

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



TESIS

**DISEÑO DE PROCESO DE CONFORMADO PARA LARGUEROS DE
ESPESOR VARIABLE CON APLICACIÓN AUTOMOTRIZ**

PRESENTA
SERGIO CRUZ ALVARADO

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

MAYO, 2016

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



TESIS

**DISEÑO DE PROCESO DE CONFORMADO PARA LARGUEROS DE
ESPESOR VARIABLE CON APLICACIÓN AUTOMOTRIZ**

**PRESENTA
SERGIO CRUZ ALVARADO**

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

MAYO, 2016

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

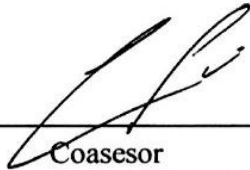
Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Diseño de proceso de conformado para largueros de espesor variable con aplicación automotriz", realizada por el alumno Sergio Cruz Alvarado, matrícula 1479467, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería 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, N.L. Mayo 2016

DEDICATORIA

A Dios, por la vida, la salud, y brindarme la oportunidad de vivir esta maravillosa experiencia, por nunca abandonarme y bendecirme con las maravillosas personas que me rodean.

A mi madre, por enseñarme perseverancia, por mostrarme el camino, por su guía e incansable espíritu.

A mi padre, por enseñarme el valor de la responsabilidad, del trabajo duro, sobre prioridades y que la familia es lo más importante.

A mi hermana, por estar ahí para mí en las buenas y en las malas, por su paciencia, por inspirarme a ser lo mejor de mí.

A mi abuela, por la fe puesta en mí y el inmenso sacrificio realizado.

A mi familia, por todo su apoyo, por creer en mí.

A mis amigos, por sus ánimos cuando me sentía cansado.

AGRADECIMIENTOS

A mis asesores:

Dr. Oscar Zapata, por su compromiso y entrega, su ejemplo, su apoyo y sobre todo su paciencia, por despertar en mí el amor por la ciencia y la investigación, un amigo y mentor.

Dr. Manuel Rodríguez, por su visión y pasión, por motivarnos en la búsqueda de resultados, por sus consejos personales y profesionales y alentarme a buscar siempre lo mejor.

Dr. Rafael Colás, por la inspiración transmitida y legado.

Dr. José Taha, por sus atenciones, por su dedicación y apoyo brindado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico en el desarrollo de este trabajo.

Contenido

RESUMEN	1
CAPÍTULO 1	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Perfiles	4
1.3. Largueros.....	5
1.4. Problemática	7
1.5. Objetivo.....	8
1.6. Hipótesis.....	8
CAPÍTULO 2	9
2.1. Introducción a la laminación.	9
2.2. Proceso de laminación.....	12
2.3. Fuerza, torque y potencia de laminación.....	14
2.4. Molinos de laminación.....	15
2.5. Laminación en frío.....	17
2.6. Laminación en caliente	17
2.7. Laminación de calibre variable.....	19
CAPÍTULO 3	23
3.1. Transferencia de calor.	24
3.1.1. Conducción.....	24
3.1.2. Convección.	28
3.1.3. Radiación	28
3.2. Plasticidad	29
CAPÍTULO 4	34
4.1. Definición de MEF	36
4.2. Antecedentes.....	38
4.3. Ecuaciones.....	40
4.3.1. Método de Ritz	40
4.3.2. Método variacional	41
4.3.3. Método de residuos ponderados.....	42
4.4. Método de Galerkin para el cálculo de temperaturas	44

4.5.	Análisis de deformación plástica mediante el método variacional	48
CAPÍTULO 5	.....	51
5.1.	Introducción	51
5.2.	Preparación del modelo. (Geometrías, ensamble, malla, tipo de mallado).....	54
5.3.	Propiedades del material.....	57
5.4.	Tipo de análisis.....	59
5.5.	Condiciones frontera.....	60
5.6.	Malla.....	62
5.7.	Diseño del rodillo	62
5.8.	Casos.....	64
5.9.	Pases.....	65
CAPÍTULO 6	.....	66
6.1.	Cambio en geometrías de rodillo.	67
6.1.1.	Placa deformada con ángulo de 30°	67
6.1.2.	Placa deformada con ángulo de 35°	68
6.1.3.	Placa deformada con ángulo de 45°	69
6.1.4.	Ensanchamiento lateral por diseño del rodillo.	70
6.2.	Estudio de casos.	70
6.3.	Pases.....	71
6.4.	Medición de áreas.....	74
CAPÍTULO 7	.....	77
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	.....	77
SIMBOLOGÍA	.....	79
REFERENCIAS	.....	84
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO	.....	88

RESUMEN

Se analiza un proceso de laminación en caliente para placas de acero de 9.5mm de espesor inicial con la finalidad de obtener un perfil de calibre variable orientado hacia la fabricación de largueros de vehículos pesados buscando obtener como beneficio un menor peso y mayor resistencia mecánica, así como una reducción en consumo de materia prima, combustible y menores tiempos de proceso.

Se realizaron modelos numéricos que ayudaron a entender el flujo de material durante la laminación. Así mismo, se determinó el número de pases necesarios para producir un perfil idealizado por medio de simulación en Abaqus.

El uso de programas avanzados de diseño apoyados con programas de modelación numérica permite cambiar propiedades geométricas de los rodillos de laminación para estudiar sus influencias sobre el flujo de material sin necesidad de hacer los cambios a prueba y error realizados frecuentemente en las industrias ayudando a reducir costos de fabricación.

En base a los resultados obtenidos en las simulaciones, se llegó a la conclusión de que, un diseño de rodillos con 30° grados de inclinación respecto a la horizontal formada con la placa en su zona de ataque resulta en un mayor ensanchamiento en comparación con el obtenido por un rodillo de 45°, prediciendo así un desplazamiento lateral de material mas optimo lo que permite reducir el uso de materia prima por larguero reduciendo así peso y mejorando el desempeño en la aplicación final.

Finalmente se realizó un análisis en simulación de las fuerzas requeridas para la laminación con las variables que afectan críticamente el proceso, tales como la fricción, el tipo de contacto y coeficientes de expansión térmica.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción.

La reducción de peso en los componentes utilizados en la industria automotriz es un área de oportunidad crítica y donde se puede mejorar la eficiencia del producto final.

Al lograr una mejoría en el diseño de los componentes al reducir peso de manera individual, se obtiene un mayor rendimiento integral en todos los aspectos del vehículo, desde el consumo del combustible, hasta la seguridad e integridad del mismo.

Es por esto que, visto desde un punto de reducción de peso se puede definir como “una técnica de construcción integrada que utiliza todos los recursos disponibles en el campo del diseño, ciencia de los materiales, y manufactura combinados para reducir la masa de una estructura completa y sus elementos individuales mientras se incrementa la calidad funcional al mismo tiempo” (1).

Buscando reducir peso y costo, la industria metal-mecánica ha buscado la manera de desarrollar nuevos procesos de manufactura para productos semi-terminados en partes complejas, especialmente en acero. Algunos ejemplos son trabajos de placas y tubos hechos a la medida para nuevos aceros de alta resistencia, es por ello que es necesario adaptar los procesos actuales a las nuevas necesidades (2).

En base a esto, teniendo un gran avance en el área de los materiales, es momento de cambiar el diseño en secciones transversales para los componentes usando material únicamente donde es necesario ya que esto representa un gran potencial para la reducción del peso y optimización de las propiedades del producto. (2).

Se han hecho trabajos basados en placas hechas a la medida con las cuales se redujo hasta un 13% el peso comparado con estructuras que manejaban un

espesor constante además de presentar una mejoría en pruebas estáticas y dinámicas con carga, (2)- (3).

1.2. Perfiles

El uso de perfiles ayuda a utilizar material en zonas específicas de un componente sin sacrificar resistencia, es decir, en las zonas donde no se requiere de resistencia, es posible la remoción o redistribución de material resultando en una disminución de peso.

Los miembros pueden transmitir cuatro tipos fundamentales de cargas y se les clasifica de acuerdo con ellas:

- a) Tensores, los cuales soportan cargas de tensión.
- b) Columnas, que soportan cargas de compresión.
- c) Vigas, que soportan cargas perpendiculares a su longitud, llamadas cargas de flexión.
- d) Ejes o flechas, que transmiten cargas de torsión.

En la práctica, es raro que un miembro transmita cargas de un solo tipo, resultando en una combinación de las mismas. Frecuentemente, cuando los miembros están sometidos a la acción de cargas combinadas, una de ellas es más importante y gobierna el diseño; por tanto, los elementos estructurales

pueden clasificarse y estudiarse de acuerdo con sus cargas predominantes, (4).
La figura 1 muestra ejemplos de perfiles:

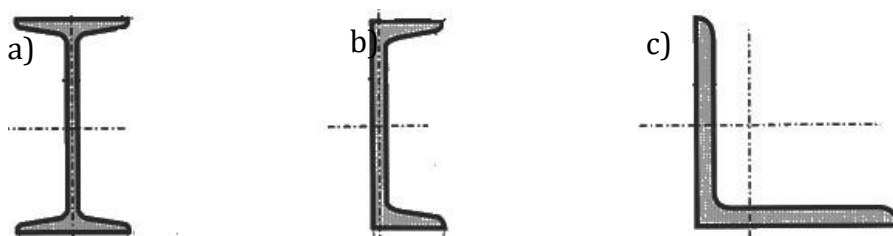


Figura 1: Ejemplos de perfiles. a) Perfil I estándar, b) Perfil C estándar, c) Angulo con lados iguales y/o desiguales. (4).

Los perfiles se componen de dos elementos definidos a continuación:

- Patín: Miembro compuesto generalmente de dos ángulos y que se localiza tanto en la parte superior como inferior de un perfil, usualmente con una separación entre ellos. Estos elementos se encargan de soportar los momentos de flexión en el larguero.
- Alma: elemento diagonal o vertical que conecta los patines superior e inferior. Tiene la función de soportar la fuerza cortante en el larguero.

1.3. Largueros

Se llama bastidor en los vehículos a aquella estructura rígida donde se fijan de una u otra forma, tanto la carrocería como los distintos elementos y grupos mecánicos que componen un vehículo (motor, elementos del sistema de transmisión, suspensión, etc.).

El bastidor de los vehículos, además de soportar el peso de todos estos elementos y partes que componen a un vehículo automóvil, también deberá soportar las sobrecargas de uso que incluyen, además del peso propio de la carga que transporte y de los ocupantes del vehículo, las cargas dinámicas e inerciales originadas por el funcionamiento de los distintos elementos y por el propio movimiento del vehículo.

El bastidor se compone en su estructura de dos largueros unidos transversalmente por travesaños a lo largo de ellos.

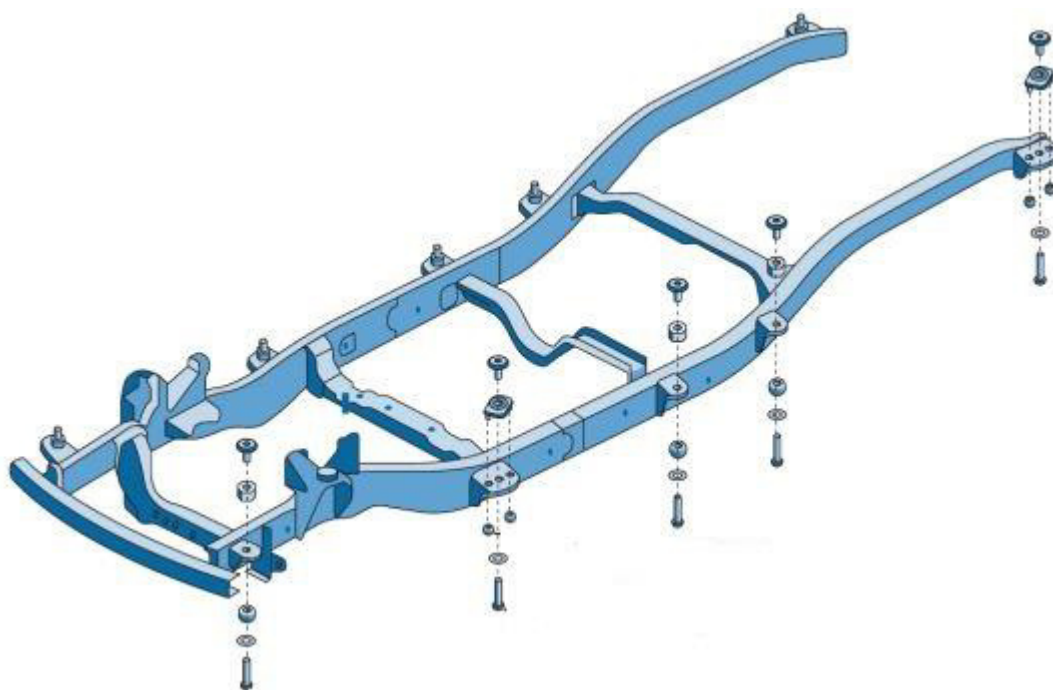


Figura 2: Bastidor de un todoterreno y puntos de anclaje de la carrocería. (5)

Un larguero es una viga horizontal encargada de soportar cargas concentradas en puntos aislados a lo largo de su longitud; también llamado travesaño.

El larguero de canal, en forma de C, es fuerte pero flexible; se emplea en vehículos pesados y en zonas de vehículos ligeros convencionales donde se

necesita resistencia y cierto grado de flexión y además es muy difícil de romper (6).

Los largueros del bastidor están unidos entre sí con travesaños. El travesaño más fuerte (llamado a veces puente) está montado en el frente del bastidor para soportar el motor y la suspensión delantera. Cada travesaño se remacha o se suelda en los largueros.

1.4. Problemática

Actualmente, la industria automotriz busca reducir el peso vehicular sin sacrificar el desempeño actual de las estructuras base, una metodología que se ha utilizado es el rediseño y optimización en los espesores de los diferentes componentes estructurales empleados, creando así la necesidad de fabricar cintas de acero de calibre variable en su sección transversal y longitudinal.

Los rollos de acero en su sección transversal se están fabricando mediante métodos de rolado convencional, siendo económicamente factible su manufactura, sin embargo, no existen métodos actuales para generar perfil de calibre variable longitudinal.

La obtención de rollos de acero de calibre variable en su longitud ha venido a crear un reto tanto en el desarrollo de nuevos procesos de manufactura y como de sus características mecánicas finales para que sea económicamente viable su obtención.

1.5. Objetivo

Evaluar una metodología mediante el uso de elemento finito para determinar la eficiencia máxima alcanzable de un proceso de laminado secuencial en V en caliente y determinar si es factible técnicamente para poder llevarlo a una operación de manufactura continua.

1.6. Hipótesis

Se puede diseñar y optimizar un nuevo proceso de laminación para lograr una placa de espesor variable en la sección transversal mediante el método de laminación secuencial tipo "V".

CAPÍTULO 2

LAMINACIÓN

2.1. Introducción a la laminación.

La laminación es un proceso de conformado de metales que permite reducir o realizar cambios en secciones transversales de piezas de trabajo largas como láminas o placas mediante fuerzas de compresión aplicadas por un conjunto de rodillos, (7).

Se define como un proceso de conformado mediante comprensión directa por medio de dos rodillos para lograr tanto una reducción en el espesor de la pieza, así como un alargamiento longitudinal y ensanchamiento lateral (8).

Desde el siglo XIV se tienen registros de trabajos de laminado en oro y plata. En el siglo XVII se comenzó a trabajar con plomo y estaño en molinos manuales. Para el siglo XVIII ya se laminaba hierro en caliente en Europa.

Antes de esto sólo existían molinos seccionadores, los cuales servían para producir clavos y geometrías similares mediante un par de molinos opuestos con collares los cuales creaban tiras de material que podían ser cortadas en un proceso posterior. Estos molinos creaban perfiles circulares, pero no láminas cuyo espesor fuera distinto al original.

La laminación moderna comienza en el año 1783 cuando en Inglaterra se comenzaron a producir barras de hierro mediante el uso de rodillos acanalados. La revolución industrial trajo consigo avances en el área destacando la laminación de rieles para ferrocarril en Inglaterra, así como las primeras vigas I en Francia en el siglo XIX. Esto trajo consigo mejoras no sólo en el proceso, sino en el tamaño y capacidad de producción, (9) (10).

Actualmente la laminación es el proceso más importante y aceptado mundialmente, dado que incluye casi el 90% de los metales que se trabajan mediante procesos de conformado, (7)

Generalmente la laminación es un proceso factible para placas con un espesor mínimo de 6 mm con aplicaciones estructurales y se llega a trabajar hasta 300 mm para aplicaciones muy específicas como grandes soportes estructurales o reactores.

Las láminas por otra parte tienen un espesor menor a los 6 mm y ésta es la principal diferencia que se presenta contra las placas. Estas pueden ser utilizadas en carrocerías para la industria automotriz, aeronáutica, electrónica, alimenticia, etc. (7), (8). En procesos convencionales de laminación el objetivo es reducir el espesor general del material como se muestra en la Figura 3.

Rodillos de trabajo

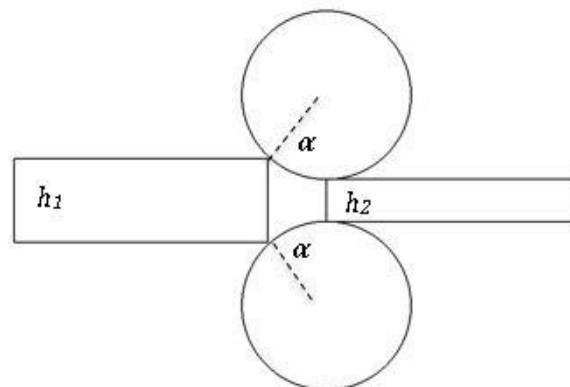


Figura 3: Condiciones de entrada en los rodillos de laminación, (11).

Donde h_1 es el espesor inicial, h_2 es el espesor final, α 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° para evitar problemas en la laminación (11).

La laminación busca generar productos más complejos al usar una serie de rodillos para generar la deformación y las geometrías deseadas (8).

2.2. Proceso de laminación

El proceso de laminación plana se describe en la Figura 4, se presenta una placa con espesor h_0 el cual entra en la zona de ataque de los rodillos o el espacio sobre el que ocurrirá la deformación mejor conocida como espacio de laminación, donde un par de rodillos giratorios comenzaran a generar esfuerzos transversales que reducirán el espesor a un h_f , estos rodillos son independientes uno del otro impulsados individualmente.

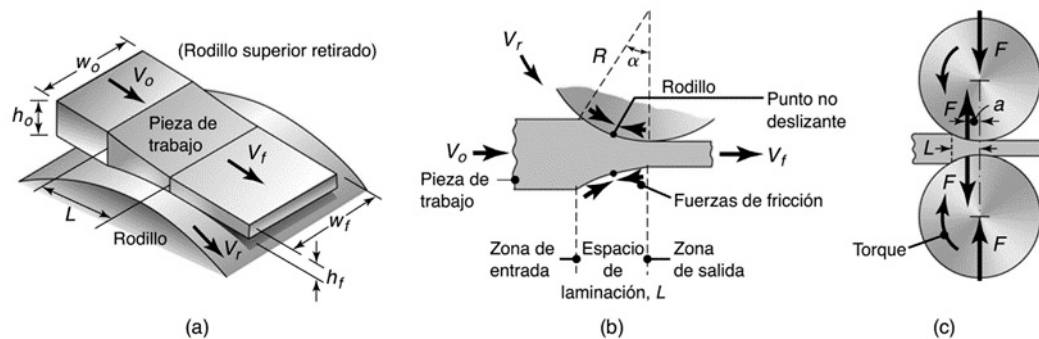


Figura 4: a) Esquema del proceso de laminación plana. b) Fuerzas de Fricción que actúan sobre las superficies de la cinta. c) La fuerza de laminado (F) y el torque (T) que actúan sobre los rodillos. Por lo general, el ancho de la cinta (w) aumenta durante la laminación, (7).

Se identifica la velocidad tangencial de los rodillos como V_r , la velocidad de entrada de la placa V_o y la velocidad de salida de la placa como V_f . Además, existe un deslizamiento relativo el cual se origina debido a la velocidad constante del rodillo, la fricción que existe entre la placa los rodillos, así como el espacio de laminación entre ellos denominado L .

Se entiende en base al diagrama que existe una fricción entre las 3 partes la cual afectará su velocidad de la siguiente manera. Existe una zona sin deslizamiento llamada punto neutro, el cual es el punto donde la velocidad del rodillo es la

misma que la de la placa; a la izquierda de este punto la placa se moverá más lento que el rodillo y a la derecha, la salida, la velocidad de salida de la placa es mayor a la velocidad tangencial del rodillo (7).

El proceso de laminación por rodillos se debe al coeficiente de fricción propio de la interacción de los componentes; la fuerza que mantiene el movimiento del material hacia los rodillos, evita su deslizamiento lateral y permite que la placa avance y se conoce como fuerza de fricción neta.

Esta fuerza se ubica a la salida del rodillo ya que como se menciona anteriormente, mantiene la placa en contacto con los rodillos. Esto no significa que esta fuerza de fricción neta sea la de mayor dimensión en el sistema, ya que ésta se encuentra a la entrada del proceso en el rodillo y es con la que se inicia la deformación.

Si bien la fricción permite el desplazamiento, los requerimientos de energía del proceso son de igual importancia. Una vez que se vence la fuerza de fricción inicial, el consumo de energía se reduce, lo que ocasiona que a mayor fricción aumenta la fuerza de laminación y la demanda de energía.

Además de aumentar el consumo energético, altos coeficientes de fricción pueden afectar el acabado o la superficie del producto laminado o que puede originarse adherencia con el rodillo provocando defectos no deseados, (7).

Basado en lo anterior se observa que existe una relación entre la reducción de espesor que se puede lograr y el coeficiente de fricción que se genera por dicha

acción, es por ello que se define el concepto de reducción máxima posible como la diferencia entre los espesores iniciales y finales de la placa para laminación plana como se aprecia en la Ecuación 1 (7):

$$h_o - h_f = \mu^2 R$$

Ecuación 1.

Siendo μ el coeficiente de fricción y R el radio del rodillo.

Al presentarse esta relación se observa que la reducción máxima posible es directamente proporcional a la fricción y el radio del rodillo, lográndose una máxima reducción al aumentar estos últimos valores (7).

2.3. Fuerza, torque y potencia de laminación

Si se tiene un espesor mayor a la distancia entre los rodillos, se generará una presión entre éstos y la placa para lograr la deformación, esta presión se conoce como fuerza de laminación, F . Esta fuerza resulta perpendicular al plano de la placa debido a que el área de contacto no genera un arco significativo en comparación con el radio del rodillo y se puede despreciar dicho ángulo sin afectar los cálculos, los cuales quedarían tal como se presenta en la Ecuación 2:

$$F = LWY_{prom}$$

Ecuación 2

Siendo L la longitud total del contacto entre el rodillo y la placa, w la anchura de la placa y Y_{prom} el esfuerzo promedio generado en el área de ataque, se observa que en dicha ecuación no se toma en cuenta la fricción como variable, si se desea

obtener una fuerza real de laminado se puede aumentar el valor final un 20% para considerar dicho efecto, (7).

Para obtener la potencia que requieren ambos rodillos para generar la laminación se deben conocer tanto la fuerza de laminado como el área de contacto, resultando en la Ecuación 3, (7).

$$Potencia = \frac{FLN}{60,000kW}$$

Ecuación 3

2.4. Molinos de laminación

La laminación se efectúa en una máquina conocida como molino. Un molino está compuesto por el bastidor, rodillos, motor, transmisión, herrajes y demás equipos auxiliares, (12).

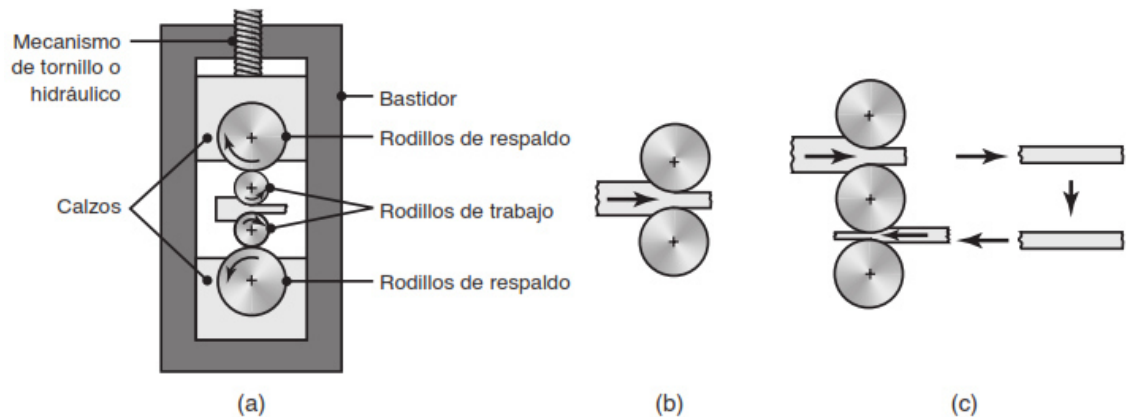


Figura 5: Esquema de diversos arreglos de rodillos: (a) molino de laminación de cuatro rodillos que muestra diversas características; (b) molino de dos rodillos; (c) molino de tres rodillos. (7)

Los rodillos de trabajo son aquellos que se encargan de efectuar la deformación en la placa, mientras que los rodillos que proveen el soporte para fijar los rodillos de trabajo son conocidos como rodillos de apoyo o respaldo.

El tren motriz es el encargado de proporcionar rotación a los rodillos, así como la velocidad y el par para la laminación (13).

Los molinos de laminación se pueden clasificar según el tipo de producto que laminan de la siguiente manera:

- a) Molino para tocho: El tocho como materia prima entra a los rodillos y estos comienzan a generar perfiles, dependiendo de la necesidad del cliente estos perfiles pueden variar su geometría.

- b) Molino para planchón: estos molinos toman un planchón de material y trabajan para reducir su espesor y producir placas, láminas o tiras según sea el caso y el tamaño del espesor final.

- c) Molino de perfiles: Este tipo de molinos cuentan con ranuras semejantes a discos, geometrías que permiten la creación de barras o varillas variando su calibre de acuerdo al canal del rodillo (14). Normalmente está compuesto por 18 castillos con 2 rodillos cada uno. Su proceso de producción se divide por etapas que van reduciendo o desbastando el material de sobra hasta lograr el perfil deseado.

2.5. Laminación en frío

Se considera laminación en frío cuando la temperatura inicial del proceso tanto de la placa como de los rodillos es la temperatura ambiente. Estas placas laminadas cuentan con un acabado superficial y tolerancias dimensionales superiores.

Los productos laminados en frío se utilizan como partes para auto, partes de motores, electrodomésticos, luminarias, estructuras para techos, tambores y demás productos cuyo espesor sea delgado (0.18 mm a 3.5 mm).

Si la temperatura de la pieza o durante el proceso alcanza los 730°C, entonces se dice que la laminación se efectúa en tibio (8), (9) , (15) - (16).

El proceso de laminación en frío tiene tres objetivos principales, reducir espesores, obtener buen acabado superficial y controlar las propiedades mecánicas del producto final, por ello el proceso es principalmente aplicado a láminas que requieran tener un buen acabado superficial, y alta precisión dimensional. (17), (18).

2.6. Laminación en caliente

Trabajar un lingote de acero para formar perfiles estructurales, barras o láminas resulta prácticamente imposible si no se trabaja en caliente, además este proceso permite martillar, prensar, laminar o extruir dicho lingote en diversas formas (18).

Se puede definir laminación en caliente como un proceso metalúrgico en el cual el metal se deforma plásticamente haciéndolo pasar a través de una serie de rodillos a una temperatura mayor a la de recristalización, (8).

Cuando se trabaja con metales en caliente se reducen considerablemente las fuerzas de deformación, pero las propiedades mecánicas también cambian moderadamente. Debido a esto, la laminación en caliente se vuelve el método más barato y eficiente para lograr cambios de espesor de manera uniforme en una sección transversal.

En este proceso el lingote colado se calienta al en un horno hasta una temperatura de entre 900 °C y 1200°C. Esto debido a que a dichas temperaturas aumenta su ductilidad y maleabilidad, facilitando la reducción de espesor.

Una vez completado el proceso de calentamiento se procede a laminar la pieza mediante una serie de rodillos colocados en pares que comienzan a reducir el espesor o reacomodar el material hasta darle la forma y tamaño deseados.

Estos laminadores deben ser capaces de procesar con rapidez la lámina de acero antes de que se enfríe y no pueda ser trabajada, (19).

2.7. Laminación de calibre variable.

Buscando la optimización del uso de materia prima, se han hecho trabajos que buscan reubicar el material en zonas críticas resultando en perfiles finales de calibre variable.

El uso de productos semi-terminados hechos a la medida permite el mayor costo-beneficio en la producción de productos terminados optimizados en peso y soporte de carga.

Usualmente se tienen placas o láminas hechas a la medida de distintos espesores que se sueldan para manufacturarse mediante una laminación posterior y así lograr una transición continua de espesores (20), (21), (22).

El instituto de Laminación de Metales (IBF por sus siglas en inglés) de la universidad de Aachen, ha comprobado que se pueden producir placas de espesor variable en la dirección de laminado sin necesidad de soldadura. De esa manera se puede lograr una reducción en peso y espesor para secciones longitudinales como se muestra en la Figura 6 (23), (24).

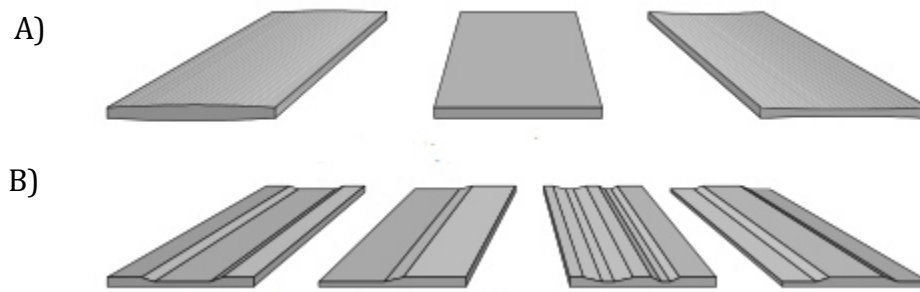


Figura 6: Perfiles de lámina: A) Laminación convencional. B) Laminación con sección transversal definida, (3).

En procesos convencionales de laminación es complicado producir un perfil de calibre variable a lo largo de la placa debido a que se presenta una limitante con el flujo del material, cuando se buscan distintos espesores se producen a la vez distintas elongaciones (25).

Se han hecho trabajos para láminas utilizando un sistema de rodillos especiales obteniendo un flujo lateral de material previniendo así deformaciones no deseadas por aplanamiento.

En la Figura 7 se aprecia la dirección de laminado (RD). Así el ensanchamiento que se va produciendo aumenta acorde al desplazamiento del material del centro de la lámina, (3).

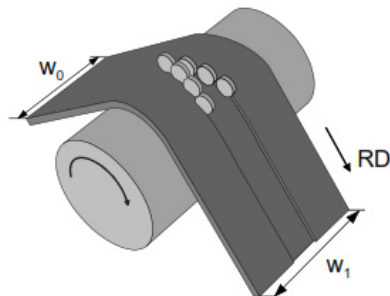


Figura 7: Sistema de rodillos especiales para flujo lateral. (3).

El principio básico para obtener un perfil de calibre variable establece que todo el material que se desplaza de la zona de deformación debe ser en dirección lateral. Una manera de obtener este flujo unidimensional es usando rodillos con geometrías especiales cuyo espesor vaya variando y con un gran diámetro, de esta manera es posible lograr un flujo de material casi perfecto y perpendicular a la dirección de laminación (3).

Cuando la ranura comienza el proceso de laminación, el material se comprime y fluye de la zona de deformación perpendicularmente a la dirección de laminación debido a la baja resistencia al flujo. Aun así, se pueden generar acumulaciones o estrías, esto puede ser evitado aplicando reducciones pequeñas en los pases de laminado.

La Figura 8 muestra un molino para laminación diseñado específicamente para laminación de perfiles con calibre variable. Aquí, los rodillos son sujetos a un eje conductor y cuentan con cierto ángulo de ataque, generalmente al centro del rodillo, con lo que comienzan a reducir el espesor por zonas. La combinación de distintos perfiles, ángulos y espesores es uno de los métodos utilizados comúnmente para este tipo de trabajos.

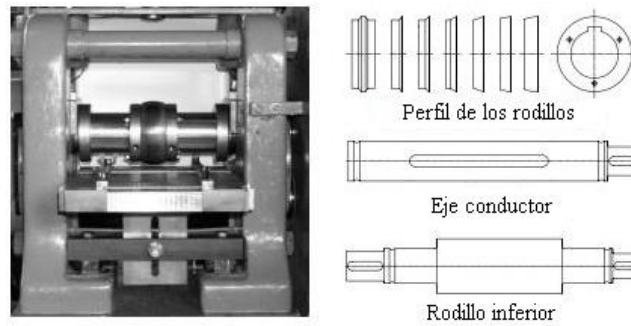


Figura 8: Diseño de molinos para perfiles con calibre variable, (3).

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 perfil de espesor variable como se muestra en la Figura 9 (3).

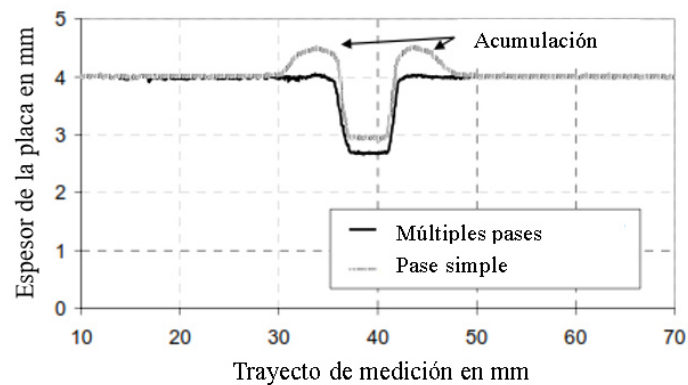


Figura 9: Sección transversal de una lámina rollada con perfiles de espesor variable, (3).

CAPÍTULO 3

MODELACIÓN MATEMÁTICA

Antes de poder realizar una simulación, es necesario conocer el modelo matemático sobre el cual se realizarán los cálculos. Es por ello que ambos conceptos están ligados, pero son muy distintos entre sí. La modelación consiste en “extraer todo el conocimiento científico y tecnológico sobre un sistema físico, organizar e interpretar este conocimiento apropiadamente y buscar reproducirlo ya sea mediante técnicas analíticas o numéricas para posteriormente hacer predicciones o modificaciones sobre el mismo” (26), (27), (28).

Se obtiene un modelo matemático de las ecuaciones que representen las leyes naturales ejercidas sobre el sistema, las cuales se buscará resolver considerando tanto las condiciones iniciales y frontera propias del modelo.

Una simulación es una modelación computacional, la cual resulta de una combinación de la modelación física y matemática. Para ello se utilizan herramientas de diseño, manufactura e ingeniería asistida por computadora (CAD/CAM/CAE). Estos, a su vez, utilizan algoritmos de programación que se encargan de resolver las ecuaciones gobernantes que “simulan” el comportamiento del sistema sobre el que se trabaja (28).

Principalmente se usan dos métodos para obtener la solución a los modelos descritos anteriormente; el método analítico, donde el problema puede ser resuelto mediante un conjunto de ecuaciones que, mediante el uso de cálculo, álgebra y ecuaciones diferenciales, pueden ser reducidas a una sola solución exacta. Los métodos numéricos utilizan operaciones básicas como sumas, restas, multiplicaciones, divisiones y comparaciones para llegar a una solución aproximada (29).

3.1. Transferencia de calor.

Existen tres mecanismos básicos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación, los cuales serán definidos más adelante (30).

3.1.1. Conducción.

El método más común de transferencia de calor consiste en transferir calor a través de la materia de manera continua. Esto ocurre si, por ejemplo, se tiene una barra metálica donde un extremo se mantiene caliente y el otro extremo se

mantiene frío, con esto se garantiza que habrá un flujo continuo de calor de la zona con temperatura elevada a la zona de temperatura baja (30).

En el análisis unidimensional de la conducción, la razón de flujo de calor Q se expresa en Watts y está relacionada proporcionalmente con la diferencia de temperaturas resultando en la Ecuación 4:

$$Q \propto (T_1 - T_2)$$

Ecuación 4

Dado que tamaño del bloque influye en la transferencia de calor, se obtiene una relación inversamente proporcional entre el área del bloque y la distancia sobre la cual ocurre la transferencia, obteniendo así la Ecuación 5:

$$Q \propto \frac{A}{x}$$

Ecuación 5

La combinación de estas relaciones resulta en la ecuación para la transferencia de calor en una dirección, mejor conocida como ecuación de Fourier:

$$Q = -k \frac{A}{x} (T_2 - T_1)$$

Ecuación 6

La conductividad térmica es una propiedad de cada material y se presenta con el coeficiente de proporcionalidad k , de igual manera al dividir entre el área se obtiene q , definida como razón de flujo de calor por unidad de área (Q/A), y se expresa en forma diferencial como se aprecia en la Ecuación 7:

$$q = -k \frac{dT}{dx}$$

Ecuación 7

El análisis del flujo de calor por conducción implica determinar la distribución de las temperaturas, para lo cual se describe ésta mediante una ecuación diferencial. Suponiendo que se tiene un volumen de control como el de la figura 10, se realiza un balance de energías igualando la diferencia entre el flujo interno y externo.

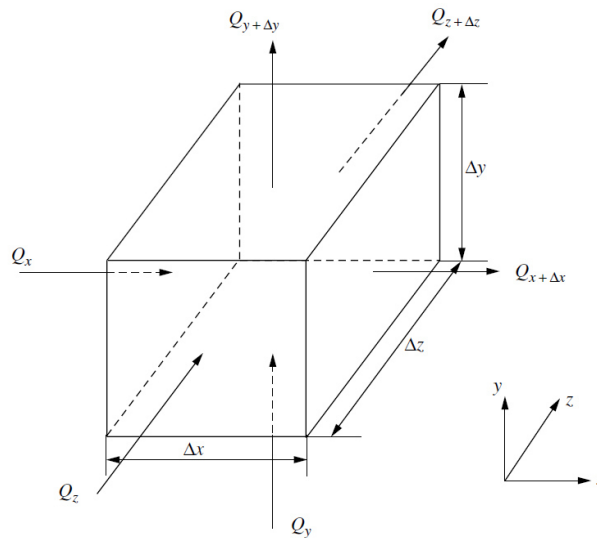


Figura 10. Volumen de control para el análisis de conducción de calor.

Basado en la figura anterior, el flujo de calor se obtiene mediante la ecuación 8 y en la ecuación 9 se utiliza una serie de Taylor para determinar el flujo de calor que sale de la cara $x+\partial x$.

$$Q_x = -k \, dy \, dz \, \frac{\partial T}{\partial x}$$

Ecuación 8

$$Q_{x+dx} = - \left[k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] dy dz$$

Ecuación 9

Se puede considerar el flujo de calor por unidad de volumen mediante la ecuación 10:

$$Q_g = q_g dx dy dz$$

Ecuación 10

Donde q_g es la energía calorífica generada por unidad de volumen. Basándose en el concepto de energía interna, la energía almacenada se obtiene mediante la ecuación 11,

$$\rho c_p \Delta x \Delta y \Delta z \frac{\partial T}{\partial t}$$

Ecuación 11

Donde ρ es la densidad y c_p el calor específico. Realizando el balance de energía total y simplificando se obtiene la ecuación general de transferencia de calor que permite obtener la distribución de temperaturas en un cuerpo, ecuación 12:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_g}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Ecuación 12

Donde α es la difusividad térmica que indica la tasa a la cual se distribuye el calor en un material y ésta tasa depende no solamente de la conductividad sino también de la tasa a la cual se puede almacenar la energía y se expresa de la siguiente manera.

$$\alpha = \frac{k}{\rho c}$$

Ecuación 13

3.1.2. Convección.

El método de transferencia de calor por convección consiste en transportar físicamente materia que esté a una temperatura elevada a una región con temperatura más baja. Por ejemplo, calentar un bloque de cobre y, en seguida, transferirlo a un recipiente con agua para enfriarlo, (30).

La Ecuación 14 describe un modelo para transferencia de calor llamado Ley de enfriamiento de Newton:

$$q = h A (T - T_f)$$

Ecuación 14

Donde h es el coeficiente de transferencia de calor, A es el área y T_f es la temperatura del fluido, (31).

3.1.3. Radiación

La radiación térmica se genera por materia a una temperatura dada que emite energía, ésta se produce directamente desde la fuente y hacia afuera en todas las direcciones.

La radiación no depende, ni necesita de materia para propagarse llegando a ser aún más efectiva en el vacío, sin embargo, su intensidad, velocidad y dirección de flujo si se ven afectados por la presencia de materia. El flujo de calor por radiación se calcula mediante la ley de Stefan-Boltzmann, ecuación 14:

$$q = A\varepsilon\sigma(T^4 - T_s^4)$$

Ecuación 15

Donde ε es la emisividad de la superficie y σ la constante de Stefan-Boltzmann.

3.2. Plasticidad

Cualquier fuerza externa que se aplica sobre una material causa una deformación, esta puede ser permanente o temporal dependiendo de la cantidad y tipo de fuerza que se aplica sobre el cuerpo. Una deformación se define como un cambio en la geometría inicial de un objeto y se relaciona directamente con el esfuerzo que se a la que se somete.

El esfuerzo se define como la fuerza que se aplica sobre un área determinada y se asemeja a la presión al medirse en Pascales. En la figura 9 se presenta la curva de esfuerzo-deformación de manera ilustrativa.

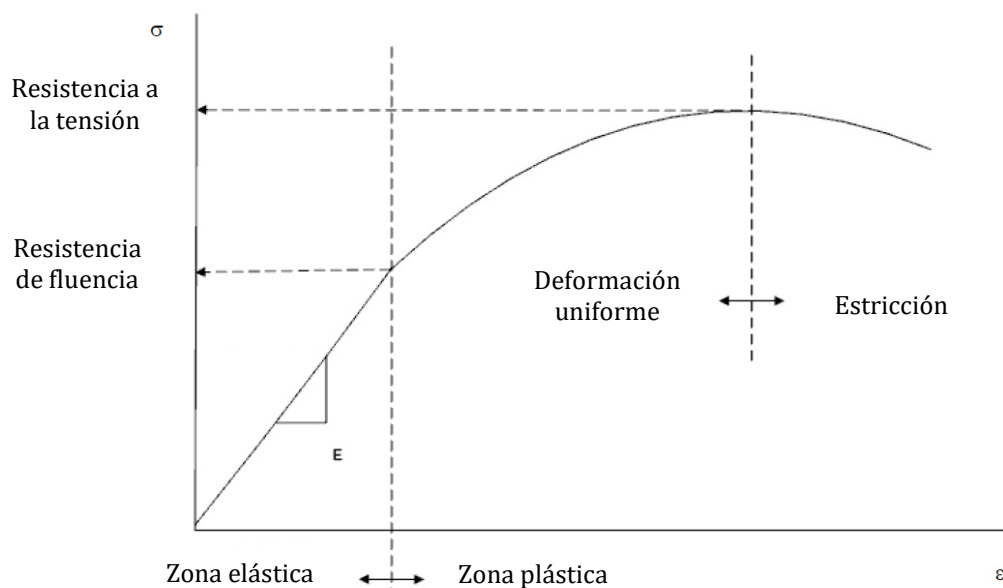


Figura 11 Gráfica de esfuerzo-deformación.

La plasticidad es un comportamiento mecánico consistente en la capacidad de deformarse permanente e irreversiblemente cuando se encuentra sometido a tensiones por encima de su rango elástico, es decir, por encima de su límite elástico.

En los metales, la plasticidad frecuentemente aparece relacionada con el desplazamiento de dislocaciones en el interior del material. 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 (32). La Ecuación 16 se conoce como de Hollomon y predice el comportamiento de los metales dúctiles.

$$\sigma_r = K \varepsilon_r^n$$

Ecuación 16

Donde K es el coeficiente de resistencia, n es el coeficiente de endurecimiento por deformación (33).

Para analizar la deformación plástica es esencial entender los criterios de cedencia tanto de Tresca y de Von Mises, ya que estos permiten conocer cuándo comenzará a deformarse plásticamente un material (34).

El primer criterio establece que la deformación plástica inicia cuando el esfuerzo cortante máximo rebasa un valor crítico (k), mejor conocido como criterio de Tresca y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3} = k$$

Ecuación 17

Donde σ_1 y σ_3 son los esfuerzos principales máximo y mínimo, respectivamente.

El segundo criterio es el de Von Mises y establece que la cedencia inicia cuando el valor del esfuerzo efectivo sea mayor que un valor crítico, ecuación 17:

$$\frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$$

Ecuación 18

En este trabajo se utiliza se utiliza el modelo de von Mises el cual permite simular altos esfuerzos y deformaciones mediante procesos dinámicos de formado mediante la ley de potencia mostrada en la Ecuación 19:

$$\dot{\epsilon}^{pl} = D \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_0} - 1 \right)^n \quad \text{para} \quad \bar{\sigma} \geq \sigma_0$$

Ecuación 19

Donde $\dot{\epsilon}^{pl}$ es la deformación plástica equivalente, $\bar{\sigma}$ es el esfuerzo promedio y σ_0 es el esfuerzo de cedencia. D representa los parámetros del material en función de la temperatura y de otras variables de estado.

Para el análisis de elemento finito, explicado en el Capítulo 4, se utiliza la siguiente ecuación constitutiva para representar los esfuerzos, (35).

$$Y = B \cdot (\epsilon^{-p})^m$$

Ecuación 20

Las ecuaciones gobernantes (en notación de índices) para la solución de la mecánica de deformación plástica para materiales rígido-plásticos y rígido-visco plásticos son las siguientes (36):

- Ecuaciones de equilibrio:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0$$

Ecuación 21

- Criterio de fluencia:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} (\sigma'_{ij} \sigma'_{ij})^{\frac{1}{2}}} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}})$$

Ecuación 22

- Ecuaciones constitutivas:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\bar{\sigma}} \sigma'_{ij}$$

Ecuación 23

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3} (\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij})}$$

Ecuación 24

- Condiciones de compatibilidad:

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

Ecuación 25

De las ecuaciones anteriores, $\dot{\epsilon}_{ij}$ representa a los componentes del tensor de esfuerzos, $\dot{\epsilon}_{ij}'$ son los componentes del tensor de esfuerzo reducido (responsable para la deformación plástica), $\bar{\sigma}$ es el esfuerzo de fluencia (a veces llamado efectivo o equivalente), $\dot{\bar{\epsilon}}$ es la velocidad de deformación efectiva y $\dot{\epsilon}_{ij}$ es la velocidad de deformación.

Los desplazamientos desconocidos serán los 6 componentes de esfuerzos y los 3 componentes de velocidad (u_i) para un análisis cuasi-estático de deformación plástica. Es demasiado complejo encontrar una solución analítica para todas las ecuaciones gobernantes por lo que se requiere de un método de aproximación, en este caso será el método variacional, el cual será descrito más adelante en la Sección 4.4.

CAPÍTULO 4

ELEMENTO FINITO

Los sistemas físicos naturales son en su mayoría sistemas continuos, lo que significa que las soluciones analíticas a este tipo de problemas, proporcionan un número infinito de soluciones para todo el dominio. Si se conocen puntos específicos sobre los cuales se requiera dicha solución, es posible elegir cualquier punto del dominio en cuestión e introducirlo en la función para obtener un resultado.

Siguiendo este principio, un sistema se puede definir como una colección de componentes o elementos sobre los cuales la respuesta del sistema puede ser

descrita mediante la solución de un número finito de valores desconocidos. De esta manera se realiza una discretización que da como resultado un sistema discreto a partir de uno continuo, (28).

Esto reduce tiempos en los cálculos al analizar únicamente los puntos donde se requiere conocer los valores del sistema. Además, mediante el uso de paquetes computacionales para ingeniería asistida por computadora, se puede realizar una gran cantidad de operaciones en un corto espacio de tiempo.

Uno de los métodos numéricos más utilizado para este tipo de problemas es el de diferencias finitas. Este método genera ecuaciones diferenciales en un punto específico y sus adyacentes a partir de una serie de Taylor para resolver las ecuaciones gobernantes del sistema.

Mediante la generación de un arreglo rectangular de n puntos sobre las que se resuelven las ecuaciones gobernantes se discretiza el sistema. Este arreglo es también conocido como malla y se ilustra en la figura 10.

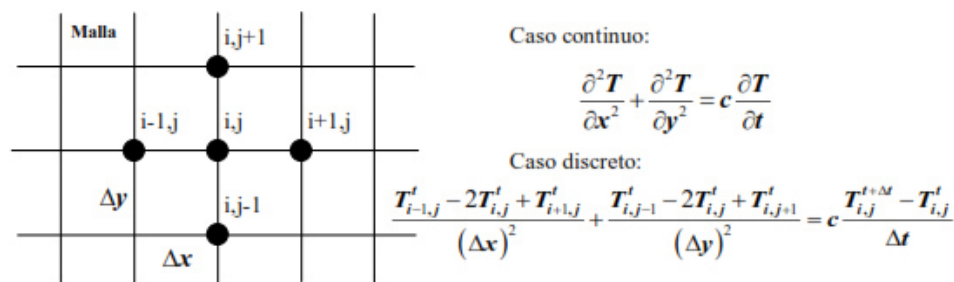


Figura 12: Método de diferencias finitas en dos dimensiones. (28)

4.1. Definición de MEF

El Método de Elemento Finito (MEF) es una aproximación numérica mediante la que se pueden resolver ecuaciones diferenciales que, por métodos analíticos para geometrías preestablecidas, sería imposible. Este método es útil para resolver problemas de ingeniería como análisis de esfuerzos, transferencia de calor, dinámica de fluidos, electromagnetismo, etc., mediante simulación por computadora (37).

El MEF se basa en la división de un cuerpo en un número finito de elementos conectados entre sí y a partir de ello calcular una solución aproximada.

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 y elementos conectados es llamado malla o mallado (28).

La figura 11 muestra un ejemplo de discretización. La figura 11a) es un mallado mediante el método de diferencias finitas, se puede observar que es complicado capturar las curvas de la geometría lo que implicaría tener un número muy pequeño de este tipo de elementos. En caso contrario, en la figura 11b) se observa una malla de elemento finito que consiste en triángulos, se puede apreciar que los elementos son capaces de capturar la geometría lo cual es ventajoso para geometrías demasiado complejas.

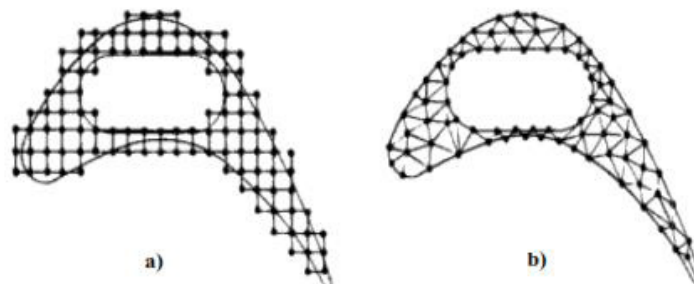


Figura 13: a) Discretización mediante diferencias finitas. b) Discretización mediante elemento finito. (38).

La figura 12 muestra los pasos requeridos para resolver un problema mediante el MEF. Se identifica el problema a resolver. Se procede posteriormente a discretizar la geometría partiendo de que el elemento contiene una formulación apropiada para resolver el problema la cual puede ser por varios métodos, principalmente el método directo, variacional y residuos ponderados.

Una vez establecidas las formulaciones por elemento se procede a ensamblarlos resultando en un sistema matricial de ecuaciones que posteriormente será reducido al aplicar las condiciones frontera e iniciales del sistema. Finalmente se procede a la solución del sistema de ecuaciones y se obtienen los resultados deseados.

A diferencia de otros métodos, el MEF permite utilizar diversas geometrías como triángulos o cuadriláteros en dos dimensiones y elementos hexaédricos o tetraédricos en tres dimensiones. De esta manera, los elementos se adaptan a cualquier geometría por más compleja que esta sea (38).

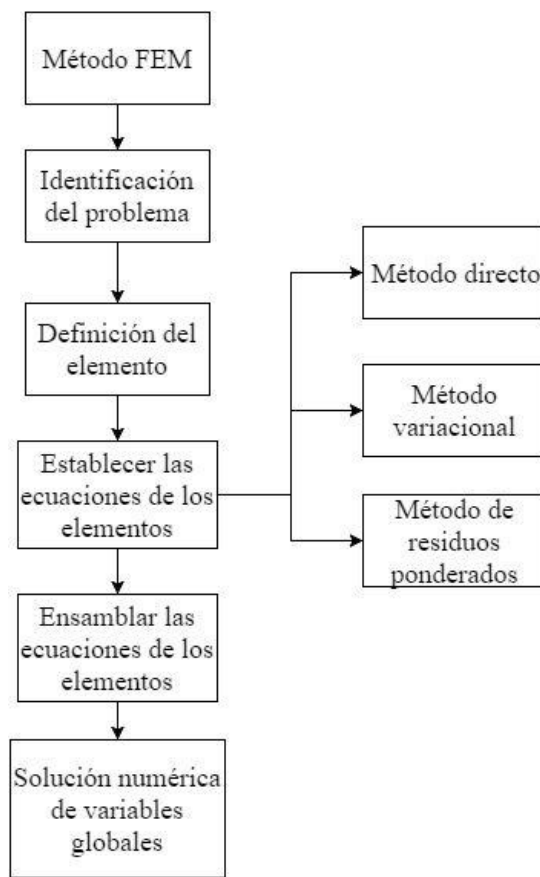


Figura 14: Diagrama de solución a problemas mediante MEF.

4.2. Antecedentes

A pesar de que las técnicas de resolución de problemas mediante MEF datan de mucho tiempo atrás, el método de elemento finito definido propiamente aparece por primera vez en 1960, cuando Clough publica un artículo acerca de problemas de elasticidad (39).

Dado que el MEF se forma a partir de tres áreas de estudio, matemáticas aplicadas, física e ingeniería. Por ello su origen resulta en tres vertientes independientes y muy diferentes entre sí dependiendo de su aplicación.

En 1943 se comienzan a utilizar elementos triangulares en matemáticas aplicadas por parte de Courant (40). Greenstadt presenta en 1959 una teoría donde describe para presentar una función desconocida mediante una serie de funciones, cada una asociada a una celda o elemento, de esta manera discretizó el problema y estableció los fundamentos de lo que hoy se conoce como elemento finito (41).

En la década de 1930 surgió la primera aproximación del MEF en ingeniería, cuando se comenzaron a analizar problemas de esfuerzos para vigas con un número definido de elementos, pero si se presentaban problemas que involucraran elementos continuos, las metodologías de la época no bastaban. Fue hasta que Hrenikoff propuso dividir cualquier estructura continua en secciones mediante barras interconectadas en un número finito de nodos, de esta manera se obtuvo la primera discretización con aplicación en ingeniería (42).

El método se volvió popular y reconocido a lo largo de la década de los 60's y 70's donde para 1974 ya existían alrededor de 10 libros hablando sobre el tema, el crecimiento fue exponencial ya que para 1991 existían más de 400 libros, 200 simposios y un sin número de artículos relacionados al método de elemento finito (38).

En cuanto a vehículos pesados se refiere, se ha trabajado en análisis mediante MEF en diversos casos dentro de los que destacan los siguientes:

Un programa de reducción de peso requiere la evaluación de un cambio material para bastidor que soporta los montajes delanteros de cabina (43). Se realizó un estudio de cargas mediante análisis de elemento finito para un nuevo diseño de

cama ligera (44). Se evaluó un cambio en elementos transversales para camión de transporte de línea con el objetivo de reducir costo y peso mediante el MEF (43).

4.3. Ecuaciones

La formulación sobre la que se basa el MEF describe la relación entre los nodos desconocidos y las cargas o esfuerzos aplicados sobre ellos a manera de matrices de la siguiente manera:

$$[K]\{T\} = \{f\}$$

Ecuación 26

Donde $[K]$ es la matriz de rigidez, $\{T\}$ es el vector de cargas (que pueden ser desplazamientos, corriente, temperatura, flujo, etc.) desconocidas y $\{f\}$ en el vector de cargas conocidas.

Para calcular las aproximaciones a los problemas, se consideran tres métodos.

1. Método de Ritz.
2. Método variacional.
3. Método de residuos ponderados.

4.3.1. Método de Ritz

El método de Ritz propone una solución aproximada de la temperatura, la cual se describe mediante la Ecuación 27.

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

Ecuación 27

Donde a son parámetros desconocidos y N_i son funciones que satisfacen las condiciones frontera del sistema y son llamadas funciones de prueba. \bar{T} Se sustituye en la ecuación diferencial gobernante y dado que consiste en una aproximación se obtendrá un residuo R el cual tiene que ser minimizado para encontrar una solución.

4.3.2. Método variacional

Para este método se utiliza la teoría de cálculo variacional, donde el funcional $T(x)$, extremiza a la forma integral de la ecuación diferencial (llamada ecuación de Euler) la cual es la solución a la ecuación diferencial y las condiciones frontera. Por ejemplo, la Ecuación 28 muestra una ecuación diferencial gobernante:

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \mu^2 T = 0$$

Ecuación 28

Junto con sus condiciones frontera, Ecuación 29:

$$\frac{dT}{dx}(0) = 0 \quad y \quad T(1) = T_b$$

Ecuación 29

La Ecuación 28 se reescribe con la forma integral, resultando en la Ecuación 30.

$$\delta I = \int_0^1 \left(\frac{d^2 T}{dx^2} - \mu^2 T \right) dT dx = 0$$

Ecuación 30

Al integrar por partes la Ecuación 30 y sustituir las condiciones frontera se obtiene la formulación variacional del problema:

$$\delta = \int_0^1 \frac{1}{2} \left[\left(\frac{dT}{dx} \right)^2 + \mu^2 T^2 \right] dx = \delta I = 0$$

Ecuación 31

Donde:

$$I = \int_0^1 \frac{1}{2} \left[\left(\frac{dT}{dx} \right)^2 + \mu^2 T^2 \right] dx$$

Ecuación 32

Por lo tanto, el perfil que minimice la Ecuación 32 será la solución de la ecuación diferencial con sus condiciones frontera.

4.3.3. Método de residuos ponderados.

Para aquellas ecuaciones diferenciales que no tienen una formulación variacional, se necesita una alternativa, mediante el método de residuos ponderados se obtiene una aproximación bastante precisa. La ecuación diferencial se reescribe tal como se muestra en la Ecuación 33:

$$L(T) = 0 \text{ en } \Omega$$

Ecuación 33

Retomando la Ecuación 27 y sustituyéndola en la Ecuación 33 se obtiene:

$$L(\bar{T}) \neq 0 = R$$

Ecuación 34

El método de residuos ponderados requiere que los parámetros a_i se determinen cumpliendo la Ecuación 30.

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

Ecuación 35

Donde $w_i(x)$ son llamadas funciones de ponderación (45). Existen 4 funciones populares para dichas funciones:

- Método de colocación: $w_i = \delta(x - x_i)$.

$$\int_{\Omega} R\delta(x - x_i)dx = R_{x=x_i} = 0$$

Ecuación 36

- Método del Sub-dominio: $w_i = 1$ para el subdominio Ω_i en la integración.

$$\int_{\Omega_i} R \, dx = 0 \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n$$

Ecuación 37

- Método de Galerkin: $w_i(x) = N_i(x)$

$$\int_{\Omega} N_i(x)R \, dx = 0 \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n$$

Ecuación 38

- Mínimos cuadrados: $w_i = \delta R / \delta a_i$

$$\int_{\Omega} \frac{\delta R}{\delta a_i} \, dx = 0 \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n$$

Ecuación 39

El paquete ABAQUS utilizado en este trabajo utiliza el método de Galerkin por lo que será descrito a mayor detalle en la Sección 4.4

4.4. Método de Galerkin para el cálculo de temperaturas

Retomando la ecuación general, ecuación 12 y considerando la conductividad térmica en función de la temperatura, aplicando el método de residuos ponderados se obtiene la Ecuación 40:

$$\int_{\Omega} w_i \left[\frac{\partial}{\partial x_1} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) + Q - \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \right] d\Omega = 0$$

Ecuación 40

Aplicando el método de Galerkin, tomando la Ecuación 38 se obtiene:

$$\int_{\Omega} N_i \left[\frac{\partial}{\partial x_1} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) + Q - \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \right] d\Omega = 0$$

Ecuación 41

Integrando por partes se obtiene la Ecuación 42:

$$\begin{aligned} & - \int_{\Omega} \left[k \frac{\partial N_i}{\partial x_1} \frac{\partial T}{\partial x_1} + k \frac{\partial N_i}{\partial x_2} \frac{\partial T}{\partial x_2} + k \frac{\partial N_i}{\partial x_3} \frac{\partial T}{\partial x_3} - Q N_i + \rho c_p N_i \frac{\partial T}{\partial t} \right] d\Omega \\ & + \int_{\Gamma} N_i \left[k \frac{\partial T}{\partial x_1} \hat{n}_1 + k \frac{\partial T}{\partial x_2} \hat{n}_2 + k \frac{\partial T}{\partial x_3} \hat{n}_3 \right] d\Gamma = 0 \end{aligned}$$

Ecuación 42

Y aplicando las condiciones frontera mostradas en la Ecuación 13 y Ecuación 14, se obtiene la Ecuación 43 que es el segundo término, es decir, la integral de superficie de la Ecuación 42.

$$\begin{aligned} & - \int_{\Gamma} \left[k N_i \frac{\partial T}{\partial x_1} \hat{n}_1 + k N_i \frac{\partial T}{\partial x_2} \hat{n}_2 + k N_i \frac{\partial T}{\partial x_3} \hat{n}_3 \right] d\Gamma \\ & = \int_{\Gamma} N_i h (T_s - T_{\infty}) d\Gamma_c + \int_{\Gamma} \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{\infty}^4) d\Gamma_{\gamma} \end{aligned}$$

Ecuación 43

De la Ecuación 12 se determina la derivada parcial de T con respecto a cada una de las coordenadas x_1 , x_2 y x_3 y se obtiene la ecuación:

$$\frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial N_i}{\partial x_i} T_i(t)$$

Ecuación 44

Sustituyendo ahora la ecuación anterior en la Ecuación 42 da como resultado la Ecuación 45:

$$\begin{aligned} & - \int_{\Omega} \left[k \frac{\partial N_i}{\partial x_1} \frac{\partial T}{\partial x_1} T_j(t) + k \frac{\partial N_i}{\partial x_2} \frac{\partial T}{\partial x_2} T_j(t) + N_i \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} N_j - Q N_i \right] d\Omega \\ & + \int_{\Gamma} N_i \left[k \frac{\partial T}{\partial x_1} \hat{n}_1 + k \frac{\partial T}{\partial x_2} \hat{n}_2 + k \frac{\partial T}{\partial x_3} \hat{n}_3 \right] d\Gamma = 0 \end{aligned}$$

Ecuación 45

Finalmente, sustituyendo la Ecuación 43 en la Ecuación 45 y ordenando términos se puede obtener la siguiente forma matricial:

$$[C] \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} + [K][T] = [f]$$

Ecuación 46

La matriz C es conocida como matriz de capacitancia y a la matriz K se le llama matriz de rigidez (45). La Ecuación 46 puede considerarse como una ecuación semidiscreta debido al primer término $[C] [\partial T / \partial t]$. $\partial T / \partial t$ se puede aproximar mediante una ecuación de diferencias finitas hacia atrás:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|^{t+\Delta t} = \frac{T^{t+\Delta t} - T^t}{\Delta t}$$

Ecuación 47

Sustituyendo la Ecuación 47 en la Ecuación 46 se obtiene:

$$[C] \left\{ \frac{T^{t+\Delta t} - T^t}{\Delta t} \right\} + [K][T]^{t+\theta} = [f]^{t+\theta}$$

Ecuación 48

Si $\theta=0$ la Ecuación 48 se reduce a:

$$[C][T]^{t+\Delta t} = ([C] + \Delta t[K])[T]^t + \Delta t[f]^t$$

Ecuación 49

Esta ecuación representa un esquema explícito, es decir, que los valores nodales de temperatura a ser calculados para un tiempo $t+\Delta t$ pueden ser obtenidos directamente a partir de los valores nodales conocidos de un tiempo anterior t .

Si $\theta=1$ la Ecuación 49 se reduce a:

$$([C] + \Delta t[K])[T]^{t+\Delta t} = [C][T]^t + \Delta t[f]^{t+\Delta t}$$

Ecuación 50

Esta ecuación representa un esquema implícito. En este esquema siempre se recurrirá al cálculo de una matriz inversa para poder obtener los valores nodales de temperatura para cada periodo Δt en que sea dividido el análisis.

Haciendo una pequeña comparación de ambos esquemas el método explícito se caracteriza por presentar una rápida solución de la ecuación discretizada. Sin embargo, este esquema es condicionalmente estable, es decir, el valor Δt debe ser menor a un valor Δt crítico.

Los esquemas implícitos por el caso contrario no presentan este problema de estabilidad proporcionando una mayor libertad de elección para el valor Δt . Sin embargo, los tiempos de solución pueden ser considerablemente mayores debido al cálculo de la matriz inversa para cada Δt , aunado a que requiere de una mayor cantidad de espacio en el disco de la computadora para almacenar la información, aunque este método también tiene sus ventajas dado que en el caso particular de procesos de larga duración en un esquema explícito el valor Δt crítico podría ser exageradamente pequeño y su tiempo de solución podría ser considerablemente mayor al del esquema implícito.

4.5. Análisis de deformación plástica mediante el método variacional

Se tiene el siguiente funcional, π (36) que representa la energía potencial del sistema que se divide en la energía interna del material (energía de deformación) y en la energía o trabajo realizado por las cargas externas:

- Materiales rígido-plásticos:

$$\pi = \int_{\Omega} \bar{\sigma} \dot{\varepsilon} d\Omega - \int_{\Gamma} F_i u_i d\Gamma$$

Ecuación 51

- Materiales rígido-visco plásticos:

$$\pi = \int_{\Omega} E \dot{\varepsilon}_y d\Omega - \int_{\Gamma} F_i u_i d\Gamma$$

Ecuación 52

F_i representa una tracción en la superficie (cargas aplicadas) y $E(\dot{\epsilon}_{ij})$ es una función de trabajo (energía). La solución se obtendrá minimizando el funcional mediante la primera variación (operador δ):

$$\delta\pi = \int_{\Omega} \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} d\Omega - \int_{\Gamma} F_i \delta u_i d\Gamma = 0$$

Ecuación 53

La condición de incompresibilidad en los campos de velocidad de la ecuación anterior se puede remover utilizando multiplicadores de LaGrange λ lo cual modifica la ecuación de la siguiente manera:

$$\delta\pi = \int_{\Omega} \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} d\Omega + \int_{\Omega} E \dot{\epsilon}_y d\Omega + \int_{\Omega} \dot{\epsilon}_{ii} \delta \lambda d\Omega - \int_{\Gamma} F_i u_i d\Gamma = 0$$

Ecuación 54

Las ecuaciones 51 y 52 se pueden expresar en términos de velocidades nodales v con sus respectivas variaciones mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial \pi}{\partial v_t} = \sum_i \left(\frac{\partial \pi}{\partial v_t} \right)_i = 0$$

Ecuación 55

El subíndice i indica el elemento y el subíndice l indica el nodo. La ecuación 50 se evalúa en cada elemento y posteriormente es ensamblada en todos los elementos (ensamble global) a partir de la cual se obtendrá finalmente una ecuación de la forma $Ku=F$. Sin embargo, en el formado de metales esta ecuación no es lineal por lo que existen formas alternativas para encontrar la solución de la ecuación $Ku=F$, normalmente aplicando métodos iterativos siendo el más común el método de Newton-Raphson.

El método de Newton-Raphson linealiza la Ecuación 55 mediante una expansión de serie de Taylor de la siguiente manera:

$$\left[\frac{\partial \pi}{\partial v_t} \right]_{v=v_0} + \left[\frac{\partial^2 \pi}{\partial v_t \partial v_j} \right]_{v=v_0} \Delta v_j = 0$$

Ecuación 56

En el cual Δv_j es un término de corrección de primer orden para una velocidad inicial v_0 que se supone al iniciar el análisis. La Ecuación 56 se reescribe nuevamente en la forma $K\Delta v=f$, y una vez que se obtiene la solución de la ecuación 56 la velocidad v_0 se actualiza mediante $v_0 + \alpha\Delta v$, en la que α es una constante entre 0 y 1 (36). Se continúa la iteración hasta que los términos de corrección son despreciables. La Figura 15 muestra el proceso iterativo del método de Newton-Raphson.

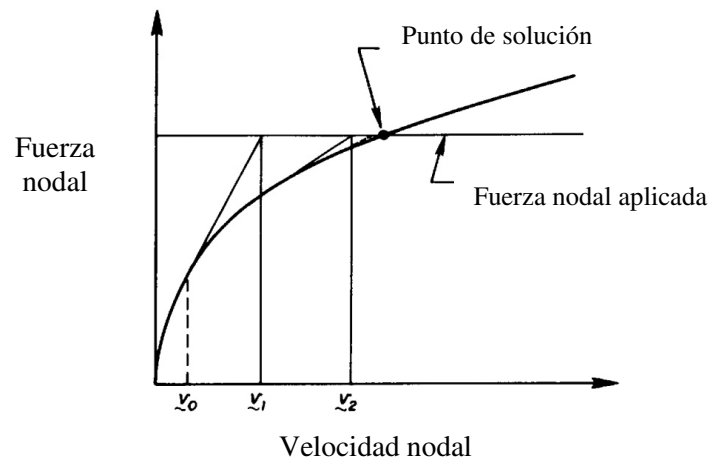


Figura 15.- Representación esquemática del método de Newton-Raphson.

En este trabajo se utilizó un análisis dinámico explícito, explicado a más detalle en el Capítulo 5.

CAPÍTULO 5

MODELACIÓN NUMÉRICA

5.1. Introducción

A continuación se describe la metodología de investigación mostrada en la Figura 16.

Este trabajo es la continuación de un estudio previo del proceso de laminación de calibre variable el cual considera un ángulo de ataque en el rodillo superior de 45° (46).

Se tomaron las pruebas físicas para la validación del modelo a 45°, se usaron los mismos parámetros para proponer dos diseños con cambios en la geometría de los rodillos en la zona de ataque, a 30° y 35°, y se corrieron simulaciones para comprobar si existe una mejora en los resultados numéricos.

Se probó con distintas variables críticas para evaluar la fiabilidad del modelo y entender que parámetros afectan los resultados de la simulación.

Una vez preparado el modelo y seleccionado el diseño optimizado de rodillo, se efectuaron los pases siguientes para analizar el flujo de material y el ensanchamiento producido en la placa. Se generaron gráficas de resultados y se obtuvieron conclusiones.

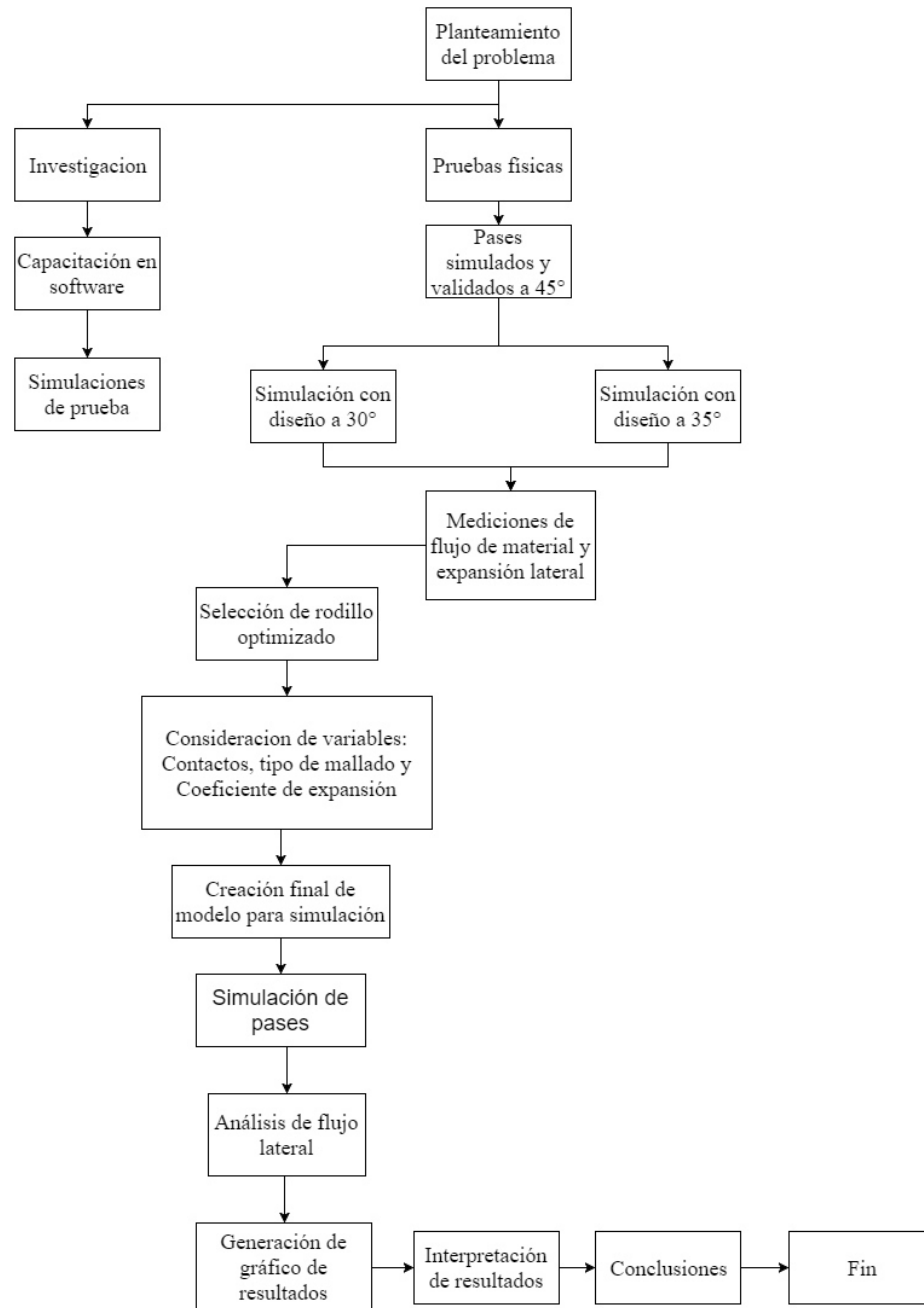


Figura 16: Metodología de investigación.

5.2. Preparación del modelo. (Geometrías, ensamble, malla, tipo de mallado).

Se replicaron las medidas de las placas validadas con pruebas físicas a 45°, así como el diseño de los rodillos para asegurar que los resultados de la simulación sean congruentes con los obtenidos anteriormente, más detalle de esta experimentación se muestra en la referencia [50].

Se preparó un modelo 3D, sólido y deformable para la placa de 9.53 mm x 50.8 mm x 304.8 mm como se aprecia en la Figura 17:

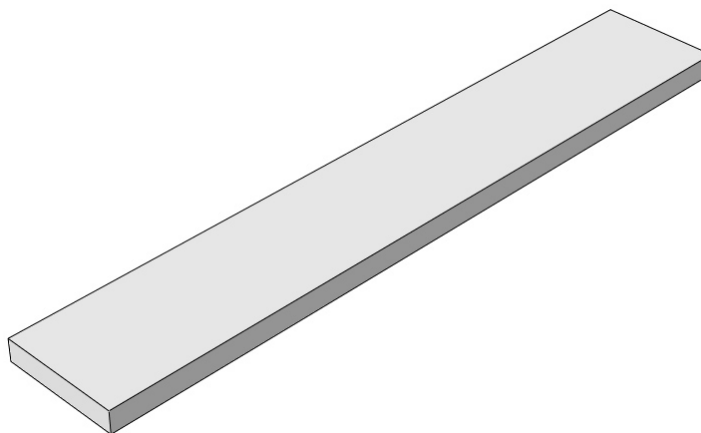


Figura 17: Modelo 3D de la placa.

El rodillo inferior tiene un radio de 152.4 mm como se aprecia en Figura 18 el diseño del rodillo superior se analizará más adelante.

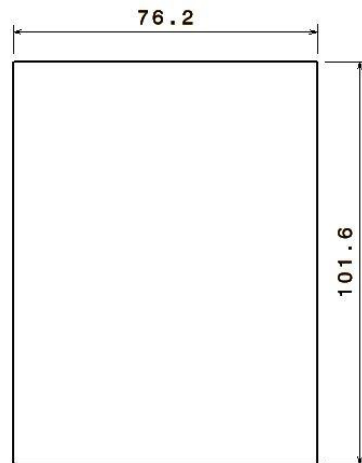


Figura 18: Diseño 2D con simetría vertical para rodillo inferior.

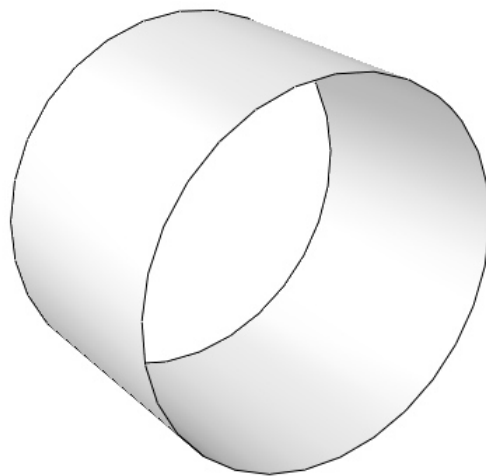


Figura 19: Modelo 3D del rodillo inferior.

El rodillo superior consta de un radio de 152.4 mm idéntico al inferior, en la Figura 20 se muestra el diseño base en 3D. Los cambios en la geometría del mismo se analizarán más adelante.

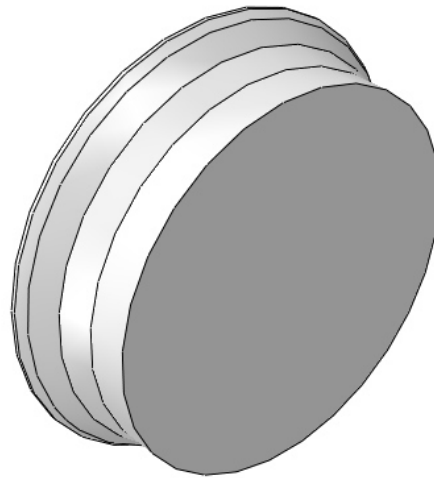


Figura 20: Modelo 3D en simetría del rodillo superior.

Para realizar el ensamble del modelo se tomó en cuenta el factor de simetría para simplificar los cálculos, se ordenaron los rodillos de manera paralela con una separación de 4.5mm entre ellos, entre esta separación se ubica la placa y representa el espesor final de la zona que se quiere optimizar.

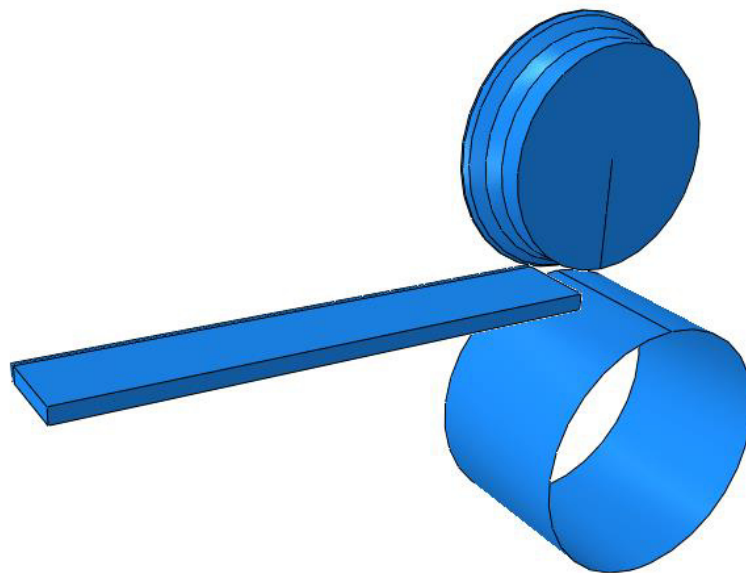


Figura 21: Ensamble 3D.

5.3. Propiedades del material.

Para este modelo se consideraron tanto las propiedades mecánicas como térmicas del material debido a la naturaleza del proceso.

Como propiedades mecánicas encontramos las elásticas y las plásticas del acero en cuestión:

Tabla 1: Propiedades mecánicas elásticas.

Densidad	7850 kg/m ³
Módulo de Young	200 GPa
Módulo de Poisson	0.3
Sección	Sólido / Homogéneo

Tabla 2: Propiedades mecánicas plásticas.

Límite Elástico	Deformación Plástica	Temperatura
266.9	0	500
273.79	0.16	500
178.62	0.31	500
169.66	0	600
177.24	0.355	600
177.93	0.555	600
84.83	0	700
84.83	0.38	700
84.83	0.58	700
41.38	0	800
47.59	0.36	800
48.72	0.72	800

El calor específico y la conductividad térmica fueron consideradas en función de la temperatura, tablas 3 y 4.

Tabla 3: Conductividad térmica vs. Temperatura.

Conductividad térmica	Temperatura
40.74	400
39.18	450
37.65	500
36.19	550
34.84	600
33.5	650
32.03	700
28.87	750
27.01	800
27.09	850
27.69	900

Tabla 4: Calor específico vs. Temperatura.

Calor específico	Temperatura
6.08×10^8	400
6.38×10^8	450
6.72×10^8	500
7.13×10^8	550
7.79×10^8	600
8.44×10^8	650
2.18×10^9	700
1.07×10^9	750
9.52×10^8	800
5.84×10^8	850
5.9×10^8	900

5.4. Tipo de análisis.

Se realizó un análisis dinámico dado la naturaleza del proceso, además se presenta un caso acoplado de temperatura y desplazamiento, ya que el segundo depende en gran medida de los cambios que sufra el primero y viceversa.

Abaqus utiliza dos métodos para resolver las ecuaciones, implícito y explícito, para este estudio se eligió en segundo dado que el método implícito tiene ciertas restricciones al tratarse de un modelo tridimensional al requerir más tiempo para procesar y no garantizar que el modelo converja, (47).

Este método utiliza integración explícita a través de las matrices de masa del elemento.

$$u^{(i+1)} = u^{(i)} + \Delta t^{(i+1)} u'^{(i+1)}$$

Ecuación 57

$$u'^{(i+\frac{1}{2})} = u'^{(i-\frac{1}{2})} + \frac{1}{2} (\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^{(i)}) u''^{(i)}$$

Ecuación 58

Donde u' es la velocidad, u'' la aceleración y el incremento y medios incrementos se expresan mediante i e $i-1/2$, $i+1/2$ respectivamente.

$$u''^{(i)} = M^{-1} * (F^{(i)} - I^{(i)})$$

Ecuación 59

Donde M es la matriz agrupada de la masa, F es el vector de la carga aplicada e I es el vector de fuerza interna, (48).

5.5. Condiciones frontera

En este proceso se analizará el dominio del acero (Ω), al cual se le asigna el valor inicial del proceso como condición inicial a 750°C resultando de la siguiente manera:

$$T(t = 0) = 750^{\circ}\text{C} \in \Omega$$

Ecuación 60

Se establecieron un total de siete condiciones frontera que sirvieron para limitar los movimientos de los rodillos y evitar comportamientos no deseados tanto en los rodillos como en la placa, estas condiciones frontera se describen a continuación.

Se aplicó una condición de simetría en el eje X , mostrado en la figura 20. Se asignó una velocidad inicial en el eje z .

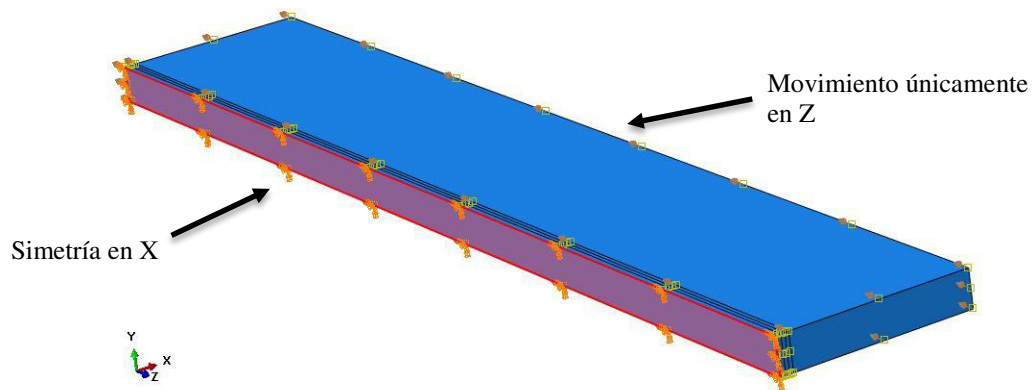


Figura 22: Condiciones frontera.

Se asignó una temperatura inicial de 750°C , así como una velocidad para toda la placa de 231 mm/s en la dirección de laminación. Se asumió una temperatura de 150°C utilizada en trabajos previos validados con pruebas físicas (46). En los rodillos y se asignó una velocidad angular de 3.33 rad/s .

El tipo de contacto utilizado fue general dada la interacción de los modelos, y los mecanismos de transferencia de calor se aprecian en la Figura 23.

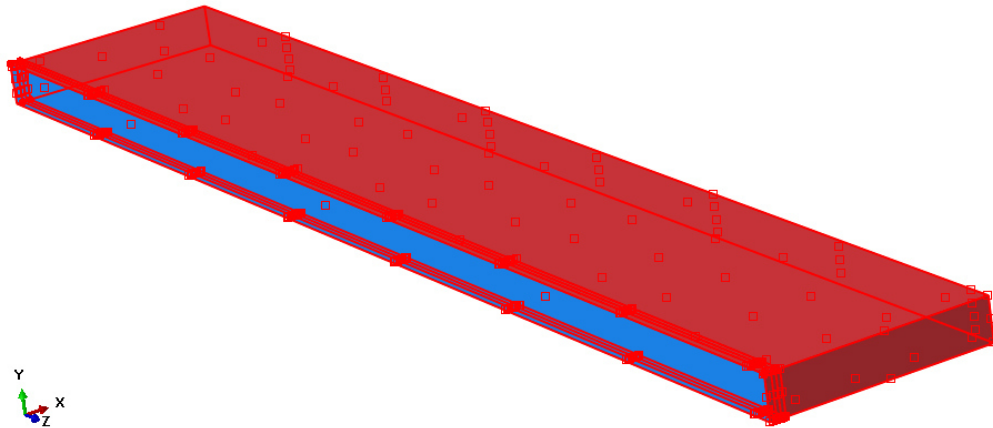


Figura 23: Convección sobre la placa.

Las condiciones frontera de los rodillos se muestran en la Figura 24, en la cual se restringen todos los desplazamientos y rotaciones excepto las correspondientes al eje X.

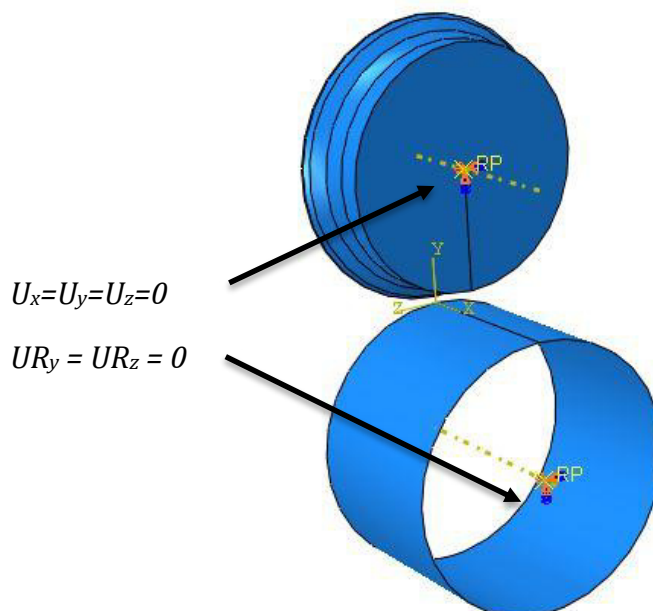


Figura 24: Condiciones frontera de los rodillos.

Así mismo se utilizó un coeficiente de fricción de 0.562 y una conductancia térmica de 50 al contacto con la placa.

5.6. Malla

El tipo de elemento utilizado fue C3D8RT, el cual es tipo ladrillo con ocho nodos y se analizó mediante un acoplamiento de temperatura-desplazamiento. El tamaño de los elementos se refinó conforme se acercaba a la zona de ataque como se aprecia en la Figura 25.



Figura 25: Mallado de la placa.

5.7. Diseño del rodillo

Se consideraron tres diferentes geometrías para los rodillos considerando los ángulos de ataque con el fin de observar cómo influye esto en el flujo de material.

El diseño original del rodillo, con el cual se hizo la validación de los trabajos de simulación contra los pases físicos, contempla un ángulo de ataque a 45°

reduciéndose gradualmente con dos ángulos subsecuentes de 35° y 30° para ayudar de manera gradual al flujo de material.

- Diseño original:

El diseño original del rodillo, con el cual se hizo la validación de los trabajos de simulación contra los pases físicos, contempla un ángulo de ataque a 45° reduciéndose gradualmente con dos ángulos subsecuentes de 35° y 30° para ayudar de manera gradual al flujo de material. Ver Figura 26.

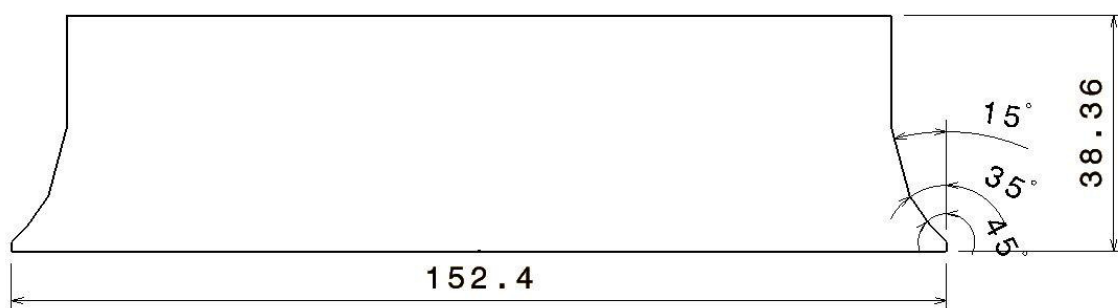


Figura 26: Diseño original del rodillo con 45° en zona de ataque.

- Propuesta a 35°

Se sugiere aumentar el desplazamiento lateral al disminuir el ángulo principal de deformación contra a placa. De igual manera se homogeniza el ángulo de ataque al igualarse con el ángulo suavizado. Ver Figura 27.

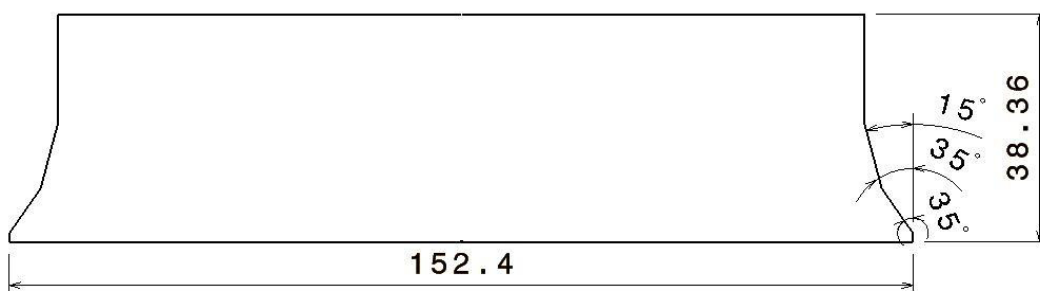


Figura 27: Propuesta de diseño con ángulo de ataque a 35° .

- Propuesta a 30°

Finalmente se busca reducir el ángulo de ataque al máximo siendo el diseño más agresivo en términos de área deformada en la placa en el cual se busca lograr el ensanchamiento máximo.

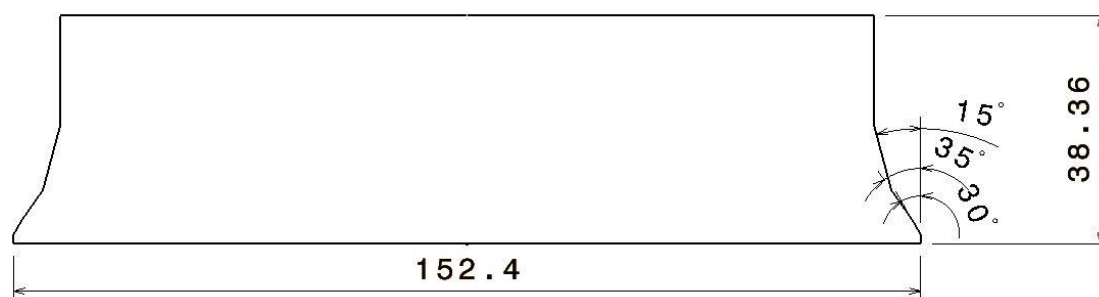


Figura 28: Propuesta de diseño con ángulo de ataque a 30°

5.8. Casos

Se realizaron un total de 8 iteraciones en donde se consideraron los siguientes parámetros los cuales son críticos para el proceso. Todos los casos se realizaron con la propuesta de diseño a 30°. Ver Figura 28.

- Tipo de contacto
- Mallado adaptativo.
- Coeficiente de expansión térmica.

Tabla 5: Variables por caso

	Malla Adaptativa	Tipo de Contacto	Expansión Térmica
Caso 1	Si	General	No
Caso 2	Si	General	Si
Caso 3	Si	Superficies	No
Caso 4	Si	Superficies	Si

Caso 5	No	General	No
Caso 6	No	General	Si
Caso 7	No	Superficies	No
Caso 8	No	Superficies	Si

5.9. Pases

Se realizaron un total de trece pases buscando alcanzar las siguientes geometrías idealizadas. (Ver Figura 29)

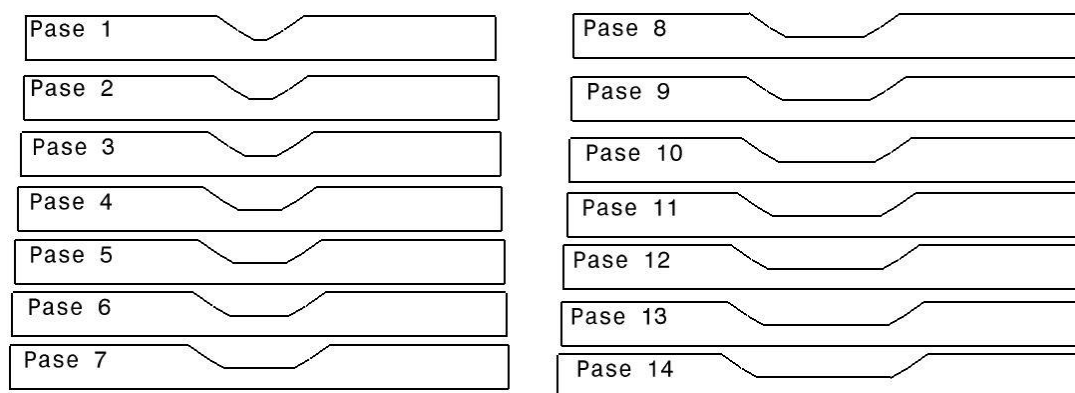


Figura 29: Pases idealizados.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se mostrarán los resultados de las pruebas discutidas en la sección 5.2.

6.1. Cambio en geometrías de rodillo.

Se realizaron mediciones a tres placas con las mismas características probando los tres diseños de rodillos mencionados en la sección 5.7. Se utilizaron las características de la validación realizada en trabajos previos con pruebas físicas.

Las mediciones fueron obtenidas en las siguientes secciones:

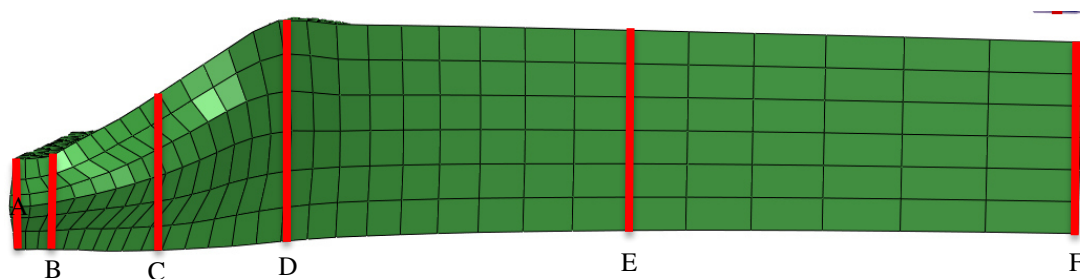


Figura 30: zonas de medición para flujo de material en la placa deformada.

- Sección A: 0 mm
- Sección B: 2 mm
- Sección C: 10 mm
- Sección D: 15 mm
- Sección E: 25 mm
- Sección F: extremo derecho de la placa, distancia variable.

Con el objetivo de analizar mejor los resultados, se presentan a continuación por separado.

6.1.1. Placa deformada con ángulo de 30°.

En la Figura 31 se aprecia una deformación uniforme en la zona de ataque y una acumulación de material en la zona D de 0.5 mm aproximadamente, esta

acumulación es normal y se considera adecuada dado que se mantiene un flujo continuo de manera lateral.

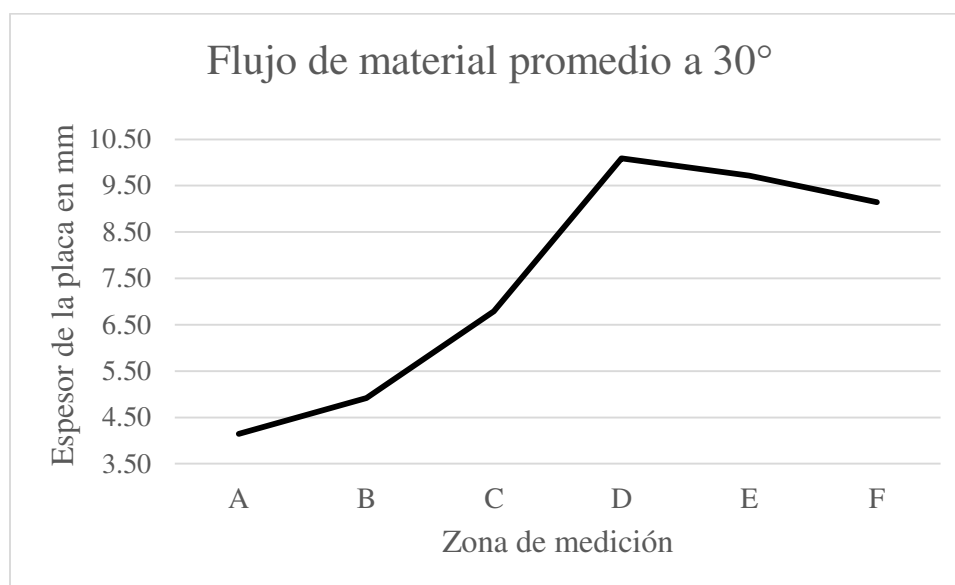


Figura 31: flujo de material en placa deformada con rodillo a 30° en su zona de ataque.

6.1.2. Placa deformada con ángulo de 35°.

En la Figura 32 se aprecia de igual manera una deformación uniforme en la zona de ataque y prácticamente no se aprecia una acumulación de material, al no tener una acumulación de material, el resto de los pases sufrieron de complicaciones dadas la estricción del acero y el ensanchamiento final se ve reducido.

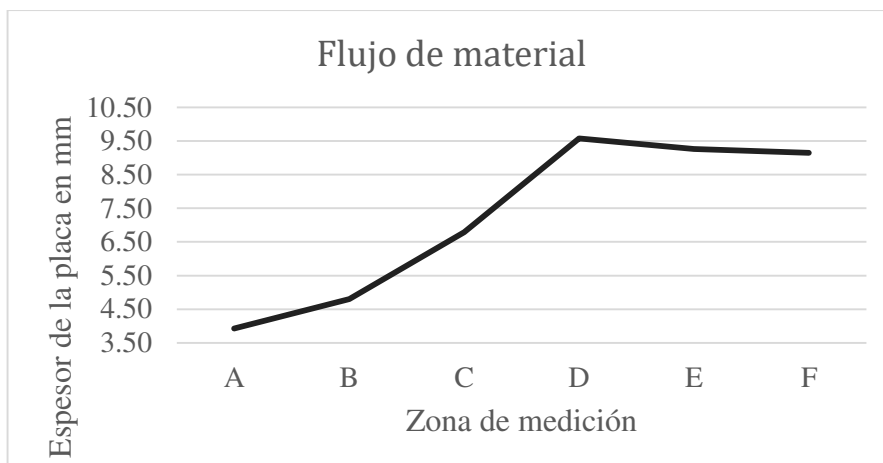


Figura 32: flujo de material en placa deformada con rodillo a 35° en su zona de ataque.

6.1.3. Placa deformada con ángulo de 45°

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta el flujo de material utilizando la propuesta original, donde no es tan agresiva la deformación que se tiene al abarcar una menor cantidad de área y tener un ángulo que desplaza menos material. Se observa una acumulación de material de 0.2 mm y una distribución homogénea en el resto de la placa.

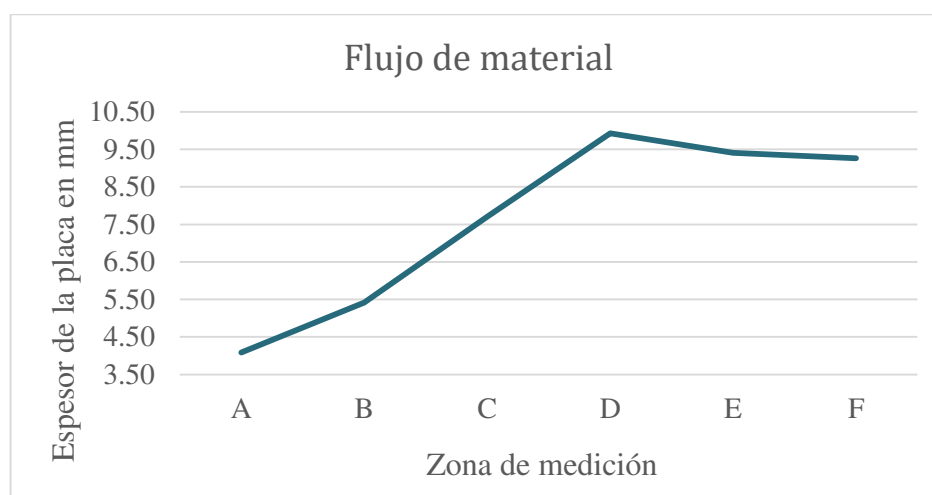


Figura 33: flujo de material en placa deformada con rodillo a 45° en su zona de ataque.

6.1.4. Ensanchamiento lateral por diseño del rodillo.

En la Tabla 6 se muestra el ensanchamiento lateral a la entrada, salida y al medio de la placa deformada, el ensanchamiento efectivo se aprecia a medio de la misma dado que es el valor mínimo y uniforme a lo largo de la placa, debido a esto, se consideran los valores obtenidos a la entrada y a la salida como no representativos.

Totales	
Placa	Ancho
45°	105.90616
35°	106.53682
30°	106.9936

Tabla 6: Ancho final efectivo de la placa por diseño de rodillo.

Con estos resultados, se observa que, si bien el diseño original funciona para el objetivo de la investigación, cambiar el ángulo de la zona de ataque a 30° optimiza el flujo lateral de material en la placa y se obtiene un mayor ensanchamiento por pase, es por ello que se proseguirá con la investigación utilizando la optimización en el diseño del rodillo.

6.2. Estudio de casos.

En la Figura 34, se muestra el flujo de material por cada caso simulado con las variables presentadas en la Tabla 5. Se eliminó el Caso 4, dado que en la simulación no se llegó a una convergencia de resultados, esto debido a que los parámetros propuestos afectaron los cálculos generando deformación excesiva en los elementos obteniendo resultados erróneos.

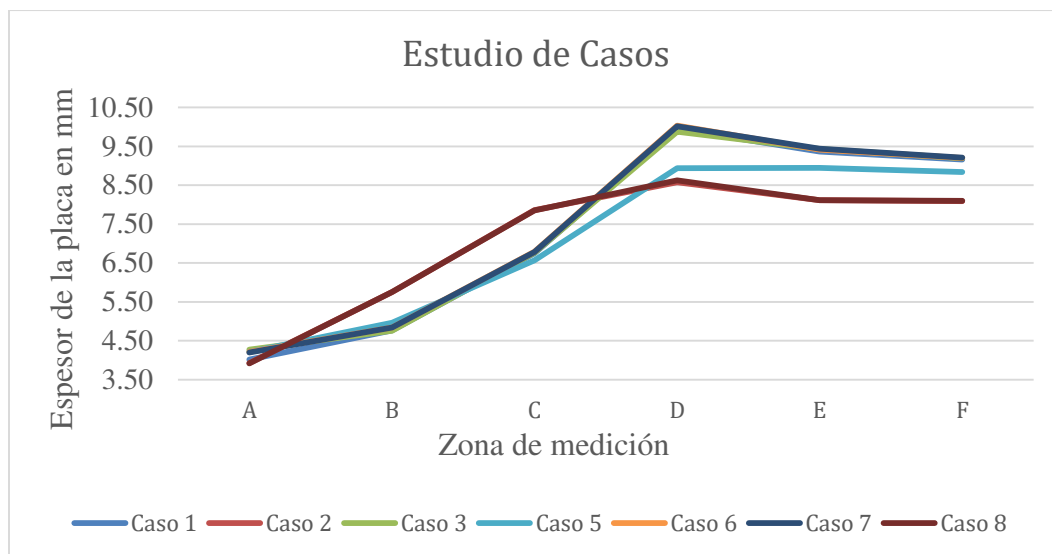


Figura 34: Gráfica de flujo por caso con diseño de rodillo a 30°.

Además, se comprueba que para el diseño de rodillo a 30°, se descartan los casos 2, 5 y 8, dejando como plausibles los casos 1, 3, 6 y 7 de los cuales, al analizar las variables y las necesidades del modelo, el caso 6 es seleccionado al ser el único que incorpora el coeficiente de expansión térmica sin hacer uso de la malla adaptativa para el reacomodo de los elementos.

6.3. Pases.

Basado en los resultados de la sección 6.2, se realizó el estudio con un total de siete pases, posteriormente se procedió a realizar una extrapolación de los resultados para obtener una tendencia en el comportamiento del flujo de material conforme el área de ataque iba aumentando.

En la Figura 35 se muestran las siete placas simuladas, convertidas a formato STL e importadas al software CATIA para su análisis.

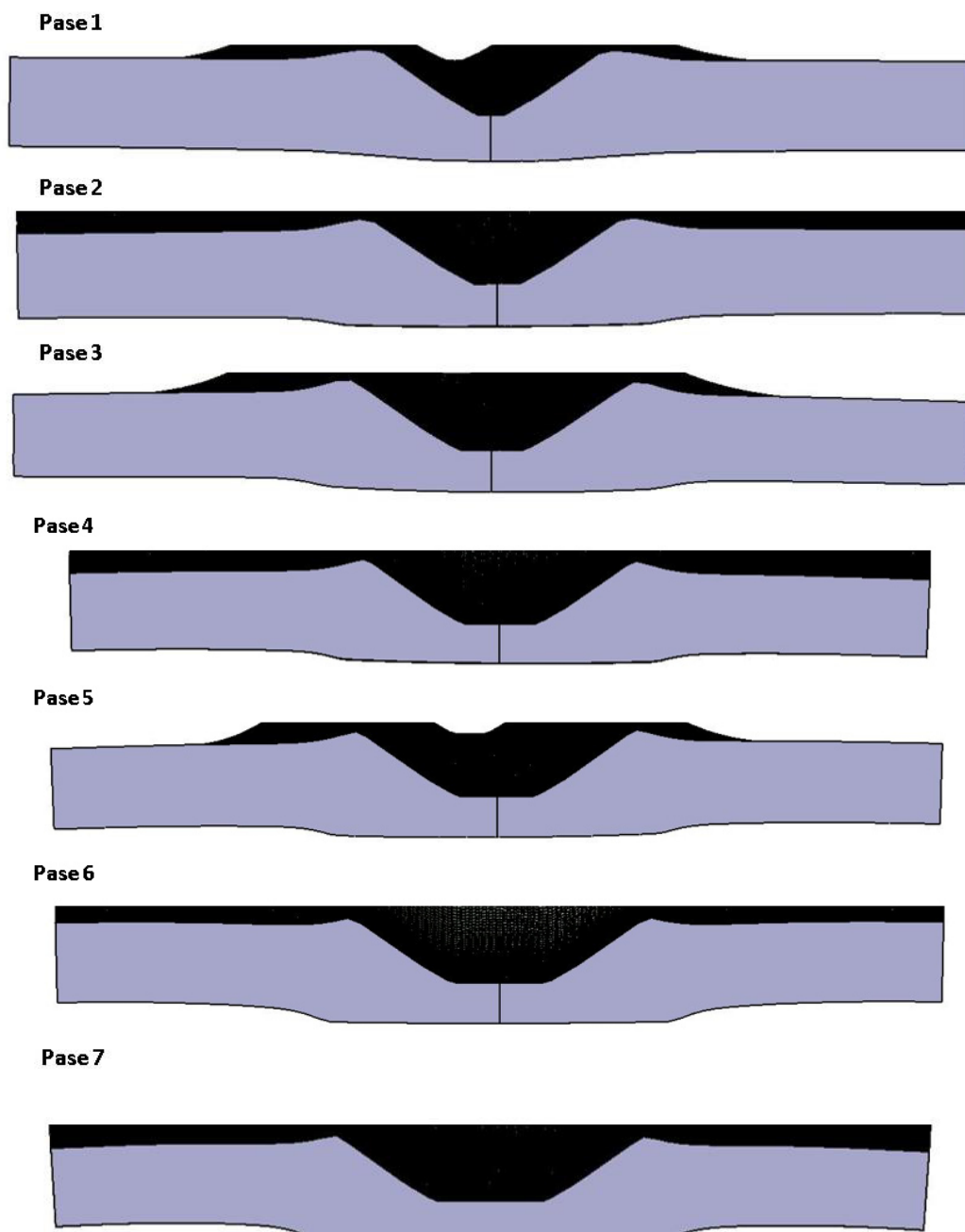


Figura 35: Pases simulados.

Se puede apreciar el ensanchamiento generado en la placa conforme el ancho del rodillo en su zona de ataque incrementa, conforme el área de ataque aumenta, se genera cierta curvatura en la placa debido a los esfuerzos a los que se ve sometida, esto dificulta obtener mediciones precisas y dado que no se tiene un control sobre el material que se acumula, otro método tuvo que ser utilizado

para analizar el desplazamiento lateral de material y así controlar el alargamiento de la misma.

En la Figura 36 se observan los distintos pases medidos en la simetría de la placa a lo ancho de la misma. Se observa el desplazamiento lateral tanto de la base de la zona de ataque, como de la acumulación del material.

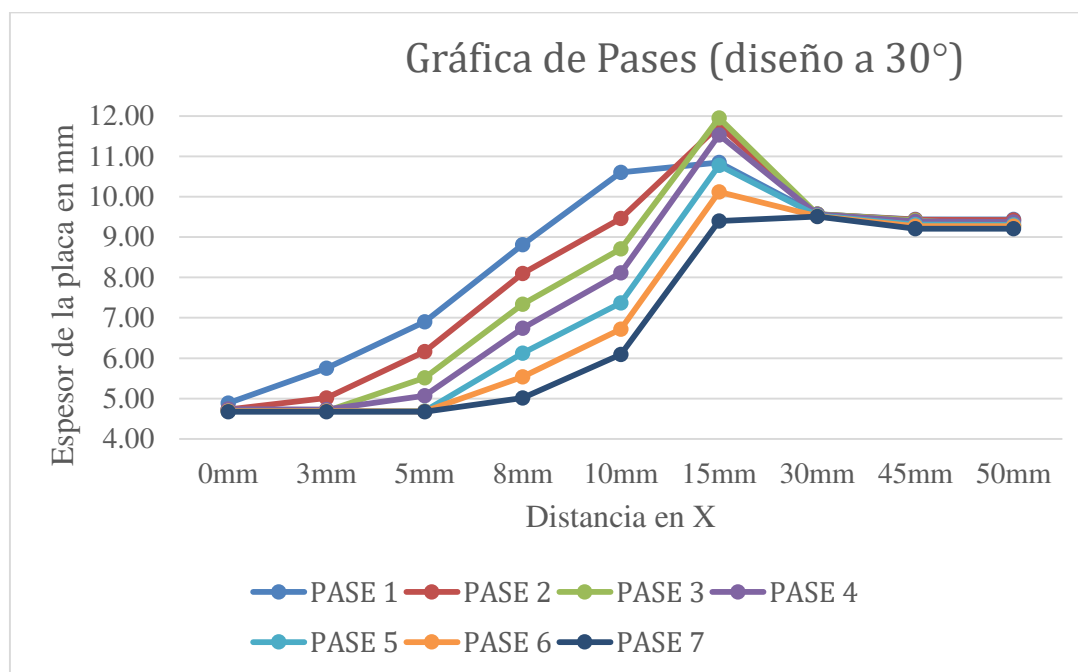


Figura 36: Gráfica de pases simulados con diseño de rodillo a 30°.

Se puede observar el desplazamiento de la zona donde se acumula el material y como este se ve arrastrado hacia los extremos, aun así, esto no se ve reflejado en el ancho final de la placa dado que este material acumulado tiende a irse de manera longitudinal por los cálculos que realiza el software, por ello es necesario controlar este volumen para conocer cuál sería el ensanchamiento real obtenido por pase de rodillo.

6.4. Medición de áreas.

Con la medición del flujo de material se conoce el comportamiento del acero y la ubicación del material a lo largo del proceso y los diversos pases realizados, pero se requirió de otra metodología de medición para cuantificar el desplazamiento lateral del mismo dado la deformación de la pieza conforme se aumentaba el área de ataque.

Se identificaron dos zonas, α y β , las cuales se midieron tanto en los pases simulados como en los idealizados, estas zonas se muestran en la Figura 37.

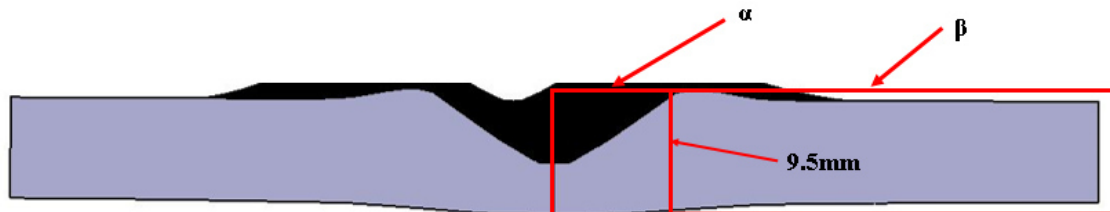


Figura 37: Zonas de medición alfa y beta.

Donde α representa el área efectiva del rodillo al causar la deformación, esta área es idéntica tanto en las placas idealizadas como en las simuladas, se traza una línea vertical de 9.525mm, que es la altura de la placa original, y se mide el área que abarca desde el eje de simetría hasta esta última línea; y β , por ende, representa el resto del material, aquí se encuentra la acumulación de material y el ensanchamiento tanto potencial como efectivo.

La Figura 38 muestra la gráfica de β idealizada (β_i), donde se obtiene el desplazamiento lateral efectivo máximo, contra la β obtenida mediante la simulación (β_s).

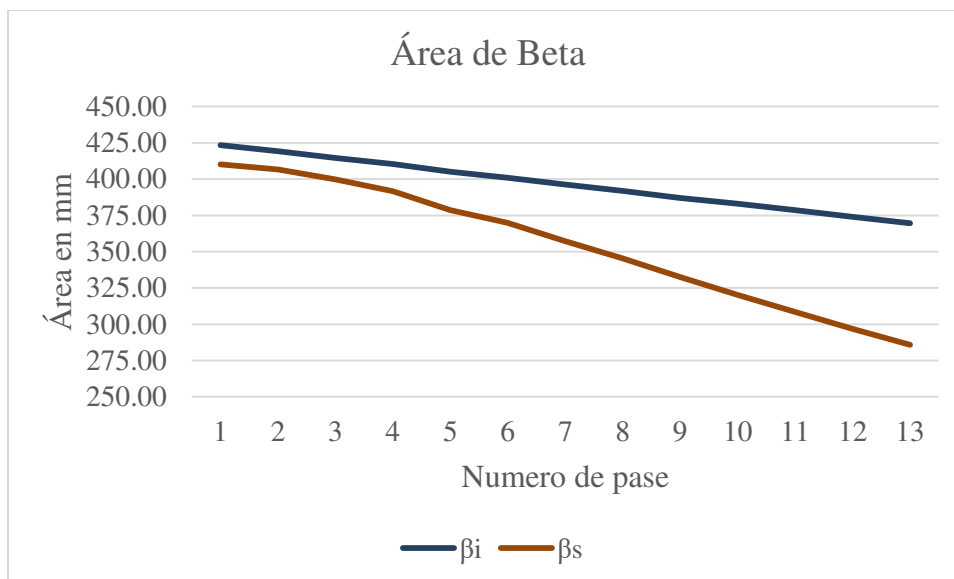


Figura 38: Gráfico de área de beta Idealizada vs. Simulada.

Se encontró que la simulación se aleja más con cada pase del área en β , lo que significa que se desplaza el material de manera transversal y no longitudinal (alargamiento en lugar de ensanchamiento), esto se debe a los cálculos realizados por el software de simulación Abaqus y por la simplificación de los parámetros de la simulación dando como resultado un estancamiento en el ensanchamiento de la placa.

Para corregir esta discrepancia, se propuso “idealizar” las simulaciones al desplazar todo el material acumulado como ensanchamiento lateral y el resto mantenerlo como alargamiento. Este proceso se realizó cada tercer pase, hasta el pase diez y los resultados se muestran en la Figura 39.

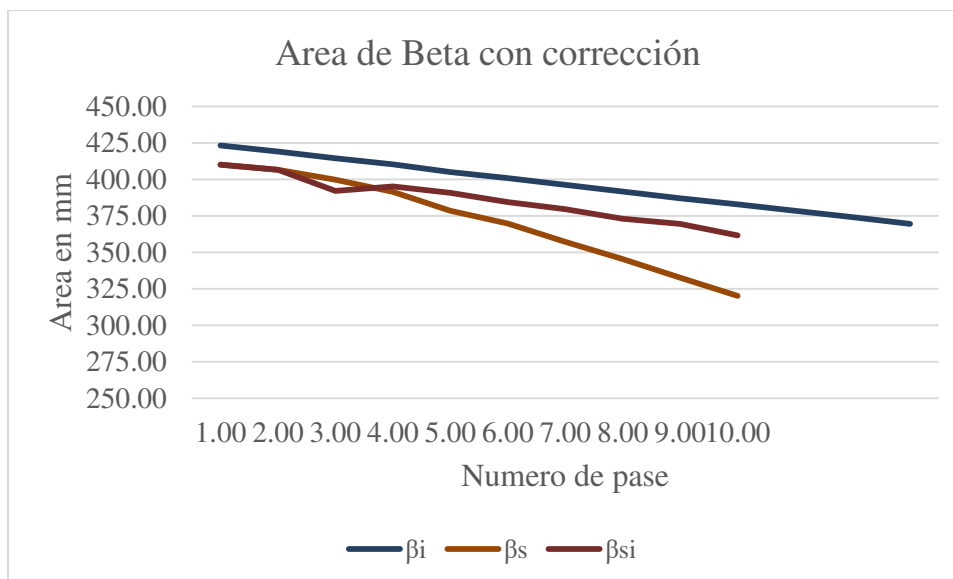


Figura 39: Área de beta idealizada vs. Simulada vs. Simulada con corrección

La corrección se aproxima a las áreas idealizadas y desplaza el material como ensanchamiento lateral.

A continuación, se muestran las fuerzas de laminación por pase:

Tabla 7: Fuerzas de laminación por pase.

Pase	Fuerza de laminación (KN)
Pase 1:	94
Pase 2:	93.4
Pase 3:	50.2
Pase 4:	43
Pase 5:	50
Pase 6:	54.4
Pase 7:	55.8
Pase 8:	57.2
Pase 9:	60.6
Pase 10:	61

En la Tabla 7 se observa como la fuerza de laminación que requiere el rodillo para lograr el primer pase es muy alta al compararse con las demás, esto se debe a que el área de contacto es mayor y es proporcional a la energía requerida para desplazar el material de la placa.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se obtuvo un modelo de simulación para proceso de laminación en placas con calibre variable capaz de determinar el flujo de material y el número pases necesarios para obtener un ensanchamiento cercano al idealizado.

El ángulo de 30 grados proporcionó un flujo más homogéneo, mayor desplazamiento lateral de material y una aproximación más cercada a la idealización.

Este estudio ha propuesto una metodología de análisis para simular procesos de formado de lámina con calibre variable por lo que se propone continuar este estudio considerando otros factores importantes tales como la temperatura de la placa, velocidad de los rodillos, condiciones diferentes de fricción que ayudarán a entender mejor el comportamiento.

A su vez, se sugiere continuar la investigación con un nuevo proceso de aplanamiento o enderezado, previo a cada pase para desplazar material acumulado, y poder correr pruebas físicas de las placas simuladas con el diseño optimizado de rodillos.

Este tipo de estudio permitirá obtener el número de pases necesario para obtener un perfil idealizado que pueda ser implementado a futuro en una planta piloto y como un futuro nuevo proceso de formado hacia una aplicación comercial.

SIMBOLOGÍA

h_0	Espesor Inicial
F	Fuerza de laminado
T	Torque
w	Ancho de cinta
V_r	Velocidad tangencial
V_0	Velocidad de entrada
V_f	Velocidad de salida
L	Longitud
h_f	Espesor final
μ	Coefficiente de fricción
R	Radio del rodillo
Y_{prom}	Esfuerzo promedio
N	Revoluciones
Q	Razón de flujo de calor
T_1	Temperatura inicial
T_2	Temperatura final
A	Área
x	<i>Distancia</i>
k	Coefficiente de proporcionalidad
q	Razón de flujo de calor
q_g	Energía calorífica por unidad de volumen
ρ	Densidad
c_p	Calor específico
α	Difusividad térmica
h	Coefficiente de transferencia de calor
T_f	Temperatura final

ε	Emisividad de la superficie
σ	Constante de Stefan Boltzmann
K	Coeficiente de resistencia
n	Coeficiente de endurecimiento
$\tau_{m\acute{a}x}$	Criterio de Tresca
σ	Esfuerzo
$\dot{\varepsilon}^{pl}$	Deformaci3n plástica
$\bar{\sigma}$	Esfuerzo promedio
σ_0	Esfuerzo de cedencia
D	Parámetros de material
σ_{ij}	Componentes del tensor de esfuerzos
σ_{ij}^*	Componentes del tensor de esfuerzos reducido
$\dot{\bar{\varepsilon}}$	Velocidad de deformaci3n efectiva
$\dot{\varepsilon}_{ij}$	Velocidad de deformaci3n
u_i	Componente de velocidad
$[K]$	Matriz de rigidez
$\{T\}$	Vector de cargas desconocidas
$\{f\}$	Vector de cargas conocidas
a_i	Parámetros desconocidos
N_i	Funciones de prueba
$w_i(x)$	Funciones de ponderaci3n
$[C]$	Matriz de capacitancia
t	Tiempo
π	Energía potencial
F_i	Tracci3n en la superficie
λ	Multiplicador de LaGrange
u'	Velocidad

- u'' Aceleración
- $[M]$ Matriz agrupada de la masa
- F Vector de carga aplicada
- I Vector de fuerza interna
- α Área efectiva del rodillo
- β Área de material fuera de la zona de ataque

LISTADO DE IMÁGENES

Figura 1: Ejemplos de perfiles. a) Perfil I estándar, b) Perfil C estándar, c) Angulo con lados iguales y/o desiguales. (4).....	5
Figura 2: Bastidor de un todoterreno y puntos de anclaje de la carrocería. (5)....	6
Figura 3: Condiciones de entrada en los rodillos de laminación, (11).	11
Figura 4: a) Esquema del proceso de laminación plana. b) Fuerzas de Fricción que actúan sobre las superficies de la cinta. c) La fuerza de laminado (F) y el torque (T) que actúan sobre los rodillos. Por lo general, el ancho de la cinta (w) aumenta durante la laminación, (7).....	12
Figura 5: Esquema de diversos arreglos de rodillos: (a) molino de laminación de cuatro rodillos que muestra diversas características; (b) molino de dos rodillos; (c) molino de tres rodillos. (7).....	15
Figura 6: Perfiles de lámina: A) Laminación convencional. B) Laminación con sección transversal definida, (3).....	20
Figura 7: Sistema de rodillos especiales para flujo lateral. (3).	21
Figura 8: Diseño de molinos para perfiles con calibre variable, (3).....	22
Figura 9: Sección transversal de una lámina rolada con perfiles de espesor variable, (3).	22
Figura 10. Volumen de control para el análisis de conducción de calor.	26
Figura 11 Gráfica de esfuerzo-deformación.	29
Figura 12: Método de diferencias finitas en dos dimensiones. (28)	35
Figura 13: a) Discretización mediante diferencias finitas. b) Discretización mediante elemento finito. (38).....	37
Figura 14: Diagrama de solución a problemas mediante MEF.....	38
Figura 15.- Representación esquemática del método de Newton-Raphson.....	50
Figura 16: Metodología de investigación.....	53
Figura 17: Modelo 3D de la placa.	54
Figura 18: Diseño 2D con simetría vertical para rodillo inferior.....	55
Figura 19: Modelo 3D del rodillo inferior.....	55
Figura 20: Modelo 3D en simetría del rodillo superior.	56
Figura 21: Ensamble 3D.....	56
Figura 22: Condiciones frontera.....	60
Figura 23: Convección sobre la placa.....	61
Figura 24: Condiciones frontera de los rodillos.	61
Figura 25: Mallado de la placa.	62
Figura 26: Diseño original del rodillo con 45° en zona de ataque.....	63
Figura 27: Propuesta de diseño con ángulo de ataque a 35°.....	63
Figura 28: Propuesta de diseño con ángulo de ataque a 30°	64
Figura 29: Pases idealizados.....	65
Figura 30: zonas de medición para flujo de material en la placa deformada.....	67
Figura 31: flujo de material en placa deformada con rodillo a 30° en su zona de ataque.....	68

Figura 32: flujo de material en placa deformada con rodillo a 35° en su zona de ataque.....	69
Figura 33: flujo de material en placa deformada con rodillo a 45° en su zona de ataque.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 34: Gráfica de flujo por caso con diseño de rodillo a 30°	71
Figura 35: Pases simulados.	72
Figura 36: Gráfica de pases simulados con diseño de rodillo a 30°	73
Figura 37: Zonas de medición alfa y beta.	74
Figura 38: Gráfico de área de beta Idealizada vs. Simulada.....	75
Figura 39: Área de beta idealizada vs. Simulada vs. Simulada con corrección .	76

REFERENCIAS

1. *Manufacturing of Lightweight Components by Metal Forming*. **Kleiner M., Geiger M. , Klaus A.** Montreal, Canada : Keynote Paper, 2003, Vol. 52/2.
2. *Metal forming techniques for lightweight construction*. **Kleiner M., Chatti S. , Klaus A.** Dortmund, Alemania : Journal of Materials Processing Technology, 2006, Vol. 177.
3. *A New Rolling Process for Strips with a Defined Cross Section*. **Kopp R., Böhlke P.** Germany : Institute of Metal Forming at Aachen University.
4. **M., Raul E. Mercedez.** Arqhys. *Arquitectura*. [En línea] 2015.
www.arqhys.com/construccion/estructurales-perfiles.html.
5. **Domínguez S. Esteban José, Ferrer R. Julián.** *PCPI - Elementos amovibles de la carrocería*. España : Editex, 2008.
6. **Robert Scharff, James E. Duffi.** *Carrocerías del automovil, Procesos de Reparación*. s.l. : Paraninfo, 1999. 8428325049.
7. **Kalpakjian, Serope.** *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México : Pearson Educación, 2008.
8. **George Ellwood, Dieter.** *Mechanical Metallurgy*. New York : McGraw-Hill, 1988.
9. **Roberts, William L.** *Cold Rolling of Steel*. E.U.A. : Dekker, 1998.
10. **Contreras, Fernando Martínez.** *Propiedades Mecánicas en Aceros de Bajo Carbono Laminados en Frio*. San Nicolás de los Garza : Universidad Autónoma de Nuevo León, 2002.
11. **Orr, Jack Barry.** *Roll Pass Design*. Sheffield : British Steel Corporation, 1979.
12. **Eduard, Mielnick M.** *Metalworking Science and Engineering*. E.U.A. : s.n., 1991.
13. **Vladimir, Ginzburgg B.** *Steel Rolling Tecnology Theory and Practice*. E.U.A : Dekker, 1978.
14. **Mikell, Groover P.** *Fundamentos de Manufactura Moderna*. México : Prentice Hall, 1997.

15. *3D FEM Analysis of strip shape during multi-pass rolling in a 6-high CVC cold rolling mill.* **K.Linghu, Z. Liang & J. Zhao.** 9-12, s.l. : The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, 2014, Vol. 74.
16. **Roberts, William L.** *Flat Processing of Steel.* USA : Marcel Dekker Inc., 1988.
17. **Lenard, J.G.** *Primer on FFlat Rolling.* s.l. : Elsevier.
18. **Amstead B.H., Ostwald F. , Begeman M.L.** *Procesos de Manuactura.* México : Grupo Editorial Patria, 2012.
19. **K., Lange.** *Handbook of Metal Forming.* s.l. : McGraw Hill, 1976.
20. *Proceedings of Leichtbau durch intelligente Blechbearbeitung.* **Doege E., Griesbach B., Schulz-Marner H.** Stuttgart : Adaptive Werkzeugkonzepte zur Umformung von gefügten Halbzeugen, 1997, Vols. EFB-Kolloquium.
21. *Thyssen Engineered Blanks.* **A., Mertens.** Alemania : Proceedings of Leichtbau durch innovativen Werkstoffeinsatz, 2002, Vol. Drittes Industriekolloquium.
22. *Deep Drawing and Stretch Forming of Geometrically Inhomogeneous Lightweight Construction Components.* **Kopp R., Hohmeier P., Wiedner C.** 1, Alemania : Annals of the German Academic Society for Production Engineering, 2002, Vol. Production Engineering IX.
23. **Greisert C., Ebert A., Wiedner C. Kopp R.** *Forming Behaviour of Tailor Rolled Blanks.* Nueva Orleans : Procedings of the TMS, 2001.
24. **Kopp R., Boehlke P., Hohmeier P., Wiedner C.** *Metal Forming of Lightweight Structures.* Polonia : Proceedings of the ESAFORM Conference, 2002.
25. **Ginzburg V. B., Azzam M.** *Selection of optimum strip profile and flatness technology for rolling mills.* s.l. : Iron and Steel Engineer, 1997.
26. **A. M. Law, W.D. Kelton.** *Simulation modeling and analysis.* s.l. : McGraw Hill, 1991.
27. **F.E. Cellier, E. Kofman.** *Continuous system simulation.* s.l. : Springer, 2006.
28. **Jesús, Zapata Hernández O.** *Simulación de descascarado en planchón de colada continua.* s.l. : Universidad Autónoma de Nuevo León, 2007.
29. **C. F. Gerald, P. O Wheatley.** *Applied numerical analysis.* s.l. : Pearson, 2004.
30. **Cornwell, Keith.** *Transferencia de Calor.* Edimburgo : Universidad Heriot-Watt, 2002.

31. **P. Frank, P. DeWitt David.** *Fundamentos de Transferencia de Calor.* s.l. : Pearson, 1999.
32. **Chawla, M. M. A. K.** *Mechanical Behavior of Materials.* Cambridge : s.n., 2009.
33. *Comportamiento elastoplastico en tracción de láminas de acero ASTM A-569.* **G. Aparicio, H. D' Armas, Marco Ciaccia.** 1, s.l. : Revista de ingeniería UC, 2007, Vol. 14.
34. **González, J. L.** *Metalurgia mecánica.* s.l. : Limusa, 1999.
35. **G.W. Rowe, C.E.N. Sturgess, P. Hartley, I. Pillinger.** *Finite-element plasticity and metalforming analysis.* New York : Cambridge University Press, 2005.
36. **Kobayashi, Shiro.** *Metal Forming and the Finite-Element Method.* s.l. : Oxford University Press, 1989.
37. **Jacob Fish, Ted Belytshko.** *A first course in finite elements.* USA : John Wiley & Sons, 2007.
38. **K.H. Huebner, E.A. Thornton, T.G. Byrom.** *The finite element method for engineers.* s.l. : Wiley, 1995.
39. *The Finite Element Method in Plane Stress Analysis.* **R.W., Clough.** Pittsburgh : Proceedings of 2nd ASCE Conference on Electronic Computation, 1960.
40. *Variational Methods for the Solutions of Problems of Equilibrium and Vibrations.* **R., Courant.** 1943, Vol. 49.
41. *On the Reduction of Continuous Problems to Discrete Form.* **J., Greenstadt.** s.l. : IBM J. Red. Dev., 1959, Vol. 3.
42. *Solution of Problems in Elasticity by the Framework Method.* **A., Hrenikoff.** s.l. : J. Appl. Mech., 1941, Vol. 8.
43. **Cosme Carlos, Ghasemi Amir, Gandevia Jimmy.** *Application of Computer Aided Engineering in the Design of Heavy-Duty Truck Frames.* Michigan : SAE International, 1999. 0148-7191.
44. **Gobessi, Mark & Arnold.** *The Application of Bonded Aluminum Sandwich Construction Technology to Achieve a Lightweight, Low Cost Automotive Structure.* Michigan : SAE International. 982279.
45. **W. Lewis Roland, Nithiarasu Perumal, N.Seetharamu Kankanhally.** *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow.* England : John Wiley & Sons, 2004.

46. **Resendez, Omar.** *Tesis en Proceso.* s.l. : Universidad Autónoma de Nuevo León.
47. *Application of implicit and.* **Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc.** 45, s.l. : Process Technology, 1994.
48. *Comparison of implicit and explicit finite element methods.* **Sun J.S., Lee K.H., Lee H.P.** 10, Singapur : Department of Mechanical and Production Engineering, National University of Singapore, 1999. 119260.
49. *Umformung und Weiterverarbeitung von flexibel gewalzten Stahlblechen für Leichtbaustrukturen.* **Kleiner M., Chatti S. Heller B., Kopp R., Wiedner C., Böhlke P.** Alemania : Fosta, 2002, Vol. Final Report.
50. **Guadalupe, H. M. Maribel.** *Diseño y simulación de una línea de formado en frío de lámina de acero.* Monterrey, N.L. : U.A.N.L., 2013.
51. **Roberts, William L.** *Hot Rolling of Steel.* Boca Raton, EUA : Taylor & Francis Group, 1983.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Sergio Cruz Alvarado

Candidato para el grado de Maestría en Ciencias

Tesis: “Diseño de proceso de conformado para largueros de espesor variable con aplicación automotriz”

Sergio Cruz Alvarado nació en la ciudad de Monterrey N.L. México el 3 de Mayo de 1993. Es hijo del Sr. Sergio Cruz Fuentes y la Sra. Blanca Elizabeth Alvarado Salinas.

Cursó sus estudios profesionales en la Universidad del Valle de México, obteniendo el título de Ingeniero en Mecatrónica con reconocimiento al mérito académico en 2012.

En Enero del año 2014 inició sus estudios de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz, becado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) en la Universidad Autónoma de Nuevo León.