

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



SIMULACIÓN DE PROCESO TERMOMECÁNICO DE
PRODUCTOS LARGOS DE ACERO 9254 A PARTIR DE UNA
PRUEBA DE TORSIÓN EN CALIENTE

POR

JUAN RENE CHING CASTILLO

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

DICIEMBRE 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



SIMULACIÓN DE PROCESO TERMOMECÁNICO DE
PRODUCTOS LARGOS DE ACERO 9254 A PARTIR DE UNA
PRUEBA DE TORSIÓN EN CALIENTE

POR

JUAN RENE CHING CASTILLO

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

DICIEMBRE 2020

Universidad Autónoma De Nuevo León

Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica

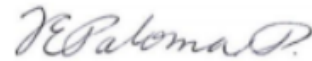
Subdirección de estudios de posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis “Simulación de proceso termomecánico de productos largos de acero 9254 a partir de una prueba de torsión en caliente”, realizada por el alumno Juan Rene Ching Castillo, con número de matrícula 1983171, sea aceptada para su defensa como requisito para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz.

El Comité de Tesis



Dr. Jacobo Hernández Sandoval
Director



Dra. Flor Esthela Palomar Pérez
Co-Director



Dr. Omar García Rincón
Revisor



M.C. Heber Santoyo Avilés
Revisor

Vo. Bo.



Dr. Stefan Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



San Nicolás de los Garza, Nuevo León, octubre de 2020

DEDICATORIA

A mi familia que ha estado,

está y siempre estará para mí.

A esas personas que intervinieron en
mi pasado para lograr el exitoso presente.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) y la Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz (MCIA) por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado dentro de sus programas y abrirme las puertas a nuevas oportunidades profesionales. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico dado durante la realización de este posgrado.

A Ternium S.A. de C.V. por la oportunidad de realizar mis prácticas de investigación y el apoyo en general para desarrollar mi proyecto de investigación. Gracias al personal de la empresa que me ayudó a cumplir con mi trabajo y que me enseñaron el ámbito industrial visto desde otra perspectiva.

A los doctores que influyeron en el camino para culminar con mis estudios de maestría, gracias por compartir sus conocimientos y consejos. En especial a mis asesores, Dr. Jacobo Hernández y Dr. Omar García, que me han guiado en el desarrollo de este proyecto.

A mi familia, mis padres Rene y Margarita, mi hermana Maylen, por su apoyo incondicional aun sabiendo que mi camino se encontraba lejos. Gracias por darme ánimos y siempre aconsejarme de la mejor forma, gracias por entender mis decisiones y ayudarme a mirar hacia el horizonte con esperanza.

A mi novia Laurita por estar y apoyarme siempre en este camino lleno de emociones y satisfacciones. Y a mis amigos que sin importar la distancia siempre me han acompañado y apoyado. En especial a Mario, Cuen, Bobby, Domy, Diana, Choche y Rocka, gracias por mantener viva la amistad que tanto aprecio.

Gracias a todos por compartir esta increíble experiencia conmigo.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	15
CAPÍTULO II. ANTECEDENTES	17
2.1 Laminación en caliente de productos largos	19
2.1.1 Proceso termomecánico	20
2.1.2 Pases de laminación y reducciones de área	23
2.2 Consideraciones matemáticas para simulación de proceso de laminación de productos largos de acero	25
2.2.1 Deformación	26
2.2.2 Cálculo de deformación para simulación de proceso de laminación de productos largos	29
2.2.3 Velocidad de deformación	34
2.2.4 Cálculo de velocidad de deformación para simulación de proceso de laminación de productos largos	35
2.3 Prueba de torsión como ensayo mecánico para simulación de laminación de productos largos	37
2.3.1 Prueba de torsión en caliente en gleeble para simular proceso de laminación de productos largos	38
2.4 Mean Flow Stress (Esfuerzo de Fluencia Promedio)	40
2.4.1 MFS a partir de prueba de torsión en caliente	41
2.4.2 MFS a partir de línea de laminación en caliente.....	44
CAPÍTULO III. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	45
3.1 Recopilación de información de una línea de laminación de productos largos de acero.....	45
3.2 Procesamiento de información de proceso termomecánico de productos largos en planta Puebla.....	47
3.3 Propuesta de modelo para simulación del proceso de laminación	48

ÍNDICE GENERAL

3.4	Diseño experimental para pruebas de torsión en Gleeble	49
3.5	Obtención de muestra de palanquilla para maquinar probetas de ensayos de torsión.....	50
3.6	Programación de pruebas de torsión en Gleeble	53
3.7	Pruebas de torsión en Gleeble	54
3.7.1	Preparación de probeta a ensayar.....	54
3.7.2	Proceso de prueba de torsión	57
3.8	Análisis y comparación de resultados	59
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		60
4.1	Modelo matemático de ecuaciones para simulación de proceso de laminación de productos largos de acero	60
4.2	Pruebas de torsión sin control de temperatura.....	63
4.3	Análisis de gráficas esfuerzo-deformación obtenidas por pruebas de torsión para simulación de proceso de laminación de productos largos.....	69
4.3.1	Simulación de proceso de laminación para obtención de alambón de 19.84 mm	69
4.3.2	Simulación de proceso de laminación para obtención de alambón de 17.80 mm	74
4.3.3	Simulación de proceso de laminación para obtención de alambón de 20.50 mm	78
4.3.4	Simulación de proceso de laminación para obtención de alambón de 23.50 mm	82
4.4	Determinación de MFS a partir de curvas esfuerzo-deformación obtenidas por prueba de torsión	86
4.5	Cálculo de MFS a partir de datos de línea de laminación de productos largos...89	
4.6	Comparación de valores de MFS de prueba de torsión y datos de línea de laminación	90
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		94
BIBLIOGRAFÍA		96

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1.	Proceso de deformación y recristalización de un acero durante laminación en caliente	21
2.2.	Esquema de proceso termomecánico.	23
2.3.	Ejemplo de secuencia de pases durante proceso de laminación de productos largos	25
2.4.	Representación esquemática de deformación del material durante proceso de laminación	27
2.5.	Tres métodos para calcular el área de la sección transversal equivalente .	28
2.6.	Identificación de H y W considerando deformaciones lineales en un pase de laminación de productos largos	29
2.7.	Representación esquemática del efecto de las deformaciones en eje de altura (H) del material	30
2.8.	Esquema de contacto de rodillo de laminación sobre palanquilla de acero .	34
2.9.	Probeta de 10 mm para ensayo de torsión en caliente en máquina Gleeble .	39
2.10.	Ejemplo de gráfica esfuerzo – deformación a partir de prueba de torsión en caliente de 18 pases de deformación	41
2.11.	Ejemplo de gráfica MFS – temperatura y cálculo de temperaturas críticas de transformación	42
2.12.	Representación gráfica y matemática para cálculo de MFS	43
3.1.	Sección de desbaste en línea de laminación de productos largos planta Ternium Puebla	46
3.2.	Esquema de variables para realizar cálculos necesarios en la programación de prueba de torsión en caliente a partir de datos de proceso real	48

ÍNDICE DE FIGURAS

3.3.	Muestra de palanquilla de 160 x160 x 200 mm de acero 9254 para producir alambión automotriz	51
3.4.	Esquema de cortes a realizar en muestra de palanquilla obtenida del proceso de colada continua	51
3.5.	Probeta de torsión para ensayo en Gleeble	52
3.6.	Máquina Gleeble con módulo de torsión instalado	54
3.7.	Máquina para soldar termopar a probetas de Gleeble	55
3.8.	Termopar soldado a probeta de torsión	56
3.9.	Probeta de torsión sujeta en máquina Gleeble lista para iniciar con el vacío y posterior ensayo de torsión	56
3.10.	Esquema general de las pruebas de torsión para simular proceso de laminación de productos largos	57
3.11.	Probeta a 1078 °C durante prueba de torsión en Gleeble	58
3.12.	Probeta ensayada por prueba de torsión en Gleeble	58
4.1.	Seguimiento de temperatura en prueba de torsión sin control de temperatura	65
4.2.	Seguimiento de temperatura y torsión de prueba sin control de temperatura	66
4.3.	Primeros pases de deformación en prueba sin control de temperatura	67
4.4.	Pases de deformación con aumento de temperatura en prueba sin control de temperatura	68
4.5.	Seguimiento de temperatura con respecto al tiempo durante prueba de torsión para simulación de laminación de alambión 19.84 mm	71
4.6.	Seguimiento de temperatura y torsión aplicada durante prueba de torsión para simulación de laminación de alambión 19.84 mm	72
4.7.	Gráfica esfuerzo-deformación de prueba de torsión para simulación de laminación de alambión 19.84 mm	73

ÍNDICE DE FIGURAS

4.8.	Ampliación de últimos dos pases en gráfica de esfuerzo-deformación en prueba de torsión para simulación de laminación de alambre 19.84 mm	74
4.9.	Seguimiento de temperatura con respecto al tiempo durante prueba de torsión para simulación de laminación de alambre 17.80 mm	76
4.10.	Seguimiento de temperatura y torsión aplicada durante prueba de torsión para simulación de laminación de alambre 17.80 mm	77
4.11.	Gráfica esfuerzo-deformación de prueba de torsión para simulación de laminación de alambre 17.80 mm	78
4.12.	Seguimiento de temperatura con respecto al tiempo durante prueba de torsión para simulación de laminación de alambre 20.50 mm	80
4.13.	Seguimiento de temperatura y torsión aplicada durante prueba de torsión para simulación de laminación de alambre 20.50 mm	81
4.14.	Gráfica esfuerzo-deformación de prueba de torsión para simulación de laminación de alambre 20.50 mm	82
4.15.	Seguimiento de temperatura con respecto al tiempo durante prueba de torsión para simulación de laminación de alambre 23.50 mm	84
4.16.	Seguimiento de temperatura y torsión aplicada durante prueba de torsión para simulación de laminación de alambre 23.50 mm	85
4.17.	Gráfica esfuerzo-deformación de prueba de torsión para simulación de laminación de alambre 23.50 mm	86
4.18.	Gráfica esfuerzo-deformación ajustada de prueba de torsión para simulación de laminación de alambre 19.84 mm	87
4.19.	Gráfica de valores de MFS en MPa de calibre 19.84 mm de alambre de acero 9254	90
4.20.	Gráfica de valores de MFS en MPa de calibre 17.80 mm de alambre de acero 9254	91
4.21.	Gráfica de valores de MFS en MPa de calibre 20.50 mm de alambre de acero 9254	91

ÍNDICE DE FIGURAS

4.22. Gráfica de valores de MFS en MPa de calibre 23.50 mm de alambón de acero
9254 92

ÍNDICE DE TABLAS

2.1.	Variables a utilizar para modelo matemático del desarrollo mecánico de un proceso de laminación en caliente de productos largos	26
2.2.	Ecuaciones para cálculo de MFS según diferentes autores	44
3.1.	Pruebas de torsión a realizar en Gleeble	50
4.1.	Orden de ecuaciones para realizar una simulación del proceso de laminación de productos largos a partir de una prueba de torsión en caliente	61
4.2.	Condiciones de prueba de torsión sin control de temperatura	64
4.3.	Condiciones de prueba de torsión para simulación de laminación de alambre 19.84 mm	70
4.4.	Condiciones de prueba de torsión para simulación de laminación de alambre 17.80 mm	75
4.5.	Condiciones de prueba de torsión para simulación de laminación de alambre 20.50 mm	79
4.6.	Condiciones de prueba de torsión para simulación de laminación de alambre 23.50 mm	83
4.7.	Valores de MFS en MPa calculados a partir de curvas esfuerzo-deformación de pruebas de torsión de los cuatro calibres de alambre estudiados del acero 9254	88
4.8.	Valores de MFS en MPa calculados a partir de ecuación (2.20) de los cuatro calibres de alambre estudiados del acero 9254	89

NOMENCLATURA

Altura de entrada de material	H_i	[mm]
Altura de salida de material	H_f	[mm]
Ancho de entrada de material	W_i	[mm]
Ancho de salida de material	W_f	[mm]
Longitud de entrada de material	L_i	[mm]
Longitud de salida de material	L_f	[mm]
Área de salida de sección transversal	A_f	[mm ²]
Deformación de pase	ε_p	[-]
Velocidad de deformación	$\dot{\varepsilon}$	[s ⁻¹]
Velocidad de material	V	[m/s]
RPM rodillos de laminación	N_r	[rpm]
Diámetro de rodillos de laminación	D	[mm]
Radio de rodillos de laminación	R_{max}	[mm]
Radio efectivo de laminación	R_{ef}	[mm]
Espacio entre rodillos de laminación	G	[mm]
Distancia de laminación	L_p	[mm]
Tiempo de laminación	t_p	[seg]
Esfuerzo equivalente	σ_{eq}	[MPa]
Deformación equivalente	ε_{eq}	[-]
Torque	T	[N m]
Torsión	θ	[-]
Radio de probeta de torsión	r	[mm]
Longitud de probeta de torsión	L	[mm]

RESUMEN

La simulación de un proceso de laminación en caliente de acero es relevante dentro de la industria debido a la posibilidad de realizar cambios en la composición química de los aceros o bien en el proceso termomecánico del mismo. Desde un proceso a pequeña escala que puede replicar el proceso real sin el riesgo de provocar grandes pérdidas o paros de producción durante las pruebas, esto con el fin de obtener mejoras en las propiedades mecánicas de los productos finales producidos. En este trabajo se estudia la metodología para llevar a cabo una simulación del proceso termomecánico de productos largos como varilla y alambrón mediante de una prueba de torsión en caliente. A partir de la recopilación de información de una línea de laminación de productos largos y el seguimiento de ciertas ecuaciones matemáticas se realizaron ensayos de torsión en caliente en la máquina Gleeble para simular el proceso de laminación del acero 9254 en diferentes calibres. Las pruebas de torsión fueron programadas para dar el mejor seguimiento posible a los valores reales de deformación, velocidad de deformación y temperatura en cada pase de laminación del proceso real. De las gráficas de esfuerzo-deformación resultantes de las simulaciones se realizaron los cálculos necesarios para obtener los valores de MFS en cada pase de deformación. Por otro lado, se calcularon los valores de MFS a partir de los datos de la línea de laminación, con esto se realizó la comparación directa entre el proceso real y la simulación en la máquina Gleeble. Aunque no se encontró una relación directa entre el proceso de laminación real y la simulación planteada, existe un comportamiento similar en la secuencia de los esfuerzos registrados. Estas diferencias en cuanto a magnitud, así como este comportamiento similar podría explicarse como un problema de escalamiento entre los dos procesos. Esta investigación es de utilidad para trabajos futuros sobre la capacidad de realizar simulaciones físicas del proceso de laminación en caliente de productos largos de este tipo de acero.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La industria automotriz en la actualidad tiene una gran demanda de aceros que cumplen con propiedades mecánicas difícilmente alcanzables, lo cual obliga a la industria del acero a encontrar y mejorar nuevas formas para producir productos que se encuentren al nivel de la demanda.

Dentro de la fabricación del producto entregado a la industria automotriz, el proceso termomecánico o laminación en caliente es el último paso donde se consideran los fenómenos metalúrgicos que afectan al acero y sus propiedades mecánicas, por lo que para la industria del acero puede llegar a ser muy costoso realizar coladas piloto para probar nuevas composiciones químicas, o bien, condiciones del proceso.

En este trabajo se afirma la importancia y el impacto en la industria del estudio del proceso de laminación en caliente de productos largos de acero. Se realiza una simulación física del proceso de laminación de productos largos con los parámetros del proceso real a través de una prueba de torsión en caliente. Esto con la finalidad de buscar cambios durante el proceso industrial que puedan generar un impacto positivo en las propiedades mecánicas del acero sin utilizar coladas piloto que puedan generar grandes gastos a la industria.

Considerando las diferencias entre productos planos y largos de acero y todas las variables que se ven involucradas en la laminación en caliente, se propone un conjunto de ecuaciones matemáticas como parte del proceso para realizar la simulación antes mencionada. Con el análisis de los resultados obtenidos por las pruebas de torsión realizadas se llevó a cabo una comparación entre la simulación y el proceso industrial.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

A pesar de la importancia del estudio metalográfico en este tipo de procesos, este trabajo se limitó al estudio térmico/mecánico, esto debido a la complejidad de este y el tiempo establecido para esta investigación.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES

Los productos largos como varillas o alambρόn son utilizados por diferentes sectores industriales, por ejemplo, desde la industria de la construcci3n hasta la automotriz, que por lo regular utiliza el alambρόn producido para convertirlo en resortes de alta resistencia que se usarán principalmente en sistemas de suspensi3n de autom3viles. Específicamente, la industria automotriz cada vez demanda más aceros con propiedades mecánicas mejoradas a los que se encuentran produciéndose hoy en día, es por eso que se busca mejorar las propiedades finales de estos aceros, así como tratar de reducir sus costos de producci3n [1].

La industria automotriz se encuentra en una continua búsqueda por satisfacer las necesidades de sus clientes, por lo que siempre se está buscando la forma de entregar mejores productos y al mismo tiempo mantener el balance entre precio y calidad. Para lograr esto es necesario contar con materia prima que se adapte a las necesidades específicas de esta industria. En el caso de los aceros, por lo regular, se busca tener valores altos de resistencia y dureza, al mismo tiempo que una buena formabilidad para fabricar las piezas que se necesitan al momento de construir un vehículo.

El acero 9254 automotriz, el cual es utilizado como alambρόn en la fabricaci3n de resortes para suspensiones de autom3viles, se requiere que tenga altos valores de resistencia a la fatiga debido a su aplicaci3n específica [2]. Para obtener el alambρόn con las propiedades específicas que demanda la industria automotriz es muy importante considerar algunos factores como la química del acero y el proceso termomecánico al cual es sometido el material. De igual forma es sumamente importante considerar el proceso de formado de los resortes por el cliente, así como el

tratamiento térmico que este le da para obtener el producto final, esto es debido a que procesos como el “shot peening” tienen un impacto en las propiedades mecánicas del acero [3 - 5].

Después de ser transformado el alambión de acero 9254 en resortes que se utilizan para suspensiones de automóviles, es necesario realizar pruebas de resistencia a la fatiga, esto para asegurar que el producto no vaya a sufrir una falla durante la vida útil del automóvil. Estas pruebas suelen realizarse simulando el uso que pueda tener la pieza en su aplicación de la vida diaria, lo cual involucra una gran cantidad de ciclos de fatiga, y en caso de existir una ruptura durante la prueba, entonces se puede realizar un análisis de la falla para determinar la causa o el origen de la falla [6 - 8].

A partir de los requerimientos demandados por la industria automotriz, uno de los principales objetivos de la industria del acero es encontrar formas de mejorar la calidad y competitividad de los productos obtenidos a partir de los procesos involucrados para su fabricación, para lograr esto, es indispensable conocer el desarrollo de estos procesos y buscar el mejoramiento de los mismos.

El proceso de laminación de acero consiste en deformar el material de tal forma que se obtenga el producto final deseado, donde las deformaciones son aplicadas a partir de rodillos que giran para dar la forma al material. Dicho proceso se puede realizar en frío y en caliente, esto dependerá de la aplicación del mismo y las condiciones requeridas para el producto final. La laminación en frío consiste en realizar las deformaciones necesarias a temperatura ambiente, lo cual aumenta la resistencia de material al mismo tiempo que disminuye su tenacidad, por lo que es necesario realizar un tratamiento térmico de recocido para obtener las propiedades mecánicas deseadas. Por otro lado, la laminación en caliente se realiza por encima de la temperatura de austenización del material, facilitando de esta manera la deformación aplicada y teniendo por consecuencia una probable recrystalización en la microestructura del mismo, por lo regular al finalizar con las deformaciones se termina el proceso con un enfriamiento controlado para obtener las propiedades mecánicas buscadas [9-10].

Al llevarse a cabo la laminación en caliente de un acero se presentan diversos fenómenos metalúrgicos, como recrystalización de la microestructura del material o la formación de precipitados inducidos por deformación, esto afectará directamente en

las propiedades mecánicas del producto final. Considerando esto, es indispensable conocer el proceso termomecánico al que se ve sometido un acero al momento de su laminación. Para estudiar este proceso es necesario llevar a cabo simulaciones que lo repliquen a pequeña escala, de esta manera y mediante procedimientos de laboratorio es posible ver el comportamiento metalúrgico de un acero durante el proceso de laminación en caliente.

De acuerdo con la geometría final obtenida en el material después del proceso de laminación existen dos tipos de producto, planos y largos. Mientras que los productos planos son tiras de láminas a diferentes espesores, los productos largos son varillas o alambrones con diferentes diámetros de sección transversal. En donde la principal diferencia es la forma en que se realizan las deformaciones, cambiando así significativamente las variables que se involucran en el proceso.

El fundamento de una simulación del proceso de laminación es el desarrollo mecánico del mismo, el cual define las deformaciones aplicadas a lo largo de todo el proceso para llegar al producto final. De igual forma es indispensable conocer la geometría del material conforme se aplican las diferentes deformaciones. Teniendo en cuenta estas variables se pueden realizar simulaciones del proceso tanto en software como en físico, dependiendo del objetivo de estudio.

2.1 LAMINACIÓN EN CALIENTE DE PRODUCTOS LARGOS

La laminación en caliente de un acero es el proceso al cual se ve sometido para cambiar su forma mediante deformaciones plásticas a una elevada temperatura y obtener un producto final con determinadas dimensiones. En la mayoría de los casos después de las deformaciones existe un enfriamiento controlado que termina por definir las propiedades mecánicas del material.

Se le conoce como línea de laminación al conjunto de todos los elementos que intervienen en la laminación de un material. Los estantes de laminación alojan los rodillos que se encargan de dar la deformación plástica al material, al final de todos los estantes se encuentra la cama de enfriamiento donde se lleva a cabo el enfriamiento

controlado del material laminado. El diseño de los rodillos de laminación define la geometría dada al material en cada estante.

El proceso de laminación en caliente de un acero comienza con el material en forma de palanquilla, en el caso de productos largos, la cual es creada a partir de una colada de acero con la composición química requerida. Se eleva la temperatura de la palanquilla a aproximadamente mil doscientos grados Celsius en un horno de recalentamiento donde se mantiene el tiempo suficiente para homogenizar la temperatura en todo el material. Posteriormente la palanquilla empieza a pasar por cada estante de laminación y se va deformando plásticamente poco a poco dándose así la forma que se requiere para el terminado. Al momento de acercarse más hacia los últimos estantes la velocidad del material aumenta considerablemente, esto es debido al alargamiento que existe en el sentido de laminación por parte de la palanquilla. Después de terminar con las deformaciones el material laminado pasa a una cama de enfriamiento donde mediante un medio determinado este se enfría de acuerdo con la microestructura deseada en el producto final.

2.1.1 PROCESO TERMOMECAÁNICO

La laminación en caliente de un acero es un proceso termomecánico debido a que involucra esfuerzos mecánicos y cambios de temperatura en el material procesado. Este proceso por lo general se lleva a cabo a temperaturas entre 850°C y 1200°C, de esta manera se busca tener una mayor facilidad para deformar plásticamente el material, más aún en los primeros pases de deformación. Considerando este rango de temperaturas, el material a laminar se encuentra por encima de la temperatura de austenización A_3 , por lo que en él sólo encontramos una fase austenítica, de esta manera al momento de realizar el enfriamiento controlado nos ayudará a obtener la transformación de fases deseada [11].

Debido a que el enfriamiento controlado define las fases que estarán presentes en el producto final, la microestructura con la que se comienza el enfriamiento es fundamental para estudiar la transformación de fases que tendrá el material. Esta microestructura dependerá de lo que ocurra durante el proceso de laminación ya que

hay que considerar la temperatura de no recrystalización T_{nr} y la temperatura de recrystalización T_r .

La T_{nr} es la temperatura límite para que se lleve a cabo una total o parcial recrystalización en la microestructura del material, mientras que T_r es el límite entre obtener una microestructura parcialmente recrystalizada y una donde no existe recrystalización [12].

Estas temperaturas son importantes dentro del proceso termomecánico de laminación ya que depende de estos valores como será la microestructura resultante en el material. Cada deformación plástica aplicada sobre el material durante el proceso se realiza sobre los ejes horizontal y vertical de la palanquilla, por consecuencia existe una deformación en el sentido longitudinal del material, provocando así el alargamiento de los granos en su microestructura. En la figura 2.1 se representa esta deformación en los granos y al mismo tiempo la recrystalización que se presenta durante el proceso, cuando la temperatura del material está por encima de T_{nr} la nucleación y crecimiento de granos será rápida y completa, mientras que al estar por debajo este fenómeno se dará con menor rapidez y parcialmente; por consiguiente, cuando el material se encuentre debajo de T_r no existirá recrystalización alguna [13].

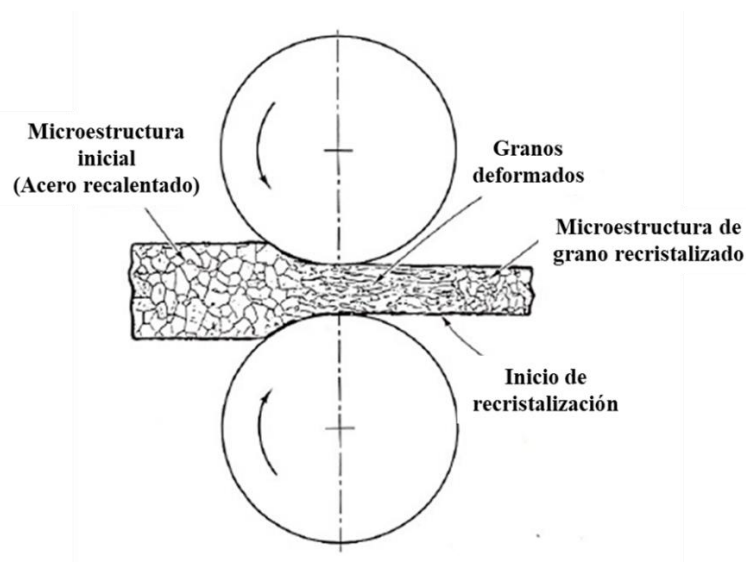


Figura 2.1. Proceso de deformación y recrystalización de un acero durante laminación en caliente [12].

El fenómeno de recristalización después de una deformación del material está presente a lo largo del proceso en cada uno de los estantes de laminación, aunque no en todos por igual. El comportamiento de la microestructura del material durante la laminación es importante debido a que puede afectar el desarrollo mecánico del proceso, cuando no existe una total recristalización entre las deformaciones aplicadas comienza a existir una acumulación de esfuerzos que regularmente se busca evitar. En la figura 2.2 se presenta un esquema de un proceso termomecánico, se muestra la temperatura respecto al tiempo a lo largo del proceso de laminación en caliente [14]. Como se observa en la figura 2.2 al llevar el material por encima de A_3 se obtiene una fase austenita, cuando se presentan deformaciones por encima de T_{nr} y se da el tiempo suficiente la austenita recristaliza completamente resultando una microestructura homogénea de austenita recristalizada; cuando el material sufre un proceso de deformación y se encuentra por debajo de T_{nr} y por encima de A_3 la recristalización será parcial, por lo que toma el nombre de austenita deformada.

Aunque es complicado tener un completo control de la recristalización durante la laminación, siempre se busca la forma de que se lleve a cabo correctamente. Esto se consigue sin muchos problemas en los primeros pases de laminación ya que el material, aunque sufre mucha deformación su velocidad es poca y tiene el tiempo suficiente para recristalizar; a diferencia de los últimos pases donde la rapidez es mucho mayor y la oportunidad de tener un control sobre esta es casi nula.

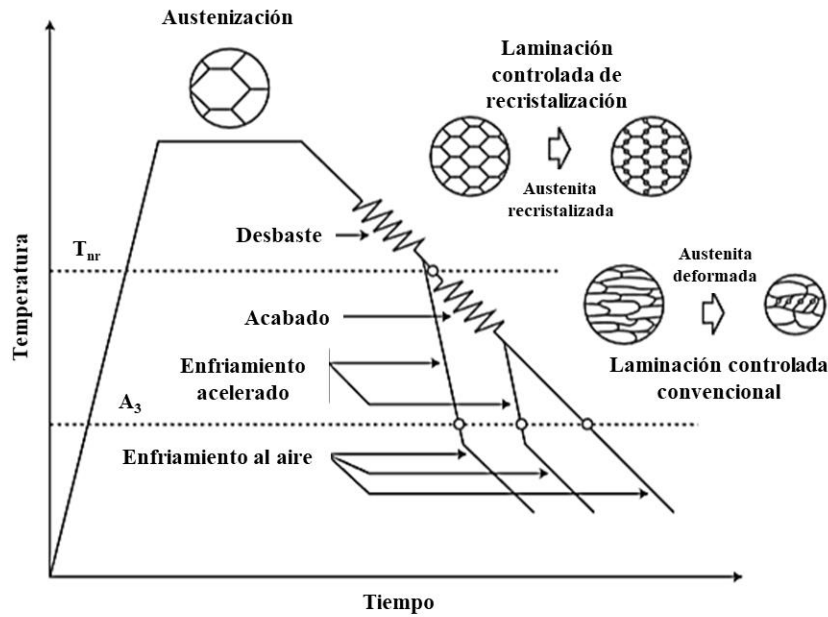


Figura 2.2. Esquema de proceso termomecánico. Se considera temperatura de no recrystalización, temperatura de austenización, pases de laminación, enfriamiento y fases de recrystalización [14].

2.1.2 PASES DE LAMINACIÓN Y REDUCCIONES DE ÁREA

El proceso de laminación para productos largos comienza con el acero colado en forma de billets o palanquillas que se calientan a temperaturas por arriba de la temperatura de austenización, después el material comienza a pasar por estantes donde se encuentran los rodillos que irán dando las reducciones a la palanquilla en cada pase. Estas palanquillas tienen un área transversal definida por una forma cuadrada que conforme se vea sometida a cada pase de laminación va cambiando su forma y al mismo tiempo reduciéndose hasta llegar al área o diámetro requerido.

El cálculo del área transversal, así como la forma que se tendrá en la palanquilla durante el proceso se vuelve muy importante, a diferencia del proceso de productos planos, ya que en ese caso solamente es indispensable ver el espesor del planchón en cada pase de laminación. Por lo regular en los laminadores de productos largos se comienza con formas transversales cuadradas y rectangulares en los primeros pases, después se tienen formas ovaladas y circulares, esto es dependiendo la cantidad de deformación que se busca a lo largo del proceso [15-16]

Para modelar un proceso termomecánico de productos largos es necesario conocer y definir el área de la sección transversal de la palanquilla en cada pase de laminación. Es importante conocer las dimensiones de los rodillos de laminación, ya que estos terminan marcando la forma y dimensión final de la sección transversal de la palanquilla después de cada pase de laminación [17-18].

Existen diferentes configuraciones para las líneas de laminación de productos largos, esto va a depender del producto que se está buscando de las necesidades industriales en cuanto a espacio y facilidad. Hablar de configuraciones se refiere a diferentes disposiciones de todos los elementos de la línea de laminación, por ejemplo, el proceso puede realizarse interrumpiendo la velocidad del material, esto es, intercambiando los estantes de laminación y dando hacia adelante y hacia atrás la palanquilla hasta dar las deformaciones requeridas. Por otro lado, están las líneas corridas, las cuales son las más comunes, donde el material comienza a tomar velocidad sin interrupciones hasta llegar al último pase de laminación para obtener así el producto final [19].

A pesar de que existen diferentes formas de llevar a cabo el proceso de laminación en productos largos, el principio utilizado para realizar las deformaciones al material es el mismo, por lo que un estudio de este proceso se debe concentrar específicamente en los estantes de laminación y considerar de forma adecuada los esfuerzos y deformaciones aplicados en cada punto. Considerando lo anterior, la forma del material definida por los rodillos de laminación en cada pase es el punto clave para entender el desarrollo mecánico de dicho proceso.

Como ya se ha mencionado antes la palanquilla de acero comienza el proceso de laminación con una sección transversal cuadrada, la cual sufre diferentes cambios en su forma dependiendo del diseño de los rodillos de laminación en cada estante. Estos cambios se realizan gradualmente, lo cual explica la gran cantidad de pases que se encuentran en una línea de laminación. En los primeros pases la forma transversal de la palanquilla cambia entre cuadrados y rectángulos, para después tener óvalos y círculos, de esta manera se va intercalando hasta llegar a la reducción necesaria [20].

En la figura 2.3 se muestra un ejemplo de 4 pasos de deformación, donde se aprecia el cambio que va existiendo en la forma transversal del material durante el proceso de laminación.

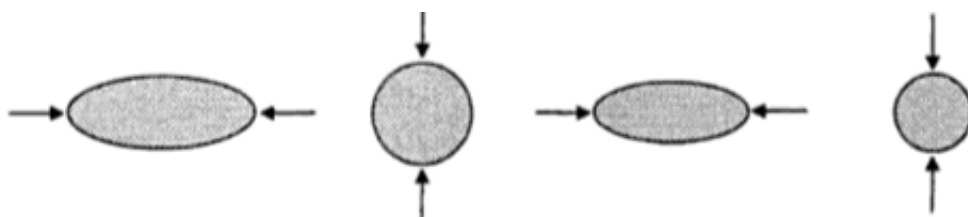


Figura 2.3. Ejemplo de secuencia de pases durante proceso de laminación de productos largos [21].

2.2 CONSIDERACIONES MATEMÁTICAS PARA SIMULACIÓN DE PROCESO DE LAMINACIÓN DE PRODUCTOS LARGOS DE ACERO

Realizar una simulación del proceso de laminación de productos largos de acero conlleva el análisis profundo del funcionamiento completo de una línea de laminación industrial, principalmente en el desarrollo mecánico de la misma, lo cual implica deformaciones aplicadas al material en determinados puntos a temperaturas específicas y diferentes formas de la sección transversal de una palanquilla durante el proceso.

Es común utilizar una prueba de torsión para realizar estudios del material expuesto a un proceso como el de laminación de productos largos [22], ya sea para caracterización de un material o bien el estudio del proceso termomecánico al que se ve sometido.

Dentro del proceso mecánico de laminación de productos largos existen algunas variables indispensables para que su funcionamiento sea el correcto, tales como, la temperatura del material, su velocidad, el diámetro de los rodillos de laminación y el espacio que hay entre ellos; todas estas variables influyen al momento de llevar a cabo una simulación de la laminación.

Las dos variables más difíciles de considerar en el proceso mecánico de laminación de productos largos de acero son las deformaciones y velocidades de deformación en cada pase de laminación, esto es debido a la complejidad de las deformaciones presentes en el proceso. Para el correcto análisis de estas variables es

necesario estudiar por igual todos los factores involucrados en cada estante de laminación.

En la Tabla 2.1 se muestran las variables utilizadas para el desarrollo de las ecuaciones presentadas a continuación.

Tabla 2.1. Variables a utilizar para modelo matemático del desarrollo mecánico de un proceso de laminación en caliente de productos largos.

Variable	Símbolo	Unidades
Altura de material	H	mm
Ancho de material	W	mm
Área de salida de sección transversal	A_f	mm^2
Deformación de pase	ϵ_p	-
Velocidad de deformación	$\dot{\epsilon}$	s^{-1}
Velocidad de material	V	m/s
RPM rodillo	N_r	rpm
Diámetro de rodillo	D	mm
Radio efectivo de laminación	R_{ef}	mm
Espacio entre rodillos	G	mm
Distancia de laminación	L_p	mm
Tiempo de laminación	t_p	s

2.2.1 DEFORMACIÓN

De acuerdo con su definición deformación es el cambio en el tamaño o forma de un material debido a esfuerzos externos producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo. Esta puede ser longitudinal, donde el desplazamiento del material se da debido a un alargamiento en un solo eje; por otro lado, puede ser angular y considerar el cambio de forma respecto a un ángulo de desplazamiento [23].

Durante la laminación de un producto largo se distinguen dos cambios en la forma del material inicial, uno es longitudinal debido a que la palanquilla comienza con un determinado largo y al final del proceso este largo terminó aumentando considerablemente; la otra deformación notable es en la reducción de la sección transversal de esta. En el caso longitudinal la deformación es lineal, lo cual es fácil de

observar debido al claro alargamiento presentado, mientras que en la sección transversal ocurren deformaciones que mediante algunos métodos es posible considerar la presencia de deformaciones lineales en dos ejes.

En el caso de la deformación plástica que se presenta en la sección transversal de la palanquilla se tienen valores positivos y negativos de esta dependiendo de la forma de los rodillos de laminación y la disposición del material en cada estante. Esto es debido a que en cada pase la forma transversal del material se va alternando entre cuadrados y rectángulos, o bien, círculos y óvalos, de esta manera poco a poco se van dando las dimensiones requeridas para el producto final [24]. En la figura 2.4 se muestra una representación esquemática de las deformaciones lineales aplicadas a la palanquilla en cada estante, donde W y H son el ancho y la altura de la sección transversal del material, mientras que L es el largo de la palanquilla. La figura 2.4 muestra las dimensiones iniciales y finales durante el proceso de deformación plástica; se aprecia que, aunque la fuerza de laminación solo es aplicada en un sentido ésta afecta en los tres ejes del material.

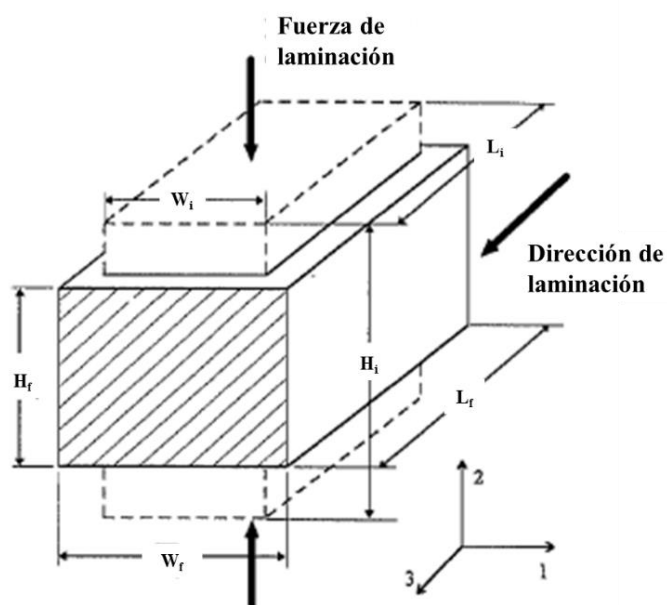


Figura 2.4. Representación esquemática de deformación del material durante proceso de laminación [24].

En los primeros pases de laminación al tener cuadrados y rectángulos es sencillo representar las deformaciones lineales aplicadas en dos ejes, después esto se vuelve un problema al tener círculos y óvalos presentes en las formas de la sección transversal de la palanquilla. Para su correcta interpretación existen varios métodos que consideran rectángulos al momento de identificar las longitudes que se utilizan para calcular las deformaciones pertinentes, tal y como se muestra en la figura 2.5 [24].

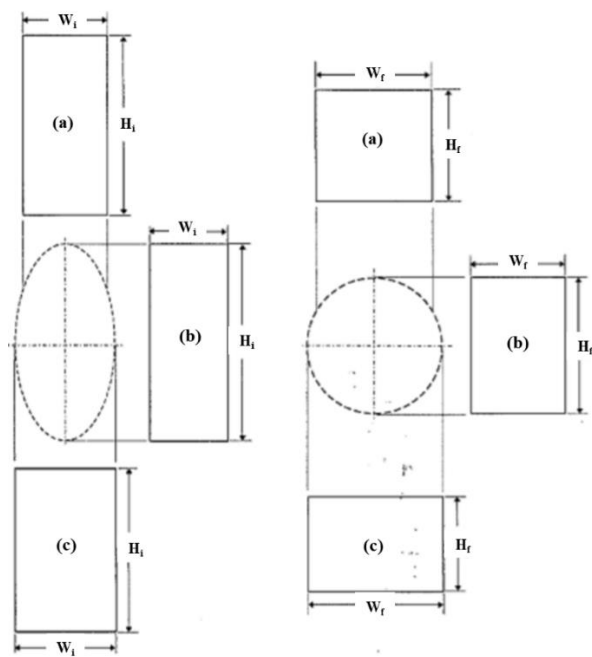


Figura 2.5. Tres métodos para calcular el área de la sección transversal equivalente. a) Método de relación ancho-altura. b) Método de máxima altura. c) Método de máximo ancho [24].

Para identificar las dimensiones de la sección transversal del material se utiliza la letra H para el alto y W para el ancho, de esta manera se identifican estas dimensiones en cada punto del proceso. Como ya se mencionó anteriormente durante el proceso en cada pase de laminación existe una deformación positiva y otra negativa, esto quiere decir que cuando existe una reducción lineal del alto (H) del material, se presenta un alargamiento lineal en el ancho (W) del mismo. El cálculo de estas deformaciones en cada eje del material se puede realizar fácilmente obteniendo la diferencia entre la

longitud final y la inicial y dividiéndola por la longitud original, así se conocen dos deformaciones lineales después de cada pase de laminación [25].

Es importante hacer una correcta identificación de las dimensiones H y W a la entrada y salida de cada estante de laminación, por lo que hay que considerar la disposición del material respecto a los rodillos de laminación, de esta manera se obtendrá un cálculo correcto de deformación. Considerando lo anterior, es necesaria la identificación de H y W dos veces por cada estante, una justo antes de que se realice la deformación, tendiendo así las dimensiones iniciales, y otra después de que se lleve a cabo la deformación para obtener así las longitudes finales [26]. En la figura 2.6 se observa la identificación de H y W antes y después de la deformación aplicada por los rodillos de laminación.

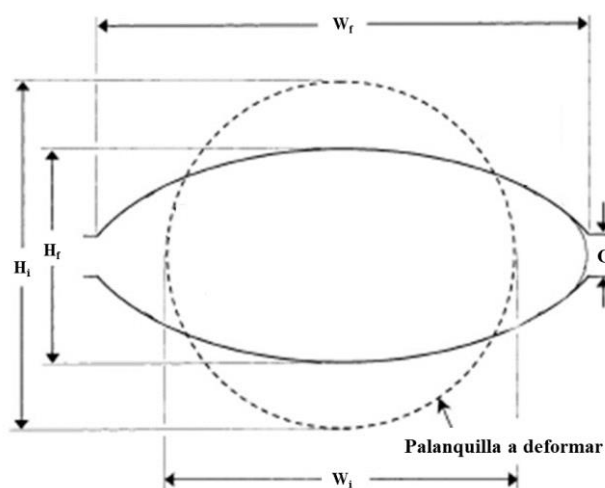


Figura 2.6. Identificación de H y W considerando deformaciones lineales en un pase de laminación de productos largos [26].

2.2.2 CÁLCULO DE DEFORMACIÓN PARA SIMULACIÓN DE PROCESO DE LAMINACIÓN DE PRODUCTOS LARGOS

Para calcular la deformación del material en cada pase de laminación se consideran dos ejes donde se aplica fuerza para lograr reducir el material a la forma siguiente después de cada estante, esta forma está definida por el diámetro de los rodillos y su radio efectivo dependiendo la configuración de la línea de laminación que

se desee replicar. Primero es necesario pasar las dimensiones de los círculos y óvalos a rectángulos para después poder llevar a cabo el cálculo de la deformación en cada uno de los ejes antes mencionado [24-26]. En la figura 2.7 se especifica el método a considerar para las deformaciones a lo largo del proceso de laminación cambiando los rectángulos y cuadrados por círculos y óvalos.

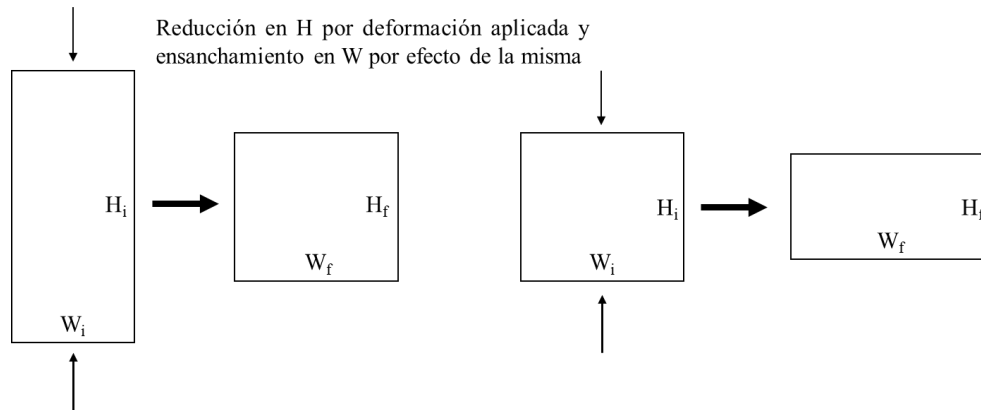


Figura 2.7. Representación esquemática del efecto de las deformaciones en eje de altura (H) del material.

En cada estante de laminación se producen tres deformaciones al mismo tiempo, dos de ellas se llevan a cabo en la sección transversal del material y la tercera longitudinalmente; esta última se puede despreciar para el estudio del desarrollo mecánico del proceso de laminación de productos largos, esto es debido a que la fuerza de laminación sólo es aplicada en la altura y el ancho de la palanquilla en cada pase.

La deformación en un pase de laminación utilizando el método de la sección transversal equivalente es expresada como el logaritmo natural del cambio en la altura equivalente en la sección transversal del material, siendo H_i y H_f la altura inicial y final respectivamente [27].

$$\varepsilon_p = \ln\left(\frac{H_i}{H_f}\right) \quad (2.1)$$

La ecuación (2.1) sólo considera la deformación en un solo eje, siendo este la altura H de la sección transversal de material. Considerando este modelo donde la fuerza de laminación se aplica sobre el eje H, se tendrá una reducción en la longitud del mismo sin importar las demás deformaciones presentes en el material. Por lo tanto, esta ecuación podría ser utilizada para calcular la deformación plástica en la laminación de productos planos, mientras que para productos largos no es válido, debido a la falta de consideración del ensanchamiento producido en el eje W de la sección transversal del material.

Partiendo de la ecuación (2.1) y agregando una constante que la multiplica, tal y como se muestra en la ecuación (2.2) [28]. Esta ecuación es una corrección a la anterior y es la utilizada para el cálculo de la deformación plástica en productos planos [29], por lo que sirve como base para establecer la ecuación específica utilizada para la laminación de productos largos.

$$\varepsilon_p = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{H_i}{H_f} \right) \quad (2.2)$$

Para realizar un cálculo de la deformación plástica existente en un pase de laminación de productos largos es necesario considerar los tres ejes donde influyen las fuerzas de laminación sobre el material. Estas deformaciones se pueden tomar en cuenta como lineales ya que su desplazamiento se realiza sobre su mismo eje. A continuación, se describen las ecuaciones de los tres ejes involucrados en el proceso.

En la sección transversal de la palanquilla se llevan a cabo dos de las deformaciones involucradas, el ancho W y el alto H, las cuales se expresan como una deformación simple, al igual que la elongación L presentada en el material.

Deformación plástica en ancho W de la sección transversal de palanquilla (eje-x):

$$\varepsilon_W = \ln \left(\frac{W_i}{W_f} \right) \quad (2.3)$$

Donde W_i y W_f es el ancho inicial y final respectivamente.

Deformación plástica en alto H de la sección transversal de palanquilla (eje-y):

$$\varepsilon_H = \ln\left(\frac{H_i}{H_f}\right) \quad (2.4)$$

Donde H_i y H_f es la altura inicial y final respectivamente.

Deformación plástica en largo L de la sección transversal de palanquilla (eje-z):

$$\varepsilon_L = \ln\left(\frac{L_i}{L_f}\right) \quad (2.5)$$

Donde L_i y L_f es el largo inicial y final respectivamente.

Un signo positivo en el valor de la deformación plástica significa que existe una contracción en el material, mientras que al haber una extensión el signo es negativo. Debido a que la deformación aplicada a la palanquilla por los rodillos de laminación siempre es en el eje-y, esta será positiva debido a la reducción que existe en la altura del material, mientras que el eje-x y eje-z serán negativos debido al ensanchamiento y elongación respectivos de la palanquilla durante cada pase de laminación.

Una vez definidas las principales deformaciones presentes en los tres ejes de una palanquilla durante el proceso de laminación en cada estante, el autor Lee definió la deformación plástica de un pase de laminación partiendo de la ecuación propuesta por Kawai. La ecuación (2.6) muestra este cálculo, donde se consideran las tres deformaciones anteriormente presentadas [24].

$$\varepsilon_p = \left[\frac{2}{3} (\varepsilon_W^2 + \varepsilon_H^2 + \varepsilon_L^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

En el proceso de laminación de productos largos es prácticamente imposible obtener el valor de la deformación longitudinal debido a diferentes factores como la dificultad de realizar una medición en la palanquilla y la cercanía entre cada estante de laminación. Por tal razón se busca simplificar la ecuación presentada por Lee a dos variables de deformación, alto y ancho de la sección transversal del material; para esto

se considera la condición del volumen constante, donde teóricamente sin importar las deformaciones aplicadas en los diferentes ejes de una pieza el volumen de la misma siempre se mantendrá constante, en la ecuación (2.7) se muestra la representación matemática de esta consideración.

$$\varepsilon_L = -\varepsilon_W - \varepsilon_H \quad (2.7)$$

A partir de esta consideración se realiza el siguiente desarrollo de la ecuación de deformación plástica por pase de laminación para establecer una ecuación (2.8) que utilice solo las variables de deformación en el eje-x y eje-y.

$$\begin{aligned} \varepsilon_p &= \left\{ \frac{2}{3} [\varepsilon_W^2 + \varepsilon_H^2 + (-\varepsilon_W - \varepsilon_H)^2] \right\}^{\frac{1}{2}} \\ \varepsilon_p &= \left[\frac{2}{3} (\varepsilon_W^2 + \varepsilon_H^2 + \varepsilon_W^2 + 2\varepsilon_W\varepsilon_H + \varepsilon_H^2) \right]^{\frac{1}{2}} \\ \varepsilon_p &= \left[\frac{2}{3} (2\varepsilon_W^2 + 2\varepsilon_H^2 + 2\varepsilon_W\varepsilon_H) \right]^{\frac{1}{2}} \\ \varepsilon_p &= \left[\frac{4}{3} (\varepsilon_W^2 + \varepsilon_H^2 + \varepsilon_W\varepsilon_H) \right]^{\frac{1}{2}} \\ \varepsilon_p &= \frac{2}{\sqrt{3}} (\varepsilon_W^2 + \varepsilon_H^2 + \varepsilon_W\varepsilon_H)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (2.8)$$

En la ecuación (2.9) se sustituyen los cálculos de las deformaciones individuales dentro de la ecuación (2.8), con esto se establece un método para realizar el cálculo de la deformación plástica total en cada pase de laminación de una palanquilla.

$$\varepsilon_p = \frac{2}{\sqrt{3}} \left\{ \left[\ln \left(\frac{W_i}{W_f} \right) \right]^2 + \left[\ln \left(\frac{H_i}{H_f} \right) \right]^2 + \ln \left(\frac{W_i}{W_f} \right) \ln \left(\frac{H_i}{H_f} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

2.2.3 VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN

La velocidad de deformación comparte la misma importancia que la deformación dentro del proceso de laminación, ya que influye en el comportamiento del material al momento de sufrir los cambios en su forma. Este parámetro involucra justamente la deformación aplicada a la palanquilla y el tiempo en el que esta se lleva a cabo.

Es importante no confundir la velocidad del material con la velocidad de deformación, ya que aparte de la velocidad que existe en la línea de laminación, en cada estante de laminación existe la influencia de factores como la forma de la palanquilla, el radio y la velocidad de los rodillos que se encargan de aplicar la deformación al material y el espacio que hay entre ellos. Por otro lado, para obtener este valor es necesario el cálculo de otras variables como lo es la distancia de laminación, la cual es la longitud que recorre el rodillo para tener contacto con el material y llevar a cabo su deformación [30-31].

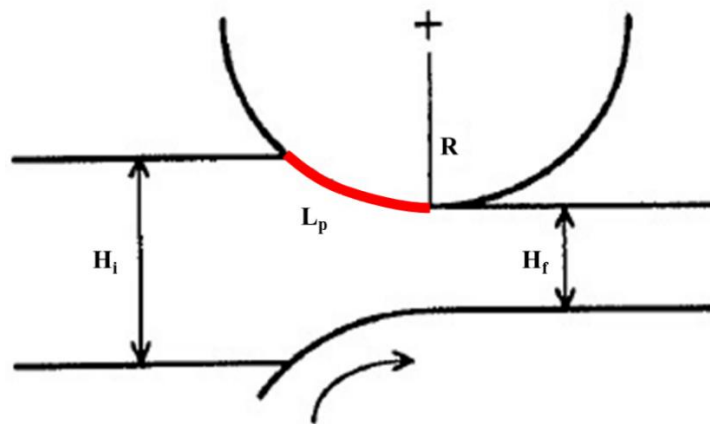


Figura 2.8. Esquema de contacto de rodillo de laminación sobre palanquilla de acero.

De acuerdo con la figura 2.8, donde se muestra la distancia de laminación L_p , se puede observar que la deformación solo se da en ese pequeño fragmento del rodillo, por lo que la velocidad de deformación debe considerarse de acuerdo a la deformación dada por el rodillo de laminación y el tiempo que dura para llevar a cabo dicho cambio en la forma del material.

La deformación y la velocidad de deformación aparte de la temperatura son los parámetros esenciales para realizar una simulación del proceso de laminación, ya que, aunque son valores que no se utilizan directamente en la programación de una prueba, estos son la base para obtener dicha simulación [32].

2.2.4 CÁLCULO DE VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN PARA SIMULACIÓN DE PROCESO DE LAMINACIÓN DE PRODUCTOS LARGOS

Una velocidad es la tasa de cambio de un determinado factor, por lo que la velocidad de deformación es el cambio de la forma de una palanquilla en el tiempo en el que transcurre dicha deformación, en la ecuación (2.10) se describe matemáticamente tal relación, donde ε_p es la deformación plástica dada en cada estante de laminación descrita anteriormente, y t_p es el tiempo de laminación.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_p}{t_p} \quad (2.10)$$

El tiempo de laminación es el tiempo durante el cual se lleva a cabo la deformación en el material, en otras palabras, es el lapso en el que los rodillos de laminación tienen contacto con la palanquilla en cada estante de laminación. En su cálculo intervienen variables como la longitud de laminación y las dimensiones de los rodillos que llevan a cabo la deformación. Según el autor Lee la ecuación (2.11) describe el cálculo para el tiempo de laminación, en el cual intervienen las variables L_p , N_p y R_{ef} , siendo estas la distancia de laminación, las revoluciones por minuto de los rodillos de laminación y el radio efectivo de laminación, las cuales se definirán más adelante [21].

$$t_p = \frac{60L_p}{2N_pR_{ef}} \quad (2.11)$$

La distancia de laminación se define con la ecuación (2.12), la cual describe la longitud de contacto que los rodillos de laminación tienen con el material en cada

estante de laminación durante el proceso de deformación plástica. Esta ecuación considera la altura inicial y final de la palanquilla debido a que es en ese eje donde se aplica la fuerza de laminación; el radio máximo de los rodillos y la variable G que representa la distancia que existe entre los dos rodillos que llevan a cabo la deformación [21].

$$L_p = \left\{ \left[R_{max} - \left(\frac{H_f - G}{2} \right) \right] (H_i - H_f) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

Las revoluciones por minuto de los rodillos de laminación tal y como se muestra en la ecuación (2.13) se calculan a partir de la velocidad que tiene el material en cada estante de laminación y el radio efectivo de los rodillos.

$$N_p = \frac{60000V}{2\pi R_{ef}} \quad (2.13)$$

Por último, definimos el radio efectivo de laminación, el cual es un valor que se calcula a partir del radio máximo de los rodillos de laminación para obtener un valor más certero al momento de realizar el cálculo del tiempo de laminación. Existe un método analítico para la determinación de R_{ef} , aunque este método es preciso se puede sustituir por cálculos matemáticos utilizando cierta ecuación [33].

La ecuación (2.14) considera el método de la sección transversal equivalente utilizado en el presente trabajo. Tomando en cuenta lo anterior A_f es el área de la sección transversal del material después de aplicar la deformación plástica correspondiente en cada estante de laminación, W_f el ancho final de la misma sección y G el espacio entre los rodillos de laminación [34].

$$R_{ef} = R_{max} - \left[\frac{\left(\frac{A_f}{W_f} - G \right)}{2} \right] \quad (2.14)$$

2.3 PRUEBA DE TORSIÓN COMO ENSAYO MECÁNICO PARA SIMULACIÓN DE LAMINACIÓN DE PRODUCTOS LARGOS

La torsión de un material es la deformación axial que se da al mismo, por lo tanto, no existe un alargamiento, sino un giro que genera una deformación plástica. Sin importar en qué dirección sea, una deformación plástica implica que al momento de aplicar un esfuerzo sobre un material este supere el límite de cedencia y no vuelva a su forma original, manteniendo así su nueva forma, generando de esta manera modificaciones en la microestructura del material que afectarán en las propiedades mecánicas que este posea a partir de ese instante [35].

Un ensayo de torsión es una prueba que consiste en aplicar una torsión en una sola dirección a una probeta, para determinar la capacidad de soporte a la deformación plástica. Para llevar a cabo esta prueba una probeta se sujeta firmemente de uno de sus extremos, mientras que en el otro se aplica un giro generado por un motor que ejerce cierto esfuerzo sobre el material [36]. Regularmente esta prueba se lleva a cabo a temperatura ambiente y se concluye hasta llegar a la ruptura del material, de esta manera se obtiene la información necesaria para evaluar la capacidad de deformación plástica del mismo.

Por otro lado, este ensayo puede ser realizado en caliente, lo cual implica que la prueba se lleve a cabo a una determinada temperatura debido al control que se tiene de la misma. Con ensayos de torsión en caliente es posible hacer simulaciones del proceso de laminación y el estudio del fenómeno de recristalización en los materiales, esto debido a la capacidad que se tiene para controlar la temperatura de forma variable durante la deformación aplicada a un material, la cual puede ser en grandes magnitudes gracias a la facilidad de realizar los giros correspondientes. [37].

Para realizar una prueba de torsión en caliente se considera que el ensayo será por pasos, en los cuales se debe definir la deformación y la velocidad con la que se aplicará, así como la temperatura en ese preciso instante, por otro lado, es necesario definir también los tiempos que existirán entre cada pase de deformación.

2.3.1 PRUEBA DE TORSIÓN EN CALIENTE EN GLEEBLE PARA SIMULAR PROCESO DE LAMINACIÓN DE PRODUCTOS LARGOS

La máquina Gleeble tiene capacidad de realizar pruebas de torsión en caliente, ya que cuenta con un módulo especializado para llevar a cabo dicho ensayo, donde la probeta a ensayar se sujeta mediante mordazas dentro de una cámara al vacío. Mientras que una de las mordazas se mantiene firme y sin movimiento, la otra se encarga de realizar los giros especificados de acuerdo con la programación requerida. La cámara donde se lleva a cabo la prueba permite realizar vacío y crear así un ambiente libre de contaminación, esto es debido a que se manejan altos valores de temperatura y puede existir oxidación del material durante el proceso [38].

La programación del ensayo de torsión en caliente se lleva a cabo en un programa dentro de una computadora enlazada a la máquina Gleeble, en esta programación se sigue la secuencia de la prueba y se ingresan los datos necesarios para que la máquina realice el ensayo dentro de los parámetros especificados. Cada prueba se divide en secciones, siendo estas los calentamientos, enfriamientos o deformaciones aplicadas a la probeta, para especificar cada sección se definen los valores de la temperatura en cada punto, así como el tiempo que tarda en cambiar a la siguiente temperatura, la deformación realizada, la cual debe indicarse en cantidad de giro de la probeta (radianes) y el tiempo en el que se aplica la deformación [38].

En estas pruebas los dos valores mecánicos más significativos son el esfuerzo y la deformación aplicada durante el ensayo, los cuales son esenciales para el análisis y comparación con el proceso de laminación en caliente de productos largos. Siciliano en su trabajo presenta las ecuaciones de esfuerzo equivalente (2.15) y deformación equivalente (2.16) con las que es posible llevar a cabo tanto la programación de dicha prueba, como la interpretación de los resultados obtenidos. En estas ecuaciones se consideran las dimensiones del área reducida de la probeta de torsión que se utilizará para el ensayo, siendo L la longitud y r el radio, la torsión especificada θ y el torque T obtenido de los resultados [39].

$$\sigma_{eq} = \frac{3.3\sqrt{3}T}{2\pi r^3} \quad (2.15)$$

$$\varepsilon_{eq} = \frac{r\theta}{L\sqrt{3}} \quad (2.16)$$

La probeta para realizar un ensayo de torsión en caliente tiene una forma definida tal y como se muestra en la figura 2.9, como se puede observar en la sección reducida de la probeta es donde se lleva a cabo la torsión, mientras que las mordazas de la máquina la sujetan de los dos extremos. El diseño de la probeta asegura que las deformaciones aplicadas sólo sean en la sección reducida, así como la temperatura que debe tener el material, de esta manera se obtiene una uniformidad en todas las pruebas que se realicen y se facilita a la caracterización del ensayo una vez finalizado.

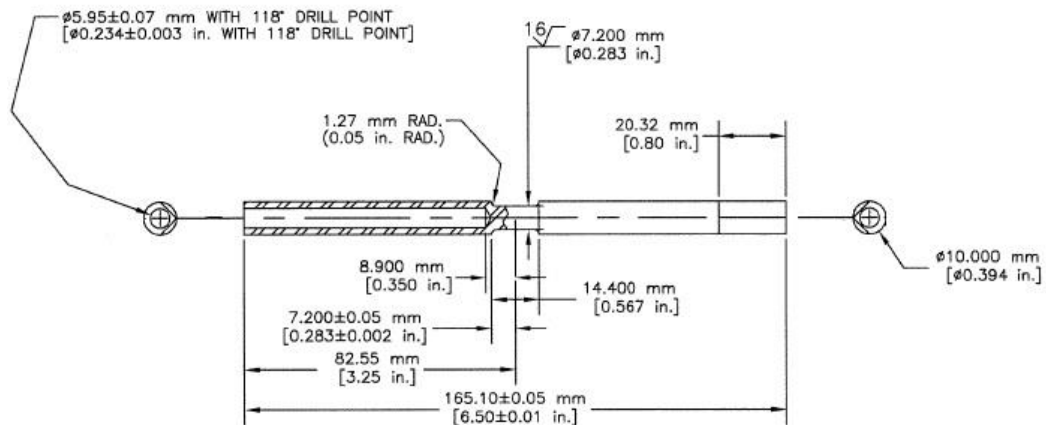


Figura 2.9. Probeta de 10 mm para ensayo de torsión en caliente en máquina Gleeble.

El principal objetivo de realizar un ensayo de torsión en caliente es conocer el esfuerzo realizado en cada deformación aplicada, de esta manera se obtiene la gráfica de esfuerzo – deformación, la cual permite el cálculo de la temperatura de no recristalización y el MFS (Fluencia de Esfuerzo Promedio), siendo estos dos parámetros indispensables para el estudio del comportamiento mecánico y metalúrgico de un acero durante su laminación en caliente.

El análisis de los resultados obtenidos después de una prueba de torsión en caliente puede ser reforzado con la caracterización de la probeta ensayada y estudiar de esta

forma el comportamiento metalúrgico del material a lo largo de todo el proceso termomecánico, esto es debido a que las condiciones establecidas para la prueba fueron las mismas que las que se encuentran en un proceso industrial. Cuando lo que se busca es estudiar y replicar el proceso de laminación en caliente con un ensayo de torsión, no es estrictamente necesaria la caracterización del material posterior a las pruebas realizadas. Una vez que el proceso real se ha replicado de forma correcta, entonces se prosigue con el estudio metalúrgico y la validación del comportamiento del acero durante una simulación del proceso de laminación en caliente.

2.4 MEAN FLOW STRESS (ESFUERZO DE FLUENCIA PROMEDIO)

Cuando se estudia el proceso de laminación en caliente de un acero, conocer el desarrollo mecánico del mismo es indispensable, ya que está involucrado tanto la fuerza que se debe aplicar para llevar a cabo las deformaciones deseadas como la cantidad de deformación plástica que el material puede soportar sin llegar a la ruptura del mismo. El valor de Mean Flow Stress (MFS) es un parámetro que sirve para entender el comportamiento mecánico que tiene un determinado acero durante el proceso de laminación en caliente.

El Flow Stress o esfuerzo de fluencia, es el valor de esfuerzo necesario para seguir deformando un material, o bien, para mantener la fluencia del mismo. Es un parámetro que se utiliza cuando existe más de una deformación plástica en el material. Este se vuelve aún más influyente cuando se analiza el proceso de laminación en caliente, ya que depende de las deformaciones presentadas anteriormente y la temperatura a la que se encuentra el material en ese preciso instante [40].

En el estudio mecánico del proceso de laminación en caliente a partir de simulaciones de este con pruebas de torsión es comúnmente utilizado el Mean Flow Stress, el cual es un término matemático utilizado para determinar la resistencia a la deformación de un metal en un determinado pase de laminación. Al ser un parámetro que puede ser calculado tanto del resultado de una prueba de torsión en caliente como de la información que brinda una línea de laminación, puede ser utilizado como punto

de comparación y en dado caso como validación de la réplica del proceso de laminación mediante un ensayo de torsión [41-42].

2.4.1 MFS A PARTIR DE PRUEBA DE TORSIÓN EN CALIENTE

La información resultante después de realizar un ensayo de torsión en caliente permite crear una gráfica de esfuerzo – deformación, la cual será fundamental para el estudio del MFS del proceso de laminación replicado. En la figura 2.10 se presenta un ejemplo de una gráfica esfuerzo – deformación, la cual describe el comportamiento del esfuerzo generado por la máquina al momento de realizar las deformaciones indicadas. Debido a que son varias deformaciones con diferencia de tiempo y temperatura entre sí, la gráfica muestra una joroba para cada pase de deformación, tiene esta forma ya que el esfuerzo aplicado comienza a subir hasta llegar a la deformación requerida; por lo tanto, es muy importante la temperatura a la que se encuentre el material, ya que eso influirá directamente en la cantidad de esfuerzo necesario en cada punto [43].

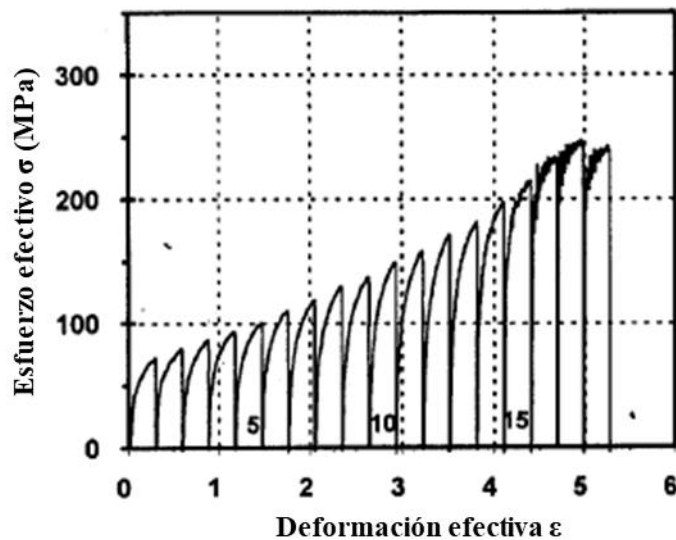


Figura 2.10. Ejemplo de gráfica esfuerzo – deformación a partir de prueba de torsión en caliente de 18 pases de deformación [44].

Para calcular el MFS a partir de una prueba de torsión en caliente se utiliza la gráfica de esfuerzo – deformación, ya que a partir de cada joroba se obtiene un valor específico de MFS, para después realizar la gráfica de MFS – temperatura como el ejemplo que se muestra en la figura 2.11. Esta gráfica sirve para analizar el comportamiento de los esfuerzos aplicados a un material a una temperatura específica, de igual forma a partir de esta gráfica es posible obtener temperaturas críticas de transformación como lo son A_1 , A_3 y temperatura de no recristalización. [45]

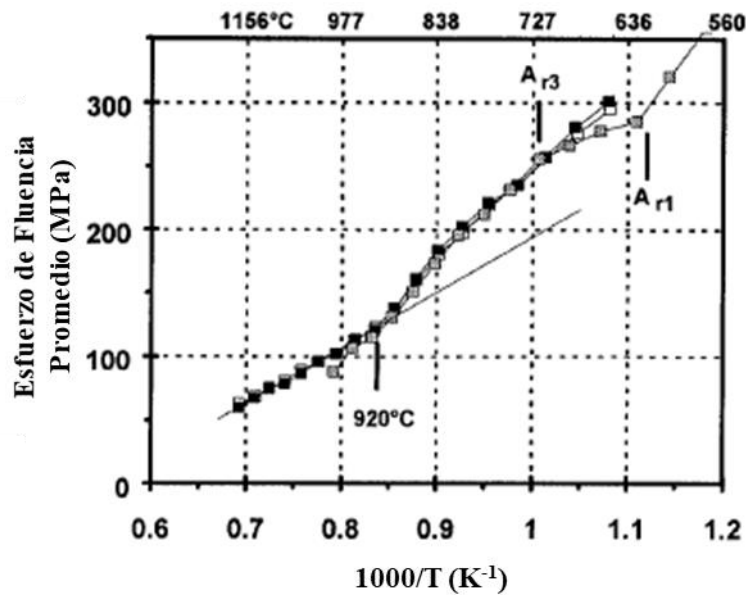


Figura 2.11. Ejemplo de gráfica MFS – temperatura y determinación de temperaturas críticas de transformación [44].

Debido a que existe un valor de MFS por cada joroba de esfuerzo – deformación, el cálculo del mismo se hace independiente para cada una de ellas. En la figura 2.12 se muestra un ejemplo de una sola joroba y la aplicación del cálculo de MFS, donde para realizarlo se calcula el área bajo la curva de la gráfica y se divide entre la deformación correspondiente al esfuerzo analizado, tal y como se describe en la ecuación (2.17) [46].

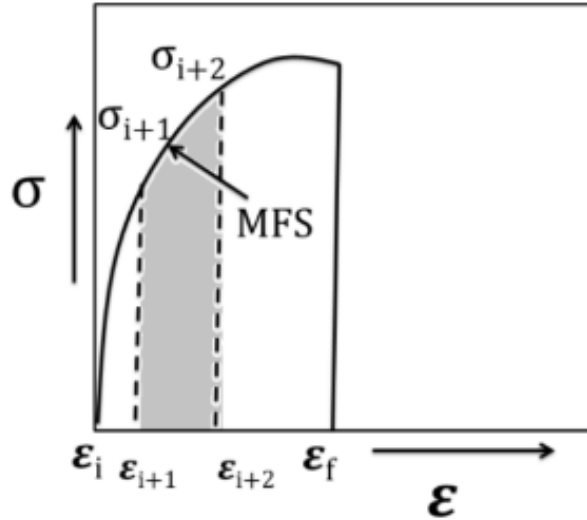


Figura 2.12. Representación gráfica y matemática para cálculo de MFS [45].

$$MFS = \frac{1}{\varepsilon_f - \varepsilon_i} \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_f} \sigma d\varepsilon \quad (2.17)$$

Para resolver la ecuación (2.17) y obtener un valor más exacto es necesaria la utilización de una sumatoria que involucre la mayor cantidad de divisiones posible dentro de cada joroba, en las ecuaciones (2.18) y (2.19) se presenta el desglose de la solución [46]. Entre mayor sea la cantidad de cálculos realizados dentro de la sumatoria, mejor será la exactitud del resultado, por lo que es recomendable utilizar algún software matemático para resolver dicha ecuación.

$$MFS = \frac{1}{\varepsilon_f - \varepsilon_i} \sum_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_f} \sigma_{prom} \Delta\varepsilon \quad (2.18)$$

$$MFS = \frac{1}{\varepsilon_f - \varepsilon_i} \left[\begin{aligned} & \frac{(\sigma_i + \sigma_{i+1})}{2} (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) \\ & + \frac{(\sigma_{i+1} + \sigma_{i+2})}{2} (\varepsilon_{i+2} - \varepsilon_{i+1}) + \dots \\ & + \frac{(\sigma_f + \sigma_{f-1})}{2} (\varepsilon_f - \varepsilon_{f-1}) \end{aligned} \right] \quad (2.19)$$

2.4.2 MFS A PARTIR DE LÍNEA DE LAMINACIÓN EN CALIENTE

En una línea de laminación en caliente no se tiene la recolección de información como para obtener una gráfica de esfuerzo – deformación, por lo que para conocer el MFS de cada pase de laminación es necesario el análisis de algunos de los parámetros que se ven involucrados en el proceso. El cálculo debe realizarse en cada pase de laminación independientemente de las demás deformaciones aplicadas al material.

Existen algunos métodos para calcular el MFS directamente del proceso de una línea de laminación utilizando diferentes ecuaciones, de las cuales el parámetro principal es la fuerza de laminación que existe en cada pase de laminación. En la Tabla 2.2 se muestran métodos propuestos por diferentes autores, donde la principal diferencia radica en las variables que se utilizan, dependiendo sea el caso cada método puede ser utilizado para realizar dicho cálculo [46].

Tabla 2.2. Ecuaciones para cálculo de MFS según diferentes autores [46].

Método (Autor)	Ecuación
Sims	$MFS = \frac{P}{\frac{2}{\sqrt{3}}wLQ} \quad (2.20)$
Ford y Alexander	$\bar{\tau}_{Ys} = \frac{P/w}{\sqrt{R(h_i-h_f)} \left[1.57 + \frac{\sqrt{R(h_i-h_f)}}{(h_i-h_f)} \right]}, \quad MFS = \sqrt{3}\bar{\tau}_{Ys} \quad (2.21)$
Friction-Hill	$MFS = \frac{\sqrt{3}P}{2 \left[\frac{1}{Q}(e^Q - 1)wL_p \right]} \quad (2.22)$

Los tres métodos presentados comparten ciertas variables donde:

P = Fuerza de laminación.

W = Longitud de ancho en la sección transversal del material.

H = Longitud de alto en la sección transversal del material.

R = Radio de rodillo de laminación.

L_p = Longitud de laminación.

Q = Factor geométrico considerado por cada autor.

CAPÍTULO III

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se describen todos los pasos que fueron necesarios para realizar la experimentación de este trabajo. El objetivo de este proceso experimental es llevar a cabo la simulación de un proceso de laminación en caliente de productos largos mediante una prueba de torsión con la máquina Gleeble y validar a partir de los resultados obtenidos el uso de este ensayo como una réplica válida de dicho proceso.

3.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE UNA LÍNEA DE LAMINACIÓN DE PRODUCTOS LARGOS DE ACERO

Para definir un modelo matemático y llevar a cabo la simulación del proceso de laminación de productos largos es necesario conocer y considerar todas las variables involucradas en el mismo, la mejor forma de obtener esta información es basarse en una línea de laminación real, con el objetivo de replicar el mismo proceso a pequeña escala. Se estudió el proceso que se lleva a cabo en la planta de laminación de productos largos de Ternium, la cual se ubica en Puebla y es la productora del alambrón utilizado para el estudio en este trabajo. En la figura 3.1 se muestra una sección de la línea de laminación para productos largos en la planta Ternium Puebla.



Figura 3.1. Sección de desbaste en línea de laminación de productos largos planta Ternium Puebla.

Después de realizar la revisión bibliográfica del proceso de laminación de productos largos en general, se definieron las variables fundamentales para modelar este proceso, el cual principalmente involucra deformaciones, velocidades de deformación y temperaturas en cada pase de laminación. Estas variables deben considerarse y ajustarse a los datos que se requieren para realizar las pruebas de torsión correspondientes. De acuerdo con esta información y las consideraciones dentro de una línea de laminación industrial, se enlistan las variables que fueron necesarias obtener del proceso real de laminación.

- Forma y área transversal de palanquilla a la entrada y salida de cada pase de laminación.
- Diámetro de rodillos de laminación.
- Velocidad de palanquilla a lo largo del proceso.
- Distancias entre cada estante de laminación.
- Temperatura de la palanquilla en cada pase de laminación.

Se recopiló la información necesaria de la planta Ternium Puebla consultando la base de datos del proceso. De esta manera se obtuvieron las variables antes mencionadas, excepto por la temperatura del material en cada pase de laminación, esto es debido a que no se cuenta con pirómetros instalados en cada uno de los estantes.

La forma y el área transversal de la palanquilla en cada estante de laminación está dada por una secuencia de pases que describe las dimensiones del material en cada

pase, por lo que esto fue indispensable para posteriormente realizar los cálculos de deformaciones y reducciones de área durante el proceso. Los diámetros de los rodillos se obtuvieron consultando la información generada por el taller de rodillos, el cual se encarga de dar mantenimiento a los mismos y diseñarlos de tal manera que cumplan con los pases de laminación específicos durante el proceso.

Fue necesaria la visita a la planta Ternium en Puebla para estudiar y conocer el proceso completo de laminación de productos largos, de esta manera se recopiló la información antes mencionada y se llevó a cabo las mediciones de temperaturas correspondientes.

Debido a que no existe una medición de la temperatura del material en cada estante de laminación, se llevó a cabo la medición de la misma manualmente. Para esto se utilizó un pirómetro con capacidad para temperaturas de hasta 1300°C, ya que la temperatura de cada palanquilla al salir del horno de precalentamiento se encuentra alrededor de 1200°C. La toma de temperaturas se realizó en diferentes calibres del producto, esto para evaluar la diferencia que pueda existir en las variaciones del proceso. Para realizar esta tarea fue necesario obtener los permisos correspondientes y tomar las medidas de seguridad adecuadas para personalmente tomar una parte de las temperaturas en el material durante el proceso de laminación, posteriormente con la ayuda de operadores se continuó con la actividad hasta obtener la información deseada. Debido a que el acero 9254 solo se lamina ciertos días al mes y los problemas de distancia entre ciudades, el proceso de la toma de temperaturas tardó aproximadamente dos meses en completarse.

3.2 PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN DE PROCESO TERMOMECÁNICO DE PRODUCTOS LARGOS EN PLANTA PUEBLA

Una vez obtenida la información requerida mencionada anteriormente fue necesario su análisis y organización, de tal forma que sea útil al momento de llevar a cabo una simulación. Aunque algunos de estos datos se utilizaron de forma directa, los demás ayudaron en el cálculo de ciertas variables especificadas por diferentes ecuaciones. El conjunto de ecuaciones necesarias y la aplicación de estas definió el

modelo matemático a seguir para llevar a cabo una simulación de laminación de productos largos.

En fin, este conjunto de ecuaciones resulta en la obtención de ciertas variables necesarias para la programación de una prueba de torsión en la máquina Gleeble, siendo estas, deformación y velocidad de deformación en cada pase de laminación, mientras que también son utilizados valores del proceso, los cuales son, temperaturas del material durante el proceso y el tiempo que existe entre cada deformación aplicada a la palanquilla.

3.3 PROPUESTA DE MODELO PARA SIMULACIÓN DEL PROCESO DE LAMINACIÓN

A partir de la revisión bibliográfica y el análisis de la información obtenida del proceso de laminación real se realizó la propuesta de un modelo que involucra ciertas ecuaciones para llevar a cabo una simulación del proceso a partir de una prueba de torsión. Con este modelo será posible realizar dichas simulaciones en la máquina Gleeble.

En la figura 3.2 se muestra el esquema del modelo con el cual se parte de la información del proceso real hasta llegar a las variables requeridas para realizar una prueba de torsión en la máquina Gleeble.

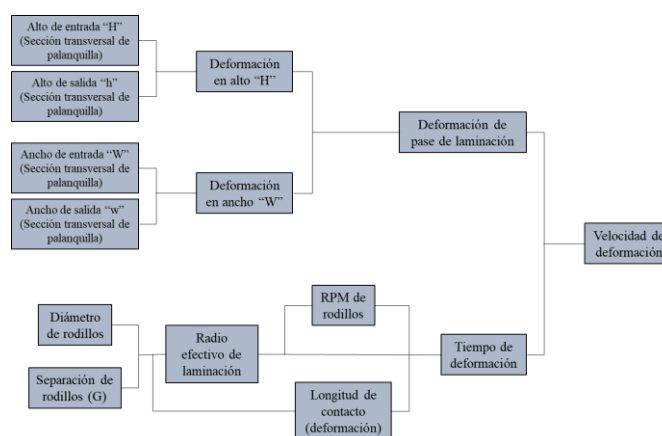


Figura 3.2. Esquema de variables para realizar cálculos necesarios en la programación de prueba de torsión en caliente a partir de datos de proceso real.

Siendo esta la propuesta para obtener un modelo que sirva para llevar a cabo la simulación de un proceso real de laminación de productos largos, se realizaron las pruebas de torsión en base a este modelo para validar su correcto desarrollo.

3.4 DISEÑO EXPERIMENTAL PARA PRUEBAS DE TORSIÓN EN GLEEBLE

Para definir las pruebas de torsión que se llevarían a cabo se consideraron varios ciclos y sus respectivas repeticiones. Los ciclos se basaron en las distintas configuraciones que hay en el proceso de laminación para los diferentes calibres del producto final. Los diámetros de la sección transversal del alambón producido van desde 12 mm hasta 23.50 mm, siendo 19.84 mm el calibre más laminado; tomando en cuenta esto se estableció aplicar el modelo propuesto a cuatro configuraciones, con esto se trató de abarcar la mayor parte del proceso de laminación en general. Aunque se consideró realizar pruebas para simular la laminación del producto de 12 mm, esto terminó por descartarse debido a limitaciones de la máquina Gleeble, al ser una gran cantidad de deformación aplicada se tuvieron problemas con el termopar soldado en la probeta.

Por otro lado, se consideró realizar pruebas con el control de temperatura del ensayo apagado, esto con la finalidad de analizar el comportamiento de la temperatura de acuerdo con las deformaciones que se aplican en cada pase de laminación. Lo anterior fue necesario ya que en el registro de la medición de temperaturas del proceso real existe un aumento entre algunos de los pases de laminación. Aunque esto lo explicamos rápidamente como un aumento de temperatura por calentamiento adiabático, se realizó la consideración para explicar físicamente este comportamiento.

En la Tabla 3.1 se presenta el diseño experimental que se siguió para la investigación, mostrando el número de pruebas para cada ciclo programado en Gleeble. El número de pruebas considerado para la experimentación fue en base a la cantidad de material disponible para obtener las probetas de torsión y a la dificultad de obtener pruebas satisfactorias en la máquina Gleeble.

Tabla 3.1. Pruebas de torsión a realizar en Gleeble.

Prueba	No. de pruebas
Laminación sin control de Temp.	2
Laminación 19.84 mm	3
Laminación 17.80 mm	3
Laminación 20.50 mm	3
Laminación 23.50 mm	3

3.5 OBTENCIÓN DE MUESTRA DE PALANQUILLA PARA MAQUINAR PROBETAS DE ENSAYOS DE TORSIÓN

Realizar pruebas de torsión en una máquina Gleeble requiere de probetas específicas, las cuales deben ser maquinadas a partir del material a ensayar. Para esta investigación se utilizó un acero 9254 automotriz, el cual es utilizado para fabricar alambrón de diferentes calibres. La obtención del material se llevó a cabo directamente desde la línea de laminación de planta Puebla, para después enviarlo hacia Monterrey y así proceder con el maquinado del mismo.

Las palanquillas de este material se obtienen a partir de una colada continua, donde se da la forma al material con un área transversal de 160 x 160 mm y un largo determinado, por lo que justo después de dar esta forma se procede al corte del material. Justo en este punto del proceso es donde se realizó el corte de la muestra requerida para obtener así un pedazo de palanquilla de 160 x 160 x 200 mm, tal como se muestra en la figura 3.3. Aunque se buscó tener la mayor cantidad de probetas disponibles, la pieza de palanquilla solo medía 200 mm de largo, esto debido a que el peso de la misma es muy elevado para su transporte a largas distancias.



Figura 3.3. Muestra de palanquilla de 160 x 160 x 200 mm de acero 9254 para producir alambrotón automotriz.

Tomando en cuenta el peso del material que se envió desde Puebla hacia Monterrey, la muestra de palanquilla obtenida se cortó en cuatro partes, de esta manera fueron enviados cuatro paquetes de aproximadamente 10 kg cada uno. Estos cortes se realizaron longitudinalmente, por lo que no afectó al maquinado de las probetas. En la figura 3.4 se muestra el esquema de los cortes que se realizaron en la muestra obtenida.

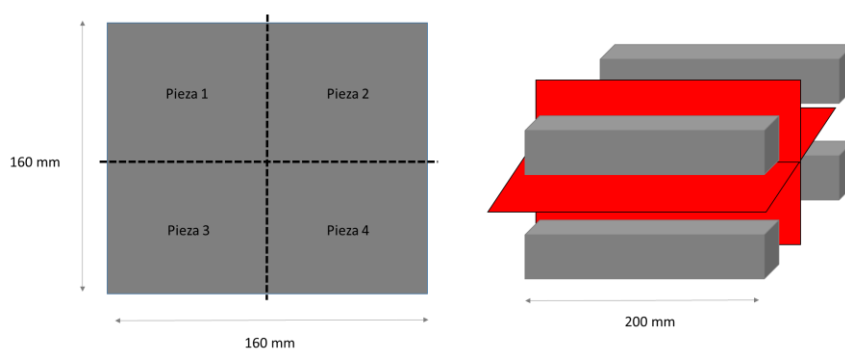


Figura 3.4. Esquema de cortes a realizar en muestra de palanquilla obtenida del proceso de colada continua.

Una vez teniendo la muestra de la palanquilla se procedió a aplicarle un proceso de normalizado al material para después llevar a cabo el maquinado de las probetas

para las pruebas de torsión. Para esto el material se elevó a una temperatura de 850°C por 30 minutos. Las probetas de torsión tienen dimensiones de 165.1 mm de largo total, y en su sección reducida un diámetro de 7.2 mm y 14.4 mm de longitud, en la figura 3.5 se muestra una probeta de torsión. Al momento de realizar la prueba de torsión el esfuerzo aplicado tendrá efecto solo en la sección reducida de la probeta, por lo que es importante que el maquinado de la misma sea exacto y sin margen de error. Considerando lo anterior y tomando en cuenta la dificultad de realizar este tipo de maquinado, fue necesaria la implementación de ciertos ajustes en la programación de las pruebas. Estos ajustes dependen directamente de las medidas de la probeta, específicamente en la sección reducida de la misma, debido a que es justo en ese punto donde se lleva a cabo la deformación del material.

De acuerdo con la anterior premisa se llevó a cabo la medición de cada una de las probetas ya maquinadas con el fin de obtener los resultados más fiables al momento de realizar las respectivas pruebas de torsión.



Figura 3.5. Probeta de torsión para ensayo en Gleeble.

En total se maquinaron cincuenta probetas, aunque estaba previsto obtener alrededor de cien probetas de la muestra obtenida, debido a problemas en el maquinado este número se redujo, por lo que se tuvo que ajustar la cantidad de pruebas a realizar para la experimentación.

3.6 PROGRAMACIÓN DE PRUEBAS DE TORSIÓN EN GLEEBLE

De acuerdo con los requerimientos de una prueba de torsión, y específicamente en la máquina Gleeble es necesaria cierta información, la cual debe ser ingresada en el software del equipo para llevar a cabo una prueba. A partir de la información que se recolectó se realizaron los cálculos necesarios como ya se ha mencionado antes, por lo que se procedió a realizar la programación de los ciclos en el software.

Debido a que las pruebas de torsión para simular la laminación en caliente de productos largos conllevan altos valores de velocidad de deformación y la máquina Gleeble no es capaz de reproducir este valor en los ensayos, se realizaron ajustes en los últimos pases de deformación de las pruebas, aunque los valores de deformación se mantuvieron fue necesario aumentar el tiempo en el que se llevaban a cabo dichas deformaciones.

La programación para una prueba de torsión en Gleeble tiene su estructura ya definida, por lo que solo se ingresaron las variables requeridas, las cuales son cuatro en total y van por pasos de deformación. Estas 4 variables son deformación, tiempo de deformación, temperatura y tiempo entre deformaciones. El tiempo de deformación, la temperatura y el tiempo entre deformaciones ya eran variables que se utilizaron directamente en la programación, mientras que la deformación fue necesaria convertirla a grados de torsión, específicamente en radianes. Esto es debido a que al ser una prueba donde la deformación de la probeta se basa en los grados de giro de esta, se debe indicar cuánto debe girar la máquina en cada pase de deformación.

Para programar cada uno de los ciclos de prueba, aun siendo en algunos casos repeticiones, se tuvieron que ajustar los valores de los radianes en cada pase de deformación de acuerdo con las medidas de cada probeta, esto es debido a que la ecuación que se utilizó para realizar esta conversión considera longitud y radio de la sección reducida de la probeta.

3.7 PRUEBAS DE TORSIÓN EN GLEEBLE

Una vez que se llevó a cabo la programación de los ciclos en el software de Gleeble, se procedió a realizar las pruebas de torsión correspondientes. En la figura 3.6 se muestra la máquina Gleeble con el módulo de torsión instalado, del lado izquierdo se aprecia el módulo táctil para monitorear, iniciar o finalizar las pruebas, en la sección derecha se encuentran la cámara de vacío donde se encuentra la probeta a ensayar, a su izquierda el módulo fijo que realiza y regula los cambios de temperatura durante los ensayos y a su derecha el módulo de torsión cuya función primaria es realizar los giros especificados por las pruebas.



Figura 3.6. Máquina Gleeble con módulo de torsión instalado.

3.7.1 PREPARACIÓN DE PROBETA A ENSAYAR

En general una prueba de torsión se basa en el seguimiento de temperatura de la probeta y la deformación de la misma, mientras que la deformación se da mediante un giro de las mordazas de la máquina, el seguimiento de temperatura se basa en la

medición de la misma en tiempo real por medio de un termopar, el cual es sujetado a la probeta por soldadura. Dicho termopar es de alumel y cromel, o bien tipo K.

Para realizar dicha soldadura se utilizó una máquina de soldar especial (Figura 3.7) para este tipo de pruebas, en donde el termopar fue sujetado dentro de la sección reducida de la probeta, esto para garantizar que la medición de temperatura sea la que se requiere y así su seguimiento sea fiable.



Figura 3.7. Máquina para soldar termopar a probetas de Gleeble.

Debido a la gran cantidad de deformación que se aplica a cada probeta se tuvieron problemas con los termopares soldados, ya que a media prueba tendían a soltarse, provocando así el fin y la pérdida de la prueba. Esta fue la causa de la pérdida de muchas probetas, por lo que se prestó más atención al proceso de soldado. Se hizo con mayor detalle y aun así persistió la falla, de esta manera terminó siendo un problema sin una causa específica. En la figura 3.8 se muestra una probeta con el termopar soldado.

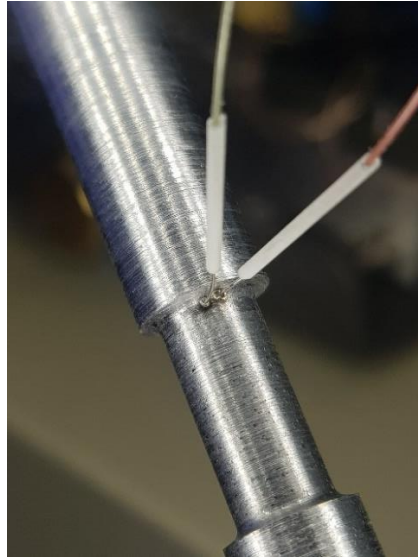


Figura 3.8. Termopar soldado a probeta de torsión.

Una vez que la probeta tenía soldado el termopar se procedía a colocarse y sujetarse dentro de la máquina Gleeble, tal y como se muestra en la figura 3.9, la sujeción se llevó a cabo mediante dos mordazas a los extremos de la probeta. Una vez posicionada la probeta adecuadamente se conectaban las puntas del termopar y se cerraba la cámara de prueba para proceder a realizar el vacío, esto para tener un mejor control de la prueba y evitar cualquier fenómeno que tenga que ver con el aire exterior.

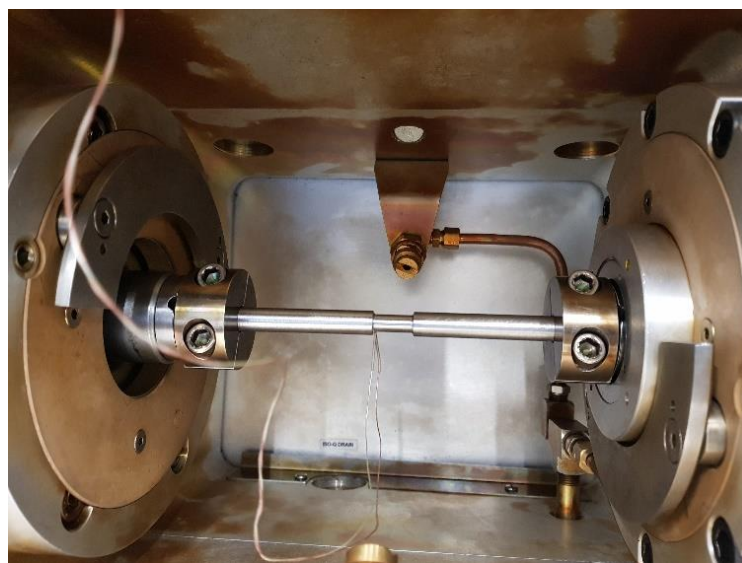


Figura 3.9. Probeta de torsión sujeta en máquina Gleeble lista para iniciar con el vacío y posterior ensayo de torsión.

3.7.2 PROCESO DE PRUEBA DE TORSIÓN

Después de tener la probeta en su lugar y de haber realizado el vacío necesario se procede a inicializar la prueba de torsión primeramente activando la programación en el software de la máquina, para después comenzar en el módulo de torsión. En general las cuatro configuraciones generales para las pruebas son muy parecidas, ya que siguen un patrón de calentamiento, mantenimiento de temperatura y enfriamiento con deformaciones.

Los ciclos programados tienen la finalidad de replicar el proceso de laminación de productos largos real en la industria, como se muestra en la figura 3.10, se comienza con un calentamiento y un mantenimiento a una temperatura específica con la finalidad de simular el proceso que se lleva a cabo en el horno de recalentamiento y de igual forma obtener así una microestructura homogénea en todas las probetas a ensayar. Después la temperatura comienza a bajar a diferentes velocidades de enfriamiento y se realizan las deformaciones especificadas en el momento indicado hasta llegar al total de deformaciones que existen en el proceso real.

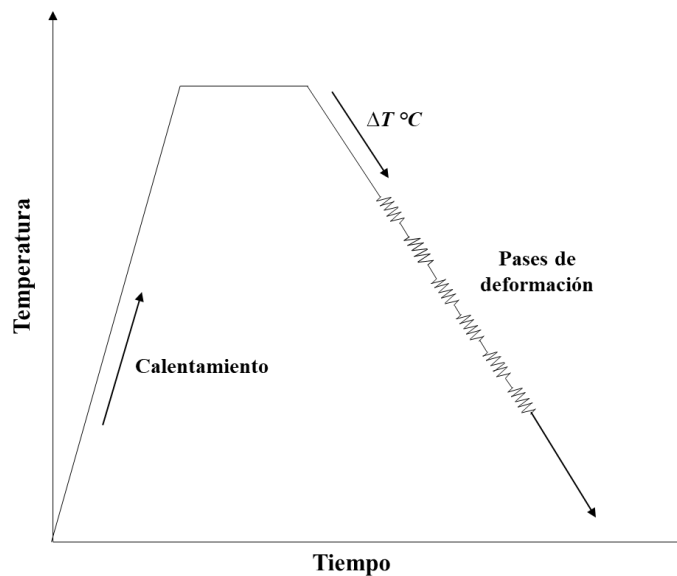


Figura 3.10. Esquema general de las pruebas de torsión para simular proceso de laminación de productos largos.

Una vez que nos aseguramos de que la programación era correcta se procedía a iniciar las pruebas de torsión, las cuales seguían todas en general un mismo patrón como se muestra en la figura 3.10. Las probetas solo presentaban el calentamiento indicado en su sección reducida, esto debido a que es justo ahí donde se llevan a cabo las deformaciones. En la figura 3.11 se aprecia el calentamiento de la probeta durante una prueba por el color amarillento en su sección reducida. El giro de la probeta para llevar a cabo la deformación solo se realizaba por parte de una de las mordazas, mientras que la otra se mantenía estática. Fue importante considerar la posición del termopar en la probeta, ya que debido a la alta deformación presentada era fácil que este girara demasiado e hiciera contacto con otra parte del material, provocando así el paro del ensayo.

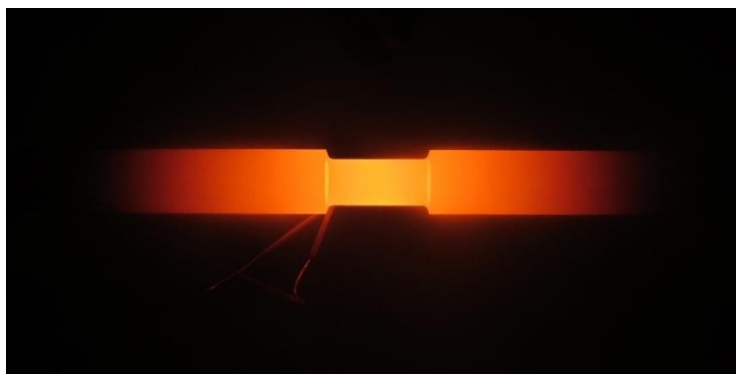


Figura 3.11. Probeta a 1078 °C durante prueba de torsión en Gleeble.

Al terminar la prueba se esperaba un tiempo para que la probeta se enfriara y proceder así a retirarla de la máquina y continuar con los ensayos. En la figura 3.12 se muestra una probeta después de haber sido ensayada.



Figura 3.12. Probeta ensayada por prueba de torsión en Gleeble.

3.8 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Después de haber realizado todas las pruebas de torsión, se obtuvo la información de las pruebas, y mediante el programa Matlab se creó un código para analizar dicha información. Se obtuvieron gráficas de esfuerzo - deformación y se calcularon los valores de MFS en cada punto de deformación.

Por otro lado, se realizaron los cálculos necesarios para obtener los valores de MFS reales del proceso actual de laminación en planta Puebla. De esta manera se realizó una comparación directa con los resultados de las pruebas.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestran y analizan los resultados obtenidos a partir del desarrollo de la investigación en cuestión, así como ciertas observaciones y conclusiones presentadas como discusión para futuros trabajos. Se consideró la estructura establecida en el capítulo de desarrollo experimental y se tomó como base para la realización del presente.

4.1 MODELO MATEMÁTICO DE ECUACIONES PARA SIMULACIÓN DE PROCESO DE LAMINACIÓN DE PRODUCTOS LARGOS DE ACERO

A continuación, se presenta el conjunto de ecuaciones necesarias para definir una simulación física del proceso de laminación de productos largos. Estas se obtuvieron a partir de la información recopilada y la selección de ecuaciones ya propuestas por diversos autores anteriormente mencionados. En la Tabla 4.1 se enlistan las ecuaciones en orden para el correcto planteamiento y seguimiento de una simulación del proceso de laminación de productos largos a partir de una prueba de torsión en caliente.

Tabla 4.1. Secuencia de ecuaciones para realizar una simulación del proceso de laminación de productos largos a partir de una prueba de torsión en caliente.

Número	Ecuación	Nombre	Unidades	Número
1	$\varepsilon_W = \ln\left(\frac{W_i}{W_f}\right)$	Deformación en ancho W de la sección transversal de palanquilla.	--	(2.3)
2	$\varepsilon_H = \ln\left(\frac{H_i}{H_f}\right)$	Deformación en alto H de la sección transversal de palanquilla.	--	(2.4)
3	$\varepsilon_p = \frac{2}{\sqrt{3}}(\varepsilon_W^2 + \varepsilon_H^2 + \varepsilon_W\varepsilon_H)^{\frac{1}{2}}$	Deformación por pase de laminación.	--	(2.8)
4	$L = \left\{ \left[R_{max} - \left(\frac{H_f - G}{2} \right) \right] (H_i - H_f) \right\}^{\frac{1}{2}}$	Distancia de laminación.	mm	(2.12)
5	$N_p = \frac{60000V}{2\pi R_{ef}}$	Revoluciones por minuto de rodillos de laminación.	rpm	(2.13)
6	$R_{ef} = R_{max} - \left[\frac{\left(\frac{A_f}{W_f} - G \right)}{2} \right]$	Radio efectivo de laminación.	mm	(2.14)
7	$t_p = \frac{60L}{2N_p R_{ef}}$	Tiempo de laminación.	s	(2.11)
8	$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_p}{t_p}$	Velocidad de deformación.	s ⁻¹	(2.10)
9	$\sigma_{eq} = \frac{3.3\sqrt{3}T}{2\pi r^3}$	Esfuerzo equivalente.	MPa	(2.15)
10	$\varepsilon_{eq} = \frac{r\theta}{L\sqrt{3}}$	Deformación equivalente.	--	(2.16)

A partir del uso de las ecuaciones de la Tabla 4.1 y la interpretación de la información obtenida de una línea de laminación de productos largos, es posible realizar los cálculos y tomar las consideraciones necesarias para llevar a cabo una simulación del proceso de laminación a partir de una prueba de torsión en caliente. Si bien pueden variar los procedimientos a considerar dependiendo de cada línea de

laminación y la máquina con la que se realizan los ensayos, la base de la metodología es la misma y el fundamento matemático para replicar dicho proceso se rige por los mismos cálculos de deformación y velocidad de deformación anteriormente mencionados.

Debido al poco estudio existente en el tema de la simulación de laminación en caliente de productos largos, realizar una prueba de torsión en caliente es la mejor forma de replicar tal proceso, esto es debido a que las variables utilizadas tanto en un proceso industrial como en un ensayo de torsión son básicamente las mismas, con la diferencia del eje donde se llevan a cabo las deformaciones. Al considerarse las mismas variables deducimos que los cálculos de las ecuaciones presentadas son compatibles para ambos casos.

En su trabajo los autores Bastos, Pereda, Lopez, Rodriguez-Ibabe y Rebellato estudian el impacto de un proceso termomecánico de un determinado acero para realizar su caracterización e incluso buscar mejoras en las propiedades mecánicas del material [43]. Con esto queda claro que hoy en día se obtienen resultados más fiables gracias a las nuevas máquinas que permiten realizar pruebas de torsión en caliente con mayor precisión, como lo es la Gleeble. Debido a esto, es importante reconocer la participación que pueden tener estas máquinas en la simulación de un proceso de laminación de acero. Con experimentaciones como la que se muestra en el presente trabajo es posible llevar a cabo un ensayo de torsión a un nivel de simulación de un proceso industrial.

Por otro lado, es importante considerar que las pruebas de torsión en caliente han sido utilizadas durante años por diferentes autores para llevar a cabo la determinación de la temperatura de no recristalización [44, 47-48], la cual se relaciona directamente con los valores de MFS calculados a partir de los resultados de un ensayo de torsión. Considerando la importancia que tienen los valores de MFS para la validación de un proceso real de laminación se establece una estrecha relación entre una prueba de torsión y un proceso real de laminación de productos largos.

4.2 PRUEBAS DE TORSIÓN SIN CONTROL DE TEMPERATURA

Durante el procedimiento de toma de temperaturas de la línea de laminación en planta se encontró un aumento y disminución de temperatura a la mitad del proceso. Esto genera una diferencia significativa contra el proceso de laminación de productos planos, ya que en ese caso la temperatura del material durante la laminación siempre es descendente.

El calentamiento en el material entre los pases de deformación se debe a un fenómeno llamado calentamiento adiabático [43], y es generado por las altas velocidades de deformación en ese punto del proceso. En el proceso industrial estos aumentos de temperatura se controlan con cajas de agua que rocían el material y lo ajustan a la temperatura deseada.

Para comprobar lo anterior y fundamentar la importancia de tener un control de temperatura durante un proceso de laminación de productos largos, se realizaron pruebas de torsión en la máquina Gleeble con el módulo de temperatura apagado. Para esto la probeta fue llevada a la temperatura del horno de recalentamiento y justo después se suspendió el control de temperatura, siguiendo con las deformaciones en el material según el proceso real de la línea de laminación.

Se tomaron en cuenta los parámetros calculados para simular el proceso de laminación del alambón 9254, en el cual se tienen dieciocho pases de deformación. En la Tabla 4.2 se muestran los valores de deformación y velocidad de deformación programados en la prueba.

Tabla 4.2. Condiciones de prueba de torsión sin control de temperatura.

Pase de laminación	Deformación	Velocidad de deformación (s⁻¹)
1	0.3802	0.1882
2	0.3961	0.2505
3	0.5167	0.4402
4	0.4371	0.5736
5	0.5321	1.2214
6	0.4883	1.6187
7	0.4544	2.4096
8	0.4719	3.1599
9	0.5427	5.4833
10	0.5572	7.2366
11	0.5570	11.5429
12	0.5839	14.2385
13	0.5214	20
14	0.5537	20
15	0.3593	20
16	0.4521	20
17	0.0847	8
18	0.0845	8

En la figura 4.1 se muestra el seguimiento de la temperatura en el material, se aprecia como la temperatura se controló durante su aumento y el mantenimiento de la misma, hasta comenzar con los pases de deformación. De esta forma se comprobó el correcto comportamiento de la temperatura de acuerdo a lo programado para la prueba. La línea color azul muestra la temperatura real del material, se puede observar la disminución de esta con el paso del tiempo, por otro lado, no da la suficiente información para analizar el fenómeno en cuestión.

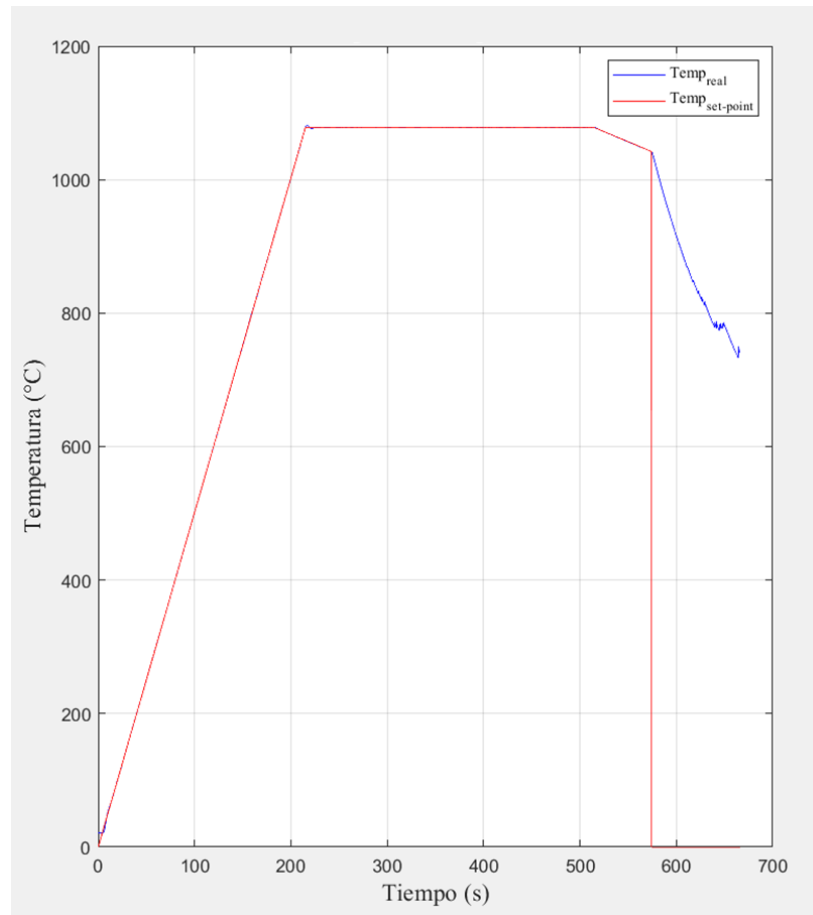


Figura 4.1. Seguimiento de temperatura en prueba de torsión sin control de temperatura.

Para entender el fenómeno de calentamiento adiabático en el material se analizó la gráfica de temperatura contra torsión, la cual se muestra en la figura 4.2.

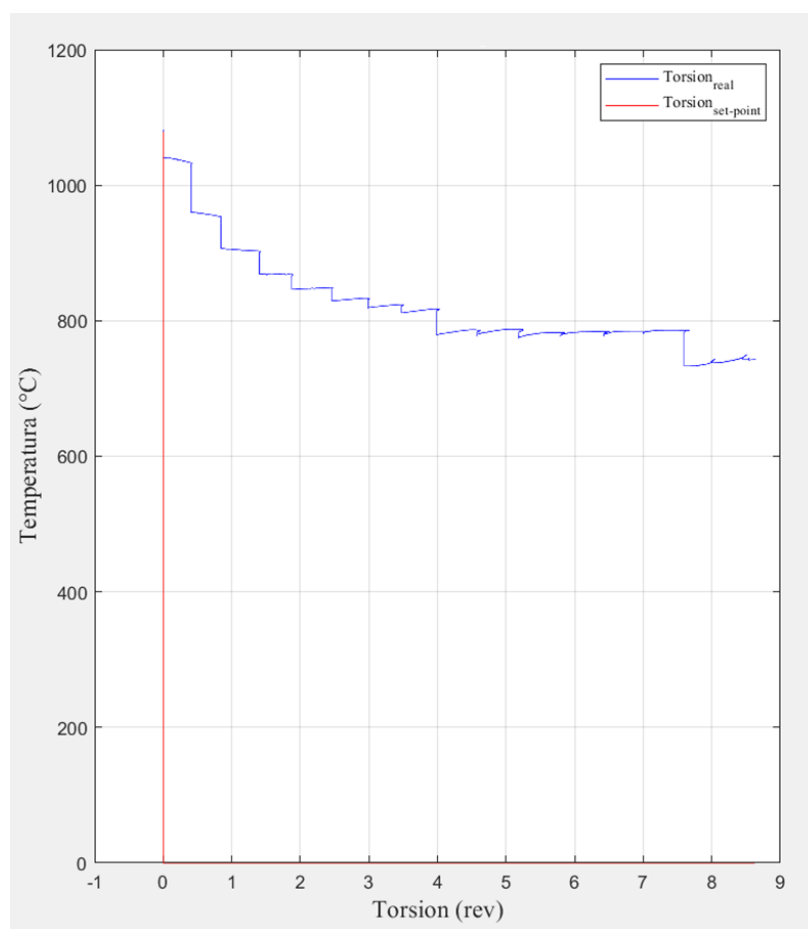


Figura 4.2. Seguimiento de temperatura y torsión de prueba sin control de temperatura.

En la figura 4.2 se observa la gráfica de la temperatura contra la torsión de la prueba, donde se aprecian las deformaciones aplicadas al material y la temperatura en cada punto de la prueba. A partir de esta gráfica es posible explicar el comportamiento de la temperatura a partir de una deformación aplicada. Los cambios en la temperatura son pequeños, pero son útiles para explicar el comportamiento de la misma durante el proceso de laminación.

En la figura 4.3 se muestra una ampliación de los primeros pases, donde la temperatura durante las deformaciones presenta un decremento, esto se debe a la baja velocidad de deformación y la alta velocidad de enfriamiento presente por el gran diferencial de temperaturas en el material.

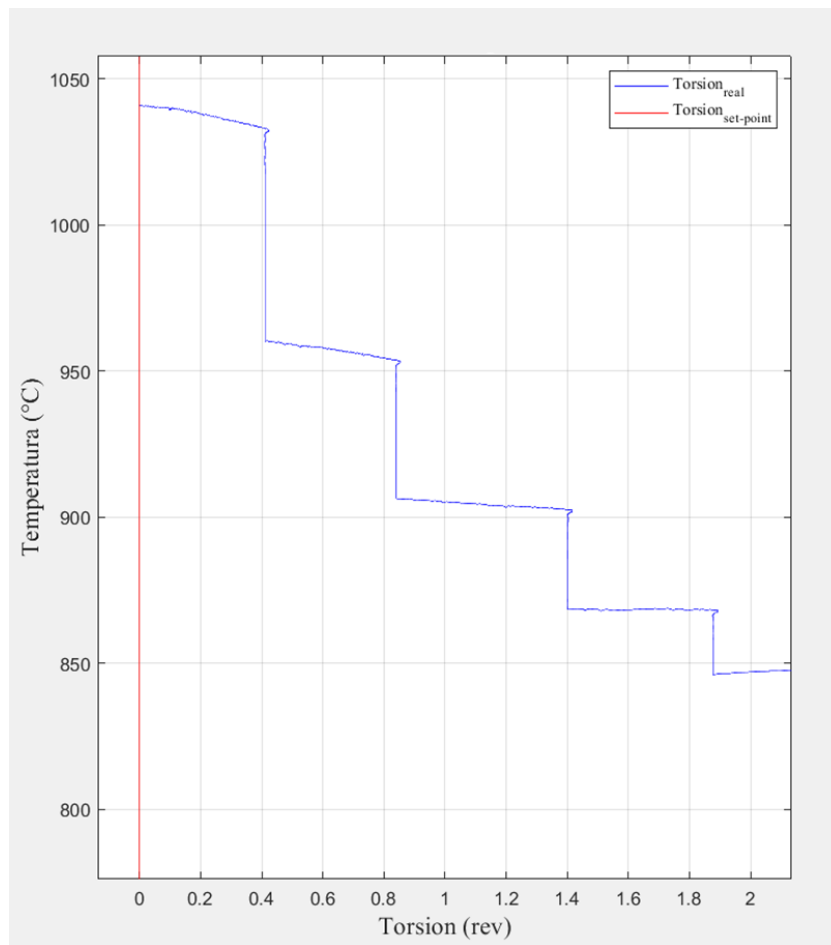


Figura 4.3. Primeros pases de deformación en prueba sin control de temperatura.

Mientras que las deformaciones aplicadas al material durante el proceso se mantienen en un valor muy cercano, las velocidades de deformación van aumentando pase tras pase, por lo que el calentamiento inducido en el material comienza a ser mayor en los siguientes pases de deformación. En la figura 4.4 se observa cómo en que cada torsión realizada la temperatura aumenta.

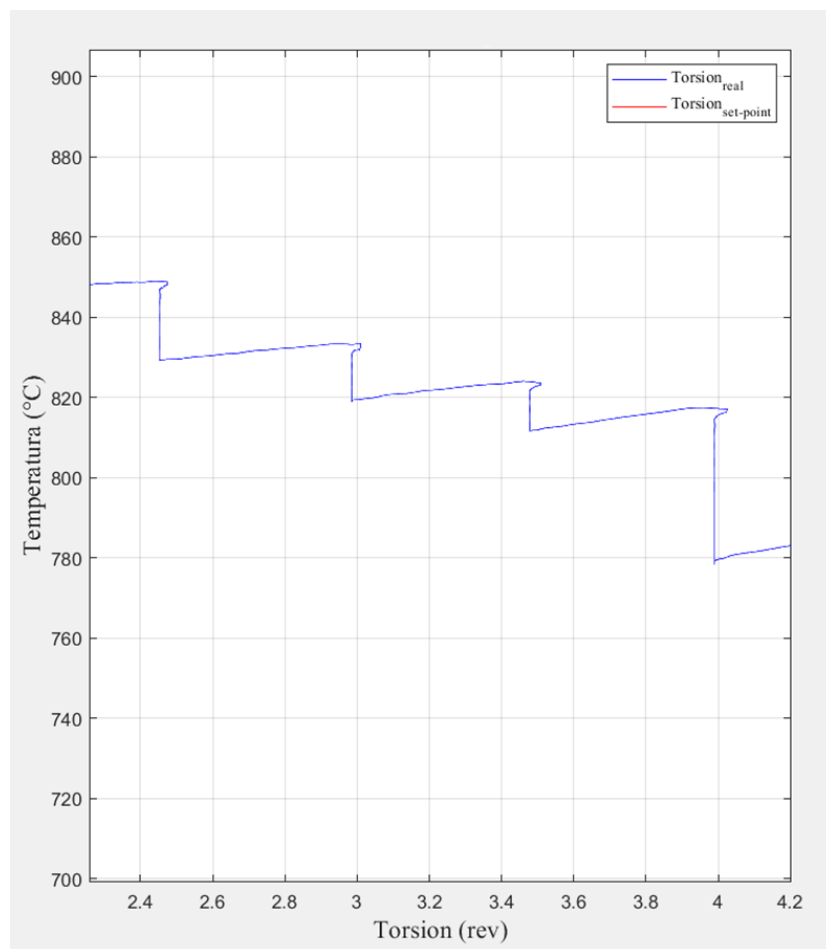


Figura 4.4. Pases de deformación con aumento de temperatura en prueba sin control de temperatura.

La temperatura durante las deformaciones tiene un aumento de aproximadamente 5°C , considerando que estas deformaciones normalmente se dan a temperaturas más elevadas, se puede decir que el aumento será mayor, por lo tanto, se comprueba que a mayor deformación y velocidad de deformación la temperatura del material tiende a aumentar, afectando de esta manera el proceso de laminación.

4.3 ANÁLISIS DE GRÁFICAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN OBTENIDAS POR PRUEBAS DE TORSIÓN PARA SIMULACIÓN DE PROCESO DE LAMINACIÓN DE PRODUCTOS LARGOS

A continuación, se muestran las gráficas de seguimiento de cada prueba y se analizan los resultados mediante una gráfica de esfuerzo-deformación. Para ampliar el estudio lo máximo posible se realizaron pruebas en cuatro calibres diferentes del producto final laminado en el proceso real, siendo estos 19.84 mm, 17.80 mm, 20.50 mm y 23.50 mm en su sección transversal. Las temperaturas del material en cada pase de deformación se consideran las mismas en todos los calibres debido a las mediciones realizadas en la línea de laminación.

4.3.1 SIMULACIÓN DE PROCESO DE LAMINACIÓN PARA OBTENCIÓN DE ALAMBRÓN DE 19.84 MM

El alambón de 19.84 mm es el más producido en la planta Ternium Puebla de productos largos, por lo que se decidió comenzar con las pruebas que simulen este proceso. En total se tienen dieciocho pases de deformación, siendo catorce de desbaste y cuatro de terminado. En la Tabla 4.3 se muestran los valores de deformación y velocidad de deformación calculados con el modelo propuesto, las temperaturas y los tiempos entre cada pase de laminación utilizados para la realización de esta prueba.

Tabla 4.3. Condiciones de prueba de torsión para simulación de laminación de alambre 19.84 mm.

Pase de laminación	Deformación	Velocidad de deformación (s^{-1})	Temperatura ($^{\circ}C$)	Tiempo entre pases (s)
1	0.3802	0.1882	1042	9.7321
2	0.3961	0.2505	1004	7.4840
3	0.5167	0.4402	963	4.9619
4	0.4371	0.5736	946	3.7679
5	0.5321	1.2214	940	3.0368
6	0.4883	1.6187	937	2.3665
7	0.4544	2.4096	931	1.6941
8	0.4719	3.1599	930	8.1712
9	0.5427	5.4833	933	3
10	0.5572	7.2366	948	1.6571
11	0.5570	11.5429	890	6.5
12	0.5839	14.2385	923	1.3004
13	0.5214	20	870	8
14	0.5537	20	910	14.4550
15	0.3593	20	893	0.0859
16	0.4521	20	893	0.0716
17	0.0847	8	893	0.0680
18	0.0845	8	893	

Como se puede apreciar en la tabla 4.3 a partir del pase de laminación trece la velocidad de deformación toma un valor constante de $20 s^{-1}$ durante los siguientes cuatro pases, para terminar con un valor de $8 s^{-1}$ en los últimos dos. Los valores calculados de acuerdo al modelo propuesto son en realidad mayores, alcanzando una velocidad de deformación de hasta $47 s^{-1}$, pero debido a las implicaciones que conlleva cumplir esta condición y las limitantes según la capacidad de la máquina Gleeble, fue necesario modificar este valor para llevar al límite la capacidad de la prueba de torsión. Es necesario tomar en cuenta estos cambios al momento de analizar los cálculos de MFS a partir de las gráficas esfuerzo-deformación. Por otro lado, fue necesario modificar los tiempos intermedios entre los pases nueve y catorce debido a que en el proceso real se producen cambios de temperatura muy rápidos; se establecieron los tiempos menores posibles para la capacidad de la máquina Gleeble.

En la figura 4.5 se muestra el seguimiento de la temperatura del material de la prueba de torsión con respecto a lo programado de acuerdo con la Tabla 4.3. Es importante asegurar un seguimiento de temperatura aceptable, ya que debido a los cambios bruscos de la temperatura es complicado.

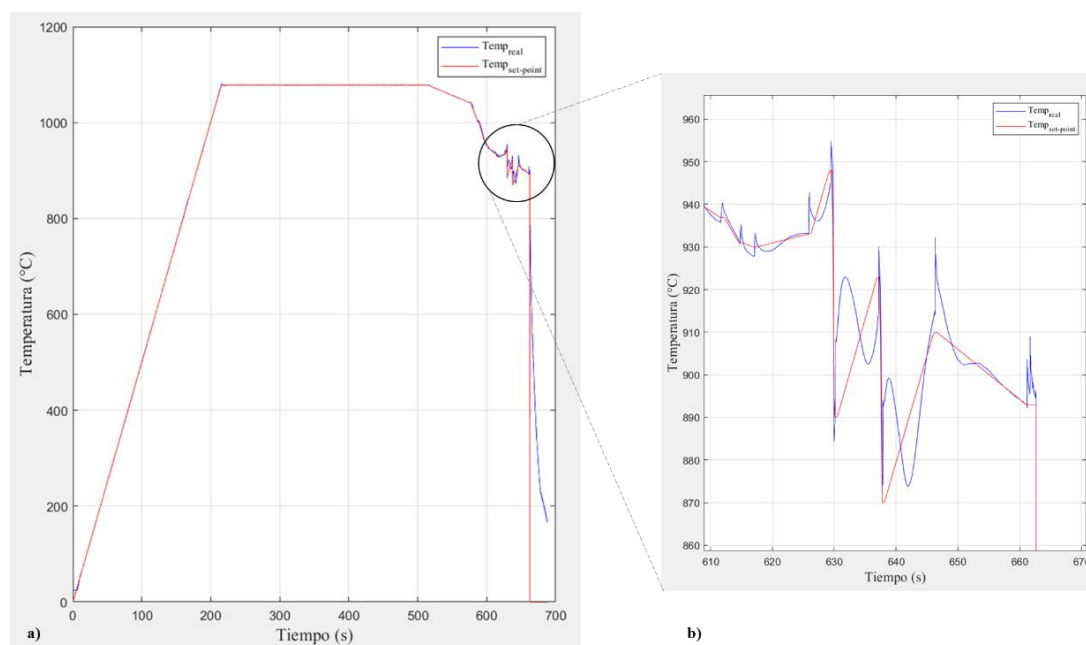


Figura 4.5. Seguimiento de temperatura con respecto al tiempo durante prueba de torsión para simulación de laminación de alambón 19.84 mm. Línea color rojo: Temperatura programada en Gleeble. Línea color azul: Temperatura real de probeta durante ensayo. a) Gráfica completa de prueba de torsión. b) Fragmento de gráfica en pases de deformación críticos.

Tal y como se aprecia en la figura 4.1 inciso a) la prueba en general tuvo un buen seguimiento de temperatura. Para simular el horno de recalentamiento de la línea de laminación la probeta se calentó a 5°C/s y se mantuvo la temperatura cinco minutos a 1078°C , para después comenzar a descender la temperatura y llevar a cabo las deformaciones correspondientes. En la figura 4.5 inciso b) se aprecia la sección más crítica de la prueba, esto sucede debido a que entre los pases once y catorce existen cambios rápidos y drásticos de temperatura. En el proceso real esto sucede debido a que existen cajas de agua que ayudan a controlar la temperatura del material. Para

simular esos cambios fue necesario utilizar un enfriamiento por helio y así asegurar el correcto seguimiento del ensayo.

En la figura 4.5 se aprecian picos en la línea color azul mientras que la roja es continua, esto es por las deformaciones que se aplican al material y el calentamiento que se presenta de acuerdo a lo que ya se ha explicado anteriormente. Es por esto que se debe considerar dicho calentamiento al momento de realizar una simulación del proceso de laminación en caliente de productos largos.

Por otra parte, es necesario verificar que las torsiones programadas para la prueba se hayan dado correctamente, para esto se muestra la figura 4.6 donde se aprecia el seguimiento de la torsión respecto a la temperatura. Los valores de torsión se siguen prácticamente sin error, mientras que entre los pases once y catorce existe un poco de variación de temperatura a los que se aplica la deformación en la probeta. Para una prueba perfecta no debería existir variación alguna en la temperatura a la que se dan las torsiones al material, ya que se alterarían directamente los valores de MFS y se obtendrían resultados erróneos.

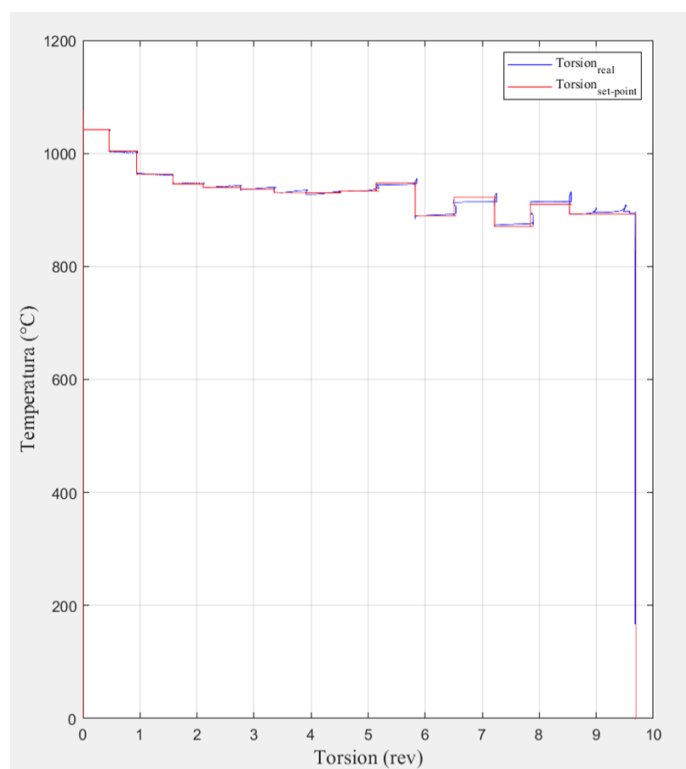


Figura 4.6. Seguimiento de temperatura y torsión aplicada durante prueba de torsión para simulación de laminación de alambón 19.84 mm.

Una vez que nos aseguramos de que la prueba tuvo un correcto seguimiento de temperatura y torsión, se obtuvo la gráfica de esfuerzo-deformación como se muestra en la figura 4.7.

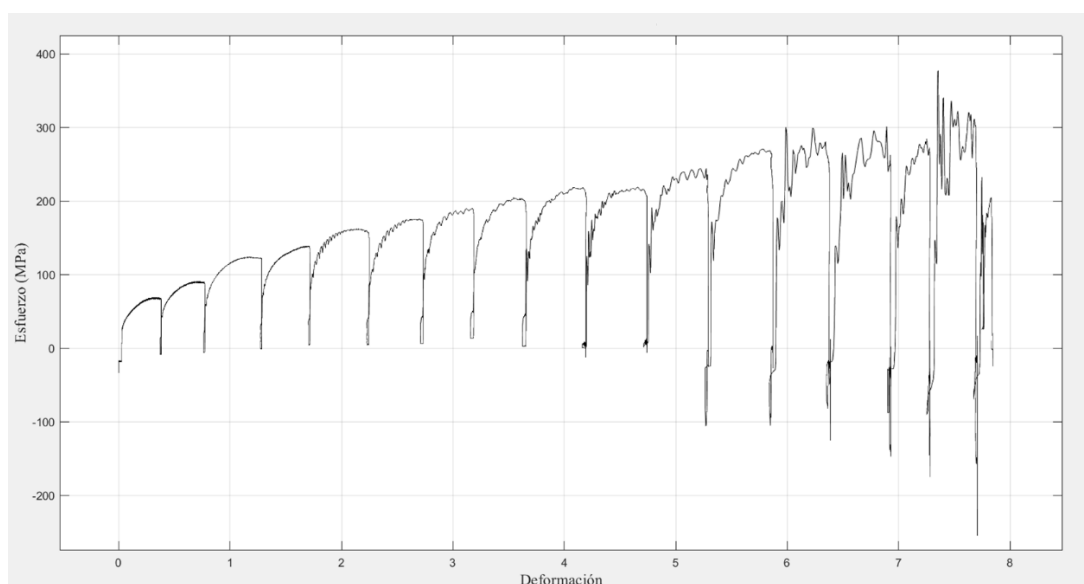


Figura 4.7. Gráfica esfuerzo-deformación de prueba de torsión para simulación de laminación de alambón 19.84 mm.

Después de procesar los datos obtenidos de la prueba, fue necesario convertir la gráfica torque-torsión a esfuerzo-deformación, de esta manera se analiza el comportamiento del material de acuerdo con las deformaciones aplicadas. Como se aprecia en la figura 4.7 cada joroba representa a cada pase de deformación o laminación, por lo que en total se tienen dieciocho jorobas. Los primeros pases al tener una mayor deformación y una velocidad de deformación lentos las jorobas se aprecian perfectamente y no existe una distorsión considerable, contrario a lo que ocurre en los últimos pases, donde la máquina Gleeble hace un mayor esfuerzo por seguir la prueba, presentando así una mayor distorsión en los resultados.

Debido a la poca deformación y la alta velocidad que se tienen en los últimos dos pases las jorobas correspondientes son pequeñas y muy distorsionadas, en la figura 4.8 se aprecian con más claridad estos pases.

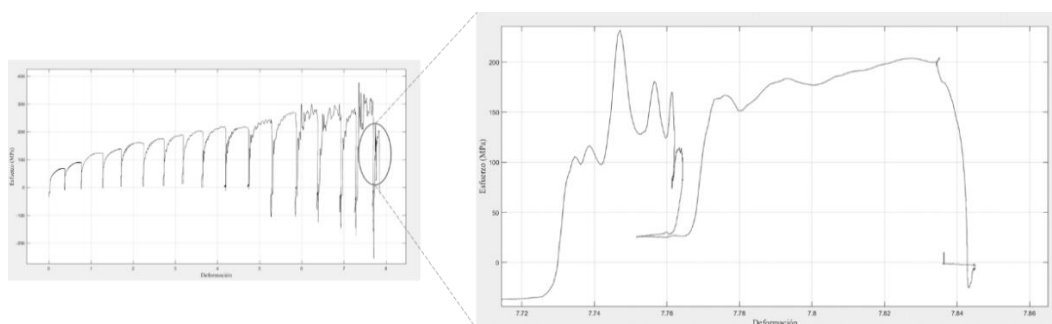


Figura 4.8. Ampliación de últimos dos pases en gráfica de esfuerzo-deformación en prueba de torsión para simulación de laminación de alambón 19.84 mm.

Al analizar la gráfica esfuerzo-deformación de esta prueba y comparar los valores de deformación mostrados en la Tabla 4.3 se comprueba que la prueba realizó los pases de deformación tal y como se estableció en un inicio, por lo que es confiable al momento de realizar cálculos de MFS.

4.3.2 SIMULACIÓN DE PROCESO DE LAMINACIÓN PARA OBTENCIÓN DE ALAMBRÓN DE 17.80 MM

El alambón de 17.80 mm es uno de los productos de calibre menor producidos en planta, por lo cual se tomó como referencia para llevar a cabo las simulaciones propuestas. Inicialmente se consideró realizar pruebas para calibres menores a 17.80 mm, pero debido a la gran dificultad para dar seguimiento del ensayo por la máquina Gleeble terminó descartándose. Esto es debido a que en los calibres menores se involucran más pases de deformación y las velocidades de deformación son mayores.

Para la laminación en caliente del alambón de 17.80 mm se tienen dieciocho pases de laminación, siendo catorce de desbaste y 4 de terminado. En la tabla 4.4 se muestran los valores de deformación y velocidad de deformación calculados a partir de las ecuaciones del modelo propuesto, las temperaturas y los tiempos entre cada pase de laminación utilizados para la realización de esta prueba.

Tabla 4.4. Condiciones de prueba de torsión para simulación de laminación de alambón 17.80 mm.

Pase de laminación	Deformación	Velocidad de deformación (s ⁻¹)	Temperatura (°C)	Tiempo entre pases (s)
1	0.3802	0.1885	1042	9.7181
2	0.3961	0.2508	1004	7.4733
3	0.5167	0.4408	963	4.9548
4	0.4371	0.5744	946	3.7625
5	0.5321	1.2232	940	3.0324
6	0.4883	1.6211	937	2.3630
7	0.4544	2.4130	931	1.6917
8	0.4719	3.1645	930	8.1595
9	0.5427	5.4912	933	3
10	0.5572	7.2470	948	1.6547
11	0.5570	11.5596	890	6.5
12	0.5839	14.2591	923	1.2985
13	0.5214	20	870	8
14	0.5537	20	910	14.4340
15	0.4617	20	893	0.0795
16	0.5194	20	893	0.0648
17	0.1685	8	893	0.0567
18	0.1698	8	893	

En comparación con los valores de deformación de la prueba de 19.84 mm, estos valores son iguales hasta el pase catorce, esto es debido a que los pases de desbaste en la línea de laminación aplican el mismo esfuerzo en los dos casos, esto es válido considerando que como se muestra en la Tabla 4.4 el valor de la temperatura en cada pase es igual a las condiciones del producto de 19.84 mm. A partir del pase de deformación quince las deformaciones para 17.80 mm son mayores, debido a que la sección transversal es menor a la de 19.84 mm.

Por otro lado, los valores de velocidad de deformación para esta prueba son mayores debido a que el material lleva una mayor velocidad al pasar por los estantes, lo cual en consecuencia provoca que el tiempo entre laminaciones también sea reducido.

En la figura 4.9 se muestra la gráfica del seguimiento de temperatura de la prueba de torsión realizada, donde la línea roja es la temperatura programada y la línea color azul es el valor registrado por el termopar directamente de la probeta.

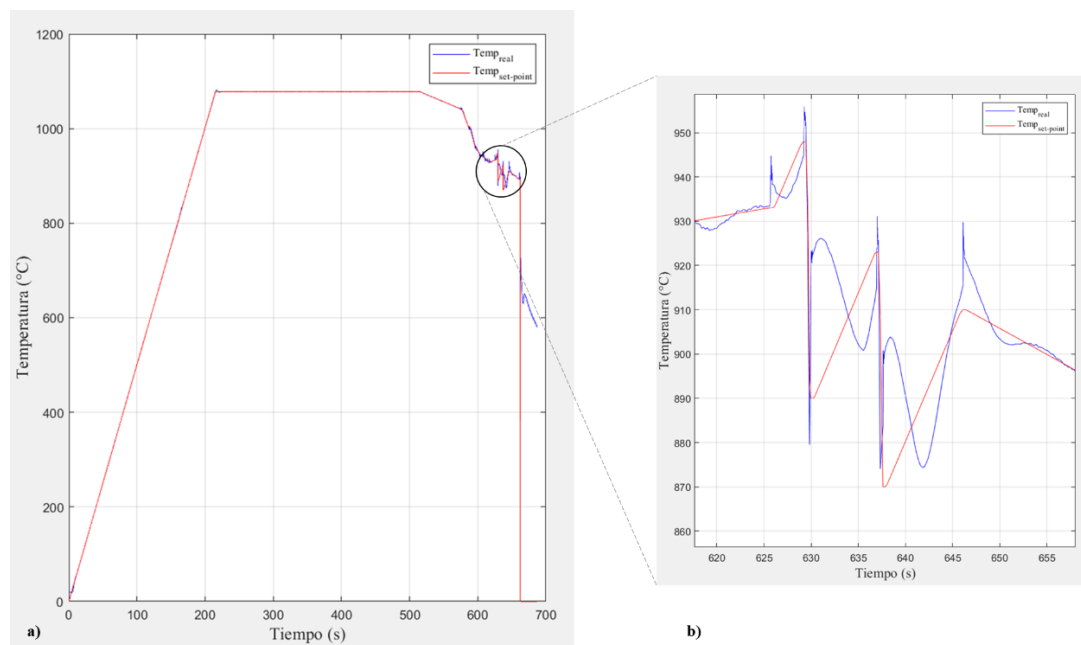


Figura 4.9. Seguimiento de temperatura con respecto al tiempo durante prueba de torsión para simulación de laminación de alambroón 17.80 mm. Línea color rojo: Temperatura programada en Gleeble. Línea color azul: Temperatura real de probeta durante ensayo. a) Gráfica completa de prueba de torsión. b) Fragmento de gráfica en pases de deformación críticos.

En general la prueba tuvo un buen seguimiento de temperatura. Se puede apreciar en la figura 4.9 inciso b) que las deformaciones no se aplicaron exactamente en la temperatura programada, lo cual se considera como un error normal de la máquina Gleeble. Estas diferencias pudieron haber sido provocadas por la alta velocidad del material durante el proceso de laminación.

Para validar que las deformaciones se hayan dado en las temperaturas establecidas, se observa en la figura 4.10 que entre los pases once y catorce las deformaciones fueron dadas en temperaturas diferentes a las programadas, esto se debe a la dificultad de la máquina Gleeble para seguir velozmente los cambios bruscos de temperatura en el material. En estos pases también se nota el aumento de temperatura

por calentamiento adiabático explicado en temas anteriores, por lo tanto, debe considerarse esta diferencia entre la simulación y el proceso real.

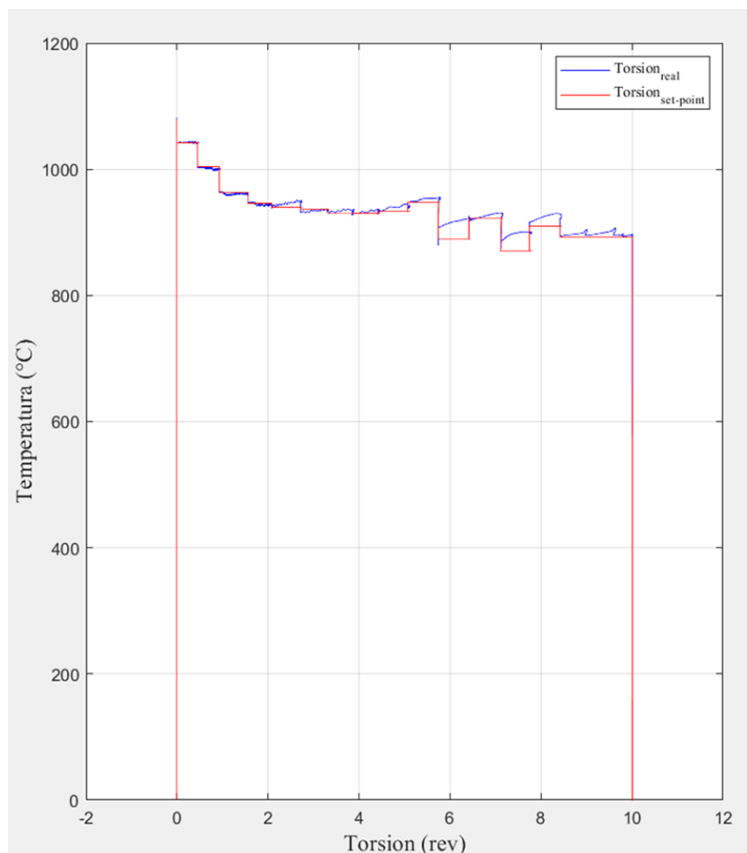


Figura 4.10. Seguimiento de temperatura y torsión aplicada durante prueba de torsión para simulación de laminación de alambre de 17.80 mm.

Después de realizar los cálculos necesarios a partir de los datos de torque y torsión obtenidos de la prueba de torsión, se obtuvo la gráfica de esfuerzo deformación del ensayo, la cual se muestra en la figura 4.11.

En comparación con la prueba de 19.84 mm, esta tiene un gran parecido en forma y valores de esfuerzo deformación, esto se debe a su similitud en los procesos de laminación, los cambios más considerables los debemos encontrar en los últimos cuatro pases.

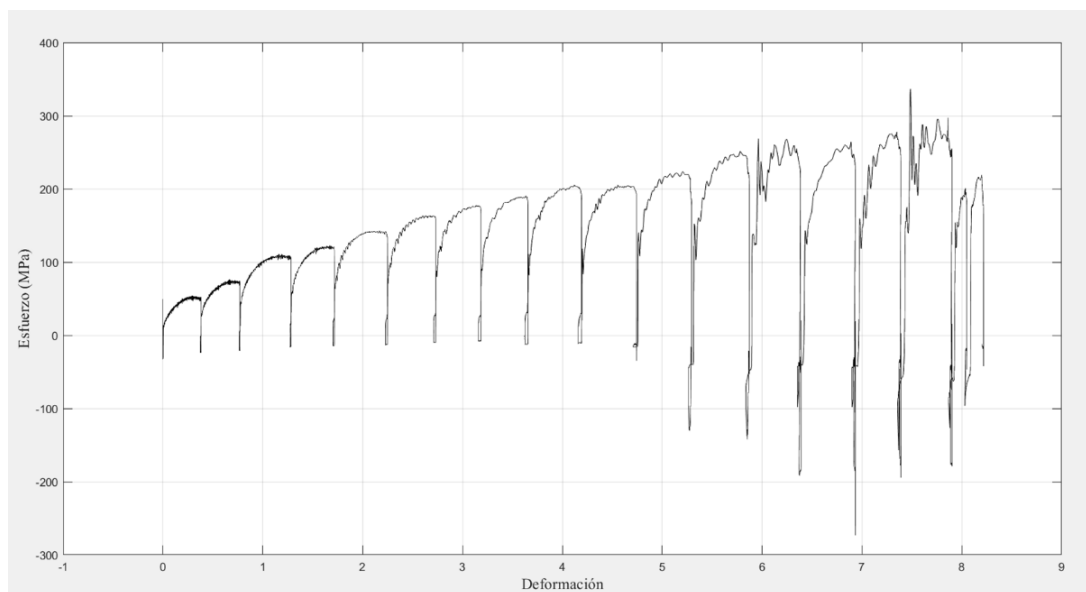


Figura 4.11. Gráfica esfuerzo-deformación de prueba de torsión para simulación de laminación de alambre de 17.80 mm.

4.3.3 SIMULACIÓN DE PROCESO DE LAMINACIÓN PARA OBTENCIÓN DE ALAMBRE DE 20.50 MM

El proceso de laminación del alambre de 20.50 mm es muy parecido al de 19.84 mm, sus diámetros transversales finales tienen menos de un milímetro de diferencia, de igual forma se tienen dieciocho pases de deformación, catorce de desbaste y cuatro de terminado. Debido a su semejanza, los resultados obtenidos son parecidos y ayudan reforzando el análisis anteriormente realizado.

En la Tabla 4.5 se muestran los valores de deformación y velocidad de deformación calculados con el modelo propuesto en este trabajo, las temperaturas y los tiempos entre cada pase de laminación utilizados para la realización de esta prueba.

Tabla 4.5. Condiciones de prueba de torsión para simulación de laminación de alambre 20.50 mm.

Pase de laminación	Deformación	Velocidad de deformación (s ⁻¹)	Temperatura (°C)	Tiempo entre pases (s)
1	0.3802	0.2066	1042	12.2138
2	0.3961	0.2749	1004	8.8662
3	0.5167	0.4832	963	6.8182
4	0.4371	0.6296	946	4.5205
5	0.5321	1.3407	940	3.9819
6	0.4883	1.7768	937	2.6712
7	0.4544	2.6449	931	2.1559
8	0.4719	3.4685	930	9.0950
9	0.5098	5.7817	933	3
10	0.5392	7.0161	948	2.0710
11	0.5197	10.7006	890	6.5
12	0.5517	13.4128	923	1.6040
13	0.4392	20	870	8
14	0.4765	20	910	15.5020
15	0.3636	20	893	0.1085
16	0.4534	20	893	0.0901
17	0.1889	8	893	0.0772
18	0.1963	8	893	

De igual manera como en los casos anteriores, los valores de velocidad de deformación a partir del pase trece fueron modificados debido a la capacidad de la máquina Gleeble, así como los tiempos entre los pases nueve y trece.

En la figura 4.12 se muestra el seguimiento de la temperatura con respecto al tiempo de la prueba de torsión realizada. Se aprecia un buen seguimiento de temperatura, teniendo un error en los pases más críticos de la prueba, donde la temperatura tiene cambios bruscos en tiempos muy pequeños.

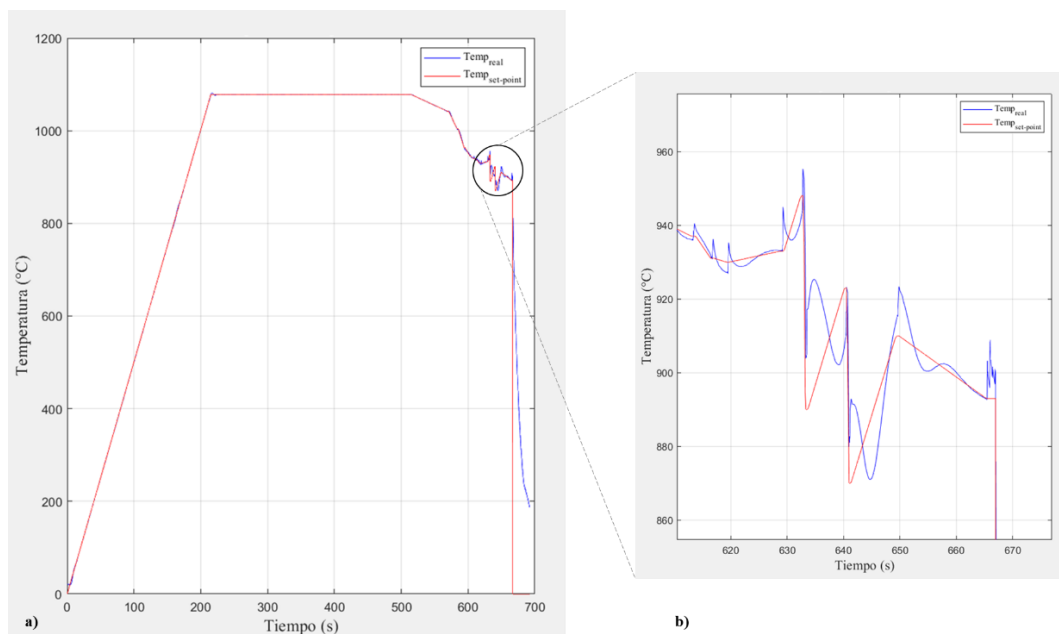


Figura 4.12. Seguimiento de temperatura con respecto al tiempo durante prueba de torsión para simulación de laminación de alambón 20.50 mm. Línea color rojo: Temperatura programada en Gleeble. Línea color azul: Temperatura real de probeta durante ensayo. a) Gráfica completa de prueba de torsión. b) Fragmento de gráfica en pases de deformación críticos.

En la figura 4.13 se muestra la gráfica del seguimiento de torsión respecto a la temperatura durante la prueba, se observa que las deformaciones aplicadas fueron dadas muy cerca de la temperatura programada para el ensayo, esto es debido a que durante el proceso de laminación real de este calibre de alambón el material lleva una velocidad menor a los de 19.84 mm y 17.80 mm, esto afecta directamente a la velocidad de deformación, por lo tanto, es más fácil para la máquina Gleeble realizar el seguimiento de la prueba.

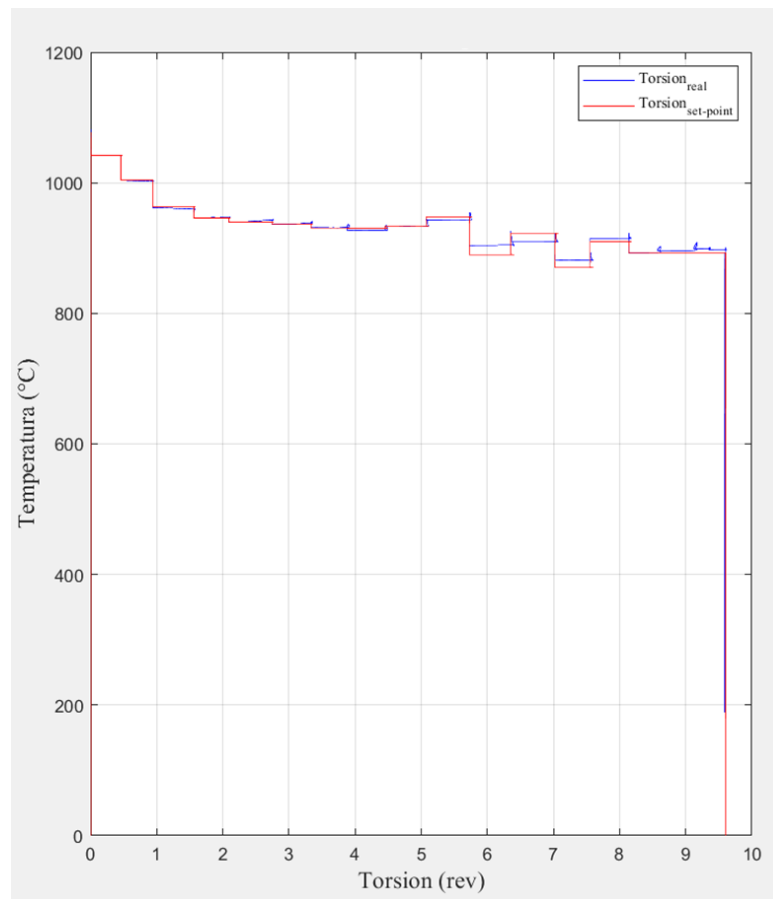


Figura 4.13. Seguimiento de temperatura y torsión aplicada durante prueba de torsión para simulación de laminación de alambrcn 20.50 mm.

Como resultado de los clculos realizados a partir de los datos de la prueba de torsin, se obtuvo la grfica de esfuerzo-deformacin tal y como se muestra en la figura 4.14.

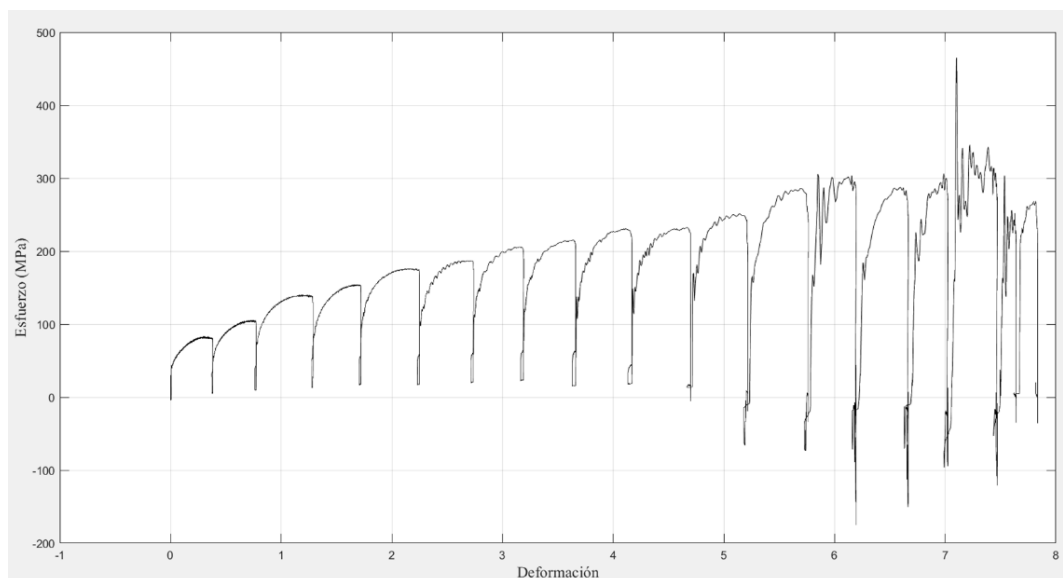


Figura 4.14. Gráfica esfuerzo-deformación de prueba de torsión para simulación de laminación de alambón 20.50 mm.

4.3.4 SIMULACIÓN DE PROCESO DE LAMINACIÓN PARA OBTENCIÓN DE ALAMBRÓN DE 23.50 MM

El alambón de 23.50 mm tiene uno de los calibres más gruesos del proceso de laminación estudiado en este trabajo. Al tener un diámetro en su sección transversal mayor a los casos anteriores, el proceso en general conlleva menos deformación al material, o bien, ésta puede estar dada de forma diferente. Debido a esto, durante la laminación de este producto solo se tienen dieciséis pases de deformación, doce de desbaste y cuatro de terminado. En la tabla 4.6 se muestran las condiciones de prueba programadas para la simulación del proceso de laminación de alambón 23.50 mm. Analizando esta información es notable que el material durante el proceso lleva una velocidad menor, por lo tanto, las velocidades de deformación disminuyen y de esta manera se vuelve más sencillo realizar la prueba para la máquina Gleeble. En esta prueba solamente se modificaron los últimos tres valores de velocidad de deformación debido a la capacidad de la máquina Gleeble.

Tabla 4.6. Condiciones de prueba de torsión para simulación de laminación de alambón 23.50 mm.

Pase de laminación	Deformación	Velocidad de deformación (s⁻¹)	Temperatura (°C)	Tiempo entre pases (s)
1	0.3802	0.1680	1042	15.0169
2	0.3961	0.2236	1004	10.9011
3	0.5167	0.3930	963	8.3830
4	0.4371	0.5121	946	5.5579
5	0.5321	1.0904	940	4.8957
6	0.4883	1.4451	937	3.2843
7	0.4544	2.1512	931	2.6507
8	0.4719	2.8211	930	17.0108
9	0.5261	4.7982	890	7
10	0.5400	5.9188	923	3.2242
11	0.5237	9.2132	870	9
12	0.5732	11.8540	910	28.1210
13	0.3129	17.5043	893	0.1946
14	0.4120	20	893	0.1549
15	0.1797	8	893	0.1286
16	0.1910	8	893	

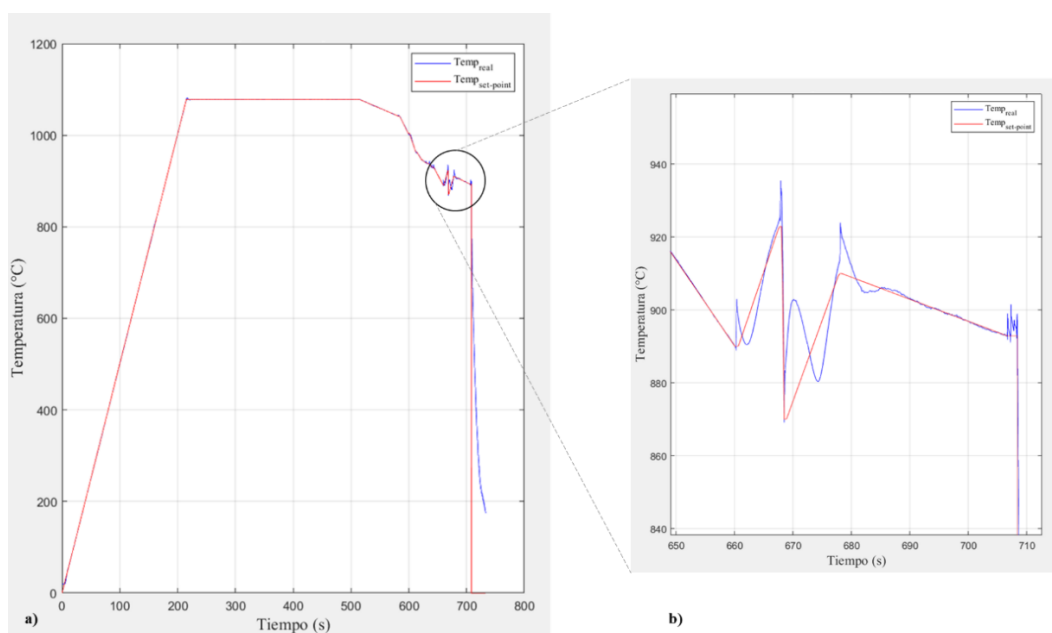


Figura 4.15. Seguimiento de temperatura con respecto al tiempo durante prueba de torsión para simulación de laminación de alambroón 23.50 mm. Línea color rojo: Temperatura programada en Gleeble. Línea color azul: Temperatura real de probeta durante ensayo. a) Gráfica completa de prueba de torsión. b) Fragmento de gráfica en pases de deformación críticos.

Como se aprecia en la figura 4.15 el material durante la prueba tuvo un buen seguimiento de temperatura, incluso en la sección crítica donde existen cambios bruscos en la temperatura, esto es debido a la menor velocidad del proceso y la menor deformación presente en comparación con los procesos anteriores.

De igual forma en cuanto a las torsiones realizadas, estas se dieron prácticamente a la temperatura deseada, únicamente de los pases nueve a doce se aprecia el aumento de temperatura adiabático por las deformaciones presentadas. En la figura 4.16 se muestra la gráfica del seguimiento de temperatura y torsión de la prueba.

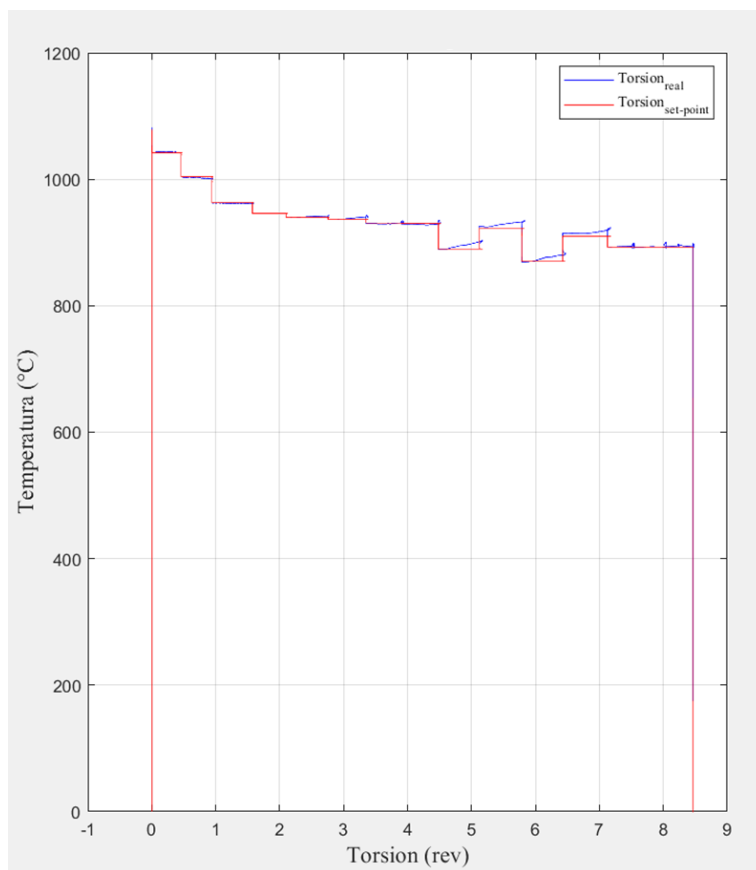


Figura 4.16. Seguimiento de temperatura y torsión aplicada durante prueba de torsión para simulación de laminación de alambón 23.50 mm.

Como resultado de la prueba de torsión para la simulación del proceso de laminación del alambón 23.50 mm se obtuvo la gráfica de esfuerzo deformación que se muestra en la figura 4.17. En esta se observan las dieciséis jorobas que representan los pases de laminación durante el proceso.

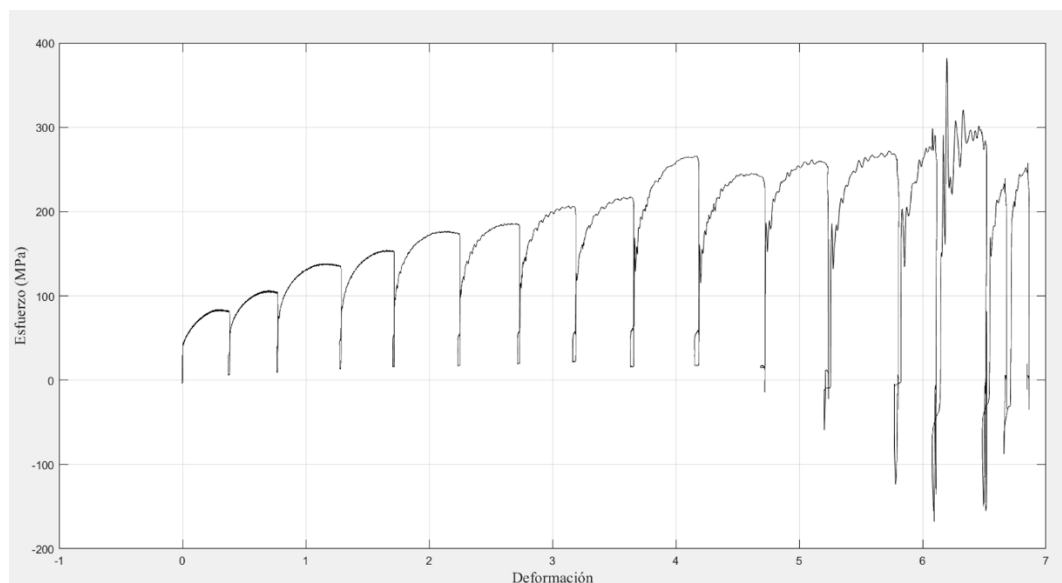


Figura 4.17. Gráfica esfuerzo-deformación de prueba de torsión para simulación de laminación de alambraón 23.50 mm.

4.4 DETERMINACIÓN DE MFS A PARTIR DE CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN OBTENIDAS POR PRUEBA DE TORSIÓN

Para realizar el cálculo de los valores de MFS en cada pase de deformación de las pruebas, se utilizó la ecuación 2.17. Por medio del programa Matlab se llevaron a cabo los cálculos partiendo de las gráficas esfuerzo-deformación obtenidas de los datos de las pruebas de torsión. Se debe considerar que las gráficas de esfuerzo-deformación fueron ajustadas al eje cero de acuerdo con el primer pase de deformación, esto debido a pequeños errores de medición que presenta la máquina Gleeble al inicio de cada prueba. De esta manera se asegura un resultado más exacto al momento de realizar el cálculo de MFS. En la figura 4.18 se muestra como ejemplo la gráfica de la prueba de 19.84 mm ajustada, donde se puede apreciar que no existe un cambio tan significativo visualmente, pero necesario debido a la exactitud de los cálculos.

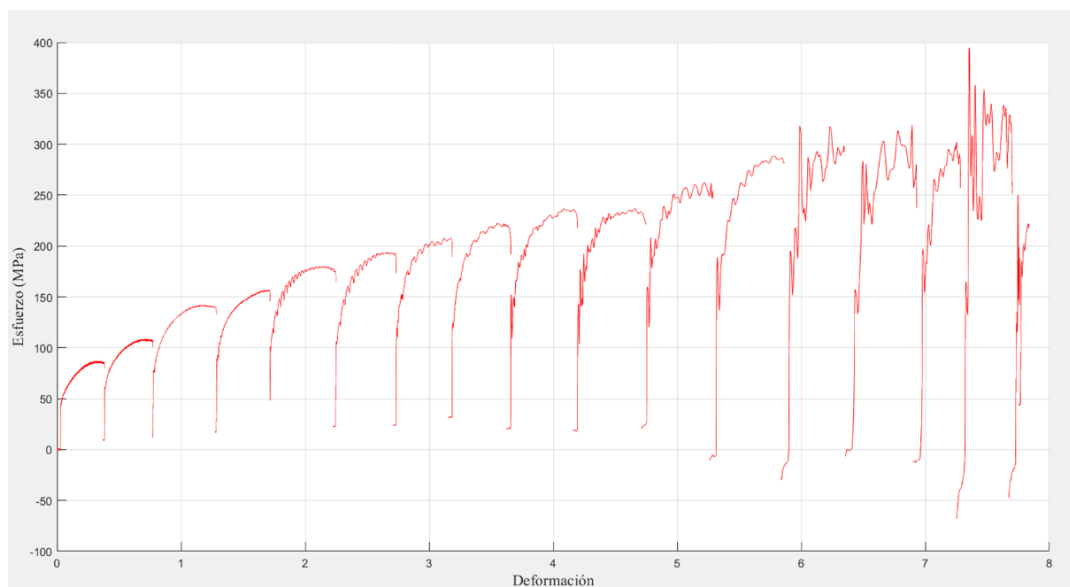


Figura 4.18. Gráfica esfuerzo-deformación ajustada de prueba de torsión para simulación de laminación de alambre de 19.84 mm.

En la figura 4.18 se observa como algunas jorobas a pesar de estar ajustadas se encuentran por debajo del eje cero, no solamente no se considera esta parte, sino que al realizar el cálculo del área bajo la curva es necesario restar esta porción de la joroba completa. De acuerdo con la experimentación realizada esto sucede a partir de los pases de deformación donde se forzó a la máquina Gleeble al límite de la velocidad de deformación, esto es importante a considerar para el estudio de la capacidad de la máquina Gleeble para realizar estas pruebas.

A continuación, en la Tabla 4.7 se muestran los valores de MFS para las cuatro pruebas de torsión realizadas en la experimentación.

Tabla 4.7. Valores de MFS en MPa calculados a partir de curvas esfuerzo-deformación de pruebas de torsión de los cuatro calibres de alambón estudiados del acero 9254.

Pase de deformación	19.84 m	17.80 mm	20.50 mm	23.50 mm
1	69.9058	73.8071	72.0473	74.5706
2	94.9439	93.1394	91.8316	94.6699
3	125.6547	124.7321	125.2460	125.1905
4	136.5279	135.7390	135.0915	137.1592
5	164.8006	156.7570	159.1672	160.5845
6	168.6374	171.6987	164.8602	165.8123
7	180.0381	182.0131	178.4285	180.7323
8	191.4642	191.2079	186.3160	189.4071
9	201.8345	202.5512	195.7398	--
10	203.3452	204.3158	198.8517	--
11	220.3215	216.1236	211.0240	227.1952
12	232.2463	227.8884	228.3043	211.1493
13	230.4334	230.1316	231.1083	225.9797
14	230.3509	224.1027	211.9645	223.6412
15	206.4985	227.0307	204.8705	242.1241
16	242.3873	242.6620	242.9339	226.9990
17	39.1474	117.2752	130.1259	128.0040
18	168.0578	141.1386	185.3499	151.7314

En la Tabla 4.7 se aprecia que para los pases uno a doce los valores de MFS son muy parecidos entre los cuatro calibres de alambón estudiados, esto es debido a que, en el proceso industrial los primeros estantes de laminación llevan a cabo la misma deformación para todos los calibres, la única diferencia es la velocidad de deformación, ya que al tener un calibre menor la velocidad será mayor. A partir del pase trece los valores de MFS se vuelven algo irregulares debido a que la máquina Gleeble se programó en su límite máximo de velocidad de deformación.

4.5 CÁLCULO DE MFS A PARTIR DE DATOS DE LÍNEA DE LAMINACIÓN DE PRODUCTOS LARGOS

A partir de la información recopilada del proceso industrial de laminación de productos largos se realizó el cálculo de MFS de todos los pases de deformación involucrados en los cuatro calibres de alambón estudiados en este trabajo. Para llevar a cabo este cálculo se utilizó la ecuación (2.20), donde se involucran variables como la fuerza de laminación en cada estante de laminación, así como las dimensiones del material antes y después de cada deformación. En la tabla 4.8 se muestran los valores de MFS para los cuatro calibres de alambón estudiados.

Tabla 4.8. Valores de MFS en MPa calculados a partir de ecuación (2.20) de los cuatro calibres de alambón estudiados del acero 9254.

Pase de deformación	19.84 m	17.80 mm	20.50 mm	23.50 mm
1	145.6710	145.6710	145.6710	145.6710
2	135.2251	135.2251	135.2251	135.2251
3	147.6238	147.6238	147.6238	147.6238
4	144.4132	144.4132	144.4132	144.4132
5	111.4651	111.4651	111.4651	111.4651
6	100.3521	100.3521	100.3521	100.3521
7	104.2862	104.2862	104.2862	104.2862
8	107.8419	107.8419	107.8419	107.8419
9	117.0767	117.0767	119.5815	--
10	116.6459	116.6459	114.2539	--
11	137.4209	137.8066	133.9978	117.8891
12	135.9153	136.2639	130.5716	115.9871
13	159.1593	159.7052	171.3716	132.4682
14	153.5425	153.9894	145.0085	128.1116
15	153.4455	132.6214	144.6909	137.5147
16	187.7675	183.6011	164.6666	138.3841
17	156.8841	111.9163	87.3721	133.7823
18	105.8040	82.4147	63.1391	100.2946

En la Tabla 4.8 se observa que para los cuatro procesos de laminación los valores de MFS hasta el pase ocho son iguales, esto es debido a la igualdad de condiciones en el proceso anteriormente mencionada. Para los pases siguientes, aunque son muy parecidos existe una diferencia considerable en algunos casos.

4.6 COMPARACIÓN DE VALORES DE MFS DE PRUEBA DE TORSIÓN Y DATOS DE LÍNEA DE LAMINACIÓN

A continuación, en las figuras 4.19 a 4.22 se muestran los valores de MFS de las pruebas de torsión realizadas y los cálculos de los datos de la línea de laminación para cada calibre de alambroón estudiado en este trabajo. Esto para una comparación directa entre la simulación y el proceso real, así como un análisis de las diferencias encontradas.

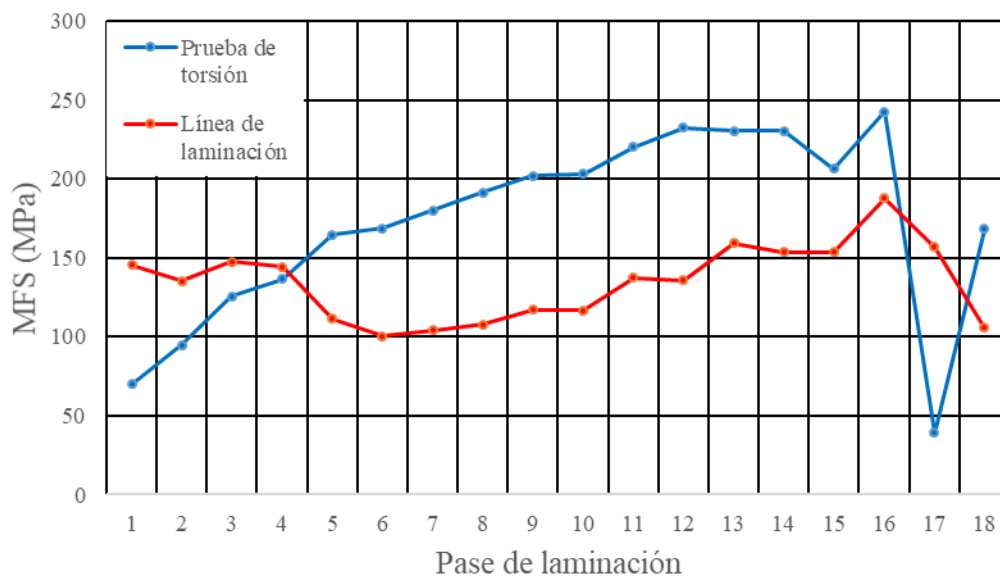


Figura 4.19. Gráfica de valores de MFS en MPa de calibre 19.84 mm de alambroón de acero 9254.

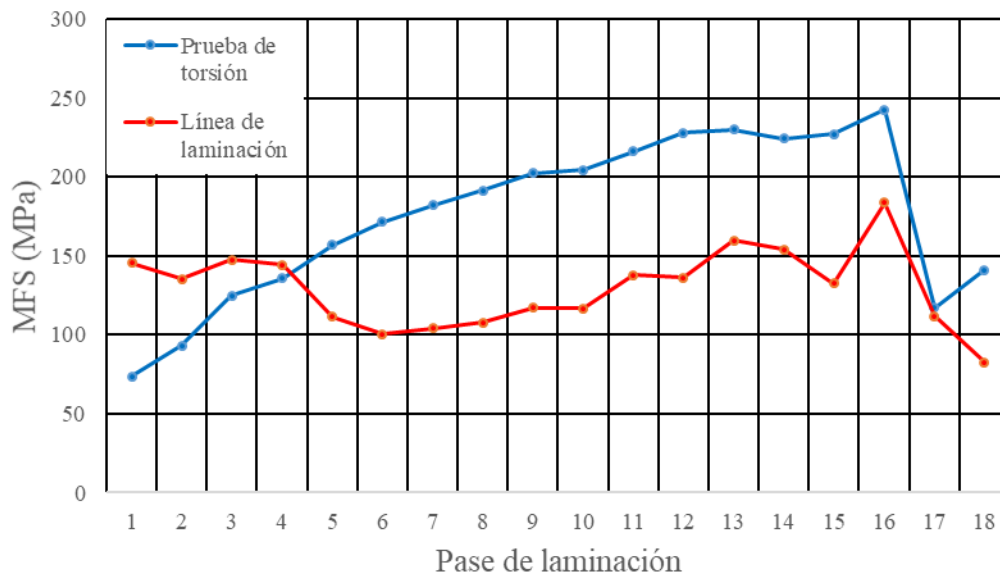


Figura 4.20. Gráfica de valores de MFS en MPa de calibre 17.80 mm de alambre de acero 9254.

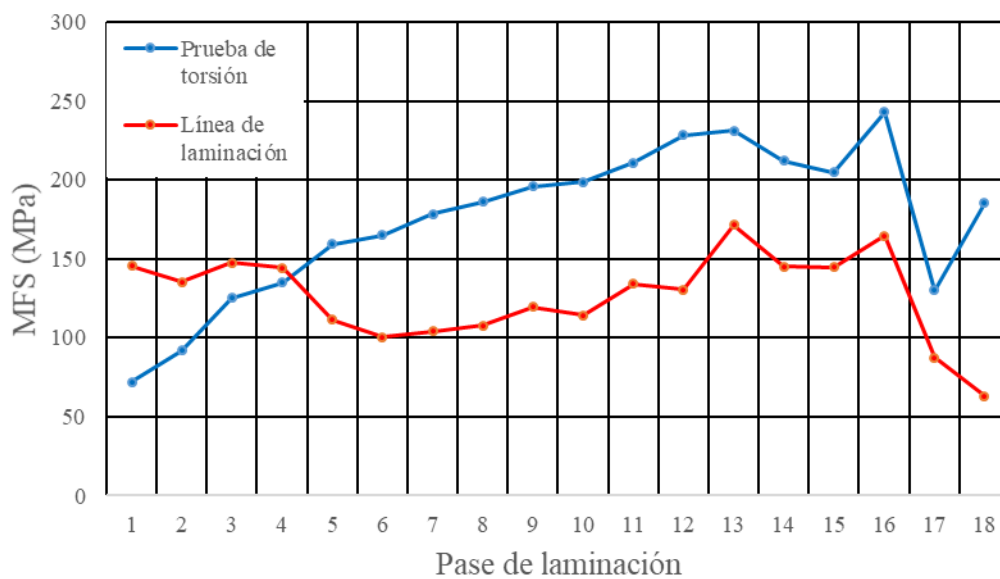


Figura 4.21. Gráfica de valores de MFS en MPa de calibre 20.50 mm de alambre de acero 9254.

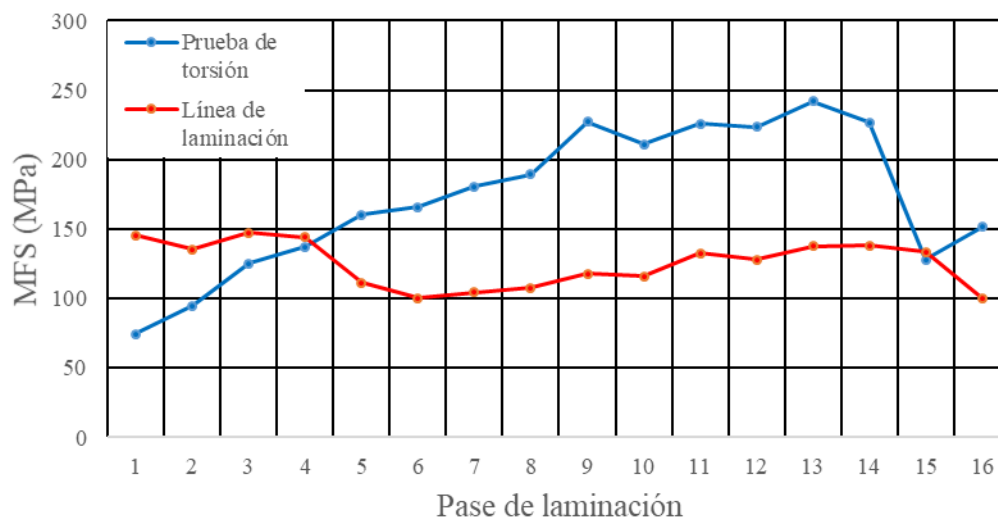


Figura 4.22. Gráfica de valores de MFS en MPa de calibre 23.50 mm de alambroón de acero 9254.

Para los valores de MFS obtenidos de las pruebas de torsión se observa como desde el primer pase de deformación comienza a elevar su valor pase tras pase, hasta llegar al trece, donde su valor aproximadamente se mantiene regular y en las últimas dos deformaciones el valor disminuye considerablemente. Este comportamiento se explica de acuerdo con el impacto que tienen ciertas variables en el proceso de la simulación, tal como la deformación y la velocidad de deformación. Los valores de deformación a lo largo del proceso se diferencian mínimamente entre sí, a diferencia de la velocidad de deformación, la cual va en aumento desde el pase uno hasta el doce, para después mantener un valor constante hasta el pase dieciséis y en los últimos dos disminuir considerablemente. De esta manera se destaca el impacto que tiene la velocidad de deformación sobre el valor de MFS durante cada pase de laminación en una prueba de torsión. Por otro lado, el aumento en el valor de MFS a lo largo del proceso de la prueba de torsión se debe en parte a la disminución de temperatura que existe durante el ensayo.

Los valores de MFS calculados a partir de los datos de la línea de laminación en los primeros pases tienen un valor de aproximadamente 150 MPa, para después disminuir alrededor de 100 MPa y comenzar a aumentar a partir del pase seis de laminación.

Comparando los valores de MFS de la prueba de torsión con los calculados de la línea de laminación se observa que en los primeros pases de deformación su comportamiento es inverso, mientras los valores de la prueba aumentan, los valores de la línea disminuyen. A partir del pase seis de deformación los dos valores comienzan a tener un comportamiento parecido con una diferencia de aproximadamente 75 MPa. Por lo tanto, el comportamiento de ambos procesos es similar a partir del sexto pase de laminación y la diferencia de MFS que existe entre ambos valores se debe principalmente al comportamiento del esfuerzo aplicado al material durante cada pase de laminación.

En un ensayo de torsión en caliente si bien es posible aplicar la misma deformación y velocidad de deformación a cierta temperatura, el esfuerzo siempre es aplicado sobre la misma forma de la probeta, a diferencia de un proceso real donde el material se va alargando mientras reduce su sección transversal, dejando con menos carga los rodillos de laminación pase tras pase de deformación. De esta manera el esfuerzo es la variable que más impacto tiene durante la prueba de torsión para lograr la simulación de la laminación de acero, ya que no se tiene un control directo del mismo, mientras que la deformación, la velocidad de deformación y la temperatura son controlados fácilmente por la máquina Gleeble.

En su trabajo Siciliano, Allen y Ferguson, utilizan un método distinto al presentado en esta investigación para llevar a cabo la simulación de un proceso de laminación de aceros, donde se afirma la confiabilidad de una prueba de torsión en caliente para la simulación de laminación [49]. En dicho trabajo, a pesar de obtener valores con un comportamiento parecido a los valores normalizados de MFS calculados de una línea de laminación, no se hace una comparación directa de una prueba que considere exactamente los mismos valores de deformación y velocidad de deformación extraídos de la información de línea.

Siciliano, Allen, Rodrigues y Jonas mencionan la facilidad de simular condiciones de laminación con cambios drásticos a partir de una prueba de torsión [50]. Para reforzar esta afirmación pueda ser necesario llevar a cabo pruebas de torsión como las presentadas en este trabajo y evaluar de esta manera el comportamiento mecánico y metalúrgico del material durante el proceso de laminación en caliente.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Considerando esta investigación como el punto de partida en el desarrollo de una simulación física del proceso de laminación en caliente de productos largos, se establece una metodología y un primer acercamiento a las simulaciones por medio de las pruebas de torsión en caliente.

De acuerdo con el análisis de los resultados obtenidos de la experimentación, se concluye que utilizando los valores de deformación y velocidad de deformación calculados de los datos de una línea de laminación de productos largos no es posible replicar los valores de MFS de cada pase de laminación mediante una prueba de torsión en caliente.

En cierta parte del proceso existe un seguimiento de tendencia que indica la similitud entre el proceso real y su simulación. Los valores de MFS de la simulación durante la prueba son mayores a los del proceso real debido al comportamiento de los esfuerzos aplicados al material durante las deformaciones del ensayo. De esta manera se afirma que la principal diferencia entre una línea de laminación y su simulación radica en los esfuerzos aplicados al material.

Debido a que en una prueba de torsión no es posible reducir el área transversal del material, se concluye que al realizar una simulación del proceso de laminación de productos largos no se busca igualar los valores de MFS, sino encontrar una relación que permita replicar el proceso a pequeña escala.

A continuación, se presentan algunas recomendaciones para reforzar o complementar las siguientes etapas de la temática planteada en este trabajo:

- Considerar las limitaciones para replicar altas velocidades de deformación en máquina Gleeble.
- Buscar relación entre la disminución del área transversal del material durante el proceso real y la forma de probeta de torsión.
- Ajustar valores de deformación y velocidad de deformación en simulaciones para obtener las mismas curvas de MFS entre el proceso real y las pruebas de torsión.
- Complementar este estudio con una caracterización microestructural que involucre el material utilizado en la simulación física y en el proceso real de laminación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Harste, K., Wüstner, E., Hüllen, P. v., & Lange, R. F. (2005). Applications for bars and rods in the automotive industry. *Steel, Future for the Automotive Industry*, 1(1), 9-17.
- [2] Sayuri Hattori, C., Augusto Couto, A., Vatauvuk, J., Batista de Lima, N., & Pereira Reis, D. A. (2013). Evaluation of Fatigue Behavior of SAE 9254 Steel Suspension Springs Manufactured by Two Different Processes: Hot and Cold Winding. *Experimental and Numerical Investigation of Advanced Materials and Structures, Advanced Structured Materials*, 91-105.
- [3] Dounde, A. A., Seemikeri, C. Y., & Tanpure, P. R. (2015). Study of Shot Peening Process and Their Effect on Surface Properties: A Review. *IJEBEA*, 12(240), 104-107.
- [4] Bhaveshbhai, P. R. (2016). Review Paper on Shot Peening Process. *IJSRD*, 4(3), 15-17.
- [5] Kulkarni, S. S., & Jain, P. S. (2016). Effect of Shot Peening on Fatigue Life. *IJMER*, 6(7), 15-20.
- [6] Puff, R., Dropa de Bortoli, M. G., & Bosco, R. (2010). Fatigue Analysis of Helical Suspension Springs for Reciprocating Compressors. *International Compressor Engineering Conference*, 1-8.
- [7] Chavan, C., Kakandikar, G. M., & Kulkarni, S. S. (2015). Analysis for Suspension Spring to Determine and Improve its Fatigue Life Using Finite Element Methodology. *International Journal of Scientific Research and Management Studies*, 1(2), 352-362.

BIBLIOGRAFÍA

- [8] Zhu, Y., Wang, Y., & Huang, Y. (2014). Failure analysis of a helical compression spring for a heavy vehicle's suspension system. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, 169-173.
- [9] Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología* (Quinta ed.). Naucalpan de Juárez, Edo. de México, México: PEARSON EDUCACIÓN.
- [10] Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems* (Cuarta ed.). Danvers, MA, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.
- [11] Larzabal Primo, G. (2017). *Efecto de los Parámetros de Laminación y Tratamiento Térmico por Inducción en la Mejora de Propiedades Mecánicas de Aceros Microaleados* (Memoria de Doctorado). Universidad de Navarra, España.
- [12] Homsher-Ritosa, C. N. (2016). *Influence of Processing Parameters and Alloying Additions on the Mechanically Determined No-Recrystallization Temperature in Niobium Microalloyed Steels* (Tesis de Doctorado). School of Mines, Colorado, Estados Unidos.
- [13] Tamura, I., Ouchi, C., Tanaka, T., & Sekine, H. (1988). *Thermomechanical Processing of High Strength Low Alloy Steel*. Inglaterra: Butterworth & Co.
- [14] Madías, J. (2009). *Avances recientes en la laminación de productos largos*. *Acero Latinoamericano*, 42-47.
- [15] Betshammar, J. (2006). *Improved Billet Shape Modeling in Optimization of the Hot Rod and Wire Rolling Process* (Proyecto de grado). Linköpings Universitet, Sweden.
- [16] Hwang, J.-K. (2020). *Thermal Behavior of a Rod during Hot Shape Rolling and Its Comparison with a Plate during Flat Rolling*. *Processes*, 1-14.
- [17] Yoo, U. K., Lee, J. B., Park, J. H., & Lee, Y. (2010). Analytical model for predicting the surface profile of a work piece in round-to-2-R and square-to-2-R oval groove rolling. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24(11), 2289-2295.
- [18] Byon, S. M., & Lee, Y. (2008). A study of roll gap adjustment due to roll wear in groove rolling: experiment and modelling. *JEM*, 222, 875-885.

BIBLIOGRAFÍA

- [19] Lundberg, S. E. (2017). *The Making, Shaping and Treating of Steel, Long Products Volume*. Estados Unidos: ASSN of Iron & Steel Engineers.
- [20] Eriksson, C. (2004). *Roll Pass Design for Improved Flexibility and Quality in Wire Rod Rolling (Tesis de Doctorado)*. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [21] Lee, Y. (2004). *Rod and Bar Rolling: Theory and Applications*. CRC Press.
- [22] Yongqing, Z., Rodriguez-Ibabe, J. M., Weiqiang, Z., Jianchun, C., Aimin, G., & Rebellato, M. (2019). Strengthening Effects and Processing Optimization of Niobium on High-Strength Rebars. *Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference*, (págs. 2013-2024). Pittsburgh, Pa, Estados Unidos.
- [23] Cervera Ruiz, M., & Blanco Díaz, E. (2015). *Resistencia de Materiales*. Barcelona, España: CIMNE.
- [24] LEE, Y. (1999). Calculating Model of Mean Strain in Rod Rolling Process. *ISIJ International*, 39(1999), 961-964.
- [25] Dieter, G. E. (1988). *Mechanical Metallurgy*. Singapore: McGraw-Hill.
- [26] LEE, Y. (2002). Prediction of the Surface Profile and Area of the Exit Cross Section of Workpiece in Round–Oval–Round Pass Sequence. *ISIJ International*, 42(2002), 726-735.
- [27] Y. Saito, Y. Takahashi, M. Moriga y K. Kato: *J. Jpn. Soc. Techrol. Plas.*, 24(1983), 1070.
- [28] R. Kawai: Master thesis, University of Sheffield, (1985).
- [29] Vieira Braga, F., Pérez Escobar, D., Lucinda de Oliveira, N. J., & Spangler Andrade, M. (2016). Hot deformation behavior of a ferritic stainless steel stabilized with Nb during hot rolling simulation at different temperature ranges. *Journal of Materials Research*, 1-11.
- [30] BYON, S.-m., NA, D.-h., & LEE, Y. (2013). Flow stress equation in range of intermediate strain rates and high temperatures to predict roll force in four-pass continuous rod rolling. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 742-748.

BIBLIOGRAFÍA

- [31] Monsalve, A., Artigas, A., Celentano, D., Guzmán, A., Colás, R., & Houbaert, Y. (2013). Determinación de la tensión de laminación en caliente a partir de ensayos de tracción. *Revista de Metalurgia*, 65-76.
- [32] Okediran, I. K., Alamu, O. J., & Durowoju, M. O. (2013). A Study of Zenner – Holomon Parameter Variation with Pass Reduction in Steel Rolling. *ISSN*, 2(12), 59-69.
- [33] Lee, Y. (2001). An Analytical Study of Mean Roll Radius in Rod Rolling. *ISIJ International*, 41(2001), 1414-1416.
- [34] Z. Wusatowski and R, Wusatowski: *Prace Imet*, 4 (1952), 273.
- [35] Avner, S. H. (1988). *Introducción a la metalurgia física*. Estados Unidos: McGraw-Hill.
- [36] Ángel Garzón, J. M., Urrea García, B. A., & Ussa Alvarez, J. S. (2015). *Diseño y Construcción de un Banco Para Pruebas de Torsión (Tesis de Licenciatura)*. Universidad de San Buenaventura, Bogotá, Colombia.
- [37] Whitley, B. (2017). *Thermomechanical Processing of Microalloyed Bar Steels for Induction Hardened Components*. School of Mines, Golden, Colorado, Estados Unidos.
- [38] Inc., D. S. (2020). Gleeble 3800-GTC. Obtenido de Thermal-Mechanical Physical Simulation System: <https://www.bleeble.com>
- [39] Siciliano Jr., F. (1999). *Mathematical Modeling of the Hot Strip Rolling of Nb Microalloyed Steels (Tesis de doctorado)*. McGill University, Montreal, Canada.
- [40] Aghasafari, P., Salimi, M., & Daraei, A. (2014). Flow Stress Evaluation in Hot Rolling of Steel. *ASM International*, 23(8), 2819-2828.
- [41] Siciliano Jr, F., Minami, K., Maccagno, T. M., Jonas, & Jonas, J. J. (1996). Mathematical Modeling of the Mean Flow Stress, Fractional Softening and Grain Size during the Hot Strip Rolling of C-Mn Steels. *ISIJ International*, 36(1996), 1500-1506.
- [42] Minami, K., Siciliano Jr, F., Maccagno, T. M., & Jonas, J. J. (1996). Mathematical Modeling of Mean Flow Stress during the Hot Strip Rolling of Nb Steels. *ISIJ International*, 36(1996), 1507-1515.

BIBLIOGRAFÍA

- [43] Bastos, F., Pereda, B., Lopez Beatriz, Rodriguez-Ibabe, J. M., & Rebellato, M. (2019). Understanding the Role of Nb in Hot-Rolled Rebars: Influence of Final Geometry and Process Parameters. Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference, (págs. 2001-2011). Pittsburgh, Pa, Estados Unidos.
- [44] Maccagno, T. M., Jonas, J. J., Yue, S., McCrady, B. J., Slobodian, R., & Deeks, D. (1994). Determination of Recrystallization Stop Temperature from Rolling Mill Logs and Comparison with Laboratory Simulation Results. *ISIJ International*, 34(1994), 917-922.
- [45] Dimatteo, A., Vannucci, M., & Colla, V. (2014). Prediction of Mean Flow Stress during Hot Strip Rolling Using Genetic Algorithms. *ISIJ International*, 54(2014), 171-178.
- [46] Alghamdi, F. (2013). Mathematical Modeling of Mean Flow Stress (MFS) during Hot Strip Rolling for HSLA Steels. McGill University, Montreal, Canada.
- [47] Gautam, J., Miroux, A., Moerman, J., Barbatti, C., van Liempt, P., & Kestens, L. (2012). Determination of the Non-Recrystallisation Temperature (T_{nr}) of Austenite in High Strength C-Mn steels. *Materials Science Forum*, 706-709(2012), 2722-2727.
- [48] Yang, H., Xiaoguang, Z., Zhenyu, L., & Guodong, W. (2016). Determination of No-recrystallization Temperature for a Nb-bearing Steel. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*, 31(3), 644-647.
- [49] Siciliano, F., Allen, B., & Ferguson, D. (2016). Hot Torsion Tests – A Reliable Rolling Simulation Method for C-Mn Steels. *Trans Tech Publications*, 879, 1783-1787.
- [50] Siciliano, F., Allen, B., Rodrigues, S. F., & Jonas, J. J. (2018). Physical Simulation Methods Applied to Hot Rolling of Linepipe Steels. *Trans Tech Publications*, 941, 438-442.