

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

SUBDIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**Diseño de pases de laminación en
caliente para la producción de postes a
partir del reciclado de riel de ferrocarril
de acero 1075**

TESISTA

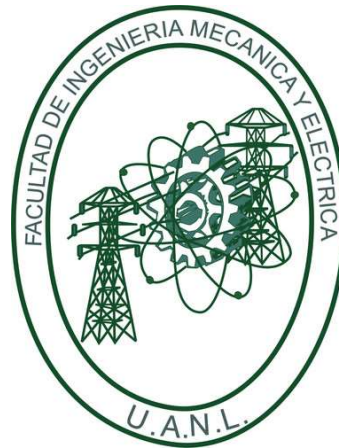
KARINA MONTEMAYOR DE LA GARZA

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN
INGENIERÍA DE MATERIALES**

CD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE DEL 2022

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

SUBDIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**Diseño de pases de laminación en
caliente para la producción de postes a
partir del reciclado de riel de ferrocarril
de acero 1075**

TESISTA

KARINA MONTEMAYOR DE LA GARZA

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN
INGENIERÍA DE MATERIALES**

CD. UNIVERSITARIA, DICIEMBRE DEL 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “**Diseño de pases de laminación en caliente para la producción de postes a partir del reciclado de riel de ferrocarril de acero 1075**”, realizada por la estudiante Karina Montemayor de la Garza, con número de matrícula 1064809, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ingeniería de Materiales.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dra. Patricia del Carmen Zambrano Robledo
Director

Dr. Luis Adolfo Leduc Lezama
Revisor


Dr. Arturo Juárez Hernández
Revisor

Dr. Óscar de Jesús Zapata Hernández
Revisor

Dra. Guadalupe Maribel Hernández Muñoz
Revisor

Dra. Flor Araceli García Castillo
Revisor

Vo.Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

Institución 190001

Programa 122608

Acta Núm. 324

Ciudad Universitaria, a 28 de julio de 2023.

Índice General

1. Introducción

1.1 Descripción del problema.....	06
1.2 Hipótesis.....	07
1.3 Metodología.....	08
1.4 Marco Teórico	09
1.5 Antecedentes.....	14

2. Laminación en caliente

2.1 Marco teórico.....	21
2.2 Fundamentos de la laminación.....	23

3. Modelación matemática

3.1 Marco teórico.....	32
------------------------	----

4. Elemento finito

4.1 Marco teórico.....	39
4.2 Discretización	40
4.3 Funciones de interpolación	42

4.4 Criterios de convergencia.....	43
4.5 Ecuación de Equilibrio de un elemento	49

5. Experimentación

5.1 Marco teórico.....	53
------------------------	----

6. Resultados

6.0 Marco teórico.....	62
6.1 Pase 1.....	68
6.2 Pase 2.....	73
6.3 Pase 3.....	78
6.4 Pase 4.....	82
6.5 Pase 5.....	87

7. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Marco teórico.....	93
------------------------	----

8. Referencias bibliográficas

7.1 Marco teórico.....	95
------------------------	----

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción de problemática

En la actualidad se utiliza de manera cotidiana una pieza de acero tipo poste para aplicaciones en la ganadería y agricultura. En este trabajo, se desean diseñar pases de laminación para la fabricación de postes mediante laminación en caliente de aceros al carbono 1075 proveniente de material reciclado de riel de ferrocarril.

La industria de la fundición en México consume acero que proviene de otros países o de empresas especializadas en la rama con altos costos, por este motivo, se desea buscar el mejor aprovechamiento de los recursos existentes como es el riel del ferrocarril el cual posee unas propiedades muy similares al acero 1075, reciclando el material y procurando mejorar las características de este.

Es posible establecer que mediante el reciclado del riel de ferrocarril se obtengan propiedades requeridas del acero 1075 para la elaboración de un producto específico por laminación en caliente, donde se estudie el efecto de los parámetros de procesamiento necesarios para el mejor desarrollo de dicho producto.

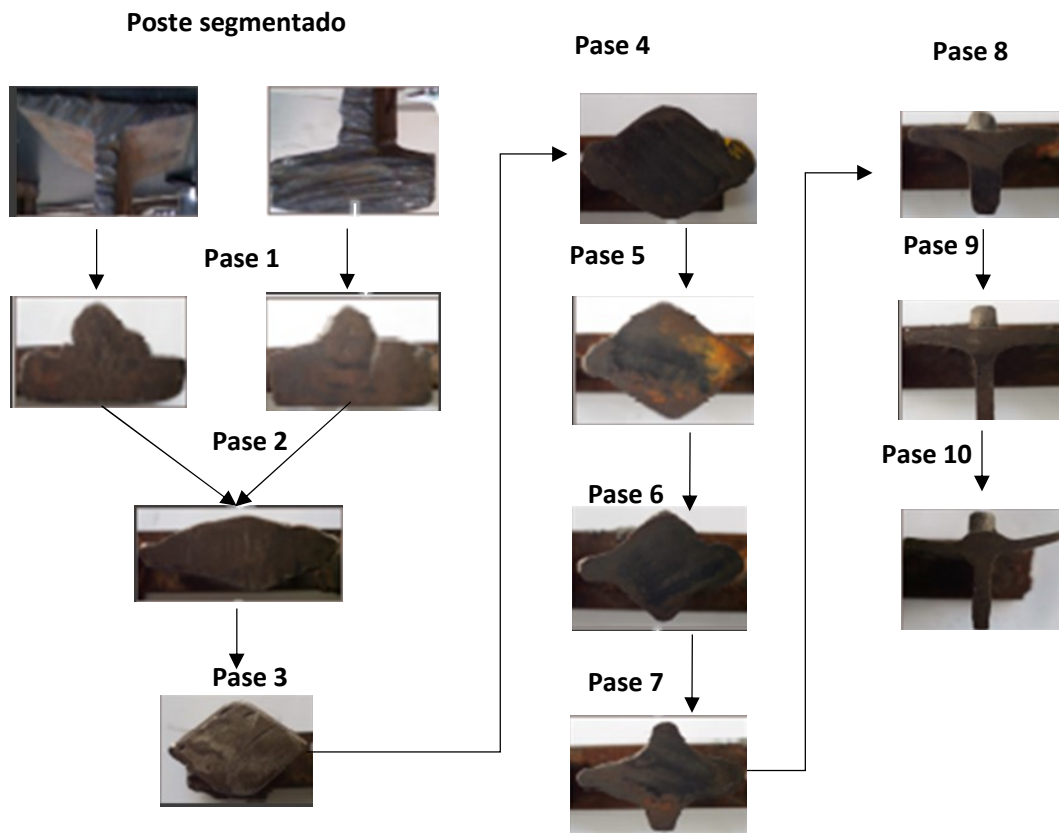


Figura 1. Pases obtenidos por proceso de fabricación de los postes a partir del riel de ferrocarril.

En la figura 1 se observa cómo cambia la geometría a partir del proceso de laminación en caliente, iniciando por el riel de ferrocarril reciclado, el proceso de rodado en caliente real consta de 10 pases para llegar al producto final.

1.2 Hipótesis

Con la simulación de un proceso de laminado en caliente para el formado de productos largos provenientes del reciclado del riel de ferrocarril, modificando parámetros de la línea de producción (temperaturas, velocidad) y analizando sus

pases, podemos identificar el impacto de los parámetros en el proceso logrando proponer cambios y mejoras.

1.3 Metodología

En el presente estudio se evalúan 5 pases de una línea de producción para la fabricación de perfiles planos por medio del rolado en caliente considerando:

1. Obtener las geometrías en 2D de cada uno de los pases de laminación que crean el producto final a partir de las instrucciones de trabajo recopiladas por la fábrica.
2. Se realizará una extensa revisión bibliográfica para referenciar antecedentes, fundamentos, mejoras, efectos ante la corrosión entre otros datos trascendentes sobre el proceso de laminación en caliente para productos de perfil no plano, así como reciclado y utilidades del riel de ferrocarril.
3. Se digitalizarán las geometrías en 2D y 3D de cada rodillo involucrado en el laminado de los pases de laminación.
4. Se definirá las características de simulación y mallado para el estudio que permita obtener los mejores resultados.
5. Se llevarán a cabo simulaciones mediante el Método de Elementos Finitos (FEM) de la mecánica de laminación para los pases, donde se utilizarán los datos obtenidos de la literatura referentes a las propiedades mecánicas a diferentes temperaturas y velocidades de deformación, posteriormente se procederá a resolver las ecuaciones constitutivas (tensores de esfuerzo, deformación, velocidad de deformación y temperatura) y se obtendrán los diseños.

6. Se realizarán simulaciones de los pases de laminaciones en diferentes condiciones en busca de algún indicativo de desviación, tendencia, comportamiento esperado u otro que permita proponer oportunidades capitalizables para una optimización del diseño.

1.4 Marco teórico

Antes del tratamiento térmico, la mayoría de los aceros son una mezcla de tres fases, ferrita, perlita, cementita. La ferrita, se caracteriza por ser blanda y dúctil, es hierro con pequeñas cantidades de carbono y otros elementos en solución. El cementita es un compuesto de hierro con el 7% de carbono aproximadamente, es de gran dureza y muy quebradiza. La perlita es una mezcla de ferrita y cementita, con una composición específica de 0.89 % y una estructura característica, sus propiedades físicas con intermedias entre las de sus dos componentes. La resistencia y dureza de un acero que no ha sido tratado térmicamente depende de las proporciones de estas tres fases. Cuanto mayor es el contenido en carbono de un acero, menor es la cantidad de ferrita y mayor la de perlita: en aceros comerciales, conteniendo manganeso, solo se requiere de aproximadamente un 0.8% de carbono, para formar una microestructura totalmente perlítica. El acero con cantidades de carbono aún mayores es una mezcla de perlita y cementita.

Las propiedades físicas de los aceros y su comportamiento a distintas temperaturas dependen principalmente de la cantidad de carbono y de su distribución, como se observa en la figura 2 y en la figura 3.

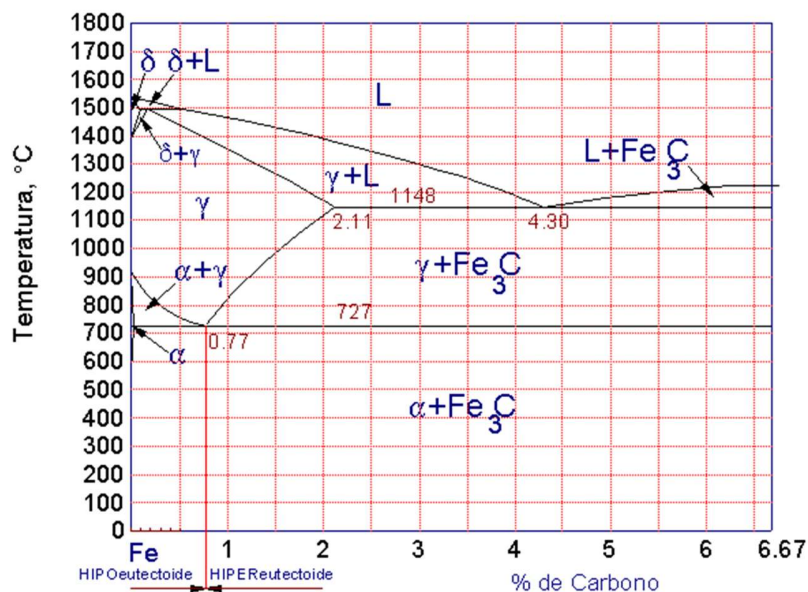


Figura 2. Diagramas de Fases Fe – Fe₃C

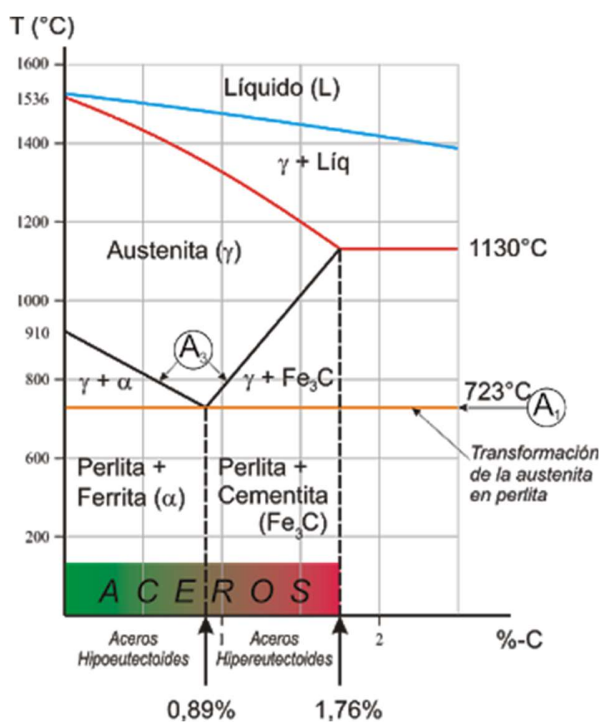


Figura 3. Clasificación y mecanismos de transformación en el acero

Las propiedades mecánicas en los aceros son influenciadas fuertemente por el contenido de carbono. Aún en estado de temple (endurecido por enfriamiento rápido), el contenido de carbono del acero sigue siendo importante pues una martensita de mayor contenido de carbono será también más dura.

Profundizando en la estructura del acero; un producto de acero, como una barra o una plancha, es un sólido que está formado por granos. Al microscopio son granos los que se observan como microcomponentes del acero. Estos granos pueden ser de alguna de las fases, o mezcla de fases, que están presentes en todo acero normal: ferrita, perlita, cementita; por lo que pueden tener diferente aspecto.

De esta forma un acero al carbono, de un contenido de carbono de 0.20 %, estará formado por una proporción de 75% de fase ferrita (cuyo contenido de carbono, a temperatura ambiente, no pasa de 0.008 %) y aproximadamente 25 % de perlita (cuyo contenido de carbono es fijo y corresponde a 0.8 %); mientras un acero de mayor contenido de carbono (por ejemplo, 0.40 %) tendrá mayor proporción de perlita (aproximadamente 50 %) y los granos están formados por arreglos de los átomos de hierro en estructuras ordenadas llamadas cristales. Los cristales serán los elementos que determinarán en gran medida las propiedades del acero.

Cada fase tiene diferente estructura cristalina o cristalográfica y por lo tanto posee diferentes propiedades. El acero poseerá en general y proporcionalmente las propiedades promedio del conjunto.

El diagrama hierro-carbono solo tiene una zona de interés tecnológico que lo constituye la porción hierro-carburo de hierro. El carburo de hierro conocido como cementita es un compuesto Fe_3C con 6.67% de carbono. Este es un diagrama

metaestable, para fines prácticos se puede considerar que el cementita es una fase cuasiestable y técnicamente representa condiciones de equilibrio útiles para entender las transformaciones que veremos en los aceros.

Considerando el contenido de carbono, es práctica común dividir este diagrama en dos partes: la de las fundiciones (entre aproximadamente 2 y 6.67 % de carbono), la de los aceros (entre 0 y 2% de carbono) y varias zonas definidas dentro del diagrama. Tenemos varias soluciones sólidas entre las cuales se pueden mencionar: La solución sólida gamma γ , (derivada de la fase gamma del hierro) se llama austenita y posee una estructura F.C.C. (sistema cubico centrado en las caras), alta temperatura se tiene la región de la solución sólida delta (derivada de la fase delta del hierro) con estructura F.C.C. y a menor temperatura se tiene la región de la ferrita (derivada de la fase alfa del hierro) también con estructura F.C.C.

La transformación más importante diagrama hierro-carbono desde el contexto de utilización técnica, lo constituye la transformación austenítica: Austenita Ferrita + Cementita. Esta transformación se verifica a 723°C, que es conocida como la temperatura eutectoide, y su control constituye un poderoso medio de determinar las propiedades mecánicas del acero adecuándolas a nuestro uso. El control y aprovechamiento de esta transformación constituye una buena parte del campo de aplicación de los tratamientos térmicos.

La velocidad de enfriamiento determinará la microestructura final presente en el acero, decidirá si la fase presente es de naturaleza metaestable o estable o si es una fase fuera del equilibrio; y por tanto determinará las propiedades mecánicas, físicas, químicas, entre otras; asociadas a las fases presentes.

Si esta transformación se realiza enfriando lentamente se producirá la mezcla eutectoide conocida como perlita, formada por finas capas alternadas de cementita y ferrita. Cuanto más lentamente se realice esta transformación más gruesa serán estas capas y mayor será el tamaño de grano del acero (esto sucede en el tratamiento térmico conocido como recocido). Si el enfriamiento es menos lento se tendrá una perlita con capas o lamelas más finas, como sucede en el normalizado.

El acero recocido es más blando que el acero normalizado. Si mediante un enfriamiento acelerado, desde la zona austenítica, se logra evitar la transformación eutectoide tendremos una fase fuera del equilibrio llamado martensita. Este nuevo componente microestructural posee alta dureza, aunque con una cierta fragilidad. La martensita es una solución sólida sobresaturada de carbono atrapado en hierro alfa lo que lleva a una estructura tetragonal de cuerpo centrado derivada de la estructura B.C.C. (sistema cubico centrado el cuerpo). El eje z de la celda cúbica es mayor debido a la inclusión de átomos de carbono. Esta fuerte alteración de la red es la responsable de la alta dureza de la martensita y también de su aspecto microestructural acicular.

El tratamiento térmico consiste en una combinación de operaciones de calentamiento y enfriamiento con tiempos determinados, aplicados a un metal o aleación en el estado sólido en una forma tal que producirá las propiedades deseadas. El calentamiento que se aplica con el único fin de favorecer una deformación, no se incluye dentro de esta definición.

El objeto de los tratamientos es mejorar las propiedades mecánicas o adaptar las ya existentes, dando características especiales a las aplicaciones específicas de las piezas, de esta manera se obtiene un aumento de dureza y resistencia mecánica, así como mayor plasticidad o maquinabilidad para facilitar su conformación. Todos los procedimientos de tratamientos térmicos de aceros incluyen la transformación o

descomposición de la austenita, por lo que el primer paso en cualquier proceso de tratamiento del acero será el calentar el material a alguna temperatura, el valor mínimo que se debe considerar debe ser tal que lleve al material a un intervalo crítico donde se pueda dar la formación de la austenita.

Los factores fundamentales que influyen en el tratamiento térmico: la temperatura y el tiempo de calentamiento, el proceso del tratamiento se caracteriza por la temperatura de calentamiento máxima (T_{max}), que es la temperatura hasta la cual se calienta el material durante el tratamiento. El tiempo de calentamiento se define como el intervalo en el que se mantiene a la temperatura de calentamiento, considerando también las velocidades de calentamiento (V_{cal}), y de enfriamiento (V_{enfr}), las cuales se toman en su valor medio ponderado en todo el proceso, y este valor se hace extensivo a todo el intervalo de temperaturas deseado. Según sea esta velocidad de enfriamiento, dará una estructura cristalina diferente, y unas propiedades físicas y químicas diferentes, para cada acabado, (según lo comentado en la parte del diagrama de fases).

Zona de los aceros (hasta 2% de carbono) del diagrama de equilibrio metaestable hierro-carbono. Dado que en los aceros el carbono se encuentra formando carburo de hierro se han incluido en abscisas las escalas de los porcentajes en peso de carbono y de carburo de hierro (en azul).

1.5 Antecedentes

En la exploración bibliográfica del presente trabajo se pueden mencionar los siguientes tópicos:

Defectos de simulación

Existen trabajos donde se utiliza el DEFORM como una solución para análisis de defectos superficiales en losas de colada continua, si bien se menciona que el proceso muestra buenos resultados en la solución del problema, también menciona que los fenómenos de oxidación en el material debido al proceso no son posibles de verificar [1]. Otros autores mencionan que no solamente con DEFORM se puede efectuar análisis de pases de laminación, pues en esta referencia utilizan otros métodos de análisis de elemento finito que de igual manera permiten estimar el comportamiento de la modificación de geometrías por medio de un proceso de rolado en caliente [2]. En otras publicaciones evalúan defectos superficiales de los materiales generados por los pases de laminación en caliente, buscan identificar los posibles lugares donde se pudieran manifestar estos defectos, se evalúan estos comportamientos a diferentes temperaturas y contemplan una etapa de validación de temperatura mediante un pirómetro [3], finalmente en otros trabajos se menciona que fue utilizado Deform-3D mediante simulaciones sistemáticas de formación masiva de varias pasadas planas y de bordes consecutivas para identificar ocurrencia de diferentes grietas en los bordes del material, los resultados de las simulaciones de formación de metales coincidieron con las micrografías de sección transversal obtenidas de un laminador experimental [4].

Hot Rolling

En algunos documentos como utilizan los datos que resultan de las simulaciones microestructurales del rolado en caliente, datos como temperatura o presión, los cuales sirven como información de entrada para los modelos desarrollados por el autor [5]. En otros se efectuaron predicciones estructurales y de temperatura que se utilizaron para determinar el esfuerzo promedio requerido para deformar al acero en un proceso de laminación en caliente y se compararon con los valores calculados a partir de la suposición de fricción adhesiva en el entrehierro, los resultados obtenidos se observaron un nivel alto en la correlación del acero al carbono, pero no para el

acero micro aleado, en el trabajo se menciona que el modelo no contempla la acumulación de deformación entre pasos [6].

Existen otros trabajos que reportan fenómenos producidos en el proceso de laminación en caliente tal es el caso de la transformación de austenita en ferrita mostrado [7], en esos documentos se utiliza un laminador piloto de 4 cajas, el trabajo considera el modelo de cinética macroscópica, el modelo termodinámico y el campo de fase.

Elemento finito

En algunos trabajos se muestra que a partir de valores definidos inicialmente para laminación de formas se pueden validar valor ves experimentales de extensión máxima y de radio de la barra de refuerzo y se han comparado con los resultados del modelo analítico y del análisis FEM para formas redonda-plana ovalada y pasada redonda-plana [8].

Otras referencias proponen modelos de regresión lineal para predecir la fuerza de laminación, la corona de desgaste de la bobina y la corona térmica de la bobina utilizando datos experimentales [9].

Algunas publicaciones confirman la utilización de elemento finito como una herramienta para la evaluación de laminaciones en caliente, afirma que el método de elementos finitos es el más práctico y preciso, considera un modelo de elementos finitos tridimensionales de plástico termo elástico acoplado para analizar el proceso de laminación en caliente, evalúa el impacto de los parámetros geometría, la temperatura, la fricción entre los rodillos de trabajo y la losa, el porcentaje de reducción de espesor y la velocidad de rotación de los rodillos de trabajo en el proceso [10].

Algunos autores mencionan un proceso de simulación de laminación en caliente, donde se identifican los puntos de deformación máxima y se muestran los esfuerzos generados por los rodillos, también presentan la caracterización termo mecánica del

acero calidad R260, Acero perlítico 0,7% C, comúnmente utilizado en laminación de rieles [11,12].

Otros autores describen un modelo no lineal de elementos finitos para laminación en frío y caliente en donde el material rodante tiene sección transversal rectangular determinando tensiones equivalentes, la deformación plástica equivalente, la tasa de deformación máxima, la deformación total equivalente, el aumento de la temperatura de la losa, el aumento de la temperatura del rollo, el aumento de la longitud de la losa, la reducción del % del espesor de la losa (tiro) y el aumento de la velocidad de la losa, tanto para el frío como para caliente [13].

Otras referencias proponen la solución del uso de combinar un modelo rígido-visco plástico euleriano de la deformación de las placas de acero a un modelo elástico lagrangiano de la deformación de los rodillos y después se valida mediante diferentes condiciones reales de laminación [14].

También se ha publicado la utilización de metodologías de redes neuronales (ANN) en trenes de laminación de bandas en caliente utilizando elementos de volumen constante y después se hizo una comparativa con otros métodos de optimización y de algoritmos genéticos, reportando mejores resultados [15].

Existen otros trabajos que buscan validar métodos analíticos publicados mediante pruebas experimentales donde se diseñaron experimentos de rolado de placas y barras, se comparan los comportamientos microestructurales y mecánicos de especímenes obtenidos de dos tipos de experimentos de laminación a 650°C [16], en otras publicaciones se comparan las simulaciones 2D de un laminado de anillos bajo el supuesto de deformación plana y una versión extendida al laminado de anillos 3-D donde se observa que la reducción del modelo analítico es aceptable y el análisis de elementos finitos se puede utilizar para ajustar el proceso de fabricación para la optimización del tiempo de ciclo o muestran problemas comunes como la modificación a las herramientas de formado para reducir el desperdicio de material que queda fuera del espacio de expansión, o la reducción de grietas superficiales se atacan mediante herramientas de simulación [17, 18].

Existen otros trabajos que proponen métodos de soluciones alternas para el análisis en la laminación del acero caliente donde se propone un nuevo Método Híbrido Euleriano-Lagrangiano que utiliza una coordenada Euleriana en la dirección longitudinal de la tira, mientras que en la dirección del ancho y espesor se emplean coordenadas Lagrangianas. También mencionan técnicas que utilizan un laminador en caliente de Buderus Edelstahl GmbH como sustitución permanente de una antigua base de datos de programación de pases utilizando para su análisis una máquina de vectores de soporte (VSM) dando como resultado mejoras y simplificaciones debido al uso de conceptos de aprendizaje automático [19, 20]

Simulación

Se han documentado una serie de publicaciones donde utilizan herramientas de simulación de FEM para en procesos de laminación, combinan métodos de modelado matemático con pruebas de campo o piloto o pruebas de laboratorio explorando rubros como: coeficiente de fricción, campos de temperatura, evolución de la microestructura y la forma del producto laminado [21].

Otras publicaciones se ayudan de la simulaciones para problemáticas específicas de las laminaciones multipases donde la formación de metales no isotérmicos en el laminado de varias pasadas en rodillos ranurados y el uso de las ecuaciones de la teoría de la dislocación ayudan a caracterizar el comportamiento del material durante la deformación compleja, después de su modificación adecuada, permiten modelar tanto el proceso de deformación como los tiempos de pausa entre pasadas particulares o donde la documentación se centra en las tiras de acero de doble fase (DP) laminadas en caliente y enfriadas rápidamente para aplicaciones automotrices o simplemente por la complejidad, tiempos reducidos de desarrollo o costo de las aleaciones se auxilia de las simulaciones, se han evaluado laminado de anillos y otros procesos de formación considerando un control de proceso en simulaciones automatizadas de todo tipo de procesos de conformado incremental, los resultados obtenidos se caracterizan como simulaciones estables y rápidas con resultados muy cercanos a la realidad [22,23,24].

Otros trabajos exponen los desafíos de la tecnología de simulación que exhiben los gaps entre los datos materiales y la tecnología computacional, se caracteriza el concepto de tecnología integrada desde la perspectiva de los requisitos de simulación, las necesidades de caracterización de materiales, las innovaciones tecnológicas de simulación y los impactos de esos requisitos en la precisión de las aplicaciones prácticas en el mundo automotriz [25]

Otros documentos efectúan simulaciones de tochos en elementos finitos con mallado seleccionado en función a la problemática, donde se aplica una simulación de elementos finitos termo mecánicos acoplados tridimensionales para analizar el proceso de laminación continua de varias pasadas de la palanquilla tubular de acero $\Phi 100\text{mm}$ 37Mn5 de $200\text{mm}\times 200\text{mm}$ cuadrado fundido, debido a la mayor deformación plástica que se produce en el área de la esquina del tocho, se utiliza el método de malla diagonal para la sección transversal del tocho para refinar los elementos de la superficie y el área de la esquina. La tensión, la deformación, la temperatura y la fuerza de laminación del proceso de laminación continua en caliente se simulan para analizar la causa del defecto de laminación, luego se calcula la optimización del paso de laminación en función del análisis de la variación de la fuerza de laminación [26].

Otros documentos mencionan la técnica de optimización de Taguchi se usa para predecir los mejores resultados para las entradas dadas, como el diámetro del rodillo, el valor de fricción, la velocidad de los rodillos y el porcentaje de reducción del proceso de formación y obtener los valores optimizados para la extensión, la dureza, la tensión efectiva, potencia requerida, velocidad de deformación y par utilizando el software de simulación de fabricación, también se ha utilizado una herramienta de cálculo para una simulación de un laminado en caliente de un solo paso de acero al carbono AISI 1016, prediciendo la variación de carga, tensión, deformación, par y potencia y la influencia estos parámetros pueden tener durante la deformación de las piezas de trabajo en el espacio entre rodillos, se concluye las condiciones óptimas durante condiciones inestables en el laminado de AISI 1016, las características de la instalación deben incluir diámetros y longitudes adecuadas de los rodillos, distancia

entre soportes de rodillos , a partir de la última caída hasta el cortante y las tolerancias que puede mantener el acero[27,28].

Se ha mencionado en otras publicaciones FEM simulando un circuito completo para el laminado de vigas de acero en un molino, se busca mediante simulación estimar la longitud final del elemento fabricado y sus variables: la geometría de la sección transversal, la tensión efectiva, la deformación plástica efectiva y potencia de laminación, donde se concluyó que el uso de un software FEM para simular un par de pasadas consecutivas de laminación en caliente permitió determinar la distribución de tensión efectiva, deformación plástica efectiva, momento de laminación, potencia de laminación, longitud final y área de cruce. sección de la viga en cada pasada de laminación, encontrando resultados con variación menor al 2.37%, también se han simulados un sistema de laminación para laminación en caliente de acero capaz de simular laminación de planchones y tochos, así como palanquillas redondas o cuadradas, en diferentes formas simétricas o asimétricas en laminación continua, inversa o combinada, es que el sistema simulado representado está desarrollado específicamente para uso industrial de laminación en caliente. Se salta todos los esfuerzos de ingeniería que requieren mucho tiempo para crear las geometrías y el mallado, como en los códigos comerciales. Y finalmente se ha utilizado FEM para laminación en caliente utilizando métodos alternativos para su resolución, se concluye que este trabajo permite desarrollar un modelo avanzado no lineal de elementos finitos de los procesos de laminación plana en frío y en caliente que pueda ser utilizado posteriormente. analizar el proceso de laminación bajo una serie de parámetros cambiantes. Muchos de los mecanismos que gobiernan el proceso de laminación en caliente aún no se conocen por completo, y existe la necesidad de proporcionar a los ingenieros herramientas integrales que les permitan diseñar los rodillos correctamente la primera vez, reduciendo así el número de ensayos en el diseño de los rollos, la cantidad de desperdicio de material, el costo de las herramientas y, por lo tanto, aumenta el tiempo que los diseñadores de rollos pueden dedicar a la ingeniería, así como la confianza en el proceso de fabricación y la calidad del producto final [28,29,30].

CAPÍTULO 2

LAMINACION EN CALIENTE

2.1 Marco teórico

La literatura acerca de la obtención de piezas por laminación en caliente es basta y completa y existen otras tecnologías que se usan para fabricar piezas específicas. Es necesario implementar una metodología experimental que permita obtener los valores de los parámetros técnicos a nivel diseño bajo los cuales se obtiene un producto de la calidad requerida, definiendo las temperaturas de deformación en caliente, porcentajes y velocidades de deformación por etapa, para determinar porcentajes de reducción en área por etapa, microestructuras resultantes en cada etapa, de las pérdidas de material por oxidación, y más, para así definir el diseño del proceso.

Los perfiles laminados en caliente se forman procesando plásticamente al acero caliente repetidamente a través de una serie de rodillos que le dan forma al elemento lineal con una sección transversal constante, así se pueden producir formas simples de varillas redondas y barras planas, flejes, placas y ángulos de lados iguales y desiguales ver figura 4.

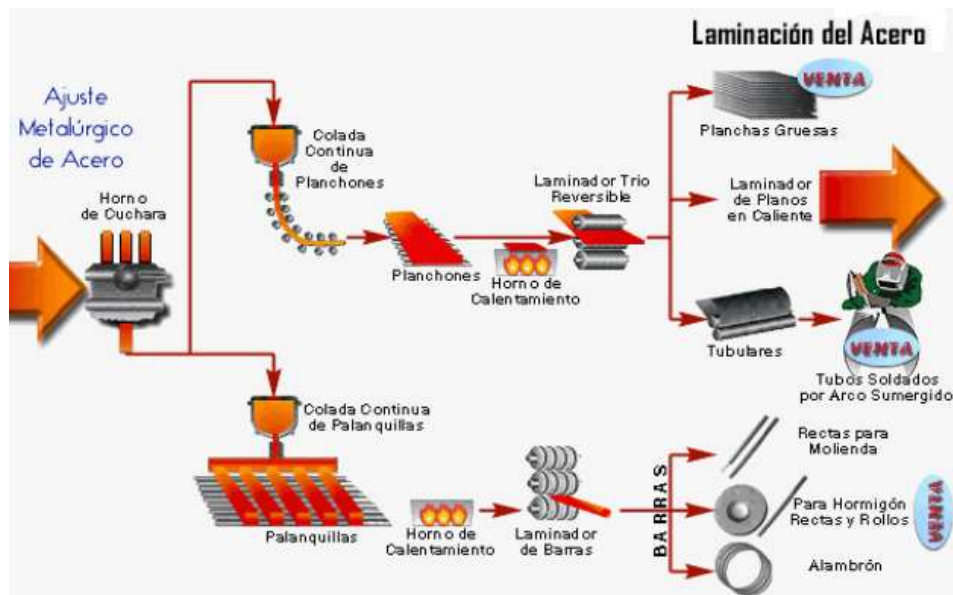


Figura 4. Laminación del acero [13]

Algunos de los elementos que intervienen en el presente proyecto de laminación en caliente son: un horno de recalentamiento para alcanzar temperaturas del orden de 1000-1200°C, sistemas de corte, desbaste y enderezado del riel de ferrocarril usado como materia prima, guías de transporte de tochos a los molinos de laminación en caliente, trenes de laminación en caliente para lograr reducciones en área sucesivas hasta alcanzar el calibre y forma finales.

Las primeras plantas de laminación fueron molinos de corte longitudinal, que se introdujeron en lo que hoy es Bélgica a Inglaterra, en 1590. Estos pasaban barras planas entre rodillos para formar una placa de hierro, que a continuación se pasaba entre rodillos acanalados para producir barras de hierro. A finales de este, se comenzó a ser enrollado y conservarlo para hacer hojalatas. La producción anterior de la placa del hierro en Europa se había hecho de forja, no de los trenes de laminación.

El molino de corte fue adaptado a la producción de aros de hierro y con una media caña, o de otro tipo, mediante secciones que fueron objeto de dos patentes de 1679. Algunas de las primeras publicaciones sobre los trenes de laminación se pueden remontar de nuevo a Christopher Polhem en 1761 en Patriotita Testamente, donde se menciona la historia que sólo quiere inclinar el uso de un bar con un martillo.

La patente fue concedida a Thomas Blockley de Inglaterra, en 1759, para el pulido y laminado de metales. Otra patente fue concedida en 1766 a Richard Ford de Inglaterra para el primer molino tándem. Un laminador tándem es uno en el que se enrolla el metal en gradas sucesivas; el tren de molinos de laminación en caliente de Ford fue de varillas de alambre [18].

Sin embargo, en el año de 1784, el proceso de laminación en caliente se le atribuyó oficialmente a Henry Court, quien fue reconocido por la invención, y a su vez, el patentado, de su proceso de pudelado. Dicho proceso consistía, en una manera de refinado del hierro que se produce en los altos hornos, por lo que el hierro resultante es hierro forjado [31]. Tras el horno de pudelado, la masa fundida pasaba al tren de laminado, en donde una serie de rodillos comprimía la masa y conseguía extraer más impurezas mediante presión. Esto confería una ventaja adicional pues se podían dar determinadas formas al hierro (raíles, perfiles cuadrados o circulares, etc.) si el último de tales rodillos tenía dichas formas grabadas y actuaba por tanto como un molde [32].

2.2 Fundamentos de la laminación

La forma más elemental de un laminador está formada por dos o más cilindros, unos enfrente de otros. Para que estas funciones la distancia entre cilindros

es menor que el ancho de la pieza a ser trabajada, con esto la pieza se alarga o se aplasta de acuerdo la reducción de sección.

La pieza en la que se trabaja es sometida a una fuerza R , normal a la superficie de contacto, es decir, según el radio del cilindro (Figura 5).

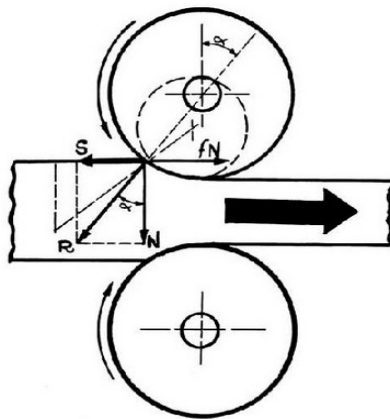


Figura 5. Forma de actuar de un laminador.

La fuerza que resulta de las fuerzas que actúan sobre la superficie de contacto, se descompone en dos fuerzas diferentes. Una es la fuerza horizontal o de estiramiento:

$$S = R \operatorname{Sen}(\alpha) \quad \text{Ec. 1}$$

y la otra es la componente normal o de aplastamiento:

$$N = R \operatorname{Cos}(\alpha) \quad \text{Ec. 2}$$

Para que el avance de la pieza se produzca que es debido al rozamiento de la superficie de contacto, es necesario que cumpla la desigualdad:

$$\mu N > S \quad \text{Ec. 3}$$

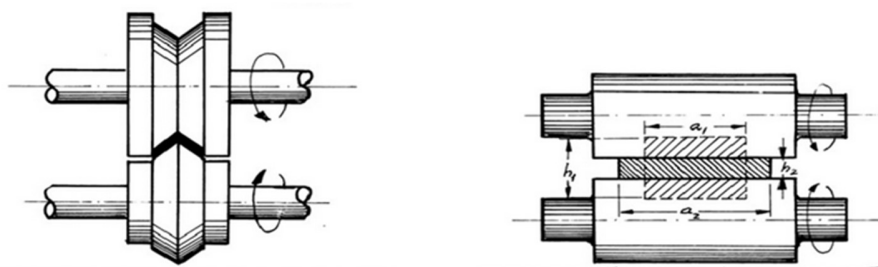
Siendo μ el coeficiente de rozamiento entre la pieza y el cilindro. Se tiene una fuerza horizontal

$$T = \mu N - S \quad \text{Ec. 4}$$

que hace que la pieza avance y en el mismo instante sea aplastado por el componente N .

Si se hace más pequeño el diámetro de los cilindros, el componente S que es la fuerza de estiramiento crecería. Entonces para poder cumplir la desigualdad anteriormente mencionada, se necesitan cilindros más pequeños que dan estiramientos más enérgicos y absorben menos potencial, los cilindros tienen diámetros entre 40 y 60 cm [33].

Las piezas no solo se pueden aplastar y alargarse, sino también se ensancha. El ensanchamiento es menor que el desplazamiento hablando en el aspecto de efecto. Durante la laminación en caliente la pieza no se enfría porque la deformación cristalina solo se transforma en calor, figura 6.



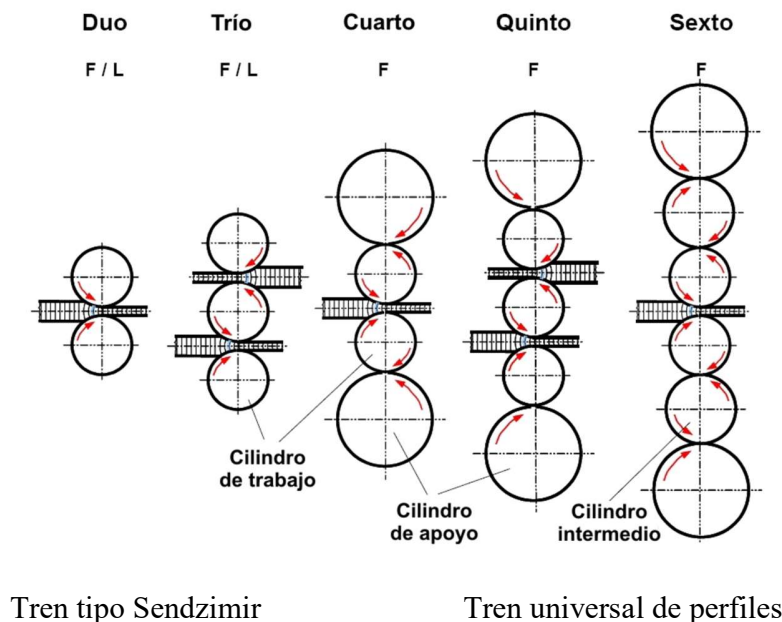
Cilindros para perfiles angulares Laminador desbastador para chapa

Figura 6. Cilindros de laminación.

El objetivo final de la laminación es darle una forma permanente diferente en la pieza, usando la ductilidad del acero. Para esto se hace pasar una pieza a laminar entre dos cilindros que giran a la misma velocidad y en sentido contrario y es la distancia menor a la del espesor del material de entrada. La presión que ejercen los cilindros sobre el material hace que se reduzca el espesor, pero se estire proporcionalmente y con esto se cumple la ecuación:

$$Vol = Sección\ de\ salida \times Longitud\ final = Constante \quad Ec. 5$$

En el 2003, dentro de una publicación realizada por K. H. Schröder [34] se incluyen conceptos básicos, entre los cuales se describen algunas generalidades de los trenes de laminación, en la figura 7 se representan algunas características de los diferentes tipos de cajas de laminación aplicados para la producción de productos planos y productos largos. En el caso de nuestro proyecto el diseño contempla un arreglo de cilindros tipo dúo y trio para productos largos.



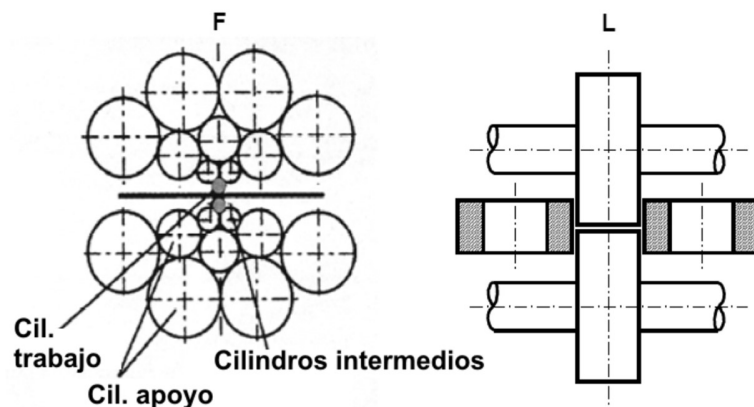


Figura 7. Cajas de laminación con diferente distribución de tensiones y carga específica. (F: Productos Planos; L: Productos Largos).

Las secuencias más comunes en el diseño de pases son las que se muestran en la figura 8.

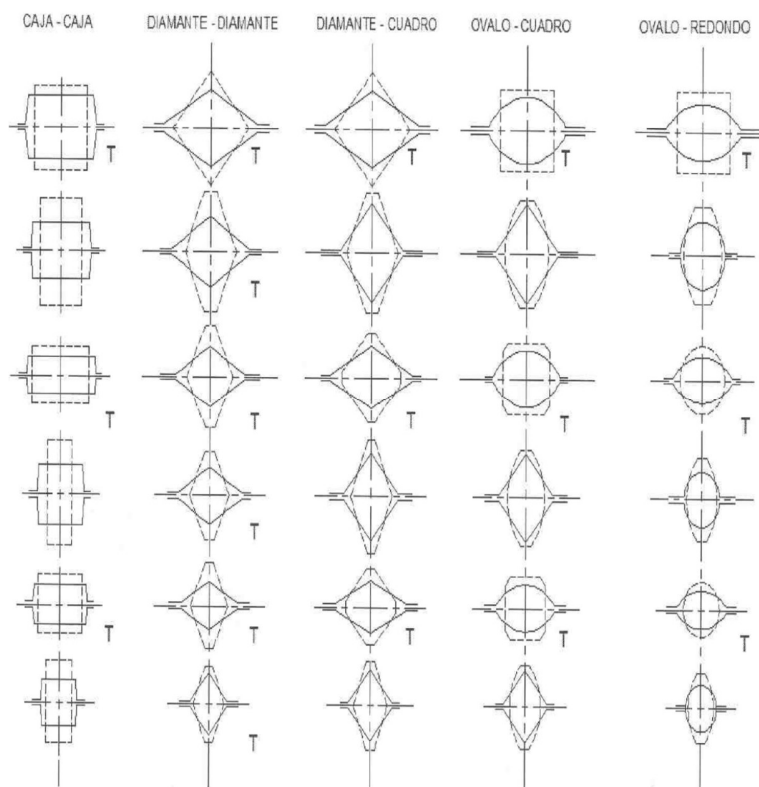


Figura 8. Secuencias más comunes en el diseño de pases.

Existen diversos análisis de rolado con multipases entre los cuales se puede mencionar el mejoramiento de una línea ya existente de 10 a 6 pases [35] aplicando rediseños en los pases de secuencia y evaluando las nuevas secuencias de rolado mediante el análisis del elemento finito con TASKS; su análisis fue desarrollado mediante dos etapas: el diseño de pases y la evaluación de pases.

También llevo a cabo estudios detallados de multipases con cambios en la geometría de rolado de cuadrado a circular [36], los resultados obtenidos los compara contra el estudio de una línea de 7 pases evaluando uniformidades de reducción de área en cada pase y distribución efectiva de la presión en la barra después del pase final.

En otros trabajos analizaron el comportamiento de endurecimiento del acero laminar perlítico, con hojas de espesor de 3.8 mm durante su deformación en frío [36]. En la figura 9 se muestra la composición química del acero perlítico y la microestructura laminar.

Chemical composition of the pearlitic steel, wt%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu	W	As	Zr	N
0.76	0.26	0.90	0.023	0.003	0.039	0.037	0.035	0.035	0.021	0.006	0.005	0.021

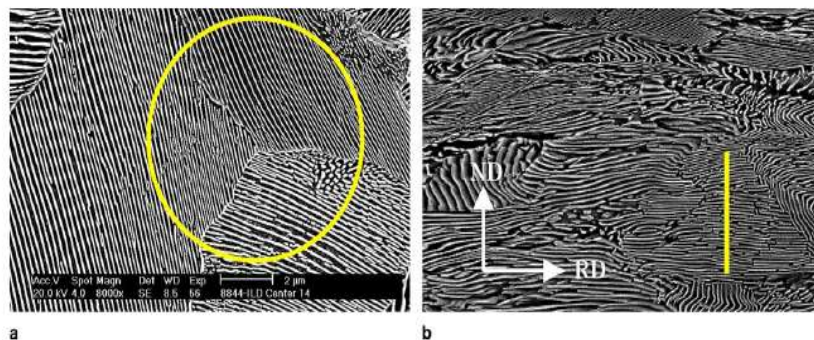


Figura 9. Composición química y microestructura laminar del acero perlítico.

Los perfiles laminados en caliente se forman moldeando acero caliente semiplástico repetidamente a través de una serie de rodillos que le dan forma al elemento lineal con una sección transversal constante. Se moldean formas simples de varillas redondas y barras planas, flejes, placas y ángulos de lados iguales y desiguales.

Dentro de las ventajas que caracterizan a los aceros laminados en caliente están:

1. La alta resistencia. - La alta resistencia del acero por unidad de peso implica que será poco el peso de las estructuras.
2. Uniformidad. - las propiedades físicas del acero no cambian apreciablemente con el tiempo, como es el caso de las estructuras de concreto que se deterioran en menos tiempo.
3. Durabilidad. - dándoles el mantenimiento adecuado contra la corrosión a las estructuras de acero, duraran indefinidamente.
4. Ductilidad. - La ductilidad es la propiedad que tiene un material de soportar grandes deformaciones sin fallar bajo altos esfuerzos de tensión.
5. Tenacidad. - Es la propiedad de un material para absorben energía en grandes cantidades.
6. Gran facilidad para unir diversos miembros por medio de varios tipos de conexiones como son la soldadura, los tornillos y los remaches.
7. Posibilidad de fabricar los miembros de una estructura en particular, cuando alguno de sus elementos no es comercial.
8. El montaje se lleva a cabo rápidamente por la facilidad de manejo del acero estructural. El acero estructural provee mayor resistencia a los movimientos sísmicos.
9. Gran capacidad de moldear o laminar y en gran medida de tamaño y formas.

10. Las estructuras de acero son más estéticas que las de concreto, ya que las dimensiones de vigas y columnas de concreto para soportar grandes cargas son mayores a las de acero.

Así mismo se conocen que algunas de las desventajas principales son:

1. Susceptibilidad al pandeo. - debido a la alta resistencia del acero, las secciones diseñadas resultan esbeltas; esta situación puede generar problemas de pandeo, ocasionando que el diseño de estos elementos no se haga basándose en resistencias requeridas, sino considerando a esbeltez de estos, este hecho se presenta muy a menudo, pudiendo resultar secciones más robustas, más pesadas y caras.
2. Fatiga. - otra característica inconveniente del acero es que su resistencia puede reducirse si se somete a un gran número de inversiones del signo del esfuerzo, o bien, a un gran número de cambios de la magnitud del esfuerzo de tensión-compresión.
3. Corrosión. - otro factor es la corrosión, presentándose cuando el elemento es expuesto a la humedad, al aire y otros medios corrosivos como el suelo.
4. Tipos y usos de los perfiles laminados en caliente. - el acero es un material muy versátil y se utiliza en una amplia gama de productos que sirven para muchas funciones en la rama de la construcción.

Los perfiles laminados en caliente se fabrican por dos métodos diferentes:

1. El método de rolado. - se fabrica pasando el material a través de rolado de rodillos, los cuales aplican presión para reducir el espesor de la sección y alargar el material.
2. El método de extrusión. - es el proceso más común de laminados y consiste en calentar un planchón a una temperatura que permite el comportamiento plástico del material para así poder extruirlo en los moldes de laminado y obtener las secciones requeridas.

En el caso del proyecto de investigación los perfiles laminados en caliente se fabrican por el método de rolado a lo largo de 10 pases de laminación, sin incluir el de corte y desbaste.

CAPÍTULO 3

MODELACION MATEMÁTICA

3.1 Marco teórico

La modelación matemática es un área de la ciencia que se encarga de expresar fenómenos de la vida real en forma matemática y así poder usar las herramientas que tenemos de matemáticas para obtener una solución al problema.

Los principales problemas que se enfrentan al modelar son aquellos en los que el modelo es muy complicado debido a que en la vida real existen muchos factores que influyen en el fenómeno a estudiar y es imposible considerarlos todos; y también que no siempre la solución del modelo nos da buenos resultados en la vida real.

Un modelo matemático describe teóricamente un objeto que existe fuera del campo de las matemáticas. Las previsiones del tiempo y los pronósticos económicos, por ejemplo, están basados en modelos matemáticos. Su éxito o fracaso depende de la precisión con la que se construya esta representación numérica, la fidelidad con la que se concreten hechos y situaciones naturales en forma de variables relacionadas entre sí.

Los modelos matemáticos son conjuntos con ciertas relaciones ya definidas, que posibilitan la satisfacción de proposiciones que derivan de los axiomas teóricos. (Figura 10).

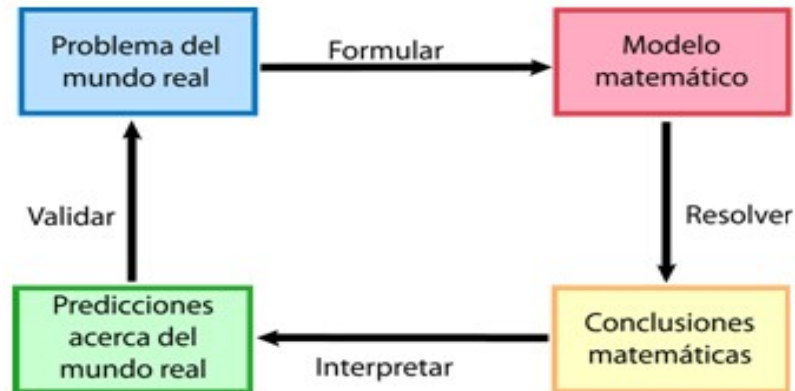


Figura 10. Proceso de Modelado

Las ventajas con las que cuenta un modelo matemático cualitativo son las siguientes:

- a) Dar a conocer las características esenciales del sistema, de forma clara y precisa.
- b) Es difícil que se altere la representación física.
- c) Puede ser replicado fácilmente.

Un modelo matemático es el que constituye una representación de la realidad, los diferentes tipos de modelos que se pueden mostrar son analógicos, físicos, gráficos, esquemáticos y matemáticos.

La modelación matemática es un intento de describir alguna parte del mundo real con términos matemáticos, los modelos matemáticos se usan en muchas ciencias, tanto físicas como biológicas y sociales. Los elementos que se toman son el cálculo, el álgebra, la geometría y otras ciencias.

Es normal que los modelos matemáticos sean modelos incompletos, es decir, que no te van a dar todos los resultados. En un modelo matemático se establece un conjunto de relaciones de igualdad o de desigualdad definidas en un conjunto de variables que reflejan la esencia de los fenómenos en el objeto de estudio.

La primera tarea es formular un modelo matemático, se tiene que revisar y nombrar las variables y se establecen hipótesis que te ayuden a disminuir el fenómeno lo suficiente para que pueda tratarse matemáticamente. En lo anterior se pone a prueba el conocimiento de la situación física y las habilidades matemáticas para obtener las relaciones entre las variables.

Un modelo matemático nunca es una representación completamente exacta de una situación física, es una idealización. En un buen modelo es aquel que se resume suficiente para permitir cálculos matemáticos, pero incluso así es bastante exacto para permitir conclusiones valiosas. Es importante el conocimiento acerca de las limitaciones de un modelo para que sea más correcto.

Pasos para resolver un modelo matemático:

Paso 1. Recolecta la siguiente información: lo que ya sabes, las fuentes de información relevante, tus suposiciones, lo que te gustaría predecir con el modelo, formas de verificar que el modelo se construirá de forma correcta y modos de validar el modelo.

Paso 2. Realiza un bosquejo de diagramas simples que den una idea general de los elementos en el modelo y cómo están conectados el uno con el otro. Al igual que para muchas tareas complejas, ya que la visualización ayuda mejor.

Paso 3. Revisión de literatura completa.

Paso 4. Revisión total de la información.

Paso 5. Comenzar por un modelo simple, en general, existe un compromiso simple entre la complejidad y la exactitud.

Paso 6. Encontrar las variables y constantes más importantes y determinar cómo se relacionan las unas con las otras. Las variables más importantes son variables de entrada y salida.

Paso 7. Construir ecuaciones que relaciones variables entre sí.

Paso 8. Identificar los parámetros de las ecuaciones y desarrollar un plan de cómo estimar los parámetros de la información. Eso se podría realizar simplemente al adaptar las ecuaciones a la información.

Paso 9. Validar un modelo.

Pasó 10. Probar el modelo de forma constante y actualizar las ecuaciones basadas en la información nueva.

Existen varios tipos de modelos matemáticos:

1. Modelos descriptivos: Solo describe el problema para entenderlo mejor en la vida real, sin proponer en muchos de los casos una mejor solución.
2. Modelos determinísticos: Sirve para definir el problema, para disminuir dudas acerca del problema.
3. Modelos probabilísticos: Estos solo se basan en probabilidades y estadísticas.
4. Modelos de optimización: En este modelo lo que se busca es la mejor manera de mejorar una situación por medio de este modelo.

5. Modelos simulados: Este modelo intenta tener una respuesta adelantada de lo que pasaría si ponen un semáforo en una calle, un puente, un paso a desnivel, etc. Esto con el fin de saber qué resultado se obtendría, este modelo es casi siempre representado por computadora.

Se conoce que es el proceso de laminación en caliente y que es la modelación matemática, se va a analizar cómo se pueden relacionar y cómo podemos aplicar estos métodos en el proceso de laminación en caliente.

La relación entre los parámetros de proceso, las propiedades mecánicas del material y la tensión necesaria para la laminación, ha sido descrita por Roberts y Leonard [15]. La mayoría de los modelos para la laminación en caliente, si no es que todos los modelos están basados en la relación general que se plantea en la teoría de la plasticidad.

$$\bar{\sigma}_t = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 F \quad \text{Ec. 6}$$

Donde σ_0 es el límite elástico, $\bar{\sigma}_t$ es la tensión necesaria para laminar y F es una función que da cuenta de la influencia del coeficiente de fricción μ y de un factor de forma Δ , asociado a la zona de deformación, esto es:

$$F = F(\mu, \Delta) \quad \text{Ec. 7}$$

El modelo toma la fuerza de separación, de los rodillos P , que depende de la longitud de laminación L , la resistencia media afectiva a la laminación K y un factor geométrico Q , a través de:

$$P = \bar{k}LQ \quad \text{Ec. 8}$$

Cuando se está fabricando dicha pieza existe una deformación a causa de diferentes factores, como lo son la temperatura, el material, etc.

La resistencia efectiva promedio a la deformación, se calcula a partir de la deformación ε , la velocidad de deformación $\dot{\varepsilon}$, la temperatura absoluta T y un conjunto de constantes (σ_0, K, n, m, C) que dependen del material a partir de:

$$\bar{k} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\sigma_0 + K \left[\frac{2}{\sqrt{3}} (\varepsilon - \varepsilon_0) \right] \right)^n \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \dot{\varepsilon} \right)^m \exp(-CT) \quad \text{Ec. 9}$$

Otra ventaja o facilidad que ofrece el modelo matemático es la de poder graficar los resultados del proceso y así poder explicar de una forma más visual los resultados obtenidos para poder dar una propuesta, para evaluar cómo van progresando, tanto la producción como la empresa y poder ver que es lo que afecta la producción y a su vez mejorar en ese aspecto para un mejor resultado.

En la figura 11 se puede observar una gráfica del factor de energía plástica de un acero que fue laminado en caliente.

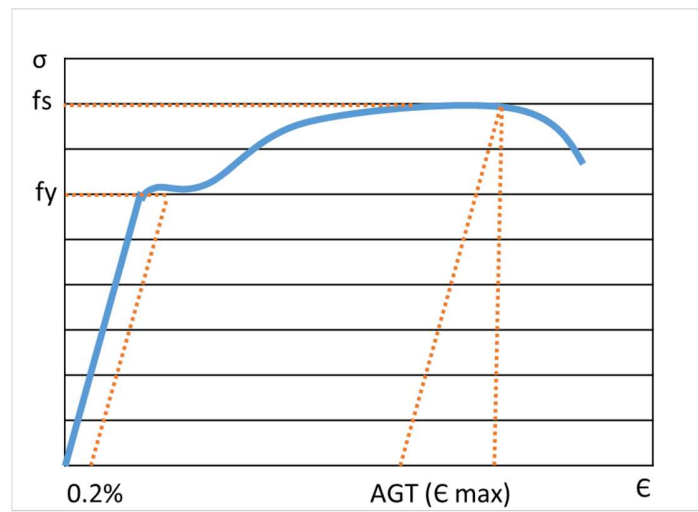


Figura 11. Grafica de Factor de energía plástica del acero.

Donde fs: Esfuerzo final y fy: limite elástico

CAPÍTULO 4

ELEMENTO FINITO

4.1 Marco teórico

Al efectuar una clasificación de las estructuras, suelen dividirse en discretas o reticulares y continuas. Las primeras son aquéllas que están formadas por un ensamblaje de elementos claramente diferenciados unos de otros y unidos en una serie de puntos concretos, de tal manera que el sistema total tiene forma de malla o retícula. La característica fundamental de las estructuras discretas es que su deformación puede definirse de manera exacta mediante un número finito de parámetros, como por ejemplo las deformaciones de los puntos de unión de unos elementos y otros. De esta manera el equilibrio de toda la estructura puede representarse mediante las ecuaciones de equilibrio en las direcciones de dichas deformaciones.

Como contrapartida, en los sistemas continuos no es posible separar, a priori, el sistema en un número finito de elementos estructurales discretos. Si se toma una parte cualquiera del sistema, el número de puntos de unión entre dicha parte y el resto de la estructura es infinito, y es por lo tanto imposible utilizar el mismo método que en los sistemas discretos, pues los puntos de unión entre los distintos elementos, que allí aparecían de manera natural, no existen ahora.

4.2 Discretización

Un medio continuo tiene infinitas formas posibles de deformarse, independientes unas de otras, ya que cada punto puede desplazarse manteniendo fijos cualquier número finito de los puntos restantes, por grande que sea este último. Por lo tanto, la configuración deformada de la estructura no puede venir dada por un vector finito como el anterior, sino que es una función vectorial u , que indica cuáles son las deformaciones de cualquier punto, y que tiene tres componentes escalares:

$$u = \begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix} \quad \text{Ec. 10}$$

Esta función es la solución de la ecuación diferencial que gobierna el problema, y si éste está bien planteado, cumplirá las condiciones de contorno impuestas, pero en principio no puede asegurarse que esta función u tenga una expresión analítica manejable, ni siquiera que pueda calcularse. Por lo tanto, la función u no podrá conocerse en general.

Para resolver este problema, el Método de los Elementos Finitos recurre a la discretización, que se basa en lo siguiente:

- El continuo se divide por medio de líneas o superficies imaginarias en una serie de regiones contiguas y disjuntas entre sí, de formas geométricas sencillas y normalizadas, llamadas elementos finitos. Los elementos finitos se unen entre sí en un número finito de puntos, llamados nudos.

- Los desplazamientos de los nodos son las incógnitas básicas del problema, y éstos determinan unívocamente la configuración deformada de la estructura. Sólo estos desplazamientos nodales se consideran independientes.
- El desplazamiento de un punto cualquiera, viene unívocamente determinado por los desplazamientos de los nudos del elemento al que pertenece el punto. Para ello se definen para cada elemento, unas funciones de interpolación que permiten calcular el valor de cualquier desplazamiento interior por interpolación de los desplazamientos nodales. Estas funciones de interpolación serán de tal naturaleza que se garantice la compatibilidad de deformaciones necesaria en los contornos de unión entre los elementos.
- Las funciones de interpolación y los desplazamientos nodales definen unívocamente el estado de deformaciones unitarias en el interior del elemento. Éstas, mediante las ecuaciones constitutivas del material definen el estado de tensiones en el elemento y por supuesto en sus bordes.
- Para cada elemento, existe un sistema de fuerzas concentradas en los nudos, que equilibran a las tensiones existentes en el contorno del elemento, y a las fuerzas exteriores sobre él actuantes. Los dos aspectos más importantes de esta hipótesis, sobre los que hay que hacer hincapié son:
 - La función solución del problema u es aproximada de forma independiente en cada elemento. Para una estructura discretizada en varios elementos, pueden utilizarse funciones de interpolación distintas para cada uno de ellos, a juicio del analista, aunque deben cumplirse ciertas condiciones de compatibilidad en las fronteras entre los elementos.
 - La función solución es aproximada dentro de cada elemento, apoyándose en un número finito (y pequeño) de parámetros, que son los valores de dicha función en los nudos que configuran el elemento y a veces sus derivadas.

Esta discretización es el pilar básico del MEF, por lo que se suele decir de éste, que es un método discretizante, de parámetros distribuidos. La aproximación aquí indicada se conoce como la formulación en desplazamiento.

Claramente se han introducido algunas aproximaciones. En primer lugar, no es siempre fácil asegurar que las funciones de interpolación elegidas satisfarán al requerimiento de continuidad de desplazamientos entre elementos adyacentes, por lo que puede violarse la condición de compatibilidad en las fronteras entre unos y otros. En segundo lugar, al concentrar las cargas equivalentes en los nodos, las condiciones de equilibrio se satisfarán solamente en ellos, y no se cumplirán usualmente en las fronteras entre elementos.

El proceso de discretización descrito tiene una justificación intuitiva, pero lo que de hecho se sugiere es la minimización de la energía potencial total del sistema, para un campo de deformaciones definido por el tipo de elementos utilizado en la discretización.

Con independencia de que más adelante se estudien en detalle, se representan a continuación algunos de los elementos más importantes.

4.3 Funciones de Interpolación

Si se considera un elemento finito cualquiera [23], definido por un número de nodos n . Para facilitar la exposición se supondrá un problema de elasticidad plana. Un punto cualquiera del elemento tiene un desplazamiento definido por un vector u , que en este caso tiene dos componentes:

$$u = \begin{cases} u(x, y) \\ v(x, y) \end{cases} \quad \text{Ec. 11}$$

Los nodos del elemento tienen una serie de grados de libertad, que corresponden a los valores que adopta en ellos el campo de desplazamientos.

El campo de deformaciones en el interior del elemento se aproxima haciendo uso de la hipótesis de interpolación de deformaciones. La matriz de funciones de interpolación N tiene tantas filas como desplazamientos tenga el punto P y tantas columnas como grados de libertad haya entre todos los nudos del elemento.

Las funciones de interpolación son habitualmente polinomios, que deben poderse definir empleando las deformaciones nodales del elemento. Por lo tanto, se podrán usar polinomios con tantos términos como grados de libertad tenga el elemento.

4.4 CRITERIOS DE CONVERGENCIA

Antes de estudiar los criterios para garantizar la convergencia en el MEF es necesario definir dicho concepto, en el ámbito del MEF. Se dice que un análisis por el MEF es convergente si al disminuir el tamaño de los elementos, y por lo tanto aumentar el número de nudos y de elementos, la solución obtenida tiende hacia la solución exacta.

Hay que indicar que, en el análisis por el MEF, se introducen, además de la hipótesis de discretización, otras aproximaciones, que son fuentes de error en la solución: integración numérica, errores de redondeo por aritmética finita. El concepto

de convergencia aquí analizado se refiere solamente a la hipótesis de discretización, prescindiendo de los otros errores, que deben ser estudiados aparte, y cuyo valor debe en todo caso acotarse.

Las funciones de interpolación elegidas para representar el estado de deformación de un medio continuo deben satisfacer una serie de condiciones, a fin de que la solución obtenida por el MEF converja hacia la solución real.

Los criterios 1 y 2 pueden agruparse de manera más matemática diciendo que las funciones de interpolación deben permitir representar cualquier valor constante de su derivada n -sima en el interior del elemento (siendo n el orden de la derivada necesaria para pasar de las deformaciones a las deformaciones unitarias, que es el orden de derivación de las deformaciones en el potencial).

Esto puede comprobarse mediante el siguiente sencillo razonamiento: los criterios 1 y 2 obligan a representar cualquier valor constante (incluido el valor nulo) del esfuerzo σ , lo cual equivale a representar cualquier valor constante (incluido el valor nulo) de la deformación unitaria ε . Pero la deformación unitaria es la derivada n -sima de la deformación, luego en consecuencia es necesario poder representar cualquier valor constante de dicha derivada. Esto se satisface siempre, si se adoptan como funciones de interpolación, polinomios completos de orden n como mínimo.

Por ejemplo, si se adopta una función lineal

$$N = Ax + B \quad \text{Ec. 12}$$

sólo es válida para problemas de elasticidad ($n=1$), ya que se representa cualquier valor constante de la derivada n -sima

$$dN/dx=A \quad \text{Ec. 13}$$

Sin embargo, no vale para problemas de flexión de vigas ni de placas delgadas ($n=2$), pues siempre es

$$d^2N/dx^2=0 \quad \text{Ec. 14}$$

es decir que no se puede representar cualquier valor constante de la derivada segunda.

El criterio 3 exige que las deformaciones unitarias sean finitas en el contorno entre los elementos. Como estas deformaciones unitarias son las derivadas n -simas de las deformaciones, lo que se exige es que haya continuidad de las deformaciones y sus derivadas hasta orden $n-1$ en el contorno del elemento. Esto es equivalente a imponer la compatibilidad de desplazamientos en el contorno.

Como resumen de los tres criterios, para problemas de elasticidad ($n=1$) es necesario emplear polinomios completos de orden 1, con continuidad $C0$ entre ellos para garantizar la convergencia. Es suficiente con usar funciones del tipo lineal, que aproximan la solución mediante una línea quebrada, aunque se produzcan discontinuidades en las tensiones entre los elementos.

Para problemas de flexión de vigas y placas, ($n=2$) es necesario emplear como mínimo polinomios de grado 2, con continuidad $C1$ entre ellos, es decir que hay que garantizar la continuidad de la flecha y el giro entre los elementos. En la práctica, para la flexión de vigas planas se usan 4 parámetros para ajustar la solución (flecha y giro en cada extremo) por lo que el tipo de funciones empleadas son polinomios de grado 3.

Con respecto a la velocidad de convergencia se pueden resumir las siguientes conclusiones de los análisis efectuados. Si se utiliza una discretización uniforme con elementos de tamaño nominal h , y se usa para interpolar los desplazamientos un polinomio completo de grado c (que representa exactamente variaciones del 14 Introducción desplazamiento de dicho grado), el error local en los desplazamientos se estima que es del orden

$$O(h^{c+1}) \quad \text{Ec. 15}$$

Respecto a las tensiones, son las derivadas n -simas de los desplazamientos, luego el error en ellas es de orden

$$O(h^{c+1-m}) \quad \text{Ec. 16}$$

Campo de Deformaciones

El campo de deformación es un punto del dominio que se define como el vector u , dicho vector puede estar colocado en cualquier parte del dominio, y asimismo se tiene componentes y deformaciones.

En cualquier elemento finito, el campo de deformaciones va decreciendo, siendo así se acerca a su interior. Se usa la hipótesis de interpolación como promedio frugal de las deformaciones en cada nudo n del elemento. Estos serían los factores de la interpolación. Figura 12.

$$u = \sum N U \quad v = \sum N V \quad w = \sum N W \quad \text{Ec. 17}$$

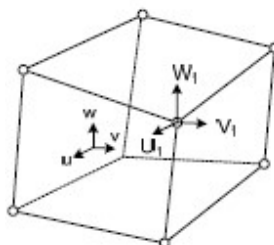


Figura 12. Deformaciones de un elemento finito

Mientras que la matriz de funciones de interpolación N es conformada por tres filas, misma cantidad de columnas como grados de libertad según los nudos del elemento.

$$\text{Ejemplo: } N = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & N_n & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 & N_n & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & \cdots & \cdots & 0 & 0 & N_n \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 18}$$

Deformaciones Unitarias

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad \text{Ec. 19}$$

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \partial u \quad \text{Ec. 20}$$

En esto se aprecia el operador matricial ∂ que es el que permite pasar las deformaciones del punto u a las deformaciones unitarias ε . El operador puede tener cuantas filas sean necesarias pues es dependiendo de las deformaciones unitarias que haya en dicho problema y las columnas que sean necesarias siendo que los componentes tengan su campo de desplazamiento u .

$$\text{Identificando la matriz } \mathbf{B}: \mathbf{B} = \partial \mathbf{N} \quad \text{Ec. 21}$$

En esta matriz \mathbf{B} tiene la tarea de relacionar las deformaciones de los nudos con las deformaciones unitarias en un punto cualquiera siempre y cuando sea en el interior del elemento.

Siendo así, \mathbf{B} representa el campo de deformaciones unitarias que está ubicado en el interior del elemento finito y es fundamental en el método de dicho elemento finito.

La estructura de la matriz \mathbf{N} , la matriz \mathbf{B} se pueden poner de forma que:

$$B = \partial N = \partial \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & N_n & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & \dots & \dots & 0 & N_n & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & \dots & \dots & 0 & 0 & N_n \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 22}$$

$$B = B[B_1 \quad B_2 \quad \dots \quad B_n] \quad \text{Ec. 23}$$

Cada una de las matrices \mathbf{B} se forma como:

$$B_i = \partial \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 24}$$

Estados de Esfuerzos. Ecuación Constitutiva

Las tensiones de cualquier punto del dominio se definen por el tensor de dicho punto, la expresión general:

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{Bmatrix} \quad \text{Ec. 25}$$

La ecuación constitutiva del material que forma el dominio es bien conocida, ya que es la que relaciona las tensiones de las deformaciones unitarias. Dada por la forma:

$$\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma_0 \quad \text{Ec. 26}$$

4.5 Ecuación de Equilibrio de un elemento

Ya que han sido puestas las expresiones que relacionan los conceptos de desplazamientos, [25] deformaciones unitarias y tensiones, junto con las funciones de

los nodos, ya se está preparado para calcular ecuaciones de equilibrio de un elemento finito.

En el caso más general se puede considerar:

1. Fuerzas exteriores de volumen aplicadas en el interior del elemento q_v , que son en general variables dentro del elemento, y tienen tantas componentes como desplazamientos haya en cada punto.
2. Fuerzas exteriores de superficie aplicadas en el contorno libre del elemento q_s , que son en general variables a lo largo del contorno, y tienen tantas componentes como desplazamientos tenga cada punto del contorno. Al contorno sobre el que actúan las fuerzas de superficie se le denomina s .
3. Fuerzas interiores q_c , aplicadas en la superficie del contorno de unión del elemento con los elementos vecinos, que son desconocidas. A dicho contorno de unión se le denomina c .
4. Fuerzas exteriores puntuales aplicadas sobre los nudos del elemento e .

Ecuación de Equilibrio del Conjunto

La ecuación que es adquirida para el elemento puede aplicarse a todos los elementos en que estén divididos el sistema continuo. Así es garantizado el equilibrio de todos ellos individualmente, consiguiendo dichas ecuaciones de fuerzas de conexión entre los elementos.

Para adquirir la ecuación de equilibrio de toda la estructura es necesario imponer equilibrio en las fronteras de unión entre los elementos.

Al poner en conjunto las ecuaciones de equilibrio de todos los nudos de unión,

obtendremos un conjunto de ecuaciones representativas del equilibrio de toda la estructura. Dichas ecuaciones se obtienen en la forma:

$$U_e [K^e \delta^e] = U_e [P_v^e + P_s^e + P_T^e + P_b^e + P_N^e] + U_e P_c^e \quad \text{Ec. 27}$$

Donde U_e indica el ensamblado de las distintas magnitudes según los grados de magnitud de la estructura.

Condiciones de compatibilidad

La ecuación de equilibrio antes vista representa el conjunto de equilibrio de la estructura, tomando en cuenta los elementos que conforman dicha estructura. Para poder resolverla es preciso imponer las condiciones de ligadura, indicando así cómo está sustentada. Estas condiciones de compatibilidad son efectuadas igualmente que el en método de rigidez para las estructuras reticulares.

Energía Potencial Total

Densidad de energía elástica acumulada en un punto cualquiera del elemento:

$$U_0^e = \int_0^\varepsilon \sigma^T d\varepsilon = \int_0^\varepsilon (D\varepsilon - D\varepsilon_0 + \sigma_0)^T d\varepsilon = \frac{1}{2} \varepsilon^T D\varepsilon - \varepsilon_0^T D\varepsilon + \sigma_0^T \varepsilon \quad \text{Ec. 28}$$

Potencial acumulado en un elemento finito es igual a la suma de la energía elástica acumulada:

$$\Pi^e = U^e + V^e = \int_v U_0^e dv + V^e$$

$$\begin{aligned} \Pi^e = & \frac{1}{2} \int_v \varepsilon^T D \varepsilon dv - \int_v \varepsilon^T D \varepsilon_0 dv + \int_v \varepsilon^T \sigma_0 dv \\ & - \int_v u^T q_v dv - \int_v u^T q_s ds - \int_v u^T q_c ds - \delta^{eT} P_N^e \end{aligned}$$

Ec. 29

Matriz de rigidez del elemento, así como los vectores de fuerzas nodales

$$\Pi^e = \frac{1}{2} \delta^{eT} K^e \delta^e - \delta^{eT} P_T^e - \delta^{eT} K P_b^e - \delta^{eT} K P_v^e - \delta^{eT} K P_s^e - \delta^{eT} K P_c^e - \delta^{eT} K P_N^e$$

Ec. 30

equivalentes, en forma compacta:

El equilibrio de la estructura implica que el potencial total sea completamente estacionario, cualquier variación de las deformaciones

$$\text{nodales: } \Pi^e = 0 \rightarrow \frac{\partial \Pi}{\partial \Delta} = 0 \quad \text{Ec. 31}$$

Se obtiene así la ecuación de equilibrio de toda la estructura:

$$K \Delta = P_T + P_b + P_v + P_s + P_N \quad \text{Ec. 32}$$

CAPÍTULO 5

EXPERIMENTACION

El proceso de experimentación del presente trabajo de tesis contempla la herramienta de elemento finito DEFORM, adicionalmente se hizo una evaluación discreta de la geometría de los rieles de ferrocarril segmentados en 2 subsistemas los cuales fueron modelados como cuerpos 3D, la geometría original evaluada antes de hacer el proceso de rolado en frio se muestra en la figura 13.

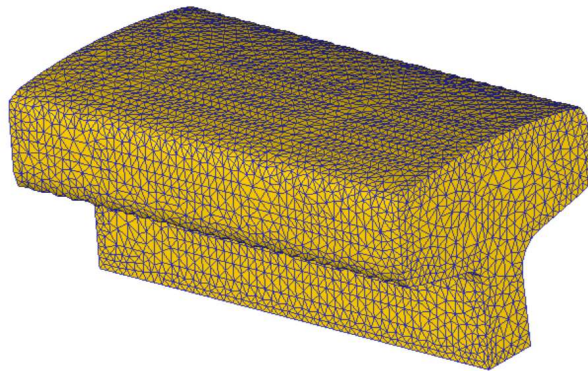


Figura 13. Tocho inicial segmento superior.

Una vez definidas las geometrías necesarias para las diferentes corridas, se procede a definir las condiciones iniciales del material en el software de simulación, para el caso de las corridas ejecutadas se tomó el AISI 1075 con las características descritas en la tabla 1.

Tabla 1: Características del acero AISI 1075

Young's module (GPa)	206
Poisson's ratio	0.3
Thermal expansion coefficient ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	1.2×10^{-5}
Density (kg/m^3)	7800

A partir del material definido para la simulación se definen las propiedades de conductividad térmica y capacidad calorífica, ambas mostradas en la figura 14 y 15.

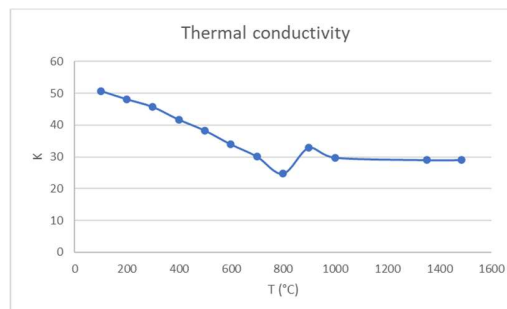


Figura 14.- Conductividad térmica de los materiales

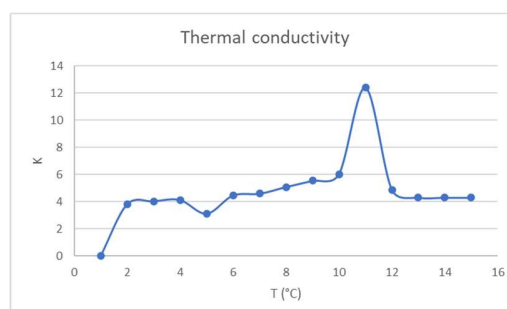


Figura 15.- Capacidad calorífica definida para el proceso

Para la evaluación se consideran condiciones fronteras con los siguientes datos:

Temperatura ambiente constante en 25°C

- Coeficiente de convección constante en 0.02N/seg/mm/°C
- El coeficiente de transferencia de calor se asumió como 20 W/m²°C. Este valor considera enfriamiento al aire.

Supuestos de modelado:

- Comportamiento isotrópico.
- Las geometrías de los rodillos eran rígidas, por lo que la única malla necesaria era la resolución del archivo STL para mejorar las condiciones de contacto con la superficie.

La evaluación de los pases de laminación se resume en las siguientes características:

1. Pieza superior del riel segmentado
2. 5 pases de laminación
3. Temperatura de rolado:
 1. 1050°C
 2. 1150°C
 3. 1250°C
4. Velocidades de rodillo:
 1. 3.1 RPM
 2. 6.2 RPM
 3. 12.4 RPM

Las condiciones para las variables temperatura y velocidad del rodillo se definen como condiciones iniciales y se mantienen a lo largo de los 5 pases de laminación, por lo que tendremos 9 diferentes simulaciones y se concluirá a partir de los pasos intermedios y en el resultado final de todas las simulaciones.

En resumen, se puede mencionar que el proceso de experimentación del presente trabajo se resume en el diagrama de flujo que se muestra en la figura 16.

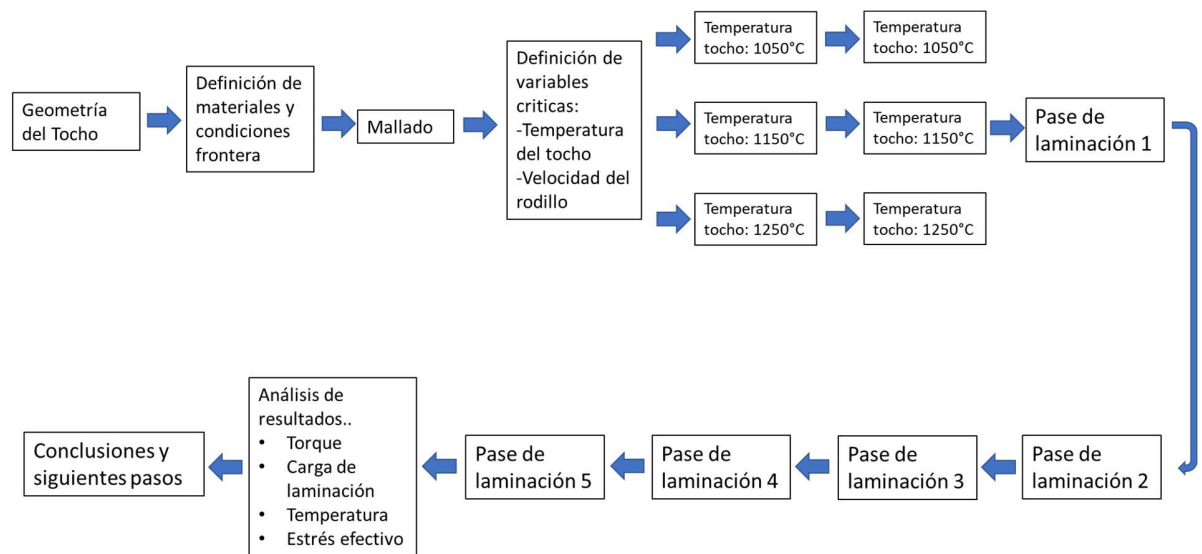


Figura 16. Diagrama de flujo de experimentación de la evaluación del riel

Para el caso de la materia prima utilizada en el proceso del rolado, se contempla el riel de ferrocarril seccionado y segmentado a la mitad buscando que se obtenga la misma área en ambas secciones, esta consideración es mostrada en la Figura 17, en el presente trabajo se utilizara solamente la parte superior del riel.

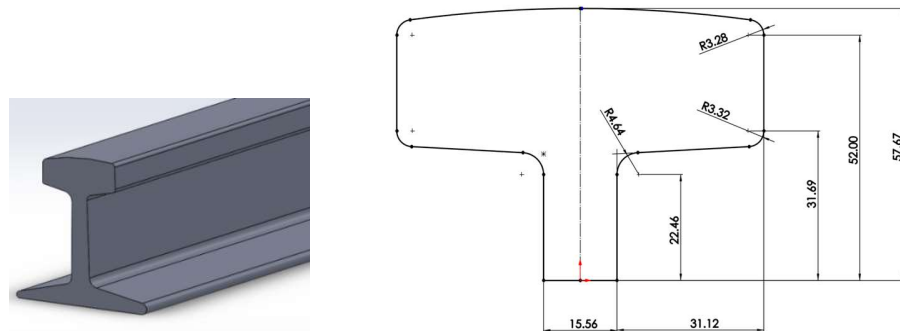
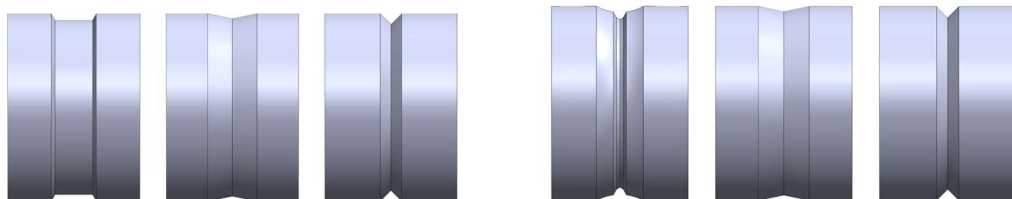


Figura 17. Sección transversal del riel de ferrocarril completo y dimensiones del riel antes del rolado.

La figura 18 muestra los rodillos utilizados para el proceso de la laminación del riel de ferrocarril, para este proceso en particular se utilizaron rodillos trio donde se tienen 3 pases de laminación juntos, estos pases son efectuados mediante un rodillo trio el cual es descrito a continuación:

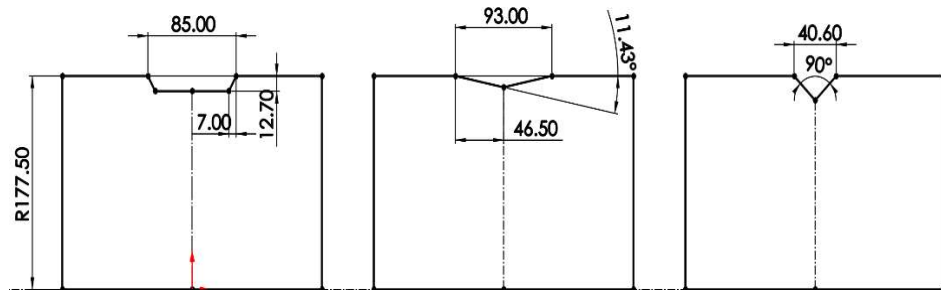


A) Geometría de rodillo inferior

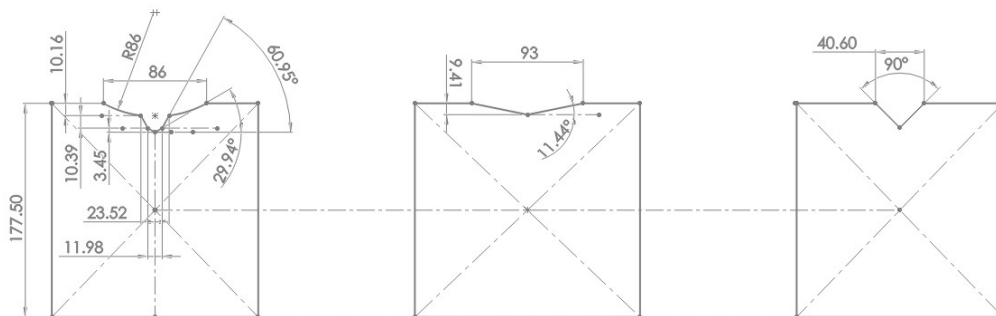
B) Geometría de rodillo superior

Figura 18. geometría de los rodillos superior e inferior de los primeros 3 pases.

La figura 19 muestra las dimensiones de los rodillos superior e inferior de los primeros 3 pases, así como los radios.



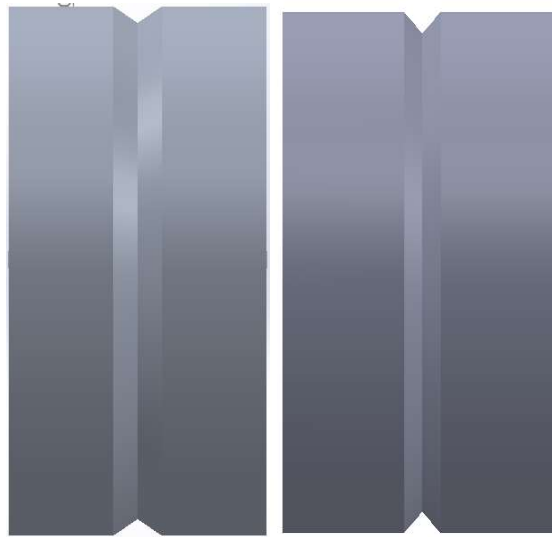
A) Dimensiones del rodillo inferior (en mm)



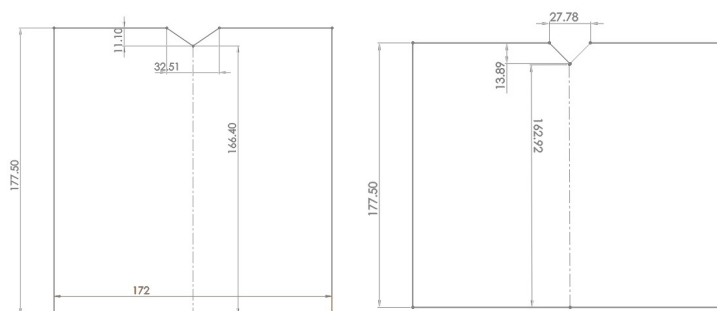
B) Dimensiones del rodillo inferior (en mm)

Figura 19. Dimensiones de los rodillos superior e inferior de los pases 1, 2 y 3

Los rodillos utilizados para las 2 últimas pasadas de laminado se muestran en la figura 20, en la figura 20b se muestra un detalle de sus dimensiones, el diámetro es de 304,8 mm.



A) Geometrías de los pases 4 y 5.



B) Dimensiones de los rodillos utilizados para los pases 4 y 5 (en mm).

Figura 20. Geometrías y dimensionado de los pases de laminación 4to y 5to.

En la figura 21 se muestran los rodillos con los que concluyen el proceso de laminación en los pases 6, 7, 8, 9 y 10, los cuales se realizaron para mejor visualización y entendimiento, sin embargo, no son parte del alcance del presente estudio.

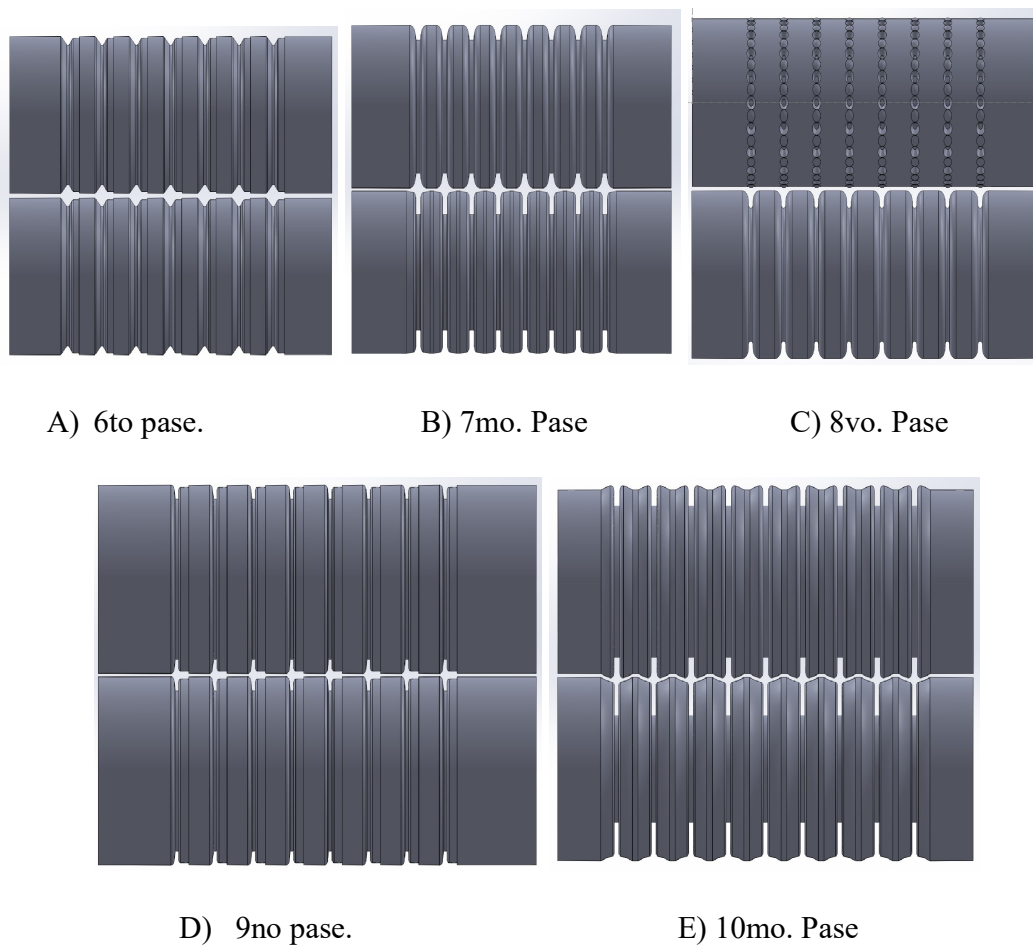


Figura 21, Geometría de los pases 6, 7, 8, 9 y 10 respectivamente.

En la figura 22 se muestran los productos resultantes de cada simulación, los cuales se realizó la representación digital de las áreas resultantes por medio del software solid words para visualizar cada uno de los pases resultantes.

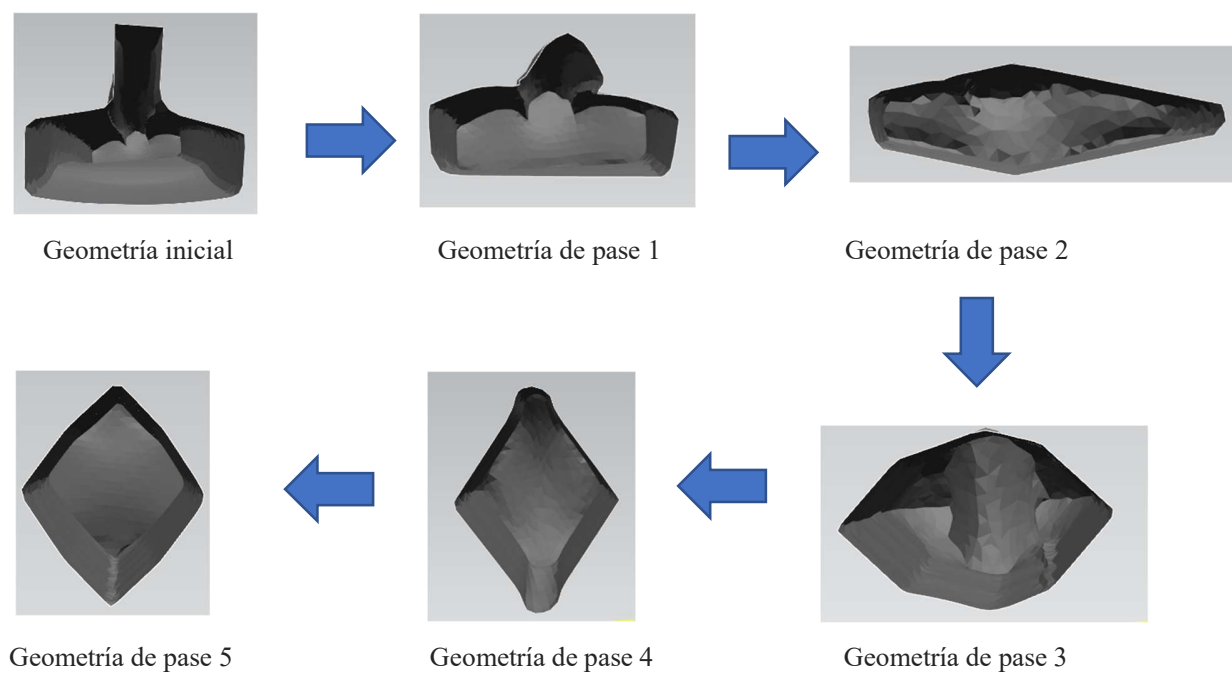


Figura 22. Riel después de cada uno de los pases de laminación.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la simulación se consideraron 2 rodillos comprimiendo el riel, una guía para el riel y un elemento de empuje para controlar la velocidad del riel.

Se seleccionó la parte superior del riel de ferrocarril y se realizaron comparativos de los primeros 5 pases con diferentes condiciones.

A continuación, se muestran los pases de laminación de los pases 1 al 5 (figuras 23 a 27).

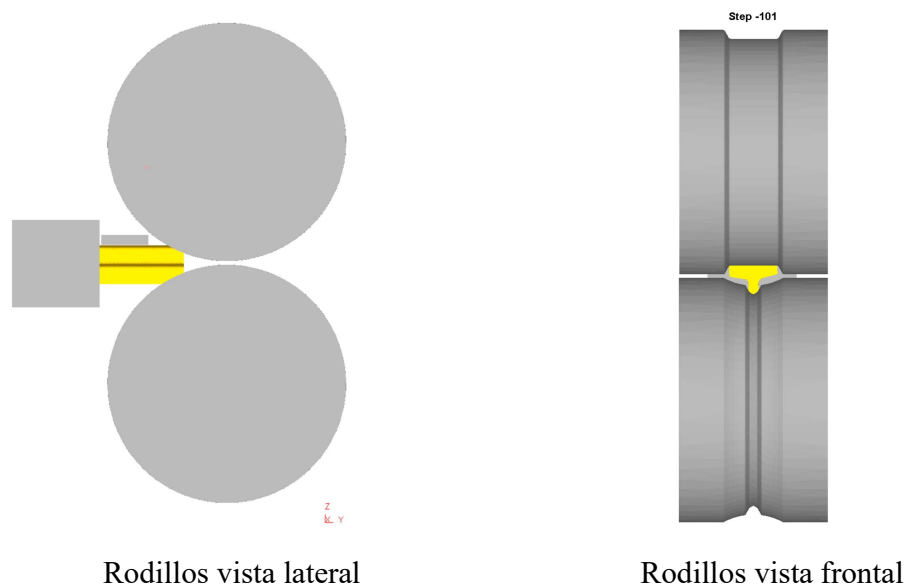


Figura 23. Pase 1 de la laminación en caliente visto desde 2 ángulos.

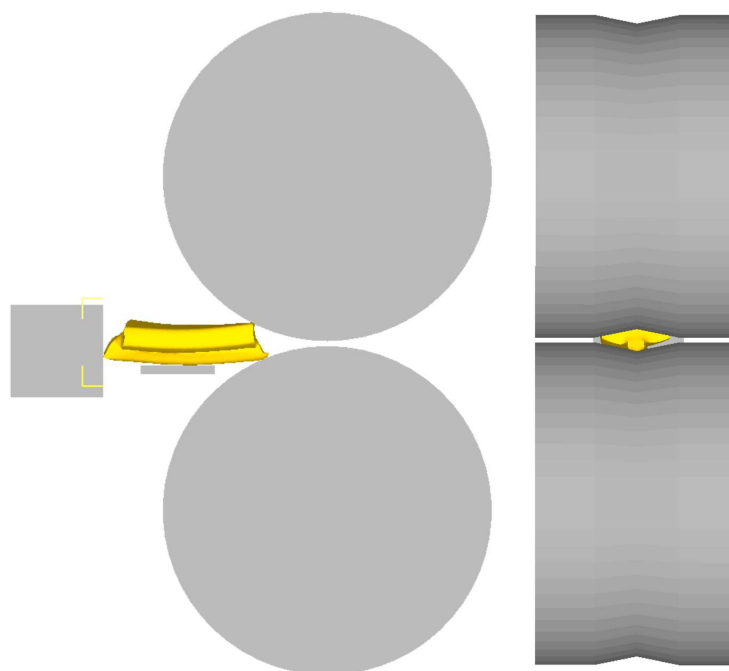


Figura 24. Pases 2 de la laminación en frío visto desde 2 ángulos.

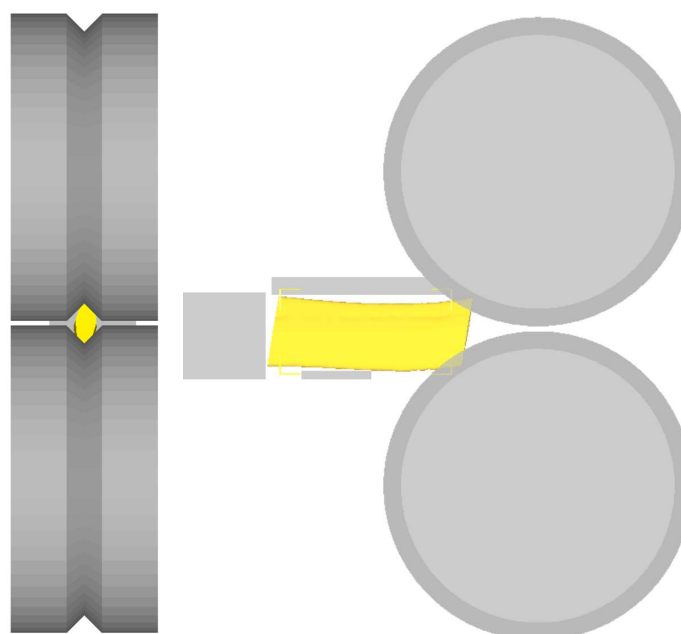


Figura 25. Pases 3 de la laminación en frío visto desde 2 ángulos.

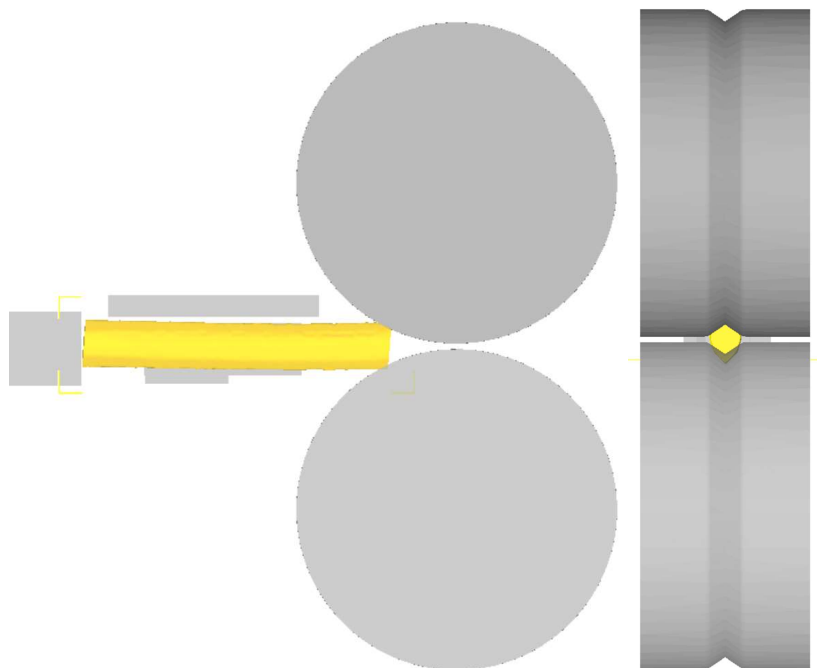


Figura 26. Pases 4 de la laminación en frío visto desde 2 ángulos.

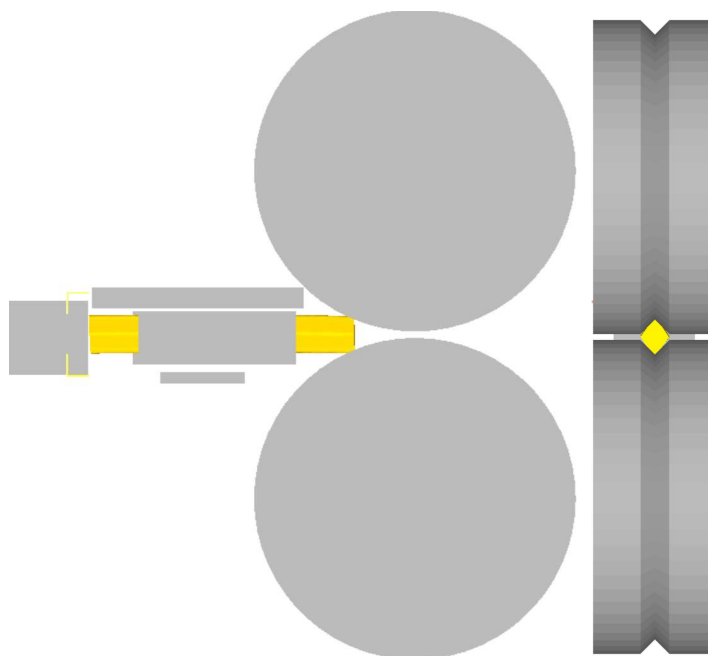


Figura 27. Pases 5 de la laminación en frío visto desde 2 ángulos.

A continuación, se muestran en las figuras 28 a 32 las geometrías resultantes del tocho después de pasar por los diferentes pases de laminación respectivamente, del pase 1 al pase 5.

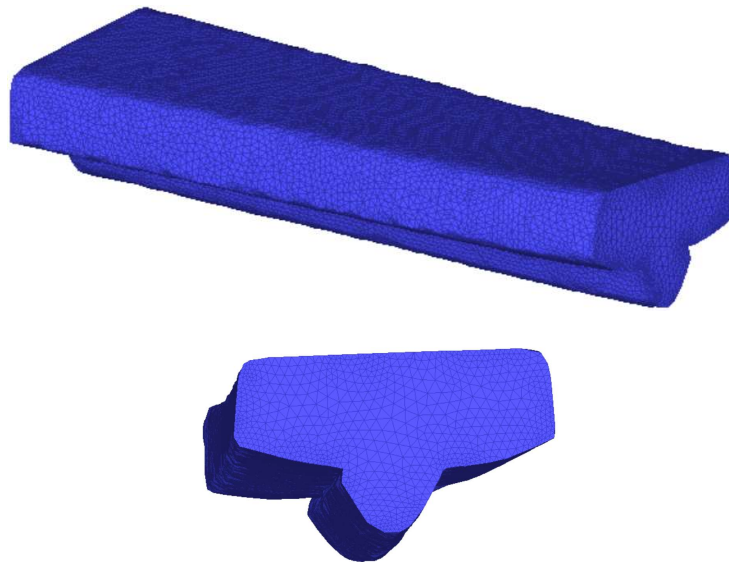


Figura 28. Geometría deformada después de pasar por el primer pase de laminación.

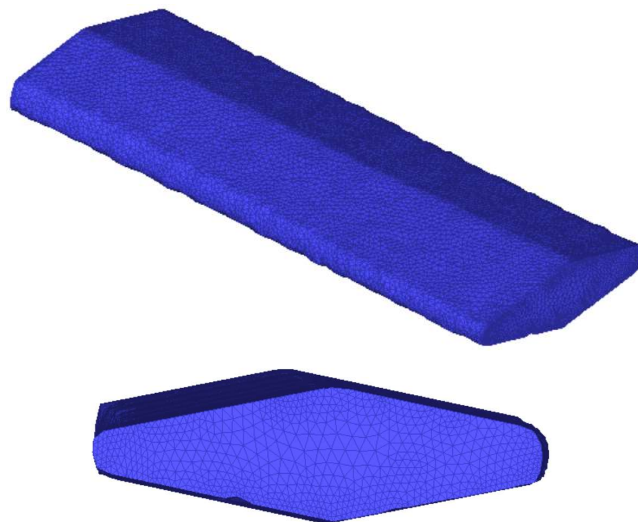


Figura 29. Geometría deformada después de pasar por el segundo pase de laminación.

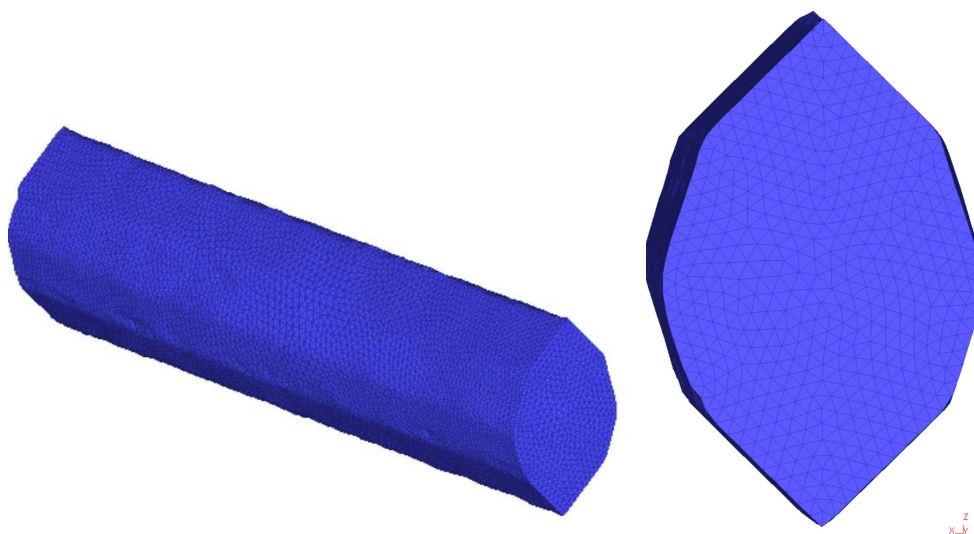


Figura 30. Geometría deformada después de pasar por el tercer pase de laminación.

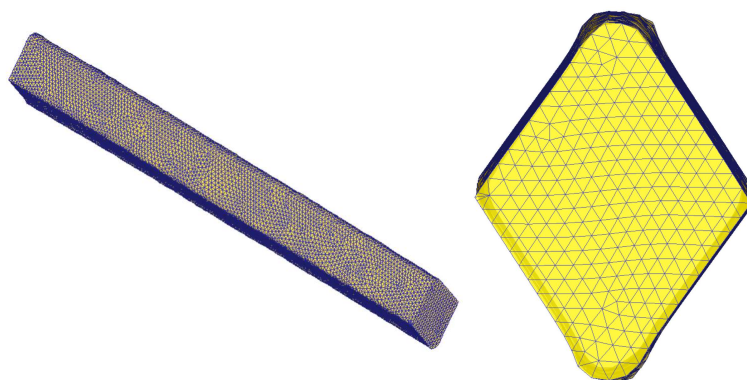


Figura 31. Geometría deformada después de pasar por el cuarto pase de laminación.

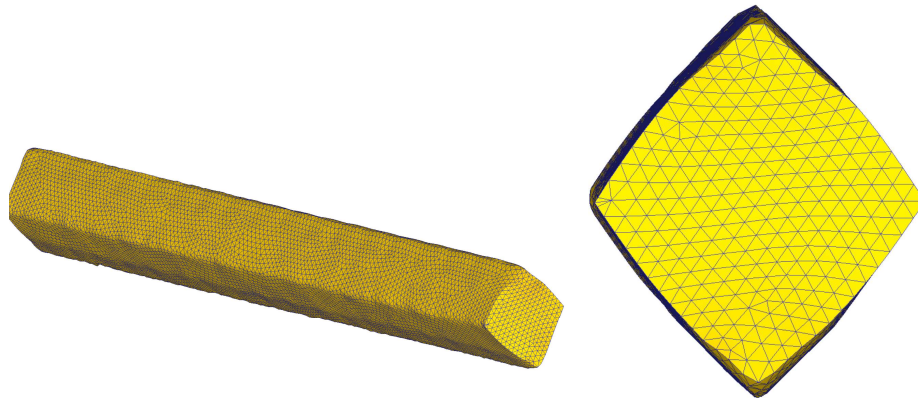


Figura 32. Geometría deformada después de pasar por el quinto pase de laminación.

A continuación, se presentan los resultados de su comportamiento, tales como la variación de temperatura, esfuerzos, cargas, tiempos, con lo cual se pudieron realizar análisis de los comparativos de cada uno de los pases resultantes y así determinar cuáles condiciones eran las más recomendadas para realizar dicho proceso de laminación en cada uno de los pases.

Las variables analizadas son:

- a) Cargas de laminación (fuerza de separación) vs Tiempo.
- b) Par o Torque vs Tiempo
- c) Diferencia de esfuerzos
- d) Homogeneidad de la deformación
- e) Temperatura vs Tiempo

A continuación, se aprecian dichos comparativos para cada uno de los pases:

6.1 Pase 1:

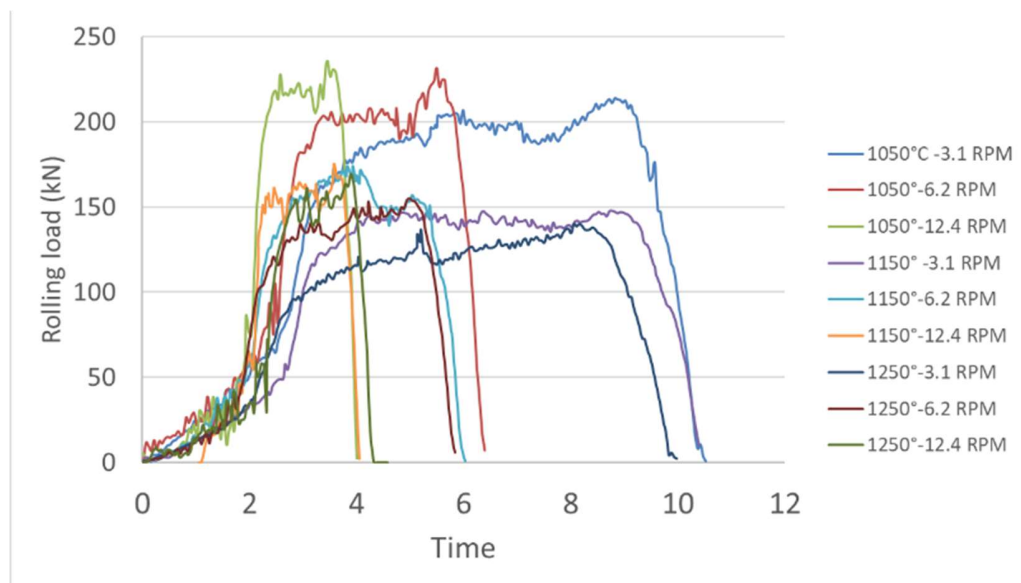


Figura 33. Cargas de laminación vs tiempo para primer pase.

En la figura 33 se muestran los resultados obtenidos en el pase 1 considerando 2 variables con 3 diferentes parámetros: temperaturas a 1050°C, 1150°C y 1250°C; y velocidades de giro del rodillo a 3.1 RPM, 6.2 RPM y 12.4 RPM.

Se observa un comportamiento de incremento en la carga en temperaturas más bajas, y el tiempo más reducido en las velocidades del rodillo más bajas, los valores más altos de torque mostrados oscilan en los 200 kN.

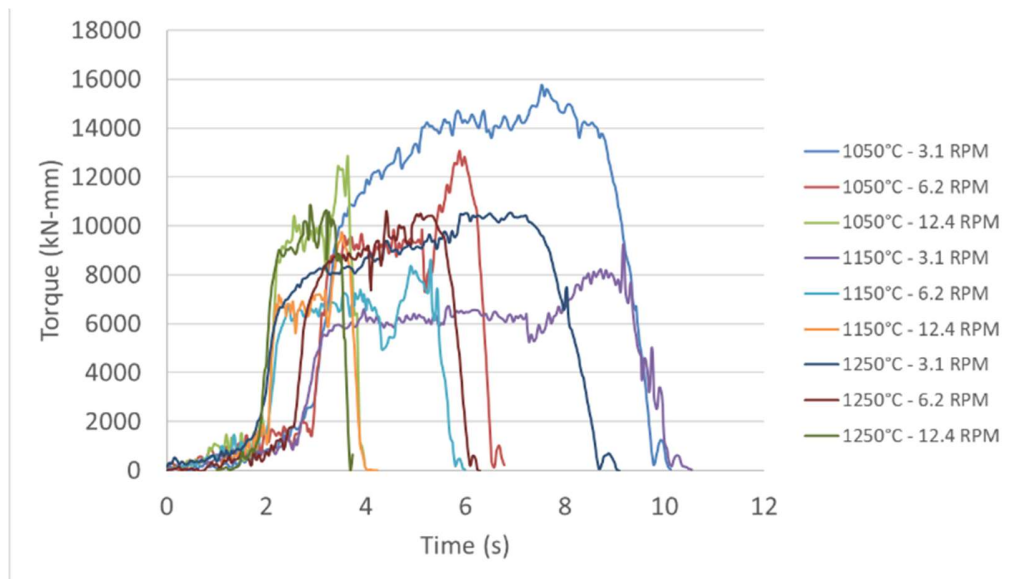


Figura 34. Par o torque vs tiempo para primer pase.

Los resultados obtenidos en la figura 34 muestran para la evaluación del primer pase de laminación para el rodillo superior considerando los 3 valores de temperatura y velocidad, se espera el mismo comportamiento de torques altos en temperaturas bajas y viceversa, sin embargo, en esta corrida no se observa este comportamiento en algunos casos específicos en la temperatura más alta 1250° y velocidad 3.1 RPM y 6.2 RPM.

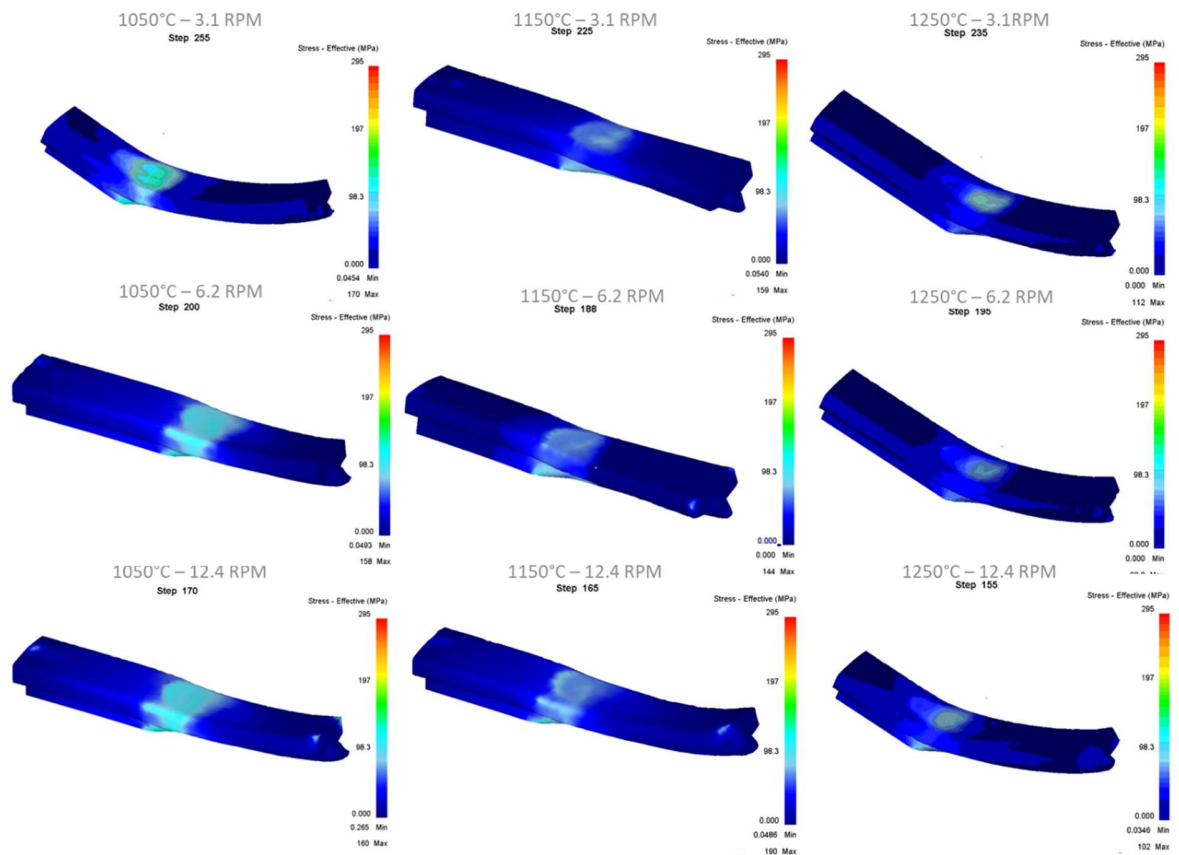


Figura 35. Stress efectivo en el riel después del 1er pase.

La figura 35 muestra los resultados obtenidos de la primera pasada de laminación considerando tres valores de temperatura y velocidad de laminación. Se puede observar que la heterogeneidad de la deformación es diferente al aumentar la temperatura. Esto puede deberse a la naturaleza de las diferentes propiedades mecánicas debidas a los cambios de temperatura. También se puede notar que el área de contacto no cambia al aumentar la velocidad de rodadura. Observe también que la curvatura de la palanquilla cambia a medida que aumenta la temperatura. Esto suele ocurrir en la práctica produciendo material atascado debido a curvaturas excesivamente altas. Se pueden generar grandes costes para “aplanar” la pieza de trabajo para entrar en la siguiente pasada.

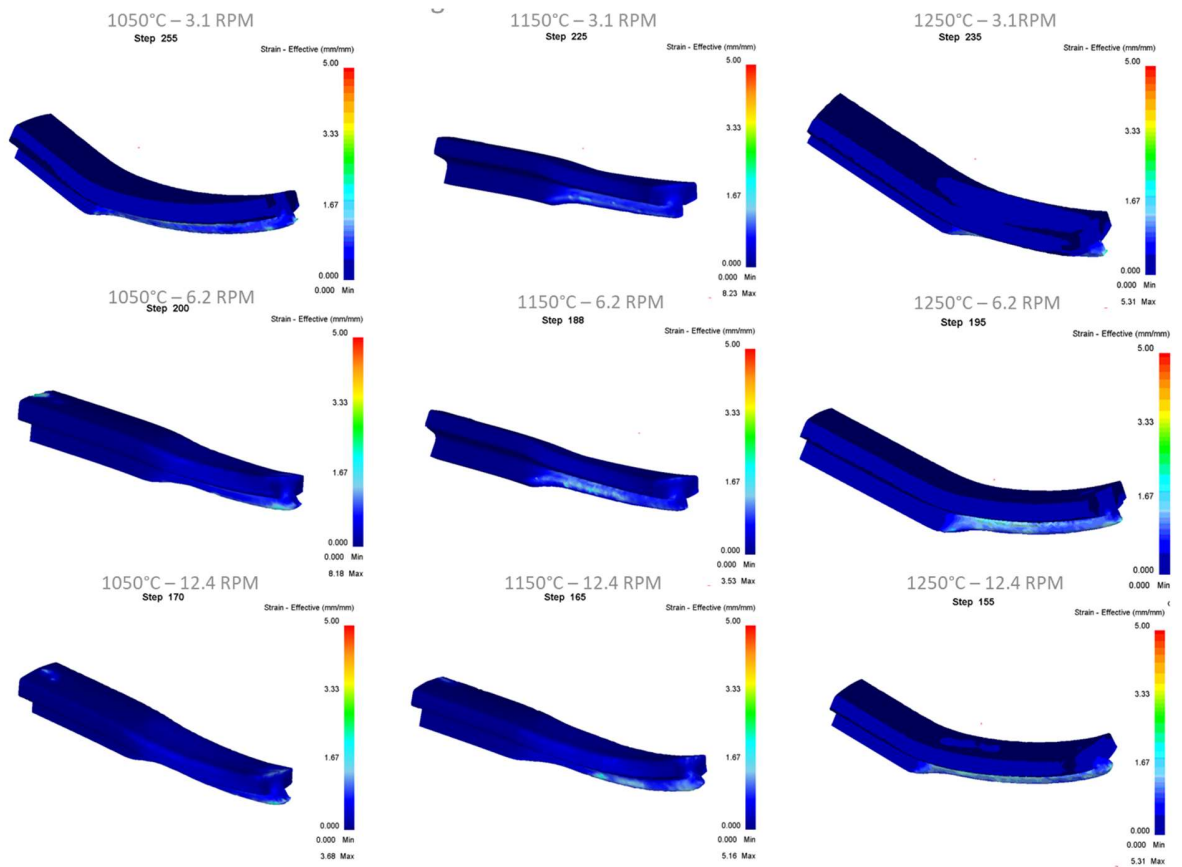


Figura 36. Deformación en el riel después del 1er pase.

La figura 36 muestra la comparación de la deformación entre los resultados de la primera pasada de laminación. A medida que aumenta la velocidad del rodillo, se detectan regiones de mayor deformación concentrada en la región más delgada de la geometría.

Es de llamar la atención que en esta primera corrida se observa un pandeo en las corridas con la velocidad más alta (1250°).

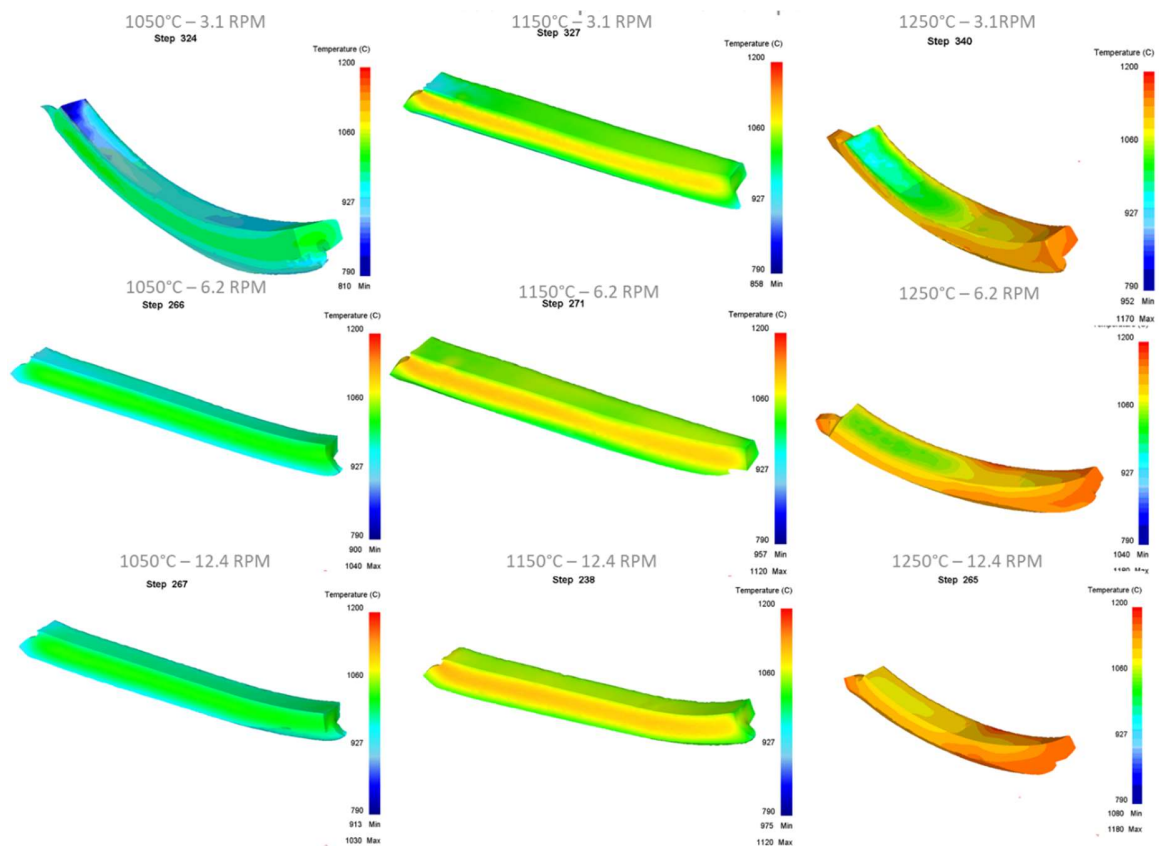


Figura 37. Gráfico de temperatura del riel.

La figura 37 muestra la distribución de temperatura después del primer paso. Estos valores de temperatura heterogéneos se utilizan para los siguientes pasos. La misma escala de color se utiliza solo con fines comparativos.

Una vez analizados los diferentes rubros del tocho para el primer paso, se procede a efectuar una evaluación similar para el resto de los pasos de laminación.

6.2 Pase 2:

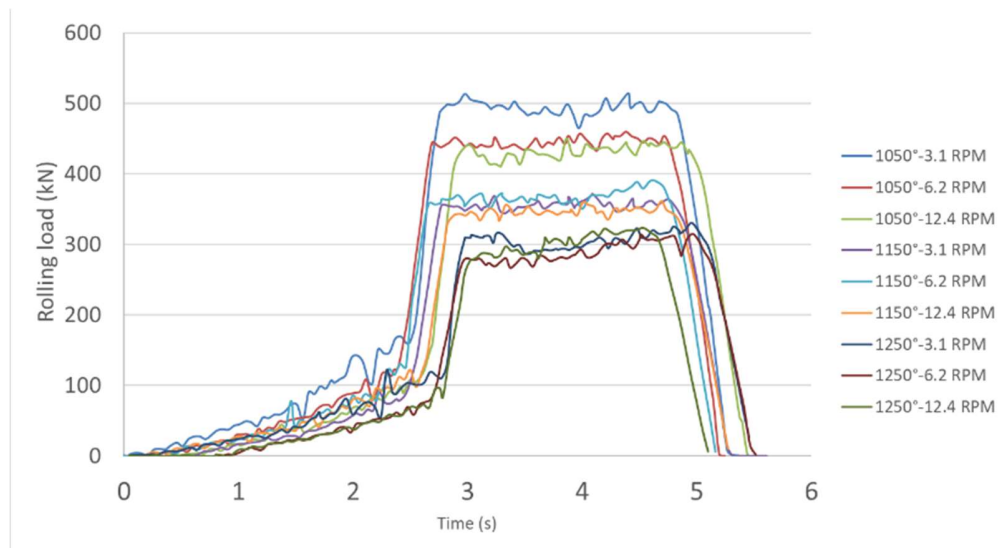


Figura 38. Cargas de laminación vs tiempo para 2do pase.

La figura 38 muestra la carga de laminación en el segundo pase, como se esperaba se mantiene la tendencia a valores de carga mas altos en temperaturas mas bajas, es de llamar la atención que los tiempos en esta corrida se observan similares independientemente de la velocidad del rodamiento, también sobresale el valor de carga para el caso 1050°C -3.1 RPM el cual ronda los 500 kN.

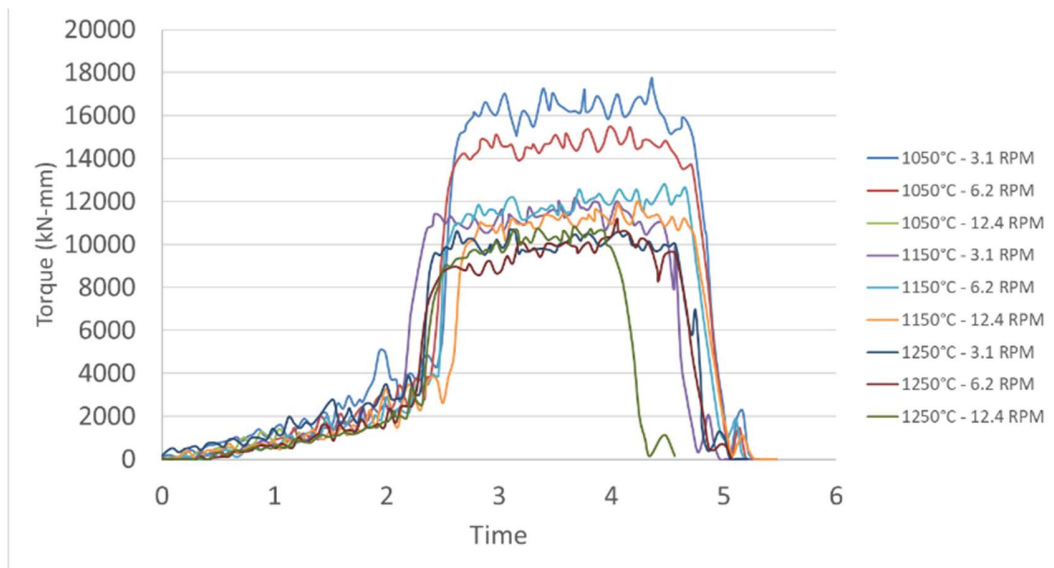


Figura 39. Par o torque vs tiempo para 2do pase.

En la figura 39 muestra la información obtenida en torque para el segundo pase, se observa el valor más alto (16kN) para el caso de 1050°C -3.1 RPM, mismas condiciones que en el caso de carga.

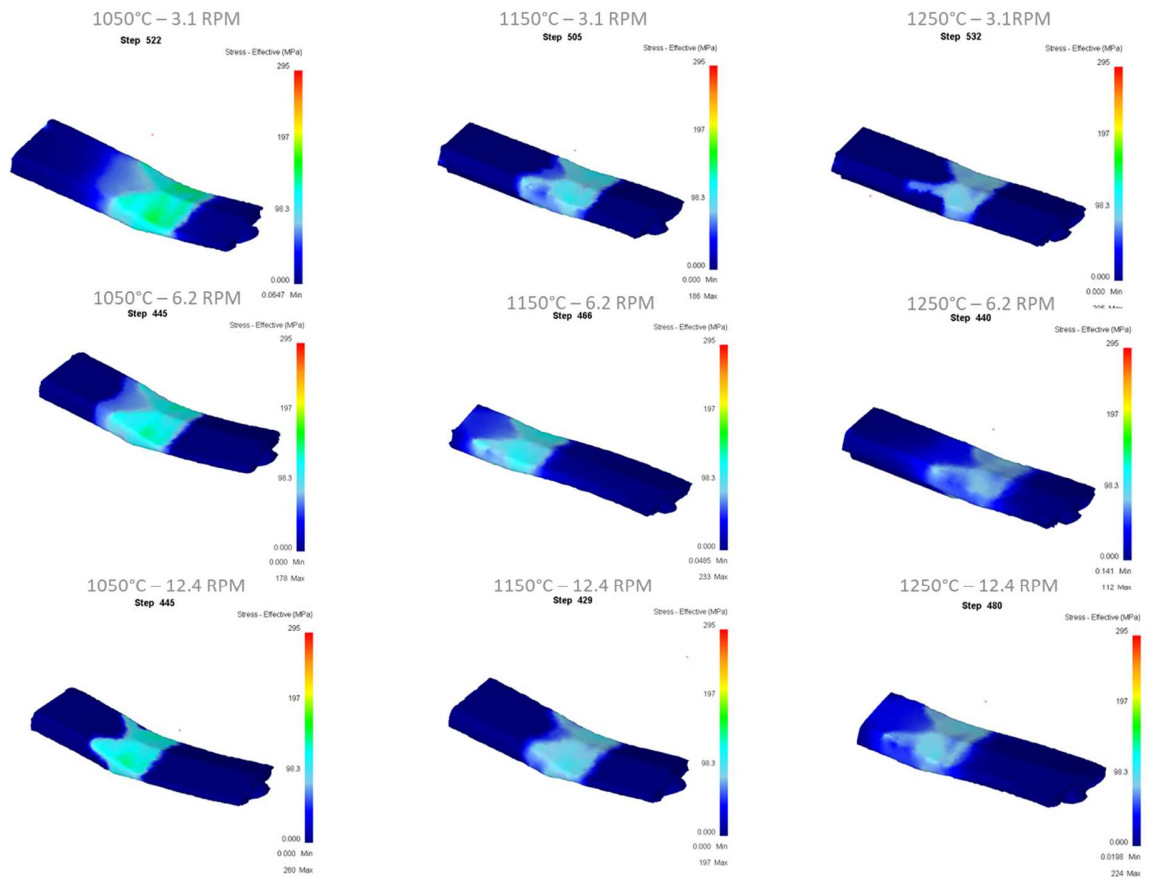


Figura 40. Esfuerzos en riel después del 2do pase.

La figura 40 muestra el esfuerzo en el riel del segundo pase, observan resultados consistentes, mayor concentración de esfuerzo en temperaturas mas bajas, no se observan puntos con concentración de esfuerzos o alguna deformación irregular.

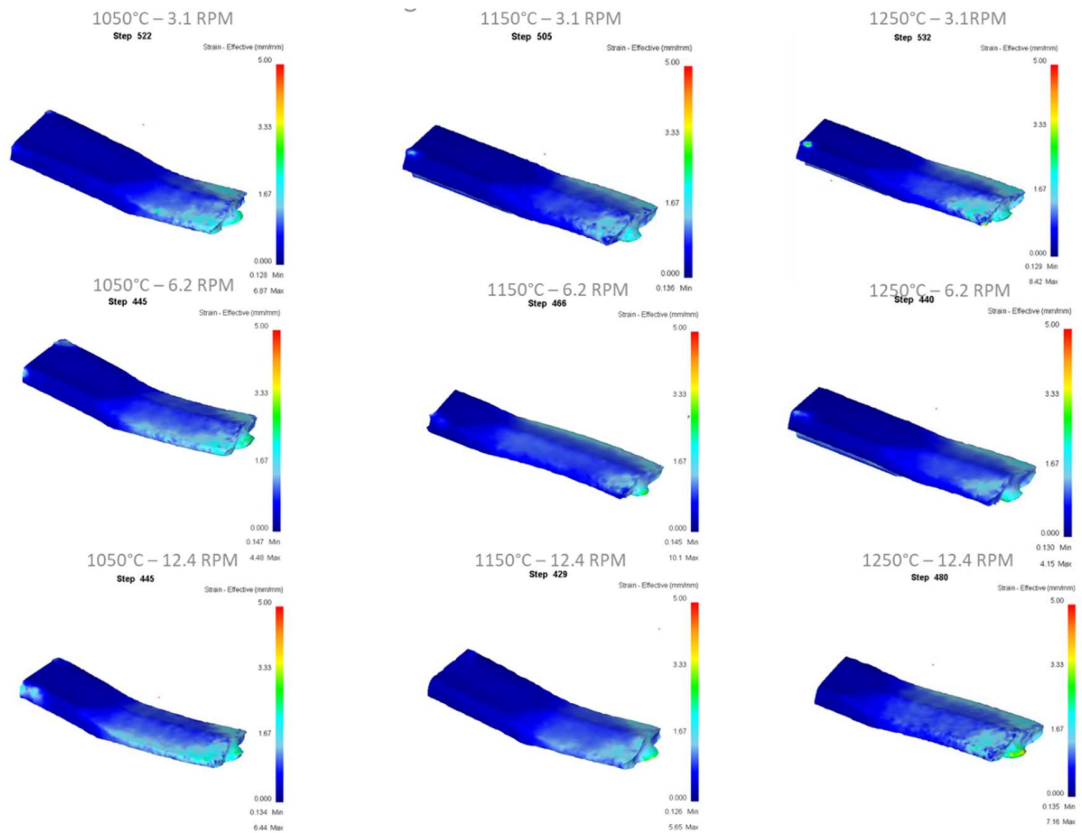


Figura 41. Deformación en riel después del 2do pase.

En la figura 41 se observa la comparación de deformación efectiva entre los resultados de la segunda laminación. Se observa un comportamiento consistente con el primer pase de laminación mostrando distribuciones homogéneas y sin aparecer concentración en la deformación.

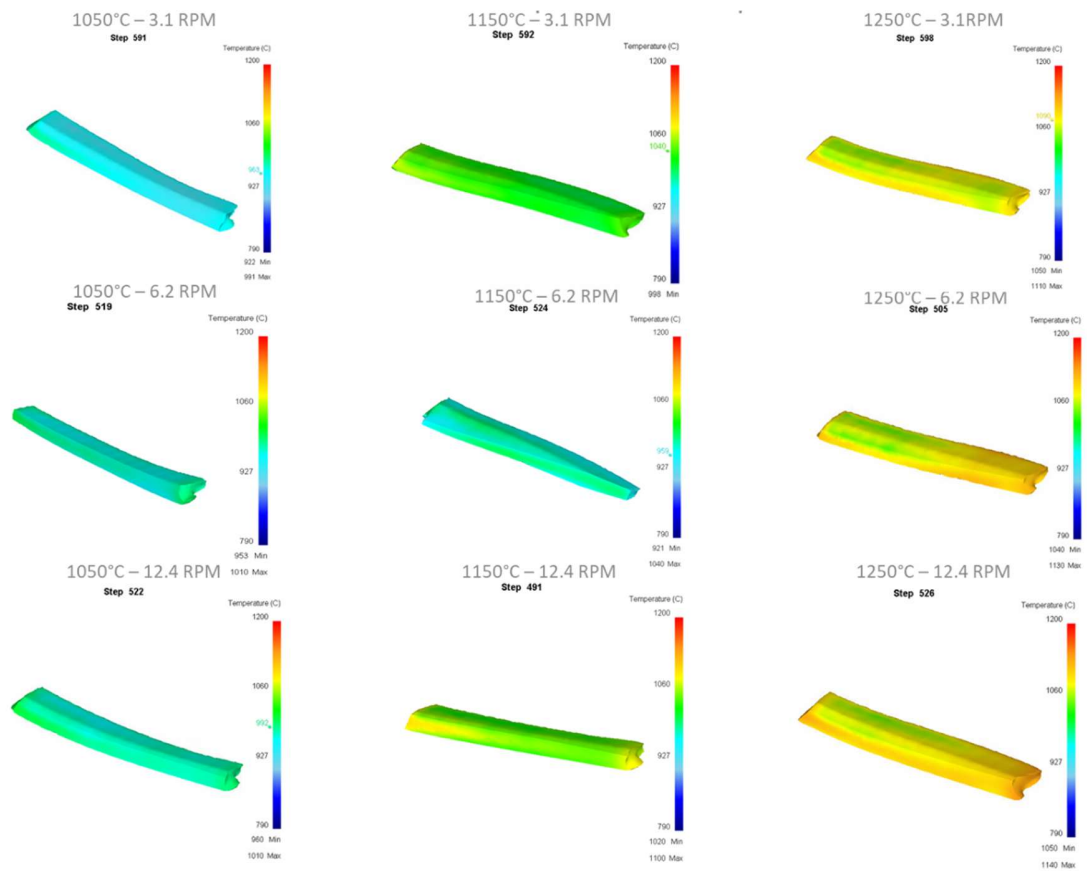


Figura 42. Gráfico de temperatura del riel para el 2do pase.

Para el gráfico de temperatura mostrado en la figura 42 se pueden mencionar condiciones de temperatura homogéneas en la pieza, donde no se observan puntos calientes derivados de la concentración de temperatura en puntos específicos.

6.3 Pase 3

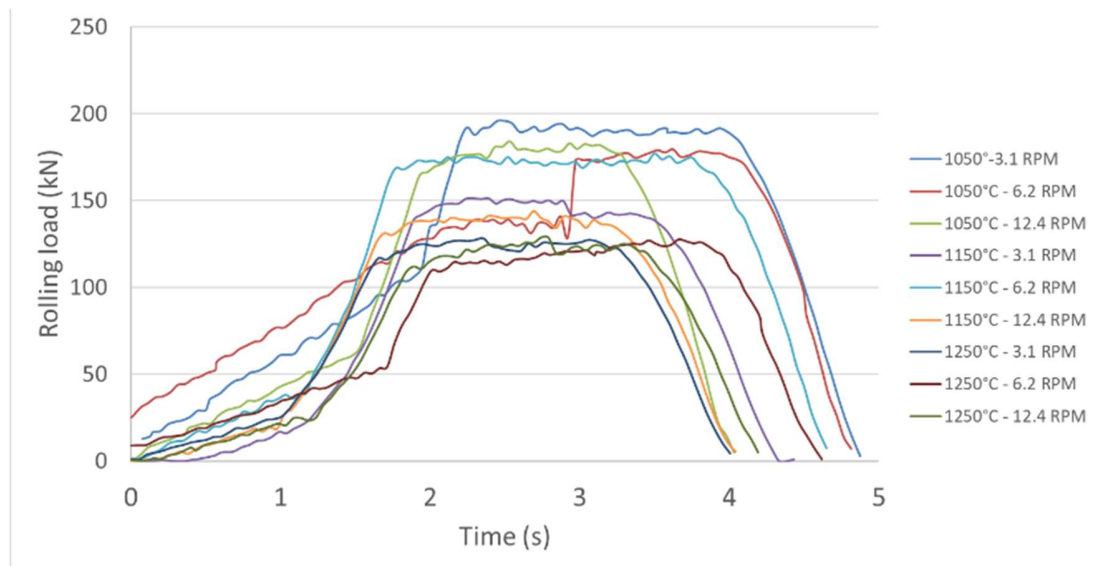


Figura 43. Cargas de laminación vs tiempo para 3er pase en el rodillo superior.

La figura 43 muestra el comportamiento de las cargas para el tercer pase de laminación, se observan cargas con valores cercanos a los 200kN para el caso de la temperatura y velocidad más baja (1050°C-3.1 RPM).

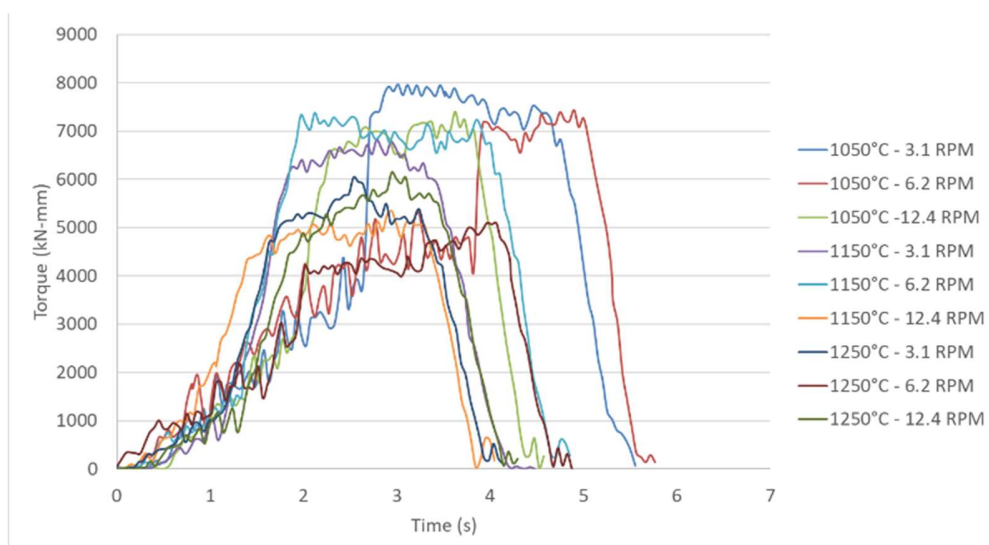


Figura 44. Torque vs tiempo para 3er pase.

La figura 44 muestra un comportamiento consistente con los 2 pases anteriores, sin embargo, a diferencia de los pases mencionados, se tiene un número considerable de gráficos con ondulaciones, algunas de las causas que pudieran dicho comportamiento en la gráfica de toque serían los siguientes: dificultad para encontrar el ángulo óptimo de la mordida de los rodillos, o inestabilidad en la corrida de simulación.

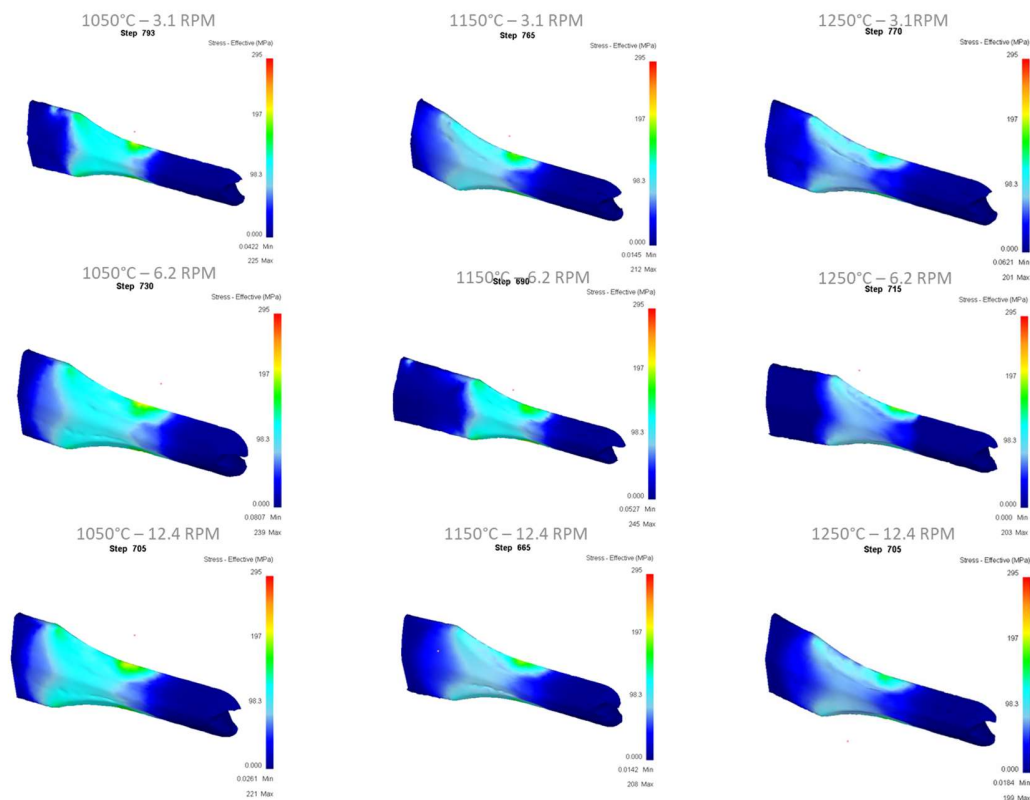


Figura 45. Esfuerzo en riel después del 3er pase.

En la figura 45 muestra la relación esfuerzo vs temperatura consistente con lo esperado incluso aun y considerando que el presente pase muestra el mayor impacto en la deformación de la geometría del riel, en términos de concentración de esfuerzos se observa una concentración esperada en el punto de contacto con el rodillo.

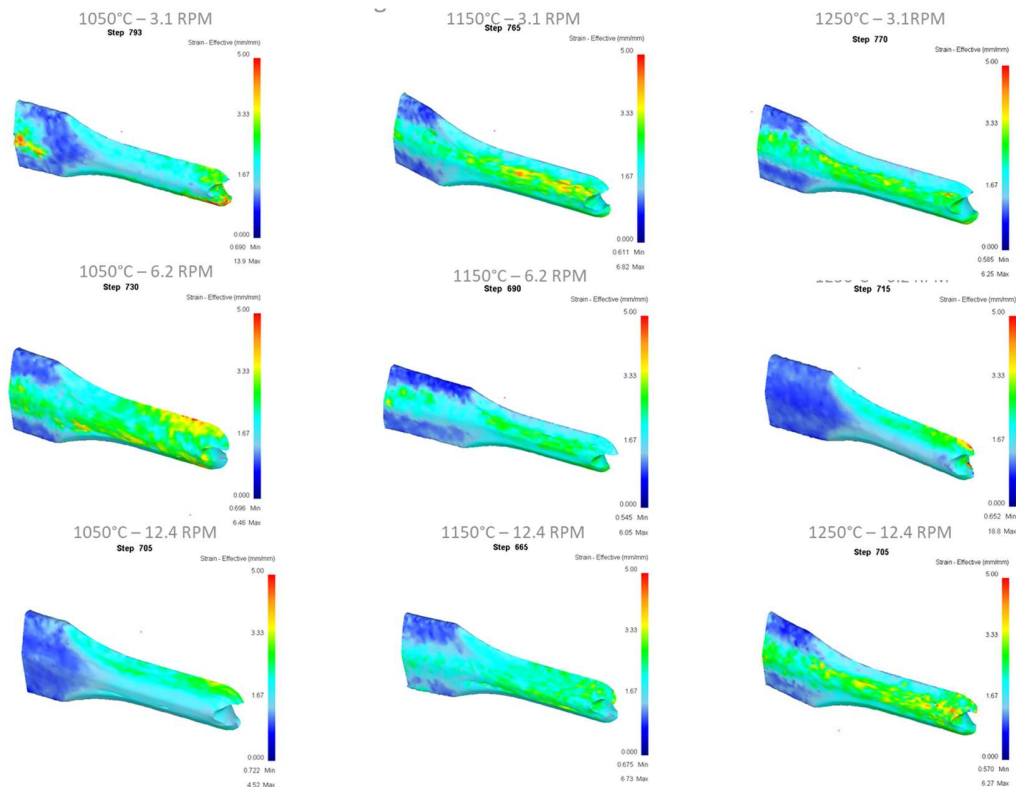


Figura 46. Deformación en riel después del 3er pase.

En la figura 46 se puede observar concentraciones de estrés en al menos 6 de las 9 corridas mostradas, teniendo puntos de esfuerzo efectivo en zonas puntuales del tocho, las corridas de 1150°C a 6.2 RPM, 1150°C a 12.4 RPM y 1050°C a 12.4 RPM son las 3 corridas que muestran las concentraciones menores en términos de deformación. Se destaca que estos puntos específicos de estrés no se encuentran en el área de deformación de los rodillos, se buscarán estudios adicionales en estos casos para identificar áreas de oportunidad en la metodología propuesta.

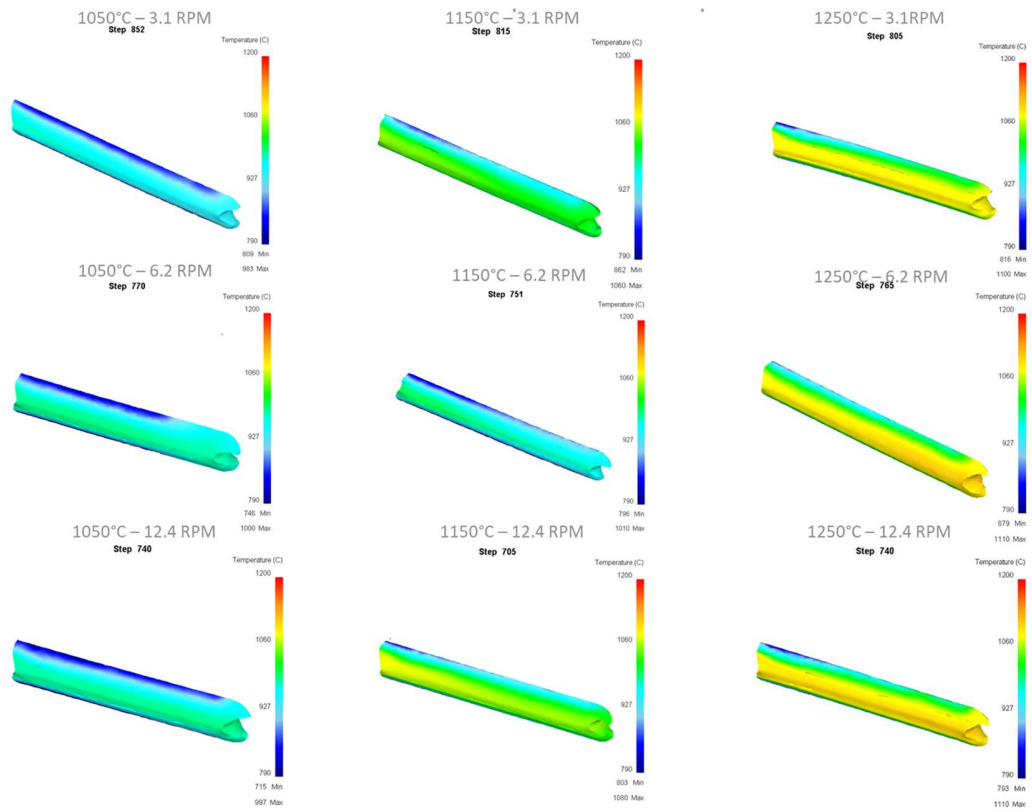


Figura 47. Gráfico de temperatura del riel para el 3er pase.

En los resultados mostrados en la figura 47 se puede ver consistencia en las temperaturas de cada caso, mantienen la tendencia de los pases anteriores.

6.4 Pase 4

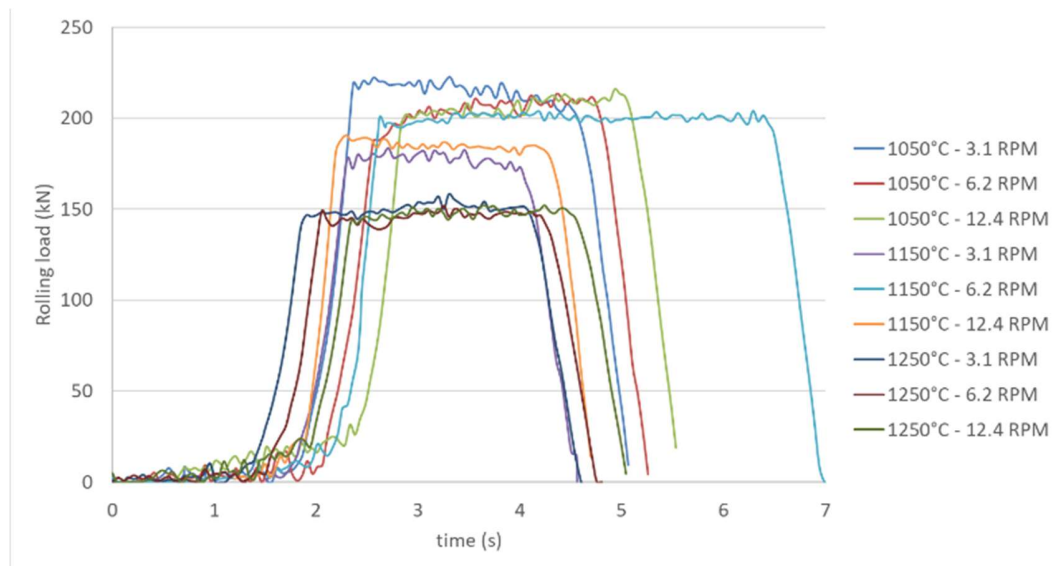


Figura 48. Cargas de laminación vs tiempo para 4to pase.

En la figura 48 se muestra la carga de laminación para el 4to pase, se observan los valores de carga esperados en relación con la temperatura, los valores mas altos en las temperaturas mas bajas, hay un caso que sale de la tendencia (1150°C-6.2RPM), y adicionalmente se puede mencionar que los valores máximos de carga oscilan en valores apenas por encima de los 200kN, esto se justifica por la disminución en el % de reducción de área en el pase de laminación en comparación con los pases anteriores.

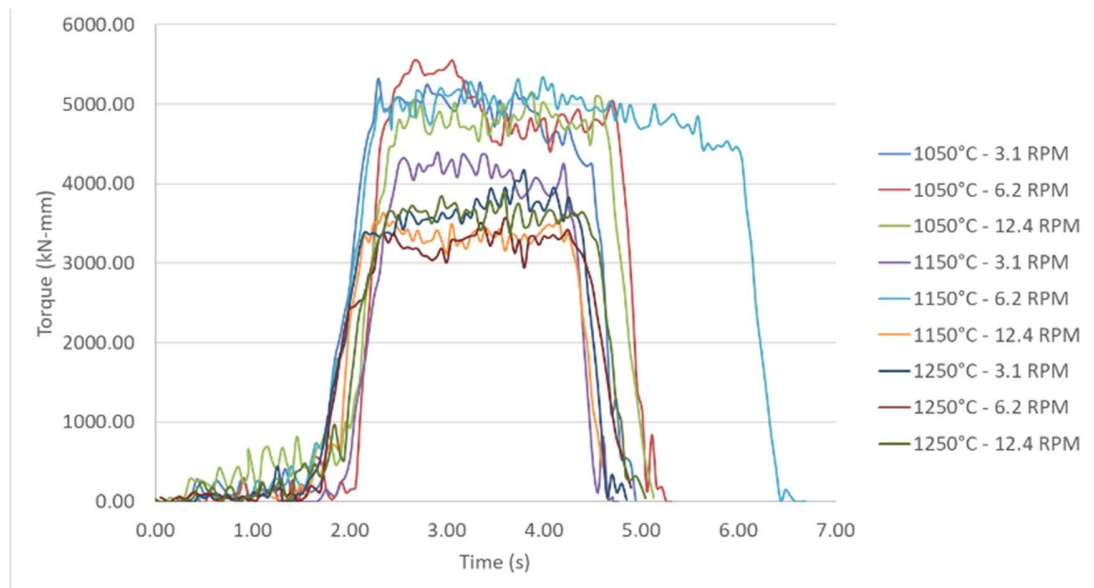


Figura 49. Torque vs tiempo para 4to pase.

La figura 49 muestra el comportamiento del torque en el 4to pase de laminación, se observa igualmente que en la grafica de carga un comportamiento distinto para la corrida 1150°C-6.2RPM en el cual no se identificó una posible causa, también se muestra la ondulación vista en una corrida anterior, este comportamiento no se pudo relacionar con alguna variable del sistema, vale la pena revisar la inestabilidad de la simulación y la mordida de este pase específicamente en futuros trabajos para encontrar tendencias y áreas de oportunidad.

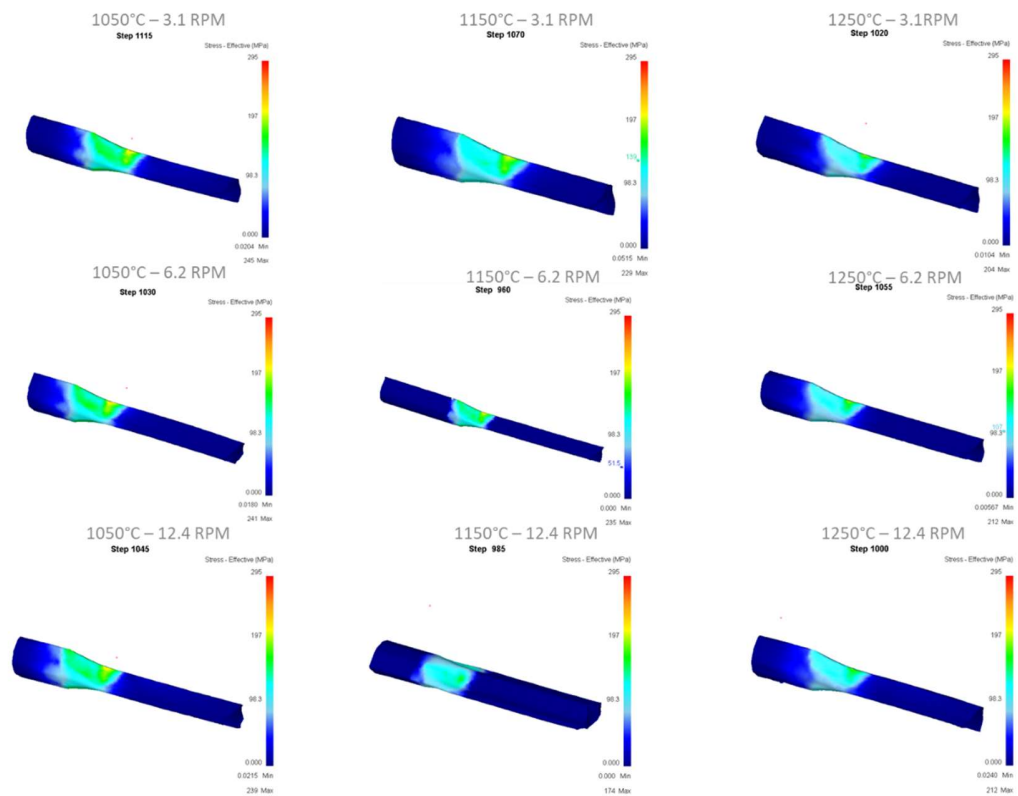


Figura 50. Esfuerzo en riel después del 4to pase.

La figura 50 muestra el esfuerzo ejercido en el riel para la 4to pase, muestra pocas diferencias entre las diferentes variables en términos de estrés, los valores y la ubicación del estrés se pueden observar de manera consistente, por lo que no se justifica un impacto en las variables temperatura o velocidad en este caso.

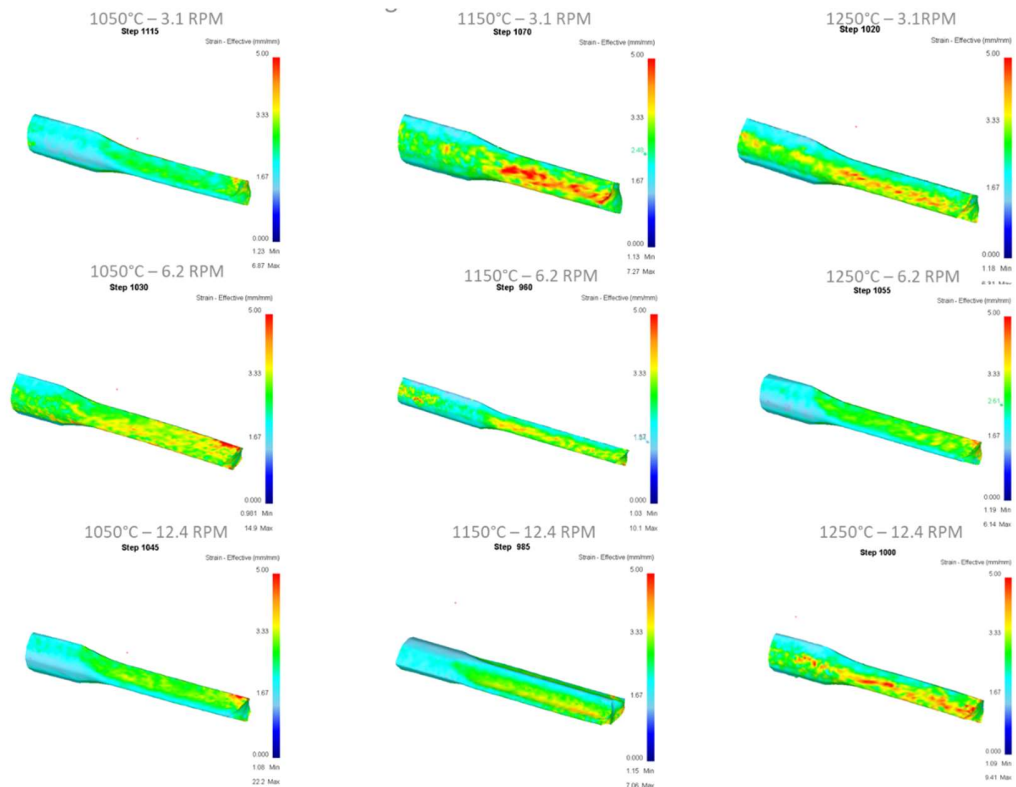


Figura 51. Deformación en riel después del 4to pase.

En los resultados de la 4ta corrida del riel plasmadas en la figura 51 nuevamente muestra concentraciones puntuales de esfuerzos en zonas alejadas de los rodillos, no se identificó una tendencia hacia las variables estudiadas como temperatura o velocidad en los casos evaluados, ni hacia los parámetros registrados en las corridas como gradiente o velocidades de deformación.

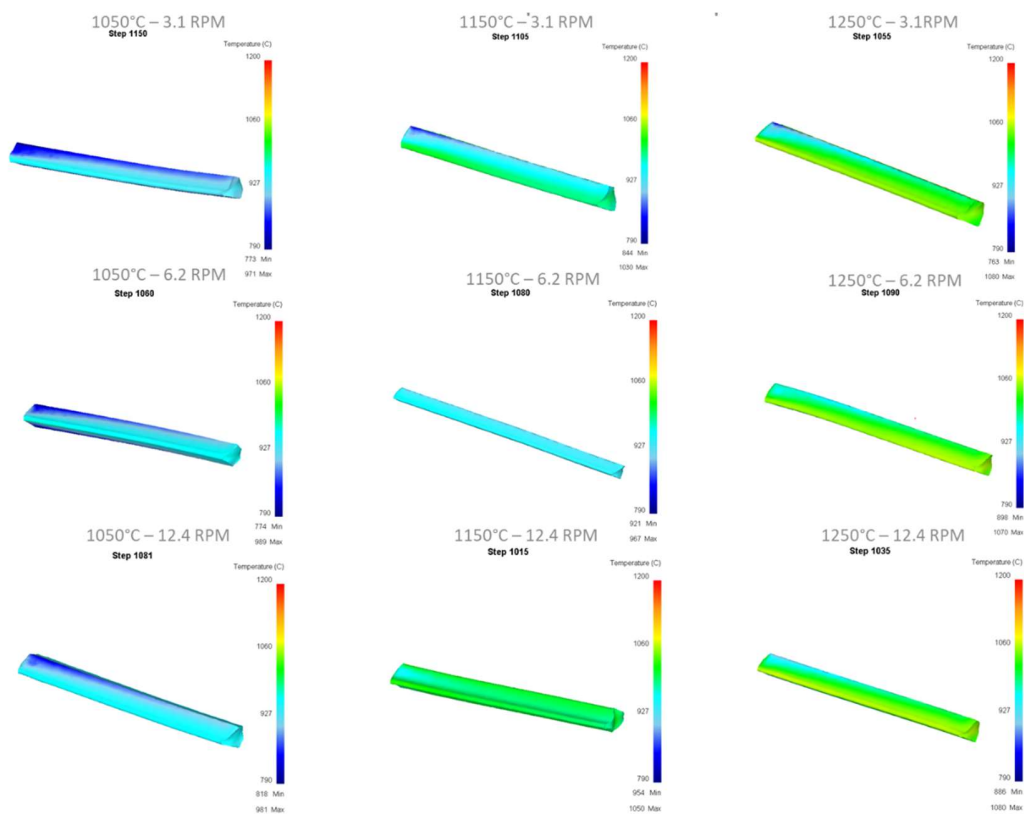


Figura 52. Gráfico de temperatura del riel para 4to pase.

Se puede observar en los resultados de la figura 52 una temperatura constante en el tocho después del 4to pase, sin mostrar algún punto caliente o temperatura elevada para los 9 casos mostrados, por lo que no se reportan hallazgos relevantes.

6.5 Pase 5

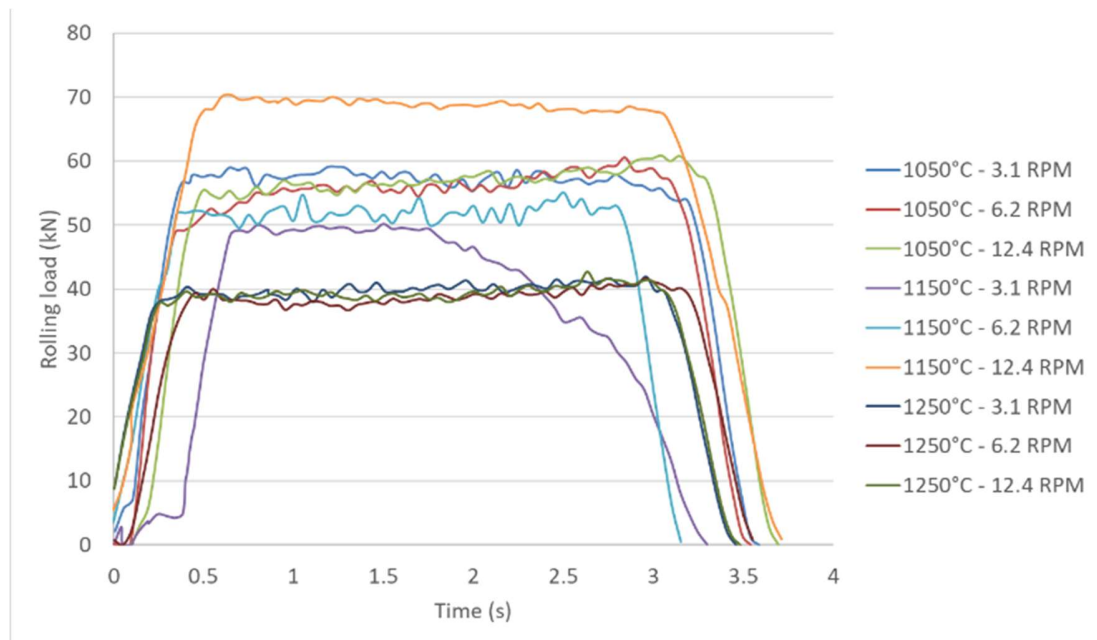


Figura 53. Cargas de laminación vs tiempo para 5to pase.

En la figura 53 se puede observar las cargas del último pase de laminación, se pueden observar cargas alrededor de 50-60kN, reflejo de tener el menor % de reducción de área por el laminado, se observan condiciones fuera de la tendencia en la versión 1150°C -12.4RPM, no se tiene identificado la relación de las variables monitoreadas vs la versión antes mencionada, se considerará hacer corridas adicionales bajo esas condiciones para trabajos futuros.

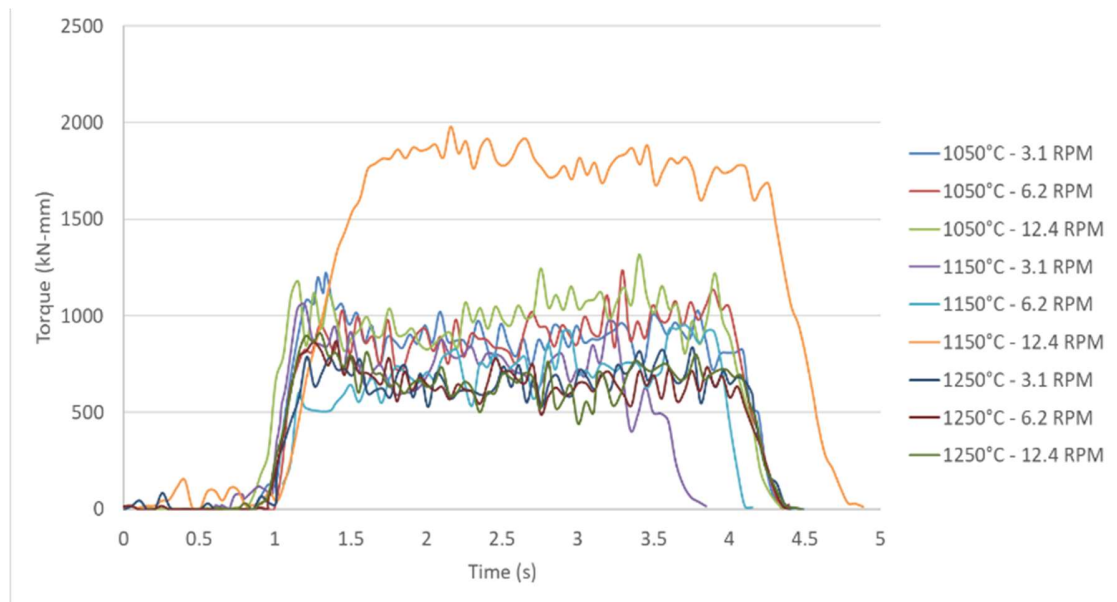


Figura 54. Torque vs tiempo para 5to pase.

Para el último paso del tocho, (figura 54) no se observan diferencias significativas en las diferentes variables de la evaluación, se mantiene la inconsistencia en el caso 1150°C-12.4RPM que refuerza la necesidad de hacer evaluaciones adicionales en trabajo futuros en esas condiciones, adicionalmente se observa inestabilidad en las corridas.

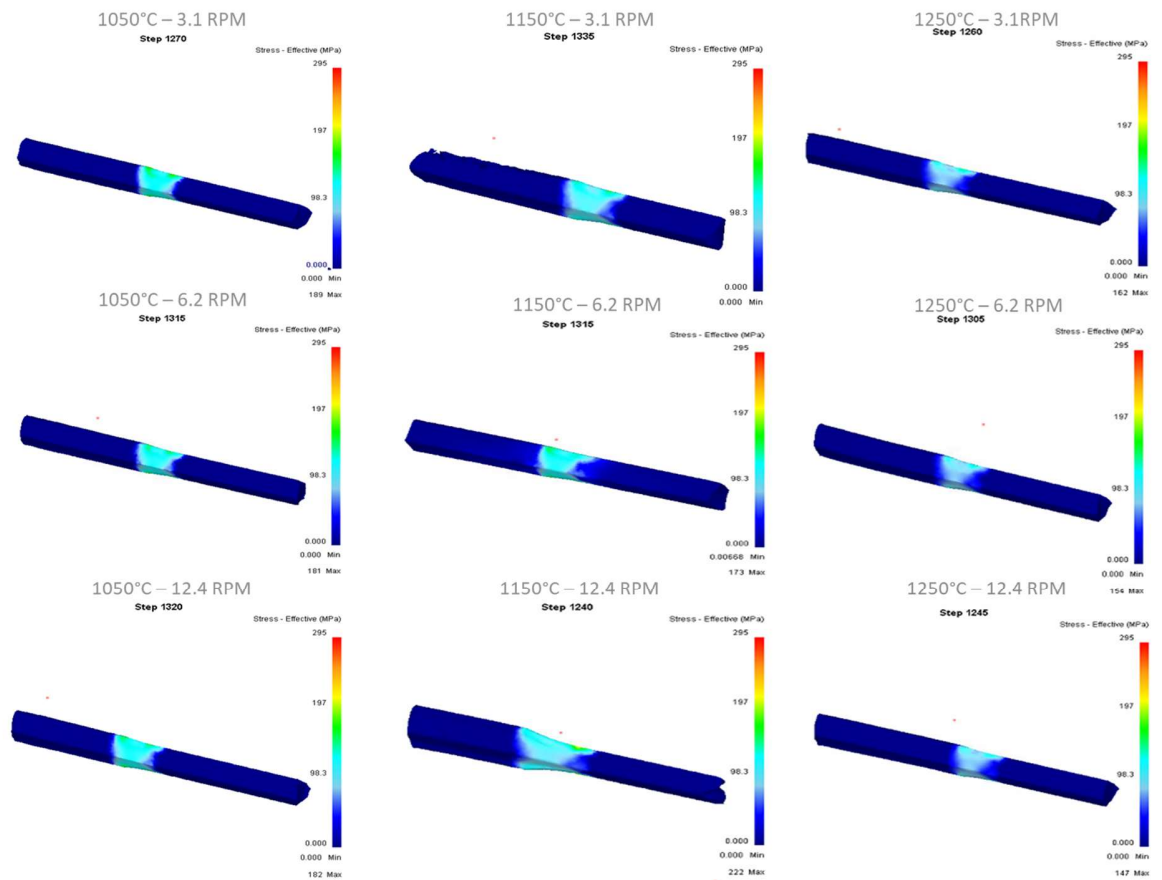


Figura 55. Esfuerzo en riel después del 5to pase.

Para el 5to pase de laminación en el tocho, (figura 55) se puede observar una concentración de esfuerzo en magnitud y ubicación acorde a lo esperado para el pase.

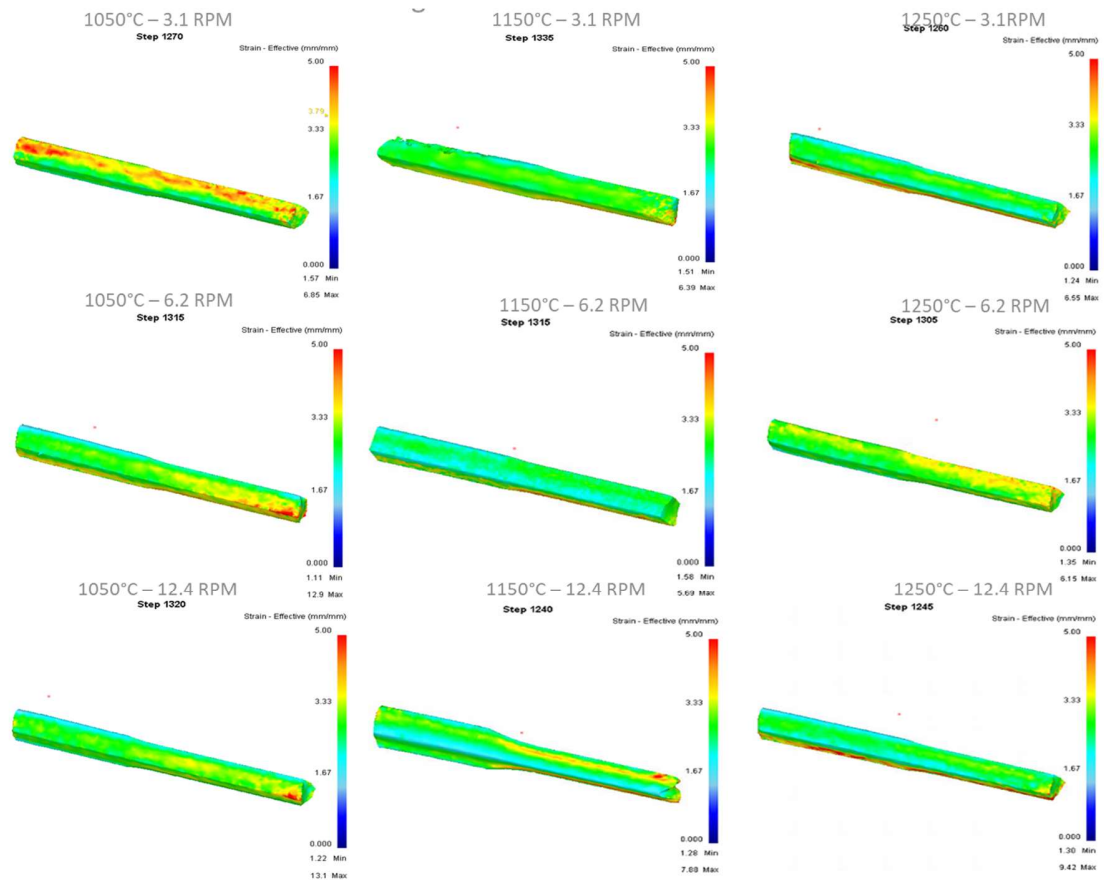


Figura 56. Deformación en riel después del 5to pase.

En la figura 56 se muestran el esfuerzo efectivo debido a las simulaciones de la 5ta pasada del Riel superior, a diferencia de las otras simulaciones, aquí se pueden ver pequeñas concentraciones en diferentes lugares del Riel dependiendo del recorrido que se tenga, apareciendo en la parte superior (1150° C-12.4 RPM) o parte inferior (1150°C-6.2 RPM) según el caso observado.

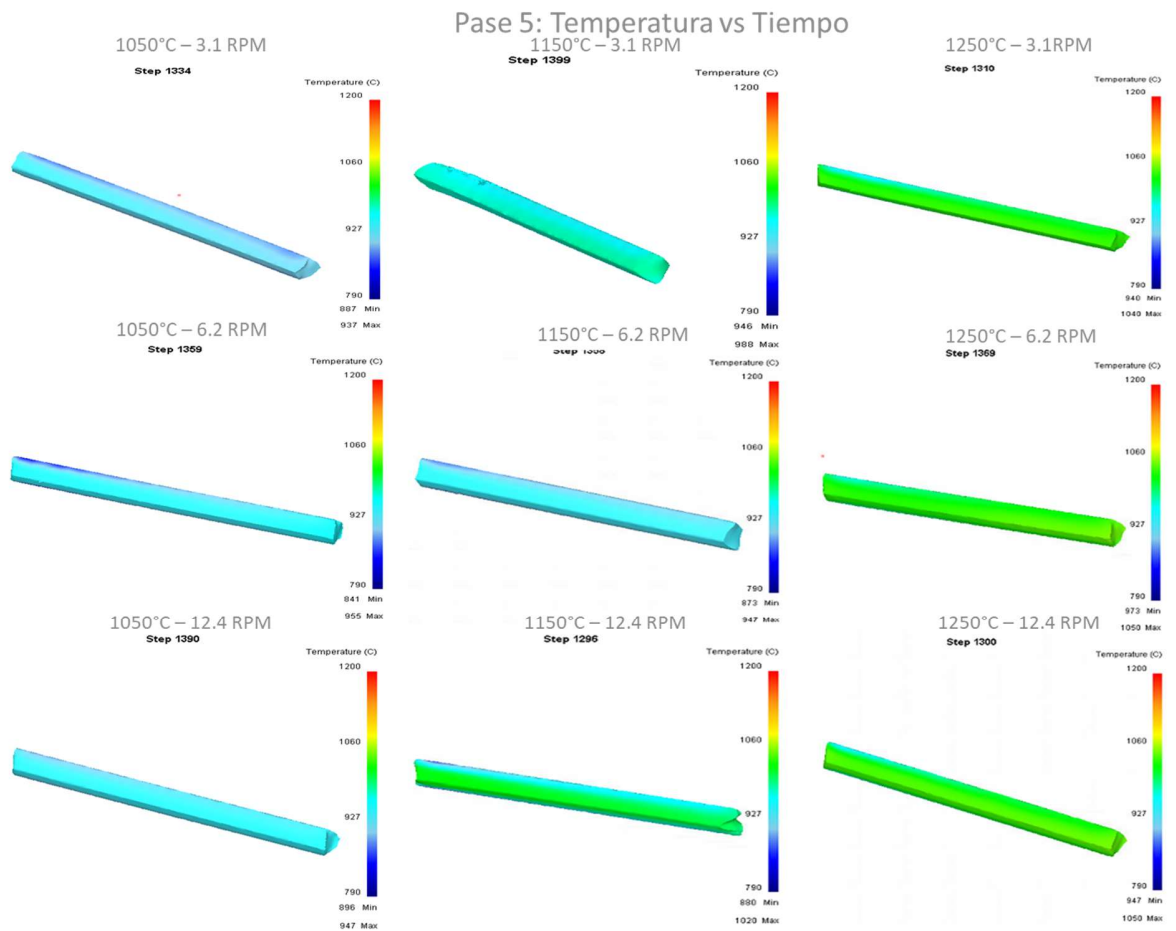


Figura 57. Gráfico de temperatura del riel para 5to pase.

En los resultados obtenidos en la figura 57 se observan comportamientos similares en cuanto a temperatura, con resultados consistentes en las 9 corridas y con mínimas diferencias.

En la tabla 2 y 3 se puede observar el resumen de las cargas y torques de los 5 pases de simulación para los 9 diferentes escenarios de temperatura y velocidad del rodillo.

Tabla 2. Resumen de carga de rolado de los 5 pases de laminación.

T(°C)	Carga de rolado (kN)								
	1050			1150			1250		
Pase\Vel ang	3.1	6.2	12.4	3.1	6.2	12.4	3.1	6.2	12.4
1	200	205	215	145	155	157	130	145	151
2	500	450	440	370	350	340	310	302	290
3	190	170	175	150	175	135	125	115	120
4	220	205	208	155	200	180	150	148	146
5	58	57	58	49	52	69	40	39	39

Tabla 3. Resumen de torque de los 5 pases de laminación.

T(°C)	Torque (kN)								
	1050			1150			1250		
Pass\Vel ang	3.1	6.2	12.4	3.1	6.2	12.4	3.1	6.2	12.4
1	14	10	11	7.0	6.8	7.0	9.5	9.3	9.7
2	16	14.5	12.9	11.5	11.9	11	10	9.2	9.8
3	7.7	7.0	6.9	6.5	7.0	4.9	5.5	4.5	5.5
4	5	5.1	4.9	4.2	5.0	3.3	4.1	3.2	3.5
5	0.8	0.9	1.0	0.7	0.8	1.6	0.7	0.6	0.7

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A través del presente trabajo se logró proponer una metodología para la evaluación de pasadas de laminación con diferentes condiciones de temperatura y velocidad. Las iteraciones permiten una mejor comprensión del flujo de materiales con el fin de ahorrar costos, identificar áreas de oportunidad y poder optimizar o mejorar el proceso de fabricación a partir de simulaciones de procesos.

Fue posible corroborar que la metodología puede evaluar los pases de simulación y sus resultados de manera individual (pase por pase), identificar la consistencia de las cargas y tensiones en el material, su homogeneidad a lo largo del riel, así como posibles puntos de concentración de temperatura, tensión, carga u otro parámetro.

La metodología también permitió identificar dentro de cada pase inconsistencias en los resultados de la simulación tales como inestabilidad en las corridas o deformaciones excesivas causas principales para descartar combinaciones de Velocidad-Temperatura en las simulaciones.

Se pudo identificar otras variables que influyen en los resultados de las corridas, tal es el caso del ángulo de la mordida, apoyos y guías del riel de ferrocarril hacia los rodillos entre otros.

El uso de la metodología en procesos reales mediante simulaciones con los parámetros reales permite la caracterización de los cambios en el proceso, de esta manera es posible mejorarlos y prevenir posibles fallas antes de que se produzcan, un problema de flujo de material no deseado en el proceso de producción provoca

atascos de producto in situ en la laminación en el momento de ser procesado lo cual representa pérdidas económicas considerables.

Considerando que el presente estudio no contempla una evaluación real para su validación física, si se pudo realizar una comparación con el trabajo mostrado en [32] donde se trabaja con una pieza de dimensiones similares y temperaturas de 1200°C, los valores de Stress reportados en la publicación oscila entre 130 MPa y 365 MPa, mientras que los resultados del presente trabajo muestran valores máximos de Esfuerzo de 295 MPa, comparando el valor máximo de simulación podemos afirmar que los resultados de las simulaciones se encuentran dentro de un rango de valores similar, También cabe mencionar que [37] no define datos finos como el % de reducción de las piezas para las pasadas reportadas, esta información nos permitiría hacer una selección detallada de la pasada más adecuada para la validación y comparación entre pasadas de las 2 publicaciones.

CAPÍTULO 8

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Muhammad Awaisa, H.W. Leea, Y.T. Ima, H.C. Kwonb, S.M. Byonc, H.D. Parkb. Defects effects simulation of rolling strip. *Materials Engineering*, Vol. 16, 2009, No. 3.
- [2] Plastic work approach for surface defect prediction in the hot bar rolling process. *Journal of materials processing technology* 201 73–78 (2008).
- [3] Hyuck-Cheol Kwon, Ho-Won Lee, Hak-Young Kim, Yong-Taek Im, Hae-Doo Park, Duk-Lak Lee. Surface wrinkle defect of carbon steel in the hot bar rolling process. *Journal of Materials Processing Technology* 209, 4476–4483 (2009).
- [4] Alexander Kainz, Sergiu Ilie, Erik Parteder and Klaus Zeman. From Slab Corner Cracks to Edge-Defects in Hot Rolled Strip – Experimental and Numerical Investigations. *Steel research int.* 79 No. 11 Metal forming (2008).
- [5] P.C. Zambrano, L.A. Leduc, and R. Colás. Modelling profile and shape evolution during hot rolling of steel strip. *Revista de metalurgia*, 42, 382-390, (2006).
- [6] P. Zambrano, M.P. Guerrero-Mata, M.I. Gómez de la Fuente, A. Artigas, A. Monsalve and R. Colás. Modelación de fenómenos metalúrgicos en laminación en caliente de acero *Revista de metalurgia*, 44, 74-84, (2008).
- [7] Zur Erlangung, des akademischen, Grades eines. Multi-scale Modelling of Hot Rolled Dual-phase Steels for Process Design. Tesis de maestria, Facultad de Ingeniería de Georecursos y Materiales. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aquisgrán, (2012)

- [8] F. Capece Minutolo, M. Durante, F. Lambiase, A. Langella. Dimensional analysis of a new type of groove for steel rebar rolling. 12th International scientific conference Achievements in mechanical and materials engineering (2003).
- [9] H. S. Salavati Pour H. Khademhosseini-Beheshti, M. Poursina. Prediction of work roll initial crown according to desired strip profile in hot rolling. IJE Transactions C: Aspects 80 - Vol. 25, No. 1, (2012)
- [10] Seyed Reza Motallebi and Amin Khalili. Investigation of Influence Parameters on the Hot Rolling Process Using Finite Element. Method Journal of Materials Science and Engineering B1, 332-338, Journal of Materials Science and Engineering, (2011).
- [11] SIMULA Two-Pass Rolling Simulation. Abaqus Technology Brief, TB-03-TPRS-1, (2007)
- [12] Armindo Guerrero, Javier Belzunce, Covadonga Betegón, Julio Jorge and Francisco J. Vigil. Hot Rolling Process Simulation: Application to UIC-60 Rail Rolling. Recent Patents on Mechanical Engineering 3, 65-71 (2010)
- [13] Alejandro Rivera Muñiz. Non-linear finite method simulation and modeling of the cold and hot rolling processes. Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University (2007)
- [14] Miguel A. Cavaliere, Marcela B. Goldschmit and Eduardo N. Dvorkin. Finite element simulation of the steel plates hot rolling process. Center for Industrial Research, FUDETEC (Feb 2001).
- [15] Lars Nolle, Alun Armstrong, Adrian Hopgood and Andrew Ware. Optimum Work Roll Profile Selection in the Hot Rolling of Wide Steel Strip using Computational Intelligence. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 1625, Springer (1999).

- [16] Youngseog Lee, Sangwoo Choi, Heesan Kim and Woong Yong Choo. An Experimental Study of the Mean Effective Strain in Rod (or Bar) Rolling Process. *Metals and Materials*, Vol. 6, No. 6 pp. 525-531 (2000).
- [17] Esa Ervasti. Closed-die forging and slab hot rolling with focus on material yield. Doctoral thesis in Production Engineering, Stockholm, Sweden (2008).
- [18] Muhammad Awais, H.W. Lee, Y.T. Im, H.C. Kwon, S.M. Byon, H.D. Park. Plastic work approach for surface defect prediction in the hot bar rolling process. *Journal of materials processing technology* 201 P. 73–78 (2008).
- [19] A. Kainz and G. Finstermann. A new Eulerian- Lagrangian hybrid finite element method for the numerical simulation of stationary rolling process. VOEST-ALPINE Industrieanlagenbau GmbH. *Rolling Mill Technologies* (1999).
- [20] Sascha Klement. Incremental Support Vector Regression for Steering Hot Rolling Mills. Tesis Instituto de Neuroinformática y Bioinformática, Universidad de Lübeck (2006).
- [21] R. Fabík, J. Kliber, I. Mamuzic, T. Kubina, S. A. Aksenov. Mathematical modelling of Flat and long hot rolling based on finite element methods (FEM). *METALURGIA* 51 3, 341-344, (2012).
- [22] A.A. Milenin, H. Dyja, S. Mróz. Simulation of metal forming during multi-pass rolling of shape bars. *Journal of Materials Processing Technology* 153–154 108–114 (2004).
- [23] M. Dziejczak, S. Turczyn. Experimental and numerical investigation of strip rolling from dual phase steel. *Archives of civil and mechanical engineering* Vol X No. 4 (2010).
- [24] Hendrik Schafstall and Christian Barth. An Innovative Approach to Automated Simulation of Full 3D Ring Rolling Process and Other Incremental Forming Processes. *Steel research international*, volume 81, Number 9, pages 202 – 205 (2010).

- [25] DaimlerChrysler AG. Production and Materials Technology. Sindelfingen Advanced Simulation Techniques - Exceeding Reality Materials science and technology (MS&T) 16-20, (2007).
- [26] Huiping Hong, Yonglin Kang. Finite Element Simulation of Hot Continuous Rolling of 37Mn5 Tube Rail and Roll Pass Optimization. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, (2012).
- [27] A. Kainz and G. Finstermann, 2008. A new eulerian-lagrangian hybrid finite element method for the numerical simulation of stationary rolling processes. VOEST-ALPINE Industrieanlagenbau GmbH. (2008).
- [28] V Musonda and ET Akinlabi. Three-dimensional simulation of a single pass hot rolling of carbon steel: Case of instabilities in steady state region. ICAMMT. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 423 (2018).
- [29] Alejandro Pérez-Alvarado, Sixtos Antonio Arreola-Villa, Ismael Calderón-Ramos, Rumualdo Servín Castañeda, Luis Alberto Mendoza de la Rosa, Kinnor Chattopadhyay and Rodolfo Morales. Numerical Simulation of the Hot Rolling Process of Steel Beams. Materials MDPI 14, 7038, (2021).
- [30] Umut Hanoglu and Božidar Šarler. Hot Rolling Simulation System for Steel Based on Advanced Meshless Solution. Metals MDPI 9, 788, (2019).
- [31] Hyuck-Cheol Kwona, Ho-Won Leeb, Hak-Young Kimc, Yong-Taek Imb, Hae-Doo Parka, Duk-Lak Leed. Surface wrinkle defect of carbon steel in the hot bar rolling process. Journal of Materials Processing Technology 209 P. 4476–4483 (2009).
- [32] P.C. Zambrano, L.A. Leduc, R. Colás. Modelling profile and shape evolution during hot rolling of steel strip Revista de metalurgia 42 (5) P. 382-390 (2006).
- [33] P. Zambrano, Guerrero-Mata, Gómez de la Fuente, A. Artigas, A. Monsalve, R. Colás. Modelación de fenómenos metalúrgicos en laminación en caliente de acero. Revista de metalurgia 44, P. 74–78 (2008).

- [34] Muhammad Awais, H.W. Lee, Y.T. Im, H.C. Kwon, S.M. Byon, H.D.Park. Journal of materials processing technology 201 Pag. 73–78 (2008).
- [35] Alexander Kainz, Sergiu Ilie, Erik Parteder, Klaus Zeman. From Slab Corner Cracks to Edge-Defects in Hot Rolled Strip – Experimental and Numerical Investigations. Steel research int. 79 No. 11 (2008).
- [36] Esa Ervarti. Closed-die forging and slab hot rolling with focus on material yield. Doctoral Thesis in Production Engineering Stockholm, Sweden (2008).
- [37] J.A. Rios-Gonzalez, F.A. Garcia-Pastor. FEM Comparative Between Two Roller Sizes for Hot Shape Rolling of Reinforced Bars Fabrication. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Unidad Saltillo. (2014)