

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



TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE
LA INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES

PRESENTA

IQ. ALEXIS IVÁN SILVA FUENTES

“EFECTOS DE LA TENSIÓN DE ENROLLADO EN LA
GENERACIÓN DE MARCAS POR FRICCIÓN EN ACERO
PLANO EN GRADOS DE BAJO CARBONO”

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.

ENERO 2024

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



TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE
LA INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES

PRESENTA

IQ. ALEXIS IVÁN SILVA FUENTES

“EFECTOS DE LA TENSIÓN DE ENROLLADO EN LA
GENERACIÓN DE MARCAS POR FRICCIÓN EN ACERO
PLANO EN GRADOS DE BAJO CARBONO”

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.

ENERO 2024

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

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “Efectos de la tensión de enrollado en la generación de marcas de fricción en acero plano en grados de bajo carbono”, realizada por el estudiante Alexis Iván Silva Fuentes, con número de matrícula 1564788, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con orientación en Materiales.

El Comité de Evaluación de Tesis

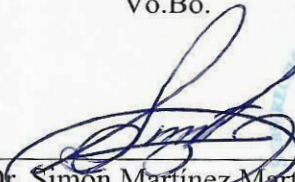
Dr. Luis Adolfo Leduc Lezama
Director


Dr. Rafael David Mercado Solís
Revisor

Dr. Julio César Morales Chavela
Revisor

Dr. Jorge Ramírez Cuellar
Revisor

Vo.Bo.


Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



Institución 190001

Programa 557546

Acta Núm. 4302

Ciudad Universitaria, a 9 de febrero de 2024.

Dedicatoria

A mi familia, por el apoyo en todo momento desde siempre

Agradecimientos

A mi familia, por el apoyo constante desde siempre, por haber estado ahí en la buenas, en las malas y en las peores, pero siempre saliendo adelante.

A Ternium por darme la oportunidad de desarrollarme ejerciendo mi profesión durante estos 7 años y ofrecerme la oportunidad de ingresar al programa de Maestrías. Especialmente a Efraín Ubici, César Villanueva y Alejandro Flores por apoyarme en mi desarrollo durante mi estancia en procesos del MC3 y que fueron clave en el éxito de este proyecto.

Al personal operativo del MC3 y el SKP4 de Churubusco por haber apoyado en el proceso de los materiales de prueba y su aportación de conocimientos de su experiencia.

A FIME por darme la oportunidad del uso de las instalaciones para llevar a cabo las pruebas, a los Profesores que siempre han estado dispuestos a apoyarnos, a los alumnos de la licenciatura que nos estuvieron apoyando en los análisis en el Laboratorio de Materiales y en especial el Dr. Luis Leduc mi asesor de tesis que siempre ha apoyado para el avance de este proyecto.

Índice

1. Capítulo I Introducción.....	9
1.1. Resumen.....	9
1.2. Antecedentes del acero.....	9
1.3. Hipótesis.....	12
1.4. Objetivos generales.....	13
1.5. Objetivos específicos.....	13
1.6. Justificación.....	13
2. Capítulo II Fundamentos de Laminación en Caliente.....	15
2.1. Laminación en Caliente en el MC3.....	15
2.2. Hornos de Recalentamiento.....	16
2.2.1. Generalidades.....	16
2.2.2. Movimiento de planchones.....	17
2.2.3. Método de calentamiento.....	18
2.2.4. Método de carga de planchones.....	19
2.2.5. Quemadores.....	20
2.2.6. Abastecimiento de gas.....	20
2.2.7. Abastecimiento de aire de combustión.....	21
2.2.8. Guías refrigeradas.....	21
2.2.9. Circuito de agua de enfriamiento.....	22
2.2.10. Revestimiento refractario.....	22
2.3. Estaciones de descascarado de planchones.....	22
2.3.1. Generalidades.....	22
2.4. Molino Canteador.....	23
2.4.1. Generalidades.....	23
2.5. Molino Reversible.....	24
2.5.1. Generalidades.....	24
2.5.2. Rodillos del molino reversible.....	25
2.5.3. Modelos de control.....	26
2.6. Coil Box.....	27
2.6.1. Generalidades.....	27
2.6.2. Diseño y operación.....	27
2.7. Estación de descascarado de barra de transferencia.....	29
2.7.1. Generalidades.....	29
2.8. Molino Tandem.....	30
2.8.1. Generalidades.....	30
2.8.2. Rodillos.....	31
2.8.3. Loopers.....	33
2.9. Mesa de enfriamiento.....	34
2.9.1. Generalidades.....	34
2.10. Enrollador.....	35

2.10.1.	Generalidades.....	35
2.10.2.	<i>Pinch roll</i>	35
2.10.3.	Mandril.....	37
2.10.4.	Rodillos unitarios (formadores)	40
2.10.5.	Guías de entrada.....	41
2.10.6.	Control de operación.....	42
2.10.7.	Modelo de control de tensión.....	44
2.11.	Skin Pass.....	46
2.11.1.	Generalidades.....	46
2.11.2.	Descripción de equipos de proceso.....	46
2.11.3.	Control de operación.....	48
3.	Capítulo III Generación de defectos	51
3.1.	Tipos de marcas.....	51
3.1.1.	Marcas mecánicas.....	51
3.1.2.	Marcas de oxidación.....	51
3.1.3.	Marcas de rodillos	51
3.1.4.	Marcas de corte.....	51
3.1.5.	Marcas de recubrimiento.....	51
3.1.6.	Marcas de soldadura	51
3.2.	Mecanismos de formación de marcas mecánicas en aceros planos.....	52
3.2.1.	Tensión deficiente.....	52
3.2.2.	Defectos en los rodillos.....	52
3.2.3.	Formación de pliegues o arrugas.....	52
3.2.4.	Vibraciones y golpes.....	52
3.2.5.	Bordes de la bobina.....	52
3.3.	Óxido durante la laminación.....	53
3.3.1.	Óxido ferroso (wüstita) (FeO)	53
3.3.2.	Óxido férrico (Fe ₂ O ₃)	53
3.3.3.	Óxido magnetita (Fe ₃ O ₄)	53
3.4.	Indicadores cualitativos.....	53
3.4.1.	Retenido.....	53
3.4.2.	Reproceso	54
3.4.3.	Rechazo.....	54
3.4.4.	Reclamo.....	54
4.	Capítulo IV Metodología y técnicas experimentales.....	55
4.1.	Caracterización del defecto.....	55
4.1.1.	Generalidades.....	55
4.1.2.	Recolección de muestras.....	58
4.1.3.	Flexómetro.....	59
4.1.4.	Estereoscopio.....	60

4.2. Análisis metalográfico.....	62
4.2.1. Preparación de muestras.....	62
4.2.2. Metalografía.....	67
4.3. Análisis de topografía tridimensional de superficie (análisis optodigital)...	71
4.3.1. Preparación de muestras.....	71
4.3.2. Equipo optodigital.....	72
4.4. Análisis de microscopía electrónica de barrido.....	74
4.4.1. Preparación de muestras.....	75
4.4.2. Análisis en microscopio.....	75
4.5. Caracterización de producto.....	76
4.6. Pruebas de proceso.....	77
4.7. Variables de proceso.....	77
5. Capítulo V Resultados	79
6. Capítulo VI Discusiones.....	85
7. Capítulo VI Conclusiones y recomendaciones.....	86
8. Bibliografía	87
9. Anexo.....	90

1. Capítulo I Introducción

1.1 Resumen

En la presente investigación se realiza un análisis de las variables del proceso de enrollado en aceros de bajo carbono, en los cuales se ha reportado con enrollado flojo, esto a su vez en el siguiente proceso de SKP4 produce una condición de “apriete” generándose fricciones entre espira y espira del rollo debido al contacto entre estas.

Se realizaron pruebas proceso en el MC3 modificando la tensión de enrollado, la sobre velocidad del mandril, la sobre velocidad del unitario del MC3 y de tensión de desenrollado y velocidad en SKP4 para correlacionar cuál variable es más crítica en la generación de las “marcas de fricción”.

De las pruebas anteriores, se generaron prácticas operativas en las líneas de MC3 y SKP4 con modificación de variables de proceso para lograr la disminución del defecto de fricciones.

1.2 Antecedentes del acero

A lo largo de la historia humana el uso de herramientas para facilitar las actividades de la vida cotidiana siempre ha estado en constante evolución. Desde las primeras herramientas hechas de piedra, madera y huesos hasta el desarrollo de herramientas metálicas de mayor durabilidad.

Los pioneros en el uso del hierro fueron los sumerios y los egipcios y data de aproximadamente el año 3500 a. C., además de que se cree que el primer hierro utilizado por los humanos podría haber sido extraído de meteoritos antes que directamente de nuestro planeta.

La palabra acero provienen del latín “*aciarius*”, y éste a su vez de la palabra “*acies*”, que denomina el filo de un arma blanca¹⁸. El proceso general para la producción de cualquier acero es la conversión del óxido de hierro en hierro.

El hierro no se puede encontrar puro en la naturaleza debido a que con la presencia del oxígeno de la atmósfera se oxida, y por ello, los métodos de extracción de hierro puro tienen su origen en la eliminación del oxígeno en el óxido del hierro. El método básico para lograrlo consiste en calentar el óxido de hierro en presencia de carbono, lo que al combinarse con el oxígeno proporciona dióxido de carbono y le da al hierro cierta pureza, aunque con altas concentraciones de carbono¹².

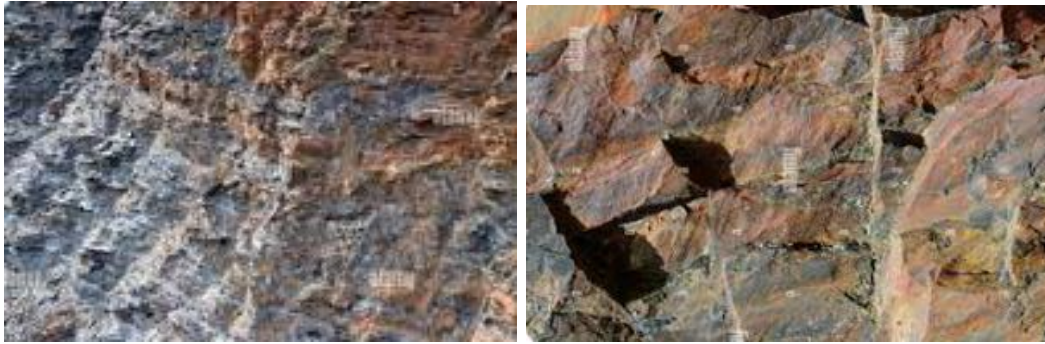


Figura 1. Depósitos de rocas de mineral de hierro en la naturaleza²

El primer desarrollo de acero data del año 300 A.C y proviene de la India y en Sri Lanka. Este se llama acero Wootz el cual destacaba por su durabilidad y por su filo, su procedimiento consistía en un horno de viento que era soplado por monzones, esta clase de acero predomina por tener una especie de bandas de capas de micro carburos temperados en una matriz con martensita. Se caracteriza por la proporción de carburos que tiene, lo que provoca que sea un acero puro¹.

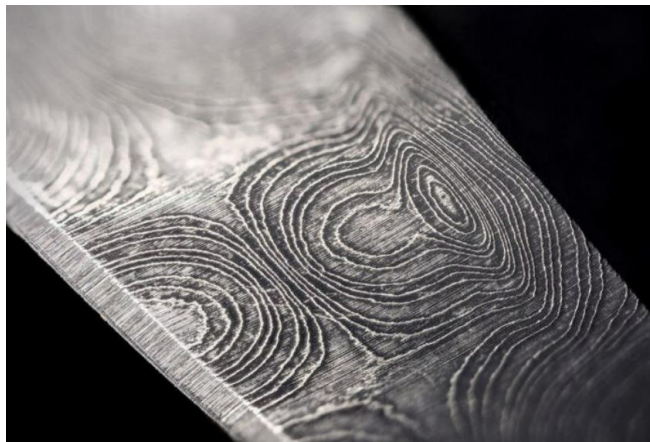


Figura 2. Los patrones de las hojas en el acero Wootz se deben a la presencia de moléculas de carburo⁸.

A pesar de contar con una tecnología rudimentaria, los primeros trenes de laminación se construyeron en el Oriente Medio y en el sur de Asia y se remontan al 600 a.C⁴. En 1502 Leonardo da Vinci describió en sus notas sus ideas para la fabricación de láminas de estaño, estos a partir de cilindros rotativos presan y aplanan las chapas metálicas¹⁵

Los primeros trenes de laminación datan de finales del siglo XVI. Estas máquinas se utilizaron para fabricar láminas y barras de hierro. Pero el verdadero comienzo del desarrollo de la metalurgia, con sus chapas y bobinas laminadas en caliente, se

debe a los brillantes esfuerzos de Henry Cort, un empresario británico a quien los escritores modernos han llamado "padre del laminado moderno".

En 1783 consiguió una patente para el proceso de laminado de piezas a partir de un molde existente en el propio rodillo. Cort fue el primero en combinar las mejores prácticas de fabricación de la época.

En la actualidad el desarrollo de nuevos aceros sigue en auge. Principalmente para industrias como la automotriz, es necesario innovar constantemente para producir aceros de nueva generación que tengan propiedades mecánicas que los hagan más resistentes y a su vez más ligeros para sus aplicaciones.

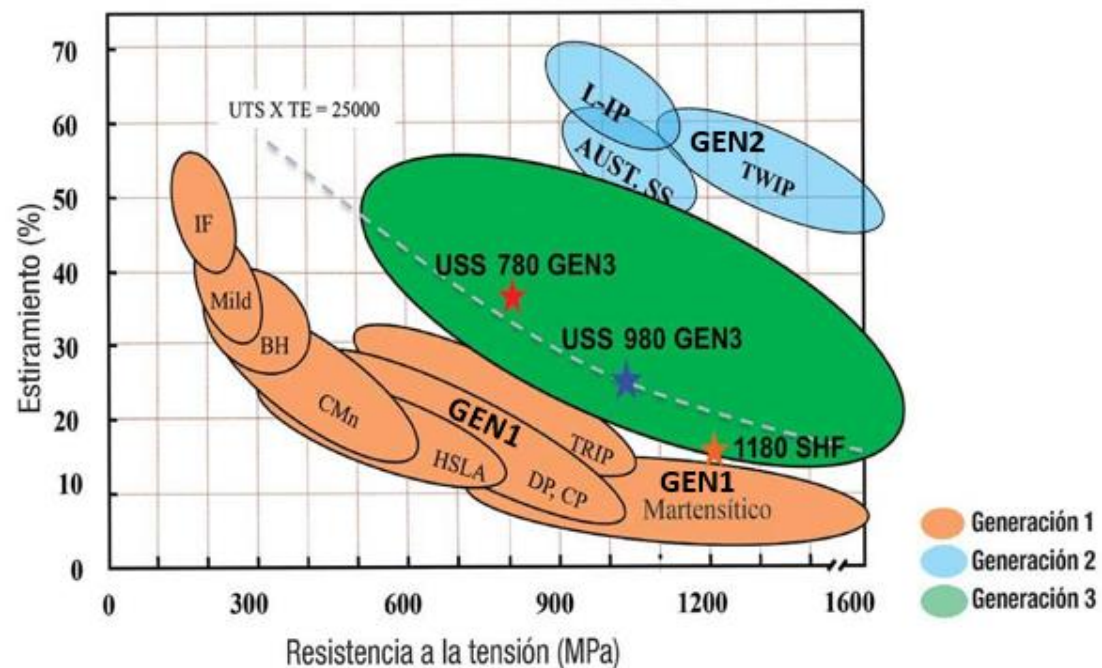


Figura 3. Gráfica de banana por generación de acero.

La figura 3 muestra la resistencia a la tensión de cada generación de acero avanzado de alta resistencia (AHSS) es graficada en el eje horizontal y la elongación se grafica en el eje vertical. El acero Gen3 puede no tener el alargamiento de los aceros Gen2, pero cuesta menos y es más soldable²².

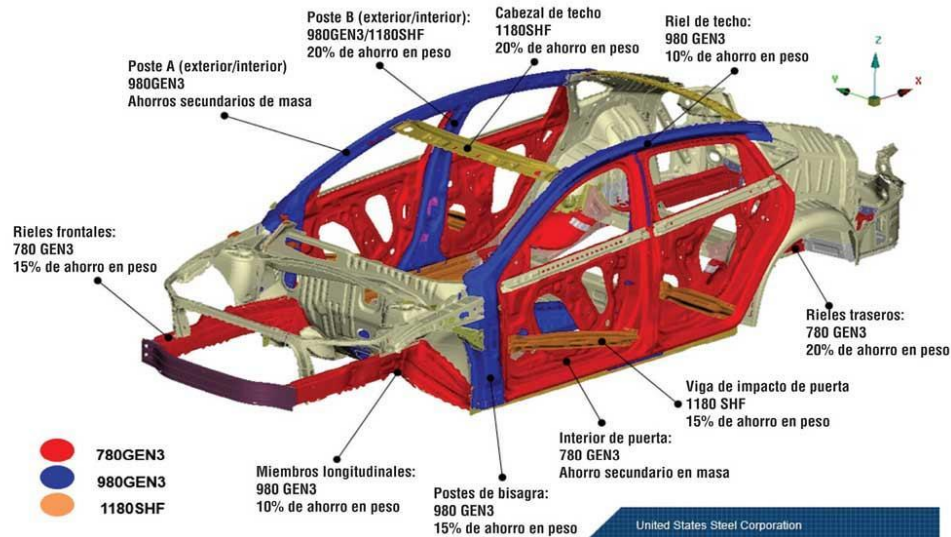


Figura 4. Partes en donde se utiliza el acero avanzado de alta resistencia (AHSS).

Estos aceros AHSS se usan típicamente para formar componentes de seguridad estructurales de una carrocería de auto—rieles frontales y traseros, poste A, riel de techo, poste B, solera de puerta y poste de bisagra, figura 4²².

En el mundo se producen actualmente alrededor de 2 mil millones de toneladas de acero, haciendo que sea una de las materias primas más empleadas en la producción industrial.

En esta investigación se va a caracterizar uno de los defectos que se genera durante el proceso de enrollado del acero. Este defecto denominado “marcas por fricción” que ocurren al procesar el rollo con baja tensión de enrollado y se analizarán las variables de proceso que se asocian directamente con la generación de este defecto.

1.3 Hipótesis

La generación de la marca de fricción es causada en aceros de bajo carbono debido a que el óxido de hierro presente en la superficie del material laminado en caliente actúa como un núcleo abrasivo de mayor dureza entre las espiras del rollo, lo que al entrar la tensión por desenrollarlo en el SKP4 asociado al factor de núcleo flojo por bajas tensiones de enrollado en el MC3, el óxido actúa como un abrasivo que arrastra el acero en la dirección del movimiento y genera la marca.

1.4 Objetivos generales

De forma general se plantea una disminución en etapas de la afectación de las “marcas por fricción”, esto provoca rechazos y reprocesos en la línea del Molino Caliente 3 (MC3). Para esto se debe mantener el control de las variables de proceso para que de manera preventiva se evite la generación del defecto.

Lo rechazos y reprocesos que se dictaminan a partir de la generación de defectos en los rollos son perjudiciales para la compañía, debido a que el rechazo es material que directamente no es funcional para el cliente para el cual se generó el pedido, debido a esto se pierde dinero al degradar un producto a segunda o a chatarra. Lo que ocurre en el reproceso es que para que el producto pueda ser funcional para el cliente inicial se tiene que procesar por otra línea fuera del plan original para cortar, dar planeza, voltear cara, decapar, etc. y esto aumenta el precio de producción del producto, haciéndolo menos rentable e ineficiente

1.5 Objetivos específicos

Desarrollar conocimiento metalúrgico asociado a la generación de defectos superficiales de los laminadores en caliente para profundizar mejor en los análisis y por resolver los problemas de una manera más eficiente.

Realizar ensayos metalográficos a las muestras para determinar variaciones en las propiedades de los materiales. Esto para mejorar la calidad del producto que se le entrega a los clientes y superar las expectativas de estos y mejorar el volumen de venta de los productos.

Aprender a utilizar los equipos de laboratorio para el análisis de las muestras con defectos para tener una idea más específica de cómo se generan los reportes de laboratorio que se usan en la industria metalmeccánica.

Hacer un *benchmark* entre los diferentes laminadores en caliente para compartir prácticas de proceso derivadas de esta investigación, esto debido a que el defecto que se está estudiando es común en estas líneas.

1.6 Justificación

El defecto “marcas por fricción” se ha vuelto la principal causa de rechazos del MC3. Este defecto no es funcional para el cliente, debido a esto se debe de descartar en una línea posterior, estos descartes se convierten en rechazo cualitativo para el MC3. Si el defecto está presente en todo el rollo este se degrada.

Además de esto, se ha incrementado la cantidad de merma generada en la siguiente línea en la cual se procesan los rollos (Skin Pass 4, SKP4) lo que ha llevado a el desvío en los costos en varios meses consecutivos.

Esta merma es generada debido a que si de la línea anterior (MC3) viene el material defectuoso (mal enrollado, marcas, etc.) para poder entrar a proceso en el SKP4 se tiene que despuntar, y dependiendo de los metros que tenga defectuosos son los que se tendrán que cortar, haciendo que la merma aumente.

En la figura 5 se muestra la tendencia del indicador de rechazo cualitativo por “marcas de fricción” del MC3, se observa que ha ido en aumento desde diciembre de 2018 (línea roja sólida), además el acumulado del ejercicio actual es el doble que el ejercicio anterior (barra roja).

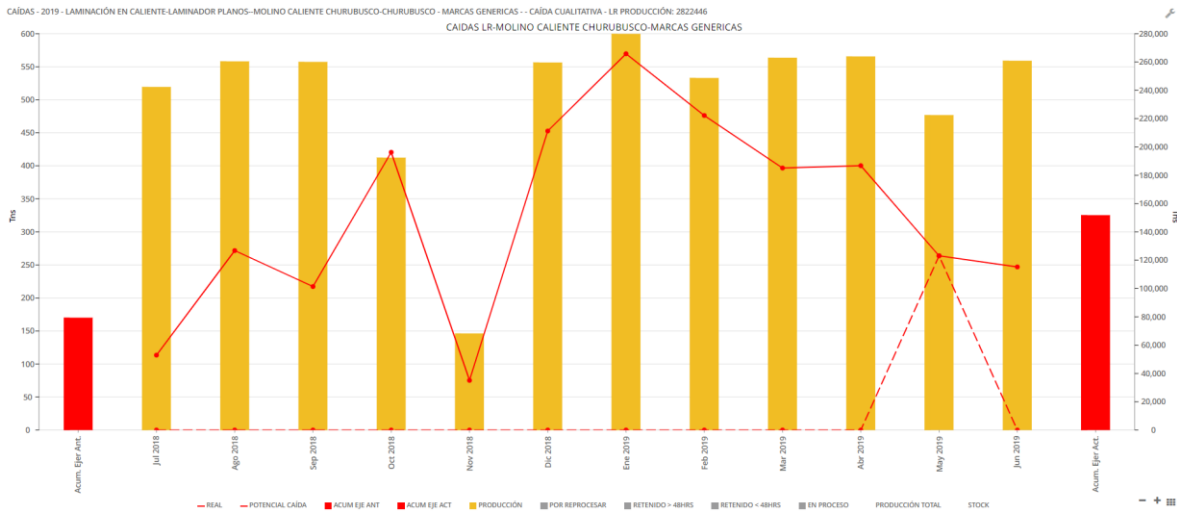


Figura 5. Tendencia de rechazo cualitativo por “marcas de fricción” del MC3.

2. Capítulo II Fundamentos de Laminación en Caliente

2.1 Laminación en Caliente MC3

En esta investigación se enfocará en la fabricación de acero en un molino de tren continuo de 6 castillos de 4 rodillos en alto cada uno. Este laminador es llamado Molino Caliente Churubusco, o Molino Cliente 3 de la empresa Ternium, es cual se encuentra ubicado en Monterrey, Nuevo León, México, figura 6.



Figura 6. Planta Ternium Churubusco.

El laminado en caliente es el proceso de conformar acero, aluminio y otros metales reduciendo la sección transversal ejerciendo presión en una o varias cajas de laminación. El laminado en caliente aprovecha la ductilidad del metal a altas temperaturas para realizar grandes reducciones de sección. En la figura 7, se muestra la configuración del MC3 y posteriormente se explicarán cada una de sus secciones.

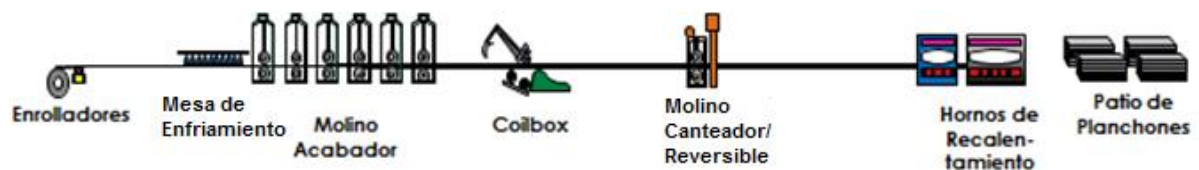


Figura 7. Diagrama de proceso del MC3

Los laminadores en caliente de productos planos se alimentan a partir de desbastes planos, llamados planchones previamente calentados y homogeneizados en hornos de recalentamiento para conseguir temperaturas adecuadas para el proceso de transformación posterior.

2.2 Hornos de recalentamiento

2.2.1 Generalidades

El proceso de laminación de acero plano en el MC3 consiste en partir de un planchón de acero, el cual viene de diferentes proveedores alrededor del mundo. El proceso principal para producir el planchón es partir del alto horno.

El MC3 cuenta con dos hornos de recalentamiento que funcionan con gas natural, uno con tecnología de viga caminante y el otro del tipo empujador, ambos de 30 m de longitud para alcanzar una capacidad combinada de 495 tn/h de producción.

Este tipo de hornos continuos utilizan vigas caminantes recubiertas con refractario, cuyo movimiento de avance, descenso y retroceso consigue hacer avanzar las cargas a través de la cámara del horno durante el calentamiento de las piezas.

Su función es la de calentar el planchón a una temperatura que va de 1200 °C a 1250 °C para permitir su laminación.

El sistema de movimiento permite que el horno sea completamente reversible, pudiendo cargar y descargar por cualquiera de sus dos frentes¹³.

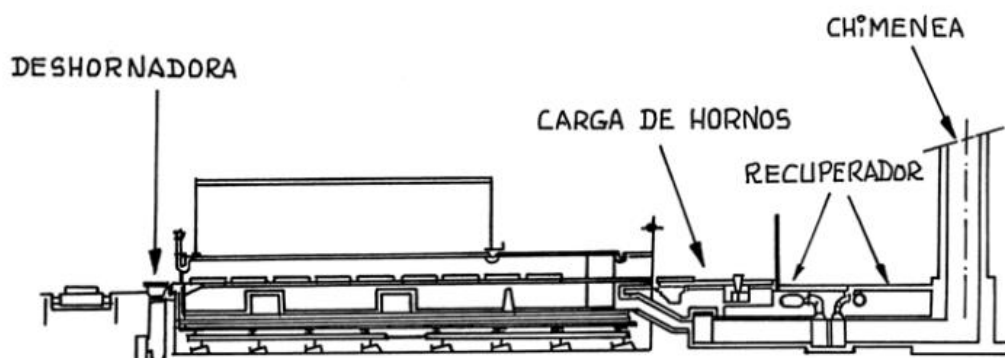


Figura 8. Diagrama de horno de recalentamiento de planchones de acero¹¹.

La bóveda del horno, así como las guías por dónde van los planchones, están recubiertas por un material refractario no permitiendo que la alta temperatura afecte a la estructura del horno.

Los hornos también poseen equipos anexos que permiten su buen funcionamiento, como lo son el doble empujador, el cual mueve los planchones; el circuito de agua refrigerante, que se encarga de mantener a una temperatura baja en las zonas a las estructuras expuestas a las altas temperaturas; los quemadores, pilares fundamentales en la operación de los hornos, por ser los que aumentan la temperatura, y un conjunto de circuitos de control que conforman el sistema que supervisan y controlan sus operaciones.

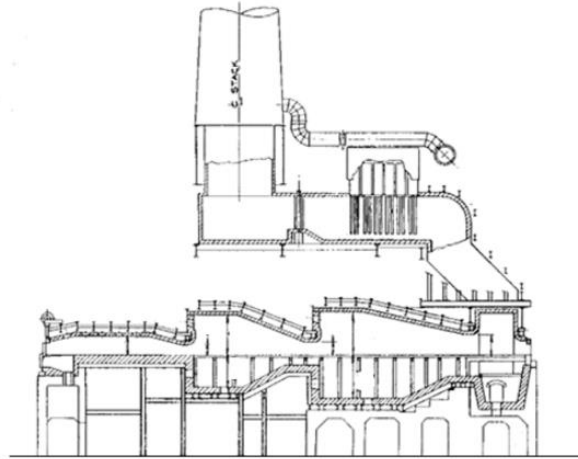


Figura 9. Sección longitudinal de horno de recalentamiento de planchones¹¹

2.2.2 Movimiento de planchones

Los planchones son empujados a las zonas de calentamiento sobre 4 guías refrigeradas, protegidas contra las altas temperaturas. Normalmente “los cuatro tubos refrigerados en la zona de precalentamiento y calentamiento llevan en la parte superior platinas de desgaste de acero inoxidable de manera que sobre éstas se deslicen los planchones.

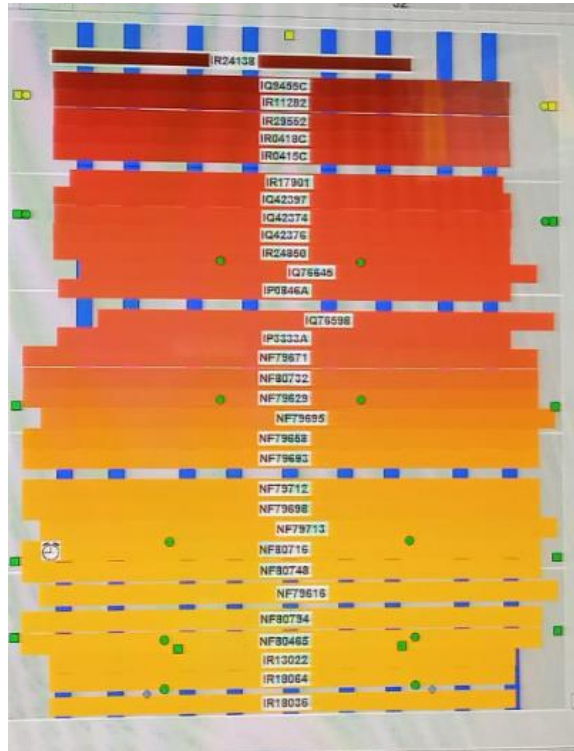


Figura 10. Gráfico de identificación de piezas y acomodo de planchones del Horno 5 del MC3

En la zona de igualación, los planchones se deslizan sobre vigas caminantes de acero recubiertas por refractarios, de aquí siguen hasta una placa de caídas que empalma con la mesa de rodillos de salida hacia la estación de descascarado.

2.2.3 Método de calentamiento

El calentamiento se efectúa mediante quemadores frontales situados en la bóveda del horno, colocados en las diferentes zonas, para obtener la temperatura deseada en el planchón. El planchón se calienta por tres zonas: precalentamiento que abarca un 60%, calentamiento un 30%, e igualación un 10% aproximadamente de la longitud del horno.



Figura 11. Modelo de calentamiento del Horno 4 del MC3 Ternium

La temperatura del planchón en su ingreso al horno es a temperatura ambiente, mientras que, a la salida la temperatura del planchón es de 1,250 °C aproximadamente.

2.2.4 Método de carga de planchones

El horno para planchones es de tipo de carga frontal. Los planchones son llevados por la vía de rodillos de acceso al horno, después de llegar a su posición de carga son empujados hacia la bóveda por el doble empujador, equipado para cargar una o dos filas de planchones.



Figura 12. Mesas de alimentación a los hornos

2.2.5 Quemadores

El cuerpo del quemador comprende una caja de aire, a partir de la cual se inyecta tangencialmente el aire de combustión, con lo que se le imprime un movimiento de rotación entorno al eje del quemador.

Dicho aire penetra en la apertura, cuyo perfil es tal que favorece el desarrollo radial de la llama, y la fuerza centrífuga lo aplasta contra su superficie y la de la bóveda adyacente.

El gas que llega por una tubería central se inyecta radialmente en la vena de aire en rotación con velocidad elevada, lo que garantiza una mezcla rápida. La llama que se obtiene de esta forma, perfectamente estabilizada mediante las corrientes de recirculación internas, se esparce cerca de la bóveda, calentándola, por convección, de forma muy uniforme, figura 13.



Figura 13. Vista interna del horno donde se observa la flama de salida de los quemadores

2.2.6 Abastecimiento de gas

Las diversas zonas y los quemadores están alimentados con gas natural, mediante una red de tuberías.

2.2.7 Abastecimiento de aire de combustión

El aire de combustión que requieren los quemadores se suministra a partir de dos ventiladores instalados a nivel del suelo. El aire proveniente de los ventiladores se recoge en un colector, para ser repartido entre las diversas zonas de calentamiento para los quemadores, con una temperatura de 40 °C aproximadamente.

2.2.8 Guías Refrigeradas.

Son guías longitudinales hechas tubo y aisladas en toda la superficie externa para reducir la pérdida de temperatura por la circulación del agua y para protegerlos de la acción de las llamas.

Para lograr este aislamiento, las guías poseen interiormente un sistema de circulación de agua refrigerada, lo que permite protegerlas de las altas temperaturas aunado a esto, poseen un revestimiento refractario que no permite el calentamiento excesivo de dichas guías.



Figura 14. Gráfico de temperatura del último pase del molino reversible de 6 planchones consecutivos

En la figura 14, se puede observar que el perfil de temperatura es diferente a lo largo del planchón, esto debido a la pérdida de temperatura de los extremos por convección con el ambiente y las crestas y valles internos de entre 10 °C y 30 °C asociados al contacto del planchón con las vigas caminantes refrigeradas.

2.2.9 Circuito de agua de enfriamiento

El agua de enfriamiento tiene una temperatura de 35°C y debe ser lo más limpia posible y libre de sales. El flujo requerido es de 750 m/h de agua por horno.

La temperatura de agua de enfriamiento en la salida debe ser de 55 °C a 60 °C como máximo. Los elementos enfriados por agua y protegidos con refractario causan una pérdida de 5.000.000 cal/h aproximadamente.

El agua que sale del horno va a una torre de enfriamiento el cual se baja una temperatura de 35 °C. El agua que vuelve de los circuitos de refrigeración se recoge mediante un sistema de tuberías en un tanque desde donde es bombeada nuevamente a las tuberías del horno.

2.2.10 Revestimiento refractario.

La bóveda de los hornos y las guías refrigeradas, así como algunas tuberías, están recubiertas por un revestimiento aislante que permite la protección de dichas áreas contra las altas temperaturas del horno. Este revestimiento varía en su composición química dependiendo de la zona donde se encuentre, por tener cada una de ellas diferentes grados de temperaturas²⁶.



Figura 15. Hornos de recalentamiento de Planchón en MC3.

2.3 Estaciones de descascarado de planchones

2.3.1 Generalidades

Después de que sale del horno pasa por un proceso de descascarado de óxido que se generó naturalmente por el recalentamiento en el horno. Para esto se utilizan 4 estaciones de descascarado con agua.

El descascarado por chorro de agua implica el uso de una corriente de agua a alta presión para limpiar la superficie del acero. El agua se dirige hacia la superficie del planchón a través de boquillas a alta presión, creando un chorro de agua concentrado y de alta velocidad que impacta sobre los óxidos, desprendiéndolos de la superficie del acero.

Este sistema de descascarado tiene varias ventajas. En primer lugar, es eficaz para eliminar los óxidos sin dañar el acero. Además, el agua actúa como un medio de enfriamiento, lo que ayuda a prevenir la deformación del acero debido a altas temperaturas.



Figura 16. Sistema de descascarado de SMS Group²⁰

En el MC3 las cuatro estaciones operan en un rango de presión entre 63 kgf/cm^2 y 70 kgf/cm^2 , siendo la estación 3 un sistema que opera con boquillas en la parte superior del planchón, la 4 con un sistema de boquillas en la parte inferior y la 5 y la 6 con sistemas de boquillas en la parte superior e inferior.

2.4 Molino Canteador

2.4.1 Generalidades

El proceso de canteo se lleva a cabo mediante el uso de rodillos verticales que se ajustan en posición y forma para dar forma a los bordes del planchón. Estos rodillos ejercen una presión controlada y aplican fuerzas específicas en los bordes del

material, lo que permite obtener una disminución en el ancho en función de los requerimientos del cliente.

El objetivo principal de un molino canteador es proporcionar un producto final con bordes rectos y paralelos, como en la fabricación de perfiles estructurales, tubos o vigas de acero.

El molino canteador puede tener múltiples pases de laminado, en las que los rodillos van ajustando gradualmente la forma y las dimensiones de los bordes del planchón. Al final del proceso de canteo se logra obtener una disminución en el ancho, así como bordes rectos, paralelos y de dimensiones precisas de acuerdo con los requisitos específicos del producto cliente.

2.5 Molino Reversible

2.5.1 Generalidades

Antes de que comience el proceso de laminación en el Molino Reversible, se elimina el óxido por medio del proceso de descascarado ya descrito anteriormente, para posteriormente reducir el espesor del planchón que puede variar entre 200 mm y 250 mm a un espesor final de 34 mm.

Las velocidades en el desbastador varían de 1 m/s a 5 m/s. En el proceso de desbaste el ancho aumenta en cada pasada y es controlado por rodillos verticales (rodillos canteadores).

Los canteadores comprimen y deforman el planchón provocando engrosamiento en los bordes que se corrige en los desbastes posteriores del Molino Reversible. Los rodillos del molino canteador suelen estar hechos de acero fundido o acero grado herramienta.

Los soportes de desbaste tienen configuraciones de dos o cuatro en alto. Al final del proceso de desbastado, el planchón se envía al laminador continuo a lo largo de la mesa de transferencia.

La temperatura del planchón en los desbastes es lo suficientemente alta como para que la barra de transferencia se recristalice por completo y mantenga granos equiaxiales.

Los molinos reversibles de desbaste constan de dos rodillos de gran diámetro que giran en direcciones opuestas. Estos rodillos tienen una superficie rugosa o estriada que ayuda a agarrar y deformar el planchón de acero a medida que pasa a través del molino.

Los rodillos están montados sobre ejes motorizados que permiten ajustar la distancia entre ellos, conocida como separación de rodillos, para controlar el espesor final del planchón.

El proceso de desbaste implica el paso del planchón a través del molino en varias ocasiones. En cada pasada, los rodillos ejercen una alta presión sobre el planchón, reduciendo gradualmente su espesor. A medida que el planchón se desplaza a través del molino, se estira y se alarga en la dirección de laminación.

2.5.2 Rodillos del Molino Reversible

Los rodillos de desbaste deben tener una alta resistencia a la torsión, a la flexión y una buena resistencia al choque térmico, por lo que se utilizan rodillos de acero vaciados aleados con una dureza de entre 43-50 hSD o rodillos hierro dúctil una dureza de 55-60 hSD.

En los últimos años se han estado utilizando rodillos de acero fundido compuestos con una capa exterior de acero con grafito con excelentes resultados.

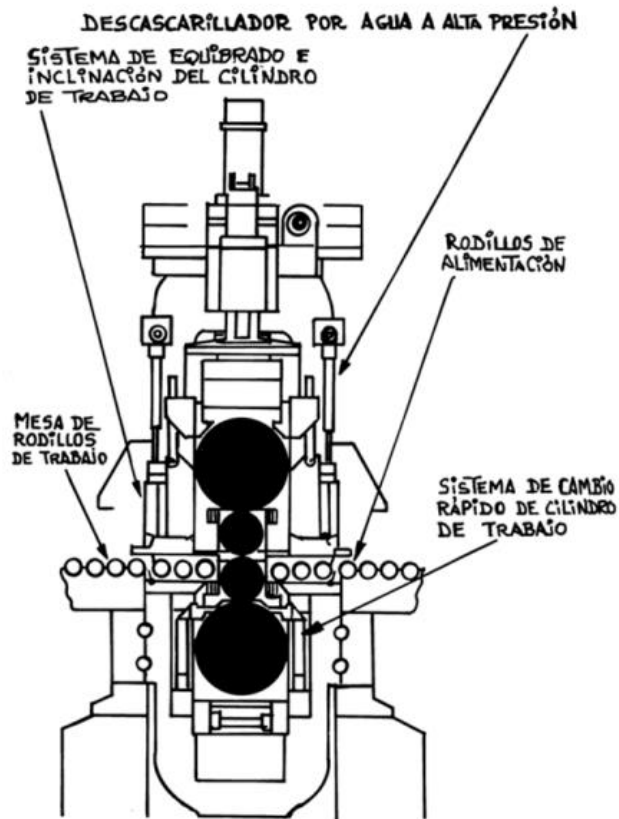


Figura 17. Configuración de rodillos de apoyo y trabajo en el Molino Reversible

2.5.3 Modelos de control

El control comienza con la función Nivel 2 de seguimiento del planchón, dirigiendo los reguladores y secuenciadores Nivel 1 basado en la zona en que se encuentre el planchón.

Para determinar las zonas de transición se emplean detectores de metal caliente y otros sensores. Las referencias específicas de laminado que se distribuyen de los modelos de seguimiento y configuración consisten en:

- Posiciones horizontales de rodillos, posiciones laterales guía y velocidades de tren de desbaste
- Posiciones verticales de rodillos y compensaciones de canteadores²⁵

Después pasa al primer proceso de reducción de espesor en un Molino Reversible, en el que por medio de 5 pases se reduce el espesor de planchón en un 80%, lo que se transforma en una barra de transferencia²⁷



Figura 18. Molino Reversible en MC3.

2.6 Coil Box

2.6.1 Generalidades

Bajo condiciones normales de operación en la sección de laminación en caliente, el tiempo de laminado es de aproximadamente 3 min, dependiendo del espesor de la lámina y peso del rollo.

Durante este proceso, el extremo posterior de la barra de transferencia, que aún se encuentra frente al molino, se enfría y entra con una temperatura que es aproximadamente 100 °C más baja que la del extremo frontal de la barra de transferencia.

La aceleración y el control automático del calibre, así como las cubiertas aislantes sobre la mesa intermedia de rodillos, permiten producir bandas en caliente con propiedades mecánicas y dimensionales homogéneas.

El Coil Box ha demostrado ser una alternativa para producir banda laminada en caliente con altas velocidades finales de laminado y alto rendimiento⁶.

Con esta tecnología, la pérdida de temperatura de la barra de transferencia es compensada por el proceso de enrollado obteniendo una distribución de temperatura muy homogénea.

Con esta tecnología, no son necesarias velocidades de laminación altas debido a que la pérdida de temperatura en cola es compensada al ser esta la que se alimenta primero al laminador, homogenizando la temperatura de la barra en su conjunto⁹.

2.6.2 Diseño y operación

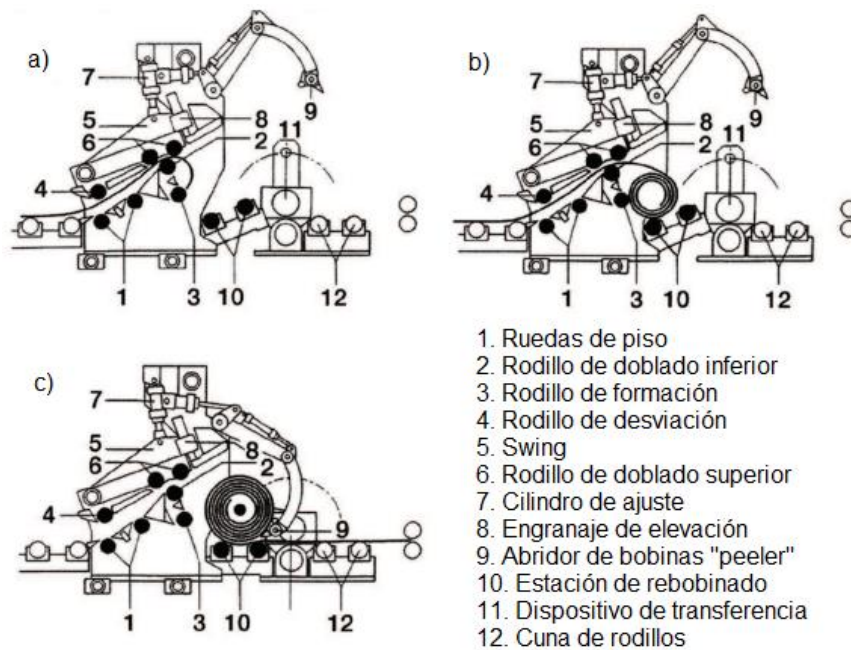


Figura 19. Representación de la operación del Coil Box⁹

La figura 19 muestra el modo de operación del Coil Box. En la figura. 19a se visualiza el Coil Box en su posición de bobinado hacia arriba. Los rodillos de entrada inferiores están en una posición elevada y guían la barra a través del espacio entre los rodillos de doblado inferiores y los dos superiores.

La estación de desenrollado también está elevada.

Los tres rodillos dobladores como su nombre lo indica doblan el extremo de la punta de la barra de transferencia de tal manera que esta entra en el rodillo formador, y la bobina inicial se forma entre el rodillo formador y el primer rodillo de la estación de desenrollado, figura 19b.

Después de que el diámetro exterior haya alcanzado aproximadamente 900 mm durante el enrollado, el espacio de flexión se abre con una velocidad preestablecida de tal manera que no se produzca un efecto de flexión hacia atrás.

Una vez que el diámetro exterior ha alcanzado aproximadamente 1.100 mm, se inicia el descenso de la estación de bobinado. Por medio de una reducción de velocidad justo antes y durante el descenso de la estación de enrollado, la bobina se inclina sobre la estación de bobinado y, posteriormente finaliza en la estación de enrollado que está en su posición horizontal.

Durante la desaceleración, el extremo posterior de la barra de transferencia se posiciona automáticamente.

En el Coil Box, los extremos de la punta y la cola, así como la superficie superior e inferior de la barra de transferencia, están invertidos.

Una vez que el conjunto del brazo pelador ha colocado el extremo superior de la bobina, es decir, el extremo posterior de la barra de transferencia, en la posición correcta, se inicia el desenrollado, figura 19c.

Al mismo tiempo, los mandriles del dispositivo de transferencia de bobinas se introducen en el ojo de la bobina.

Después de que la barra de transferencia desenrollada haya sido sujeta por una unidad de rodillo de presión o haya entrado en el primer soporte del laminador, la bobina puede transferirse a la estación de desenrollado, figura 20.

Para ello, la velocidad del dispositivo de transferencia de bobinas se sincroniza con la velocidad de alimentación de la barra de transferencia.

Una vez finalizada la transferencia, el Coil Box está listo para la entrada de la siguiente barra, es decir, el enrollado y desenrollado se pueden realizar simultáneamente⁹.



Figura 20. Coil Box en MC3.

2.7 Estación de descascarado de barra de transferencia.

2.7.1 Generalidades

El descascarado de barra de transferencia de acero previo a un proceso de tren laminador o tandem en la laminación en caliente de acero utilizando agua a alta presión es un paso importante para remover el óxido de hierro que se ha formado de manera natural por la exposición de la barra de transferencia a alta temperatura con la atmósfera, figura 21.

Las barras de transferencia de acero se colocan en posición para pasar a través del sistema de descascarado. Generalmente, se utilizan guías y rodillos para dirigir las barras a través de la zona de descascarado.

El agua a alta presión se dirige hacia las barras de acero mientras pasan por la zona. Las boquillas de agua están dispuestas de manera que el chorro de agua cubra uniformemente toda la superficie de las barras desprendiendo los óxidos generados desde su trayectoria del reversible hasta la zona del laminador.



Figura 21. Estación de descascarado del MC3

2.8. Molino Tandem

2.8.1 Generalidades

El elemento básico para laminar se conoce con el nombre de “caja”, y se compone de rodillos y de una estructura que sirve de soporte llamada “castillo”⁴.

Se denomina tren de laminación al conjunto de castillos y a todos los elementos auxiliares tales como los motores de accionamiento de los cilindros, las mesas de rodillos para la entrada y salida del material, caja de piñones, reductor y motor⁴.

La caja de laminación está compuesta por el castillo o bastidor, generalmente fabricado de acero vaciado³.

Dependiendo de la composición del grado (contenido de aleación y microaleación) de la lámina y del programa de laminación en caliente, el endurecimiento por deformación en cada pasada de los trenes de laminación y acabado y la capacidad de recristalización dinámica entre las pasadas varían²³.

El diseño microestructural del producto laminado en caliente, incluyendo la morfología del grano austenítico y el control de la precipitación de ferrita a la salida del molino, es más conocido como procesamiento termomecánico (TMP).

Consiste en modificar el tratamiento de una determinada composición de acero para conseguir el tamaño de grano y la distribución de fases requeridos, controlando ambos las propiedades del acero²³.

La microestructura y propiedades del acero dependen de factores como:

- Composición química del acero.
- Tratamientos térmicos posteriores.
- Deformación en caliente¹¹

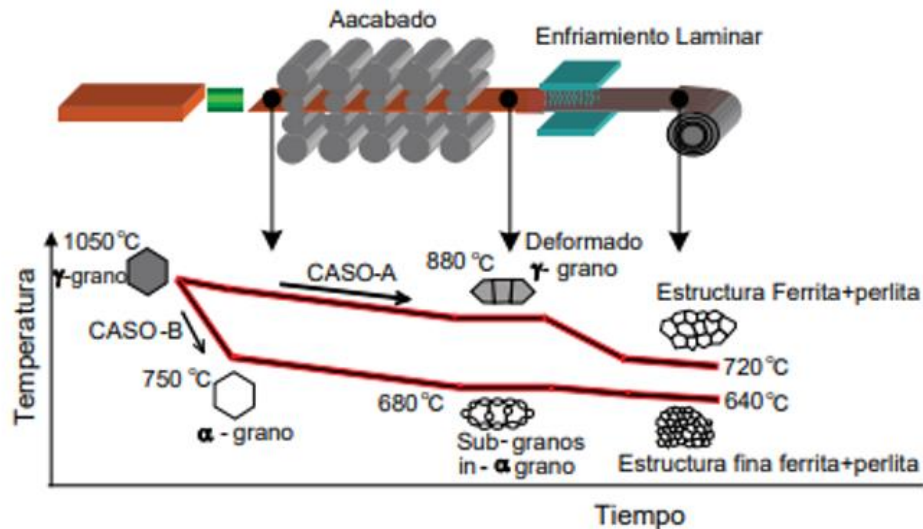


Figura 22. Efecto de laminado y enfriado sobre la estructura del grano²⁵

En cuanto al endurecimiento por deformación en caliente, la tendencia es que cuanto mayor sea el contenido de aleación (hasta aproximadamente un 5-7 % en total en los grados AHSS), mayor será la resistencia a la deformación en caliente por la influencia del Si, el carbono, el manganeso y el Nb . La consecuencia son mayores fuerzas de laminación para la misma tasa de reducción de laminación en caliente en comparación con los grados HSLA²³.

2.8.2 Rodillos

En la laminación en caliente de acero, se utilizan diferentes tipos de rodillos de trabajo y apoyo para lograr una deformación plástica efectiva del material.

Se dividen en dos tipos: rodillos de apoyo y rodillos de trabajo

Los rodillos de trabajo tienen forma cilíndrica y están fabricados con aceros aleados de alta resistencia al desgaste para soportar cargas y temperaturas elevadas.

Estos rodillos son los que están en contacto directo con la lámina caliente. Las variables más importantes que se controlan en estos rodillos son el diámetro y la corona mecánica.



Figura 23. Rodillo de trabajo de laminación en caliente¹⁹

Los rodillos de apoyo no están en contacto directo con la lámina, sino que son los que por medio de sus chumaceras soportan la fuerza de las cápsulas hidráulicas y la transmiten a los rodillos de trabajo.

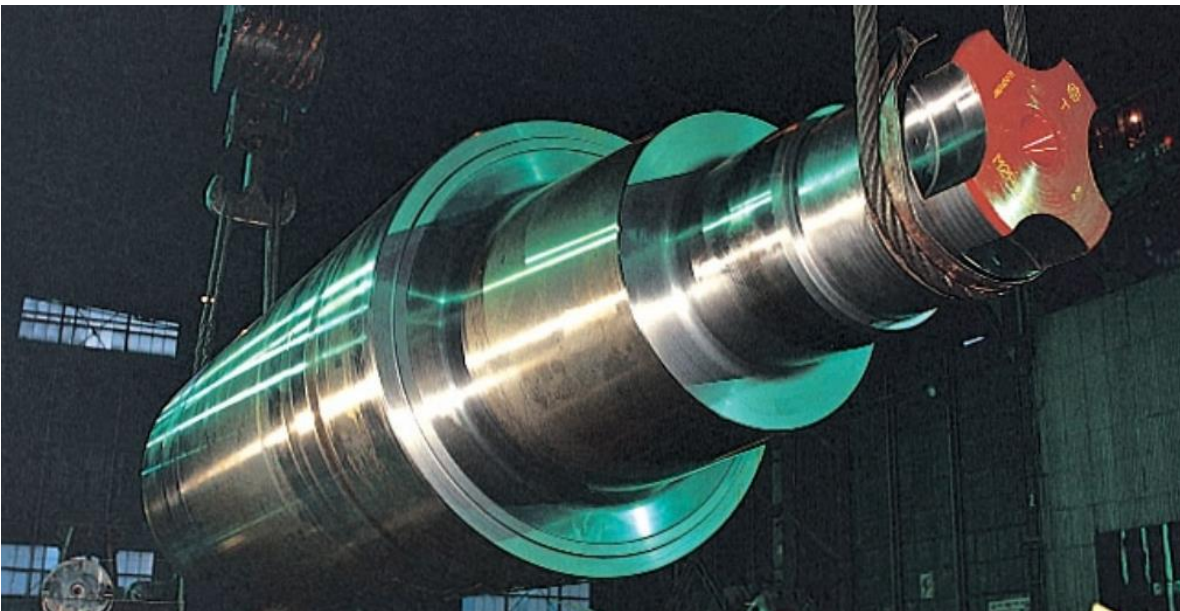


Figura 24. Rodillos de apoyo de laminación en caliente¹⁴

La configuración de cada castillo del tren de laminación consta de 2 rodillos de apoyo y 2 rodillos de trabajo acomodados de acuerdo con la figura 25.

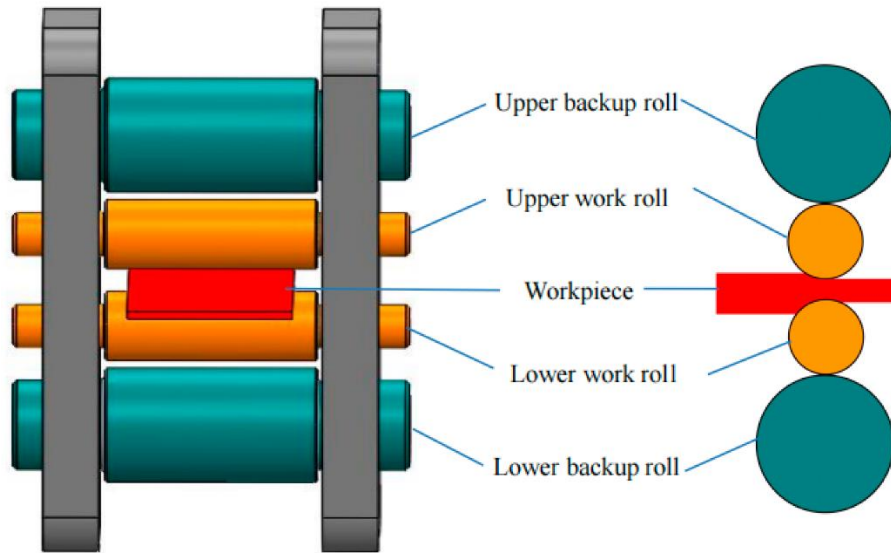


Figura 25. Configuración de rodillos de apoyo y trabajo en cada castillo de laminación¹⁷

2.8.3 Loopers

Los *loopers* son rodillos que están dispuestos entre los castillos del tren terminador de un molino caliente y su función principal es regular el flujo másico para garantizar una laminación estable. Los *loopers* son accionados por cilindros hidráulicos, figura 26.



Figura 26. Rodillo looper de un molino de laminación en caliente

En el MC3 se tiene un molino de 6 castillos en el tren laminador con la configuración de 4 en alto, 2 rodillos de apoyo y 2 de trabajo, figura 27.



Figura 27. Tren laminador MC3

2.9 Mesa de enfriamiento

2.9.1 Generalidades

Posterior al molino acabador, el material pasa por una mesa de enfriamiento en la que por medio de un modelo de control de flujo de agua y temperatura se le da una temperatura de enrollado específica para que en función de la química del material se den las propiedades mecánicas características del producto.



Figura 28. Mesa de enfriamiento en MC3.

2.10 Enrollador

2.10.1 Generalidades

La última parte del proceso de transformación de planchón a rollo se lleva a cabo en un equipo llamado enrollador.

El enrollador debe estar diseñado y ajustado de manera adecuada para garantizar que las bobinas de acero laminado se enrollen de manera uniforme y segura. Se deben considerar parámetros como el diámetro y peso de las bobinas, la velocidad de enrollado y el control de tensión para obtener bobinas de alta calidad y que cumplan con los estándares requeridos.

Es el equipo encargado de enrollar el acero ya laminado facilitando su almacenamiento y posterior manejo en la cadena de suministro y procesos de fabricación posteriores.

El sistema de enrollado tipo “*down coiler*” tiene sub-equipos que hacen que el proceso se pueda llevar a cabo de forma controlada y no genere defectos cualitativos en el producto.

La clave para un buen enrollado es tener un buen equipo, controles eléctricos modernos, excelente mantenimiento y entender qué pasa adentro del enrollador⁵.

2.10.2 *Pinch roll*

El *pinch roll* es un equipo que se utiliza como un control de posición para la lámina antes de entrar al enrollador.

Está formado por dos rodillos en una posición de desfase en la que el rodillo superior se encuentra adelante y el inferior atrás, esto para hacer que la lámina en lugar de seguir en posición horizontal pueda bajar a hacer el conformado del rollo en el enrollador.

Otra función es generar tensión después de que la cola del rollo salga del último castillo del molino continuo y así evitar que se haga un mal conformado del rollo por pérdida de tensión. El *pinch roll* mantiene contacto con la lámina hasta al final de su enrollado, figura 29.



Figura 29. Instalación de *pinch roll* superior en el MC3

Es importante para el buen enrollado tener una buena puesta a punto del *gap* del *pinch roll*. Este corrige el ángulo para que la lámina entre y afecte directamente a la caída con el impacto. Si la velocidad del *pinch roll* cae por debajo de la velocidad del molino es porque hay un ajuste inapropiado del *gap* y existe la posibilidad de generar un atorón de lámina⁵.

El *gap* del *pinch roll* es la configuración más importante del proceso de enrollado. El *gap* establece el punto base para la velocidad de avance del *pinch roll* y compensa la caída de velocidad de la punta del rollo.

Sucesivamente, este rango de velocidad después del impacto es la base para la configuración de la velocidad del mandril y de los rodillos formadores. En esencia, la velocidad de enrollado está basada en la configuración del *gap* del *pinch roll*.

El *pinch roll* tiene la función de alimentar la cinta al enrollador, estableciendo una tensión entre este y el mandril hasta que se enrolle la cola de la cinta.

La fuerza aplicada para mantener la cinta es la suma del peso hasta la parte alta del rodillo superior del *pinch roll* y la presión de aire en los cilindros. La fuerza máxima en el *pinch roll* es alcanzada siempre que el rollo superior esté completamente abajo sobre la cinta.

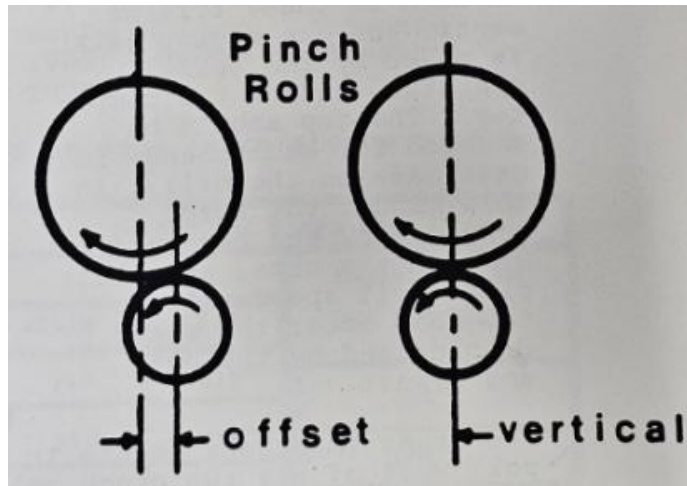


Figura 30. Posición del *pinch roll*

En el *pinch roll* el rodillo superior es usualmente de 2 a 4 veces más grande que el rodillo inferior. El rodillo superior es subido y bajado dependiendo de los requerimientos de la operación de enrollado.

Hay dos teorías de como los rodillos *pinch roll* deberían de estar alineados. En cualquiera de las dos, el rodillo superior está directamente arriba del rodillo inferior y lo alimenta hacia el mandril del enrollador, figura 30. Cada arreglo tiene sus ventajas⁵.

2.10.3 Mandril

La función principal del mandril es enrollar a su alrededor la lámina de acero que previamente se desvió en el *pinch roll*. Para esto utiliza en un inicio una secuencia de pre-expansión, expansión y contracción.



Figura 31. Vista lateral del mandril del enrollador del MC3

En la figura 31 se puede observar en la vista lateral los segmentos que lo componen. Mientras el equipo se mantiene girando, y antes de que llegue la lámina de acero al equipo, este se encuentra en su posición de espera en primera expansión.

Los mandriles están hechos de muchos materiales y pueden ser lisos, acanalados o una combinación de estos. El diseño de un mandril liso es más fuerte estructuralmente que uno acanalado. El material debe tener la máxima resistencia para soportar el calentamiento y enfriamiento durante el proceso, figura 32⁵.

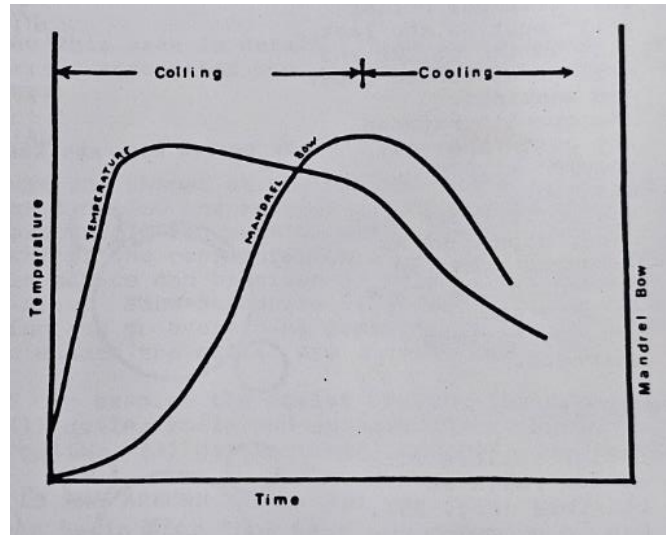


Figura 32. Gráfico de temperatura contra tiempo del enfriamiento del mandril⁵.

Cuando llega la lámina y se enrollan las primeras 5 vueltas el equipo hace su segunda expansión y se queda en esta posición hasta que termine el enrollado. Para finalizar, el equipo se contrae para dejar que el carro extractor entre por el rollo y pueda estar listo para enrollar el siguiente producto.

Las pérdidas de tensión se pueden ver durante el proceso cuando se genera un atorón de lámina. Simplemente la lámina entra al enrollador y nunca alcanza la tensión. Una gran proporción de estos atorones son atribuibles a estas condiciones (a una o la combinación de varias), figura 33:

- Configuración del *gap*
- Configuración de velocidad
- Posición del *apron*
- *Gaps* entre el *apron* y los rodillos
- Rodillos lentos o amarrados
- Falta de presión en el enrollador
- Problemas eléctricos⁵

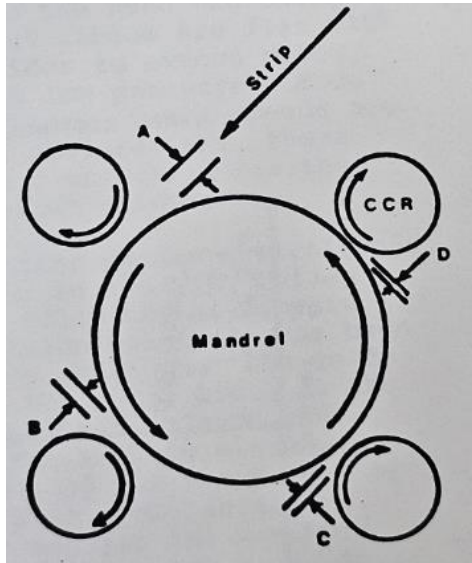


Figura 33. Representación del *gap* entre el mandril y los rodillos formadores

Configurar el *gap* del mandril es un tema ampliamente discutido en la operación de enrollado. La idea está basada en que la cinta ingresa al rodillo formador (CCR) con el ángulo mínimo de mordida y la caída de velocidad permiten tener un espacio para la primera vuelta y después entre la segunda vuelta con la “burbuja” (espacio entre el mandril y la lámina) más pequeña posible y permite la distancia adecuada entre el mandril y CCR estira la cinta justo antes de que la punta quede sujeta a la segunda vuelta al mandril⁵.

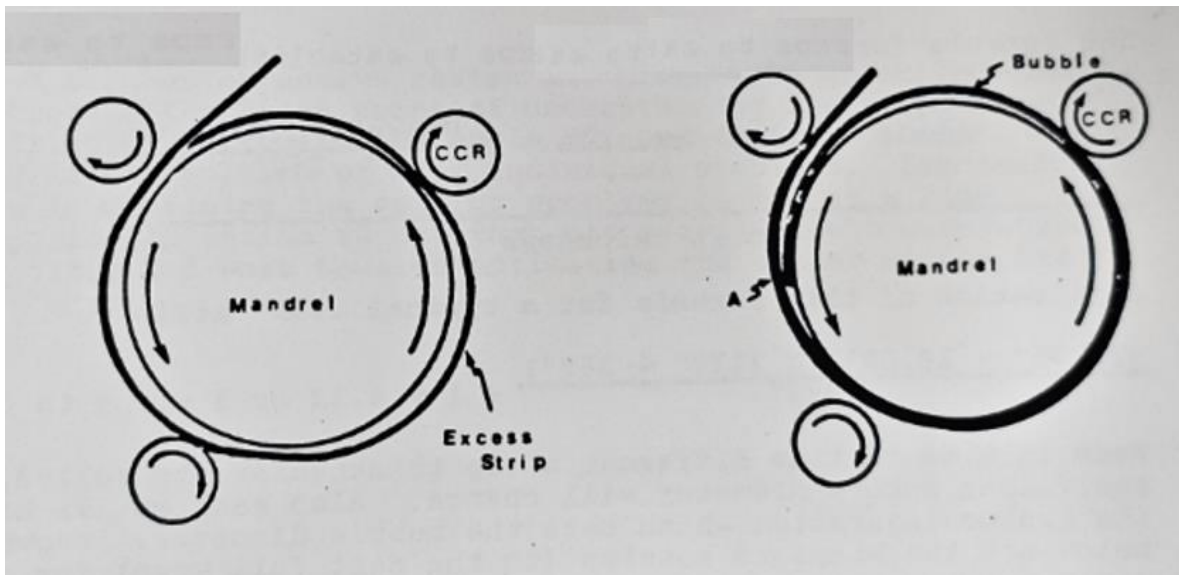


Figura 34. Formación de “burbuja” en la primera vuelta de enrollado.

La figura 34 en el lado derecho muestra la primera vuelta en el enrollador y el exceso de cinta alrededor del mandril y en el lado izquierdo muestra lo que pasa en la siguiente media revolución con la mitad inferior de la cinta estirada y ajustada, y se forma una “burbuja” entre el rodillo formador y el punto A. El desarrollo de la tensión depende de la eliminación de la burbuja.

2.10.4 Rodillos unitarios (formadores)

Los rodillos unitarios son 3 por enrollador y se encuentran situados alrededor del mandril y su función principal es ayudar a la conformación del rollo durante las primeras vueltas, figura 35.



Figura 35. Rodillo unitario del MC3

Tienen dos posiciones, cerrados y abiertos, siempre manteniéndose, girando. Cuando la lámina llega al enrollador, los 3 rodillos se encuentran cerrados, y se mantienen así durante las primeras 5 vueltas, para después abrirse y quedar en esa posición hasta que el rollo sea extraído del mandril.

Teóricamente, el proceso de enrollado podría hacerse con un solo rodillo unitario, sin embargo, tendría que ponerse un “tobogán” para hacer que la lámina que viene desde el *pinch roll* se pueda doblar y llegar hasta el rodillo unitario y así que este lo vaya estirando y enrollando en el mandril. En el MC3 se tiene una configuración de 3 rodillos unitarios en cada enrollador, figura 36.

La función principal del rodillo unitario es prevenir marcas en la cinta y ayudarla a enrollarse en el mandril para que no se atore.

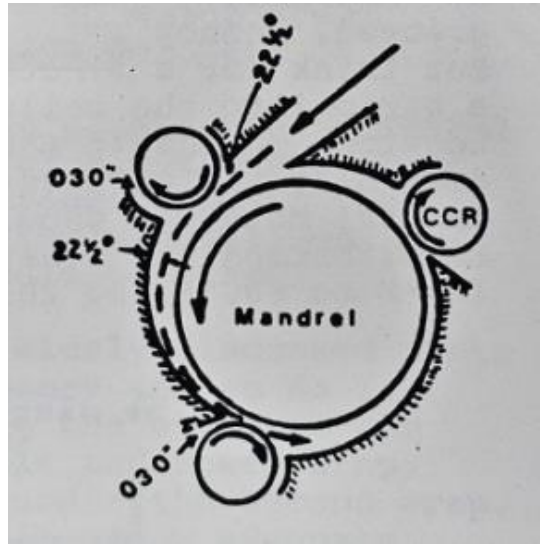


Figura 36. Configuración de enrollador con 3 rodillos unitarios

2.10.5 Guías de entrada

Usualmente las guías de entrada a los enrolladores se componen de una sección recta y otra en forma de embudo, figura 37. Los problemas de las guías de entrada al enrollador son: desgaste, diseño y velocidad de operación (apertura y cierre). El grado de telescopiado en el enrollado final del rollo depende directamente de esta parte del equipo equipo⁵.

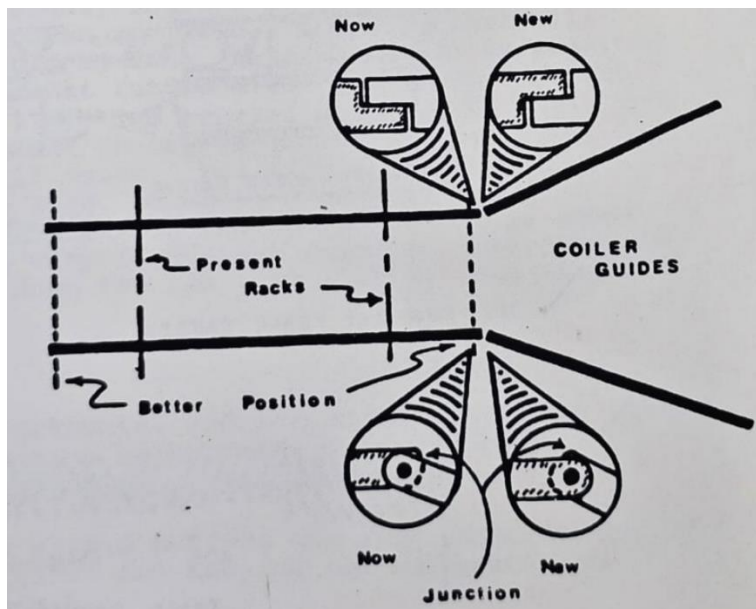


Figura 37. Esquema de guías de entrada a enrollador

Para mejorar el rendimiento de las guías es necesario desarrollar la forma en la que se cambian las placas de desgaste para que se hagan de forma más rápida, además de que hay que buscar el material más resistente a la fricción y al calor, estos pueden ser: aceros grado herramienta y aleados.

Se debe asegurar la correcta operación del *short stroke* para que las guías se posicionen rápidamente antes de que la cinta pase por el *pinch roll*. Entre más rápido se mueva la guía y quede en posición, menor será la cantidad de vueltas que queden telescopiadas⁵.

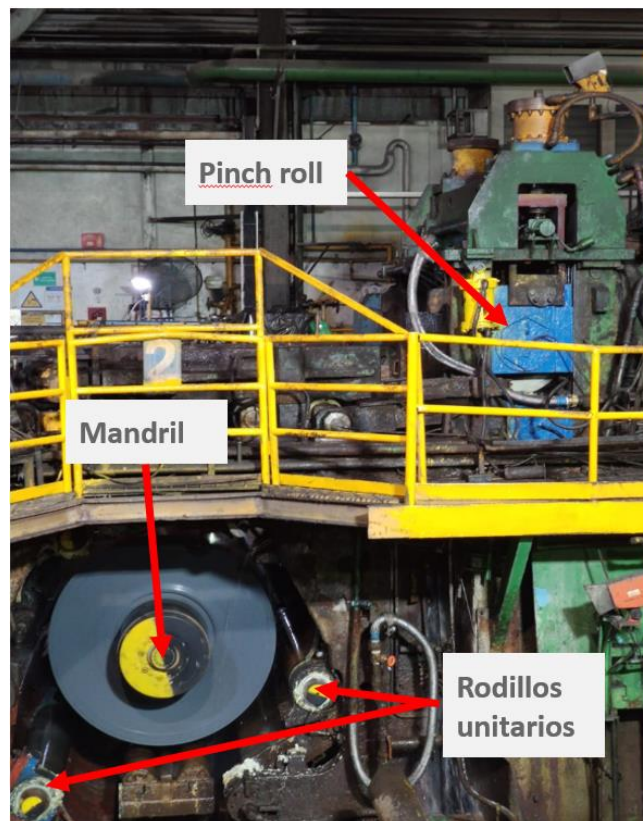


Figura 38. Arreglo general donde se muestran los equipos principales.

2.10.6 Control de operación

Después de que la lámina sale del último castillo del tren laminador pasa por la mesa de enfriamiento, la cual a partir de las regadores y el modelo de control aplica el agua necesaria para que el producto cumpla con la temperatura de enrollado; para que la lámina se mueva a través de la mesa se utilizan rodillos motorizados individualmente que en total suman 257, la lámina pasa por encima de estos rodillos debido a que la lámina sale del castillo 6 sin tensión y se requiere mover hasta el

enrollador, a una distancia de aproximadamente 130 metros hasta que lo toma el mandril.

Durante el proceso de enrollado los rodillos de la mesa de enfriamiento siguen girando a la misma velocidad que el castillo 6, esto para evitar que los rodillos le puedan generar rayas al material.

Para iniciar el proceso de enrollado, el operador debe revisar ciertas condiciones y variables de proceso para que este se pueda dar de manera controlada y evitar la generación de defectos o demorar la línea debido a una falla.

Entre las variables que se revisan están el *camber* (curvatura horizontal de la lámina respecto a su línea central), las corrientes de los motores de todos los equipos (guías, mandriles, unitarios, *pinch roll*), presión de lubricación, nivel de aceite del hidráulico, presión de aire y flujos de las bombas de alta presión de agua.

Después de que se revisan esas variables, la lámina que sale de la mesa de enfriamiento pasa entre las guías del enrollador, estas permanecen abiertas en su posición de *home* después de pasar los primeros metros entra el *short stroke* y posiciona las guías para centrar la lámina evitando defectos de enrollado.

Posterior al paso por las guías entra a los rodillos *pinch roll* los cuales están abiertos con una separación y desfase de posición definida, esto para lograr que la lámina cuando pase entre ellos se pueda deflectar hacia abajo, pase por la compuerta y pueda ayudar a llegar a la zona del mandril.

Antes de que la lámina llegue al mandril este está esperando en su posición inicial de primera expansión, junto con los rodillos unitarios los cuales tienen una separación definida (unitario 1: 15 mm a 25 mm, unitario 2: 2 mm a 4 mm y unitario 3: 1 mm a 3 mm) para que, al salir la lámina por la compuerta, esta llegue al área entre el unitario y el mandril y pueda ser agarrada por estos para que el material se empiece a enrollar en el mandril. Los unitarios permanecen en esta posición durante 5 vueltas hasta que en el mandril se realiza la segunda expansión y los rodillos unitarios se abren para que el material se termine de enrollar.

Durante este proceso el operador monitorea variables como la tensión y la velocidad de enrollado, esto para detectar una anomalía en el proceso y evitar la generación de defectos en el material (arrugas, deformaciones, mal enrollado, etc.) o demoras en la línea (atorones o roturas).

La tensión de enrollado debe de mantenerse lo más igualada a su referencia para evitar que el material pierda su secuencia y se atore en los equipos. El control de la tensión depende de varias variables de producto y se explicará en el siguiente punto.

La velocidad también es muy importante, se debe de controlar el *lead speed*, debido a que tiene que sincronizarse con el resto de los equipos, y esta debe de ir en

aumento de equipo en equipo desde la salida del castillo 6 hasta el mandril, esto es que el mandril vaya más rápido que los unitarios, estos más rápidos que *el pinch roll* y estos más rápidos que el castillo 6.

La velocidad del mandril va disminuyendo en función del aumento del diámetro del rollo. Esto es debido a que se trata de mantener constante la velocidad de salida del castillo 6, y para que esto se pueda lograr, la velocidad angular del mandril debe ir disminuyendo conforme aumente el diámetro del rollo.

Para finalizar el proceso de enrollado, cuando la cola del material pasa por el rodillo 1 del Coil Box el *pinch roll* vuelve a cerrarse, esto para que cuando la lámina salga del castillo 6 y se quede sin tensión con el mandril, estos lo puedan ayudar a mantener la tensión de enrollado.

Cuando se termina de enrollar el material, el mandril se detiene y se contrae al máximo para que el rollo pueda ser extraído por el carro de salida y posteriormente llevarlo a la viga de salida.

2.10.7 Modelo de control de tensión

El modelo de control de tensión de enrollado viene dado por los siguientes parámetros:

1. Torque de tensión:

$$T_F = \frac{U_t W h D \gamma}{2} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Dónde:

T_f = Torque de tensión
U_t = Unidades de tensión (kg/mm)
W = Ancho de la lámina (m)
h = Espesor de la lámina (m)
D = Diámetro de rollo (m)
γ = Gear reduction ratio

2. Torque de bending:

$$T_B = \frac{W h^2 \sigma}{4} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Dónde:

T_B = Torque de bending
W = Ancho de la lámina (m)
h = Espesor de la lámina (m)

σ =Yield stress

El valor de tensión de Ut de un rollo laminado en caliente				
Ancho de lámina (mm)	$h \leq 2.5$	$2.5 < h \leq 3.0$	$3.0 < h \leq 5.0$	$5.0 < h$
Unidades de tensión (MPa)	16.02	14.56	12.41	11.17

Tabla 1. Valores de Ut para rollos laminados en caliente.

3. Torque inercial

$$T_i = \frac{GD^2}{375} \div (\pi D) \frac{dv}{dt} \quad \text{Ecuación (3)}$$

$$GD^2 = GD_0^2 + \left(\frac{\pi}{8}\right) \rho W (D^4 - D_0^4) \quad \text{Ecuación (4)}$$

Dónde:

T_i =Torque inercial

GD^2 = Suma de inercia rotacional del motor

GD_0^2 = Inercia rotacional de la parte arreglada (incluye motor y tambor)

ρ =densidad del acero (7850 kg/m³)

4. Cálculo del diámetro de rollo

$$D = \frac{V_L}{\pi n} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Dónde:

D =Diámetro de rollo (m)

V_L =Velocidad de lámina (mpm)

n =Velocidad del mandril (rpm)

2.11 Skin Pass

2.11.1 Generalidades

El objetivo principal de los molinos skin pass es mejorar la condición de planeza, como eliminar las bandas de lüder y mejorar las propiedades mecánicas del producto.

Para cumplir lo anterior se controlan diferentes variables, entre las más importantes se encuentran la fuerza, la tensión de entrada y de salida, y una elongación específica entre 1 a 7%

El SKP4 es un molino de configuración 4 en alto (2 rodillos de apoyo y 2 de trabajo), figura 39



Figura 39. Skin Pass 4 Churubusco.

2.11.4 Descripción de equipos de proceso

En la figura 40 se observa el diagrama general de equipos que son utilizados para la laminación de acero en el Molino Skin Pass 4 en el arranque de operaciones de la línea (antes del retiro de bridas).

Las capacidades generales del molino son: espesores de 1.8 mm a 8 mm, anchos de 762 mm a 1575 mm y peso máximo de rollo 34 toneladas.

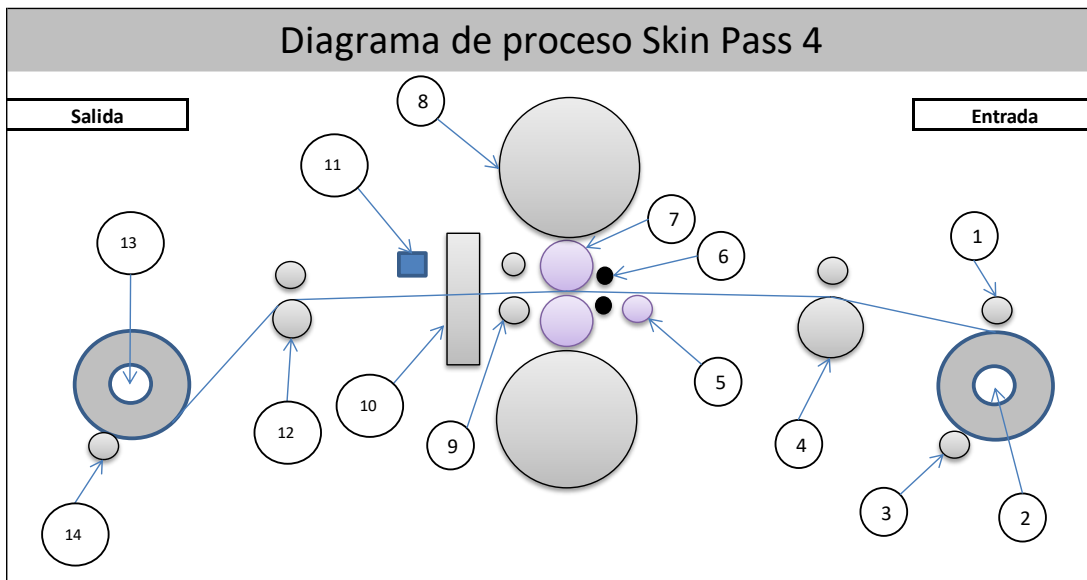


Figura 40. Desglose de equipos principales del SKP4

1. Rodillo sujetador (“pato”): Este rodillo es utilizado para enhebrar la cola del material ya que aplasta y arrastra la lámina hasta llegar al rodillo deflector. Tiene un diámetro de 295 mm y un ancho de 1530 mm.
2. Mandril desenrollador: Su función principal es alimentar la lámina al molino, y lo hace por medio de una rotación controlada. Tiene un diámetro colapsado de 660 mm mientras que al expandirse llega hasta los 780 mm.
3. Rodillo opresor de entrada: Después de que el rodillo sujetador arrastre la lámina, este rodillo termina de alimentar la lámina hasta que llega a los rodillos de trabajo. Su diámetro es de 250 mm.
4. Rodillo brida: Su función principal es que al girar y estar equipado con un encoder pueda ser utilizado para el cálculo de elongación. Tiene un diámetro de 800 mm.
5. Rodillo anticipping: Se utiliza para ayudar a entrar el material a los rodillos de trabajo levantando la punta cuando trae defectos de forma y acomodando la lámina a llegar a los rodillos de trabajo. Tiene un diámetro de 254 mm.
6. Cabezales de enfriamiento: Su función principal es enfriar los rodillos de trabajo que se calientan naturalmente por la fricción entre la lámina y los rodillos de trabajo durante la laminación.
7. Rodillos de trabajo: Es uno de los equipos más importantes para la laminación, son los encargados de aplicar la fuerza transmitida de los rodillos de apoyo a la lámina, los cuales tienen un núcleo de fundición nodular y una

capa exterior de cromo, tienen una corona específica y un diámetro que puede ir desde los 450 a 500 mm. Durante el proceso de laminación se pueden deflectar por el efecto de la fuerza, sin embargo, existe un sistema de *bending* que ayudan a que la flexión pueda ser controlada. Son dos rodillos de trabajo, uno en la parte superior y el otro en la inferior.

8. Rodillos de apoyo: Son los encargados de transmitir la fuerza generada desde las cápsulas hidráulicas hacia los rodillos de trabajo. Tienen un diámetro desde 910 a 1000 mm, tienen un núcleo de fundición nodular y una capa exterior aleada de Ni, Cr, Al y Mo.
9. Rodillo pateador: Su función es arrastrar la parte final de la lámina que queda en el molino y empujarla para cortar la muestra para propiedades mecánicas. Tiene un diámetro de 250 mm.
10. Cizalla de molino: Se utiliza para realizar cortes de lámina cuando es requerido. Su capacidad de corte va desde los 1.5 a 12.7 mm, con una resistencia a la rotura de 620 N/mm².
11. Medidor de espesor: Es un equipo que mide el espesor de la lámina utilizando una tecnología de Rayos X.
12. Rodillo deflector de salida: Su función principal es que al girar y estar equipado con un *encoder* pueda ser utilizado para el cálculo de elongación. Tiene un diámetro de 500 mm.
13. Mandril enrollador: Este equipo es utilizado para enrollar el material posterior a la laminación en el molino.
14. Rodillo opresor de salida: Se utiliza para arrastrar la cola del rollo y quede tensionada para evitar que se pueda desenrollar antes de que el material sea flejado.

2.11.5 Control de operación

Para iniciar el proceso de laminación en el molino SKP4 el rollo requiere ser movido a la viga de entrada, para esto se utiliza un carro motorizado que lleva el rollo del almacén de producto caliente hasta la posición inicial de la viga de entrada en SKP4.

Posterior a que el rollo es acomodado, comienza a avanzar las posiciones hasta llegar a la cizalla de entrada, en la cual se le hacen descartes al material de defectos provenientes de los molinos calientes. Entre los defectos principales se encuentra el *camber*, cola de pescado, dobleces, agujeros, orillas trozadas, fuera de espesor y temperatura de enrollado alta o baja.

Otra acción que se realiza es el marcaje de una línea recta en el canto del rollo, esto para validar que el rollo no se haya corrido entre espiras durante su proceso de desenrollado.

Después de pasar por la cizalla de salida el material se encuentra listo para iniciar su montaje a la línea. Para esto el material se mueve a través de un carro por la viga de salida hasta llegar a montarse sobre el mandril desenrollador.

El mandril desenrollador al terminar el rollo anterior regresa a su posición inicial, en el cual colapsa para dejar espacio a que el rollo siguiente entre en él. Posterior a su montaje se realiza la expansión del mandril para que el diámetro interior quede sujeto en él y evitar que el material se pueda patinar.

El proceso de arranque en el molino comienza con la puesta en movimiento del mandril desenrollador. Se utiliza el rodillo sujetador o “pato” para ayudar al material a desenrollarse, cuando el mandril está girando. Posterior a eso el material pasa por el rodillo deflector de entrada, el cual una de sus funciones principales es el cálculo de elongación durante su procesamiento. A continuación, el material pasa por el castillo de laminación el cual, en la secuencia de arranque se encuentra con una apertura de 18 mm.

Al salir del castillo pasa por el deflector de salida y seguido de eso pasa por la mesa de enhebrado para llegar a la mordaza del enrollador. El mandril del enrollador tiene una sola posición de enhebrado, desde la parte inferior hacia la parte posterior, es decir, siempre durante el proceso se realiza el cambio de cara de su enrollado original en el Molino Caliente.

El set up inicial de las variables principales de control de proceso del Skin Pass son: fuerza, tensión de entrada y de salida, y estas vienen dadas por tablas predefinidas en función del grado de acero, el ancho y el espesor del material, cada rollo tiene especificaciones distintas en sus variables para lograr la elongación requerida.

La elongación se define como la capacidad de un material de extender su longitud conservando su mismo ancho utilizando un esfuerzo de tracción antes de su rotura. Esta se mide a través de dos *encoders*, que se encuentra ubicado en el deflector de entrada y salida. La forma en la que estos calculan la elongación es a través de un diferencial de velocidades entre la entrada y la salida que determina el porcentaje de reducción que el molino le generó al material por el uso de la fuerza impresa por las cápsulas hidráulicas.

La fuerza de laminación viene dada a través de las cápsulas hidráulicas situadas una en el lado operador y otra en el lado motriz del castillo de laminación. Estas aplican la fuerza necesaria para que en conjunto con la tensión de entrada y salida se pueda lograr la elongación correcta del material.

Otra de las variables importantes es el control de la tensión. Esta se mide en dos zonas principales: entrada (del mandril desenrollador al castillo de laminación) y la salida (del castillo de laminación al mandril del enrollador).

La tensión de entrada (desenrollado) tienen un límite de entre 1.7 y 2.5 kg/cm², si es muy alta puede llegar a favorecer el reapriete del rollo, y si es muy baja puede llegar a correrse el material en el desenrollador.

Particularmente este molino ha sufrido modificaciones a lo largo del tiempo, en sus inicios contaba con bridas de entrada y salida, las cuales eran utilizadas para el control de la tensión. En los años posteriores y debido a la oportunidad por mejorar la productividad de la línea se retiran, haciendo que el control de las tensiones se realice directo con los mandriles y el molino.

Especialmente esta ausencia de bridas genera condiciones adversas para la generación del defecto de “marcas por fricción”, debido a que el control de tensión se hace directo desde el mandril desenrollador. Cuando inicial el proceso de laminación en el molino este genera un efecto de estiramiento en el material en la entrada, y combinado con el efecto de que el material tenga el diámetro interior flojo se genera el reapriete entre espiras internas y provoca las fricciones. Físicamente esto puede detectarse con la línea recta que se dibujó en la entrada del proceso al curvarse o el número del rollo que se imprime en el canto a la salida del molino caliente también se curva.

3. Capítulo III Generación de defectos

3.1 Tipos de marcas

Existen varios tipos de marcas que pueden aparecer en la superficie del material o producto. Estas marcas pueden tener diferentes causas y efectos los tipos más comunes son:

3.1.1 Marcas mecánicas: Son marcas que se forman debido a la interacción física del material con los equipos, rodillos u otros elementos del proceso de laminación o manipulación. Pueden ser causadas por desgaste o defectos en los rodillos, alineación inadecuada, tensiones desiguales, golpes o manipulación brusca. Estas marcas pueden ser líneas, arrugas o pliegues en la superficie del material.

3.1.2 Marcas de oxidación: Se forman debido a la exposición del acero al aire caliente durante la laminación en caliente o durante el proceso de recocido, exposición a la humedad o a condiciones ambientales desfavorables. Pueden aparecer como manchas o parches de color gris o blanco, como óxido ferroso (negro), óxido férrico (rojo) en la superficie del material.

3.1.3 Marcas de rodillo: Son marcas que se forman debido a defectos o daños en los rodillos utilizados en el proceso de laminación. Pueden aparecer como rayas o arañazos en la superficie del acero.

3.1.4 Marcas de corte: Estas marcas se forman durante el proceso de corte del material y pueden ser causadas por cuchillas desafiladas, ajustes inadecuados o vibraciones en el equipo de corte.

3.1.5 Marcas de recubrimiento: Si el acero tiene recubrimientos o recubrimientos aplicados en su superficie, las marcas de recubrimiento pueden aparecer debido a defectos en los recubrimientos, como astillamientos, burbujas o desprendimientos.

3.1.6 Marcas de soldadura: Si el acero tiene uniones soldadas, las marcas de soldadura pueden aparecer en la superficie del material debido a imperfecciones en el proceso de soldadura.

Estas son solo algunas de las marcas más comunes que pueden aparecer en la superficie del acero durante el proceso de laminación. Es importante identificar y comprender las causas de estas marcas para tomar las medidas adecuadas y evitar afectar la calidad y apariencia del producto final.

3.2 Mecanismos de formación de marcas mecánicas en aceros planos

Durante el proceso de enrollado o desenrollado de acero, pueden formarse marcas mecánicas en la superficie del material debido a varios mecanismos. Algunos de los mecanismos comunes que contribuyen a la formación de estas marcas son:

3.2.1 Tensión deficiente. Durante el proceso de enrollado o desenrollado, si la tensión aplicada al acero no es uniforme en toda su superficie, pueden formarse marcas mecánicas, especialmente en los bordes. Esto puede deberse a problemas en el sistema de tensión o alineación inadecuada de los rodillos.

3.2.2 Defectos en los rodillos. Si los rodillos utilizados en el proceso de enrollado o desenrollado tienen defectos en su superficie, como araños, marcas o desgastes, estos defectos pueden transferirse al acero y generar marcas mecánicas.

3.2.3 Contaminación de los rodillos. La presencia de partículas extrañas, óxidos o escorias en la superficie de los rodillos puede causar marcas mecánicas en el acero durante el proceso de enrollado o desenrollado.

3.2.4 Formación de pliegues o arrugas. Si el acero se enrolla o desenrolla de manera desigual, pueden formarse pliegues o arrugas en la superficie del material, lo que resulta en marcas mecánicas.

3.2.5 Vibraciones y golpes. Las vibraciones excesivas o impactos durante el proceso de enrollado o desenrollado pueden causar marcas mecánicas en la superficie del acero.

3.2.6 Bordes de la bobina. Los bordes de la bobina pueden generar marcas mecánicas en el acero si no están bien protegidos o si están dañados.

Para evitar o reducir la formación de marcas mecánicas durante el enrollado o desenrollado, es esencial mantener los equipos en buenas condiciones y seguir prácticas adecuadas de manejo y control de tensión. También se deben inspeccionar y limpiar regularmente los rodillos para evitar la transferencia de partículas o defectos a la superficie del acero.

La manipulación cuidadosa y el uso de dispositivos de protección en los bordes de la bobina también son importantes para prevenir la formación de marcas mecánicas. El control de la vibración y los impactos durante el proceso también puede ayudar a reducir las marcas mecánicas en el acero.

3.3 Óxido durante la laminación

Durante la laminación en caliente se pueden formar varios tipos de óxido de hierro debido a la exposición del material al aire caliente. Los tipos más comunes de óxido de hierro que se forman son los siguientes:

3.3.1 Óxido ferroso (wüstita) (FeO): Es el tipo de óxido de hierro más común que se forma durante la laminación en caliente. Puede formarse en condiciones de baja actividad de oxígeno. El óxido ferroso es de color negro y se encuentra en la superficie del acero caliente debido a la reacción del hierro con el oxígeno presente en el aire.

3.3.2 Óxido férrico (hematita) (Fe₂O₃): También conocido como óxido de hierro rojo o hematita, se forma cuando el óxido ferroso se oxida aún más al reaccionar con más oxígeno. Es de color rojo y puede aparecer en la superficie del acero después de un tiempo prolongado de exposición al aire.

3.3.3 Óxido magnetita (Fe₃O₄): la magnetita es un compuesto muy estable a altas temperaturas, si bien a temperaturas bajas o en presencia de aire húmedo se oxide lentamente y forme óxido férrico. Es de color negro y a menudo se encuentra en la superficie del acero laminado en caliente debido a la presencia de ambos tipos de óxidos en el proceso de formación.

Es importante tener en cuenta que la presencia de óxidos en la superficie del acero puede afectar la calidad y apariencia del producto final. Los óxidos formados pueden eliminarse mediante procesos de decapado o limpieza antes de la siguiente etapa de proceso.

3.4 Indicadores cualitativos

En Ternium para medir la efectividad de la calidad de los productos se les da el seguimiento a cuatro indicadores principales. El objetivo de estos es observar las tendencias de cada defecto para de esta forma si se desvían respecto al objetivo que se plantea al inicio del año fiscal se puedan generar planes de acción para disminuir la cantidad de material afectado.

Los defectos que se generan durante los diferentes procesos de laminación son evaluados por los inspectores operativos y posteriormente se realiza un dictamen final por el equipo de calidad de planta para tomar la mejor decisión en cuanto a la gestión del material defectuoso y así evitar que al cliente le lleguen material fuera de especificación.

Los indicadores cualitativos más importantes son: retenido, reproceso, rechazo (caída), y reclamo.

3.4.1 Retenido

Se refiere al material el cual durante su proceso incumplió una o más variables de producto de acuerdo con su especificación inicial. Estas variables o atributos pueden ser superficiales, dimensionales, de forma, propiedades mecánicas, empaque, etc. Este indicador es muy riguroso, esto quiere decir que cualquier desvío se retiene, y en este caso tiene que ser revisado puntualmente por el equipo de calidad de planta para dictaminar el futuro de este material.

3.4.2 Reproceso

Se refiere a que el material que previamente se retuvo por alguna condición fuera de especificación, por medio de un retrabajo o reproceso en alguna línea de recuperación podría cumplir con las especificaciones iniciales de cliente y el producto puede ser funcional.

3.4.3 Rechazo

Se refiere al material que no puede ser enviado a su cliente inicial por incumplir una o varios de los atributos especificados por el cliente, además de no tener la posibilidad de ser reparado y hacerlo funcional con un reproceso. Otras formas de llamar al material en esta condición son derivado, degradado o chatarra.

3.4.4 Reclamo

Es la última instancia de la afectación cualitativa, se refiere al material que incumplió alguno o varios de sus atributos especificados por el cliente y falló la detección en planta, por lo cual no se pudo retener y terminó por llegar al cliente. El cliente procede con el reclamo y puede tener diferentes resoluciones, entre las principales está la reposición del material o la bonificación económica del mismo.

4. Capítulo IV Metodología y técnicas experimentales

4.1 Caracterización del defecto

4.1.1 Generalidades

El defecto de marcas por fricción o fricciones es detectado en líneas posteriores a la laminación en caliente, principalmente en líneas de decapado, corte en cintas (*slitter*) o SKP4.

Sin embargo, existe una condición en el rollo laminado en caliente que sugiere que en líneas posteriores (principalmente en SKP4) hay una alta posibilidad de generar el defecto. Esta condición se le denomina “rollo flojo”



Figura 41. Izquierda: “rollo flojo”. Derecha: rollo estándar.

En la figura 41 se muestran las dos condiciones principales de enrollado final del producto laminado en caliente. En la imagen de la izquierda se muestra el “rollo flojo” y esto se puede identificar debido a que en las primeras vueltas enrolladas (hasta 15 vueltas) se observa una deficiente compactación y devanado (diámetro interior corrido), en esas primeras vueltas se puede ver el espacio entre las espiras, y cuando el material es transportado con una grúa de escrepas se puede observar un efecto tipo resorte cuando se mueve el diámetro interior.

En la imagen de la derecha se observa la condición estándar de enrollado, en las primeras vueltas no se observa espacio entre ellas ni el diámetro interior corrido.

Posterior a la laminación en caliente, el rollo debe de ingresar al carro de entrada en SKP4, posterior a esto se le hacen descartes en el diámetro exterior hasta dejar la punta cuadrada libre de defectos. Al finalizar esto el rollo se monta en el mandril de entrada y este se expande para asegurar que el rollo no se mueva axialmente

Al iniciar el proceso de SKP4 se genera una tensión entre el molino (rodillos) y el enrollador, y si el diámetro interior del rollo está flojo, ese espacio que existe entre las espiras hace que se genere un movimiento súbito hasta que el rollo se reaprieta y se compacta de nuevo este produce un ruido característico.

El rollo al salir de la laminación en caliente se le imprime con pintura mediante un robot (figura 37) un código de identificación que es utilizado para seguir la trazabilidad del rollo durante todas las líneas de proceso por donde este pase.



Figura 42. Robot identificador del MC3

En la figura 42 se muestra un rollo con la condición de rollo flojo. Al cargarse el rollo en el mandril desenrollador de SKP4 y proceder con la secuencia de arranque de proceso, se aplica la tensión de desenrollado al moverse los rodillos de trabajo y comenzar la rampa de aceleración, lo que ocasiona que las vueltas internas se reaprieten y se distorsione el código de identificación que se pintó en la línea de proceso anterior.



Figura 43. Rollo montado en el mandril de entrada con reapriete.

Al mandar este rollo a la mesa de inspección en SKP4 se observan las marcas por fricción.



Figura 44. Marcas por fricción o fricciones.

La figura 44 muestra las “marcas por fricción” detectadas posterior al proceso de SKP4, estas son marcas en la superficie de la lámina de bajo relieve que se repite sin patrón o desarrollo definido y se puede encontrar en el diámetro exterior del rollo procesado por SKP4.

4.1.2 Recolección de muestras

Se recolectaron 2 muestras en la línea de Skin Pass Pesquería pertenecientes al rollo con número de identificación 4A211214PS100, las cuales se muestran en la figura 45. Cabe mencionar que se analizaron muestras del Molino Caliente 4 (MC4) debido a la disponibilidad de estas y de que la morfología del defecto es igual que las muestras del MC3.

Las muestras se cortaron en el diámetro externo del rollo a la salida de Skin Pass Pesquería, lo que corresponde al diámetro interior del rollo laminado en caliente.

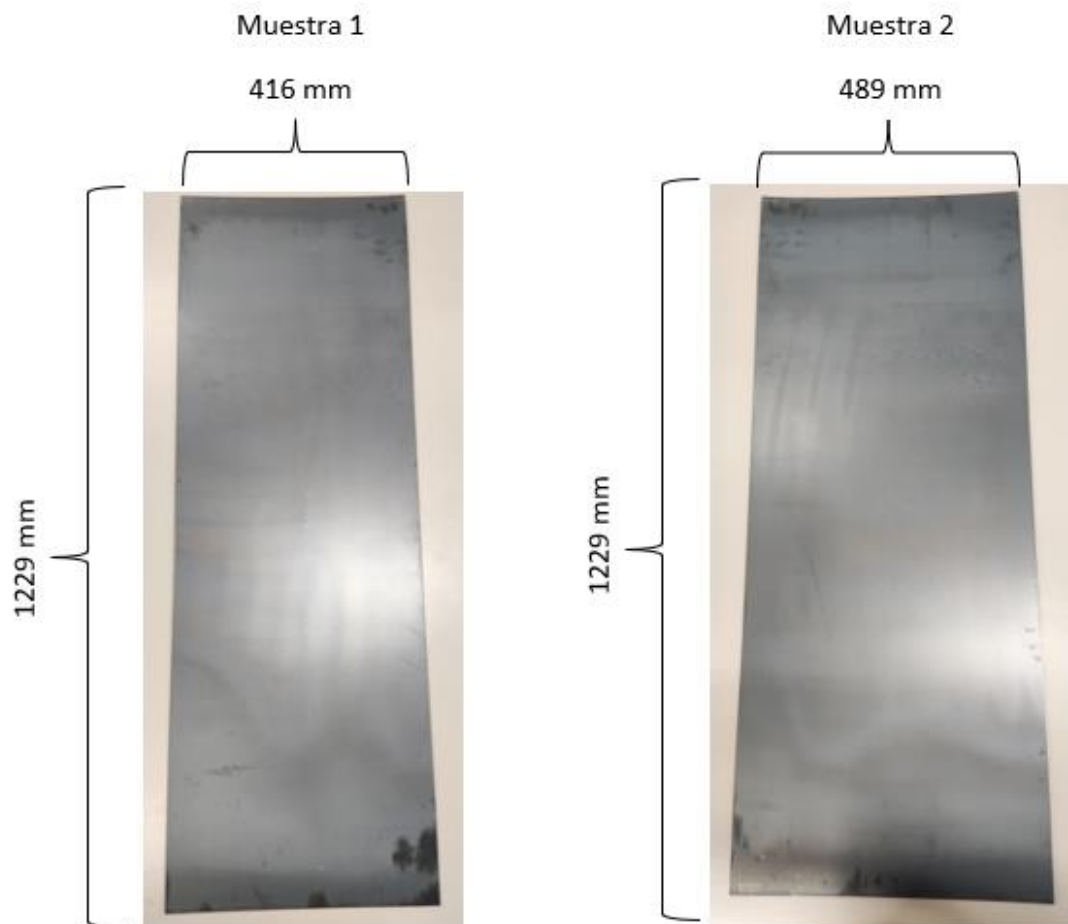


Figura 45. Muestras recolectadas en Skin Pass Pesquería

4.1.3 Flexómetro

El primer proceso de medición del defecto se realizó con un flexómetro. Se realizaron mediciones de las diferentes marcas por fricción de las 2 muestras obtenidas en Skin Pass Pesquería.

Se obtuvieron las siguientes mediciones de cada muestra:

Fricción	Largo muestra 1 (mm)	Largo muestra 2 (mm)
1	10.5	9.5
2	13.5	9.5
3	12.5	9.0
4	12.0	9.0
5	11.0	9.5
6	9.0	9.5
Promedio	11.4	9.3
Desviación estándar	1.6	0.3

Tabla 2. Medición de largo de fricciones de muestras

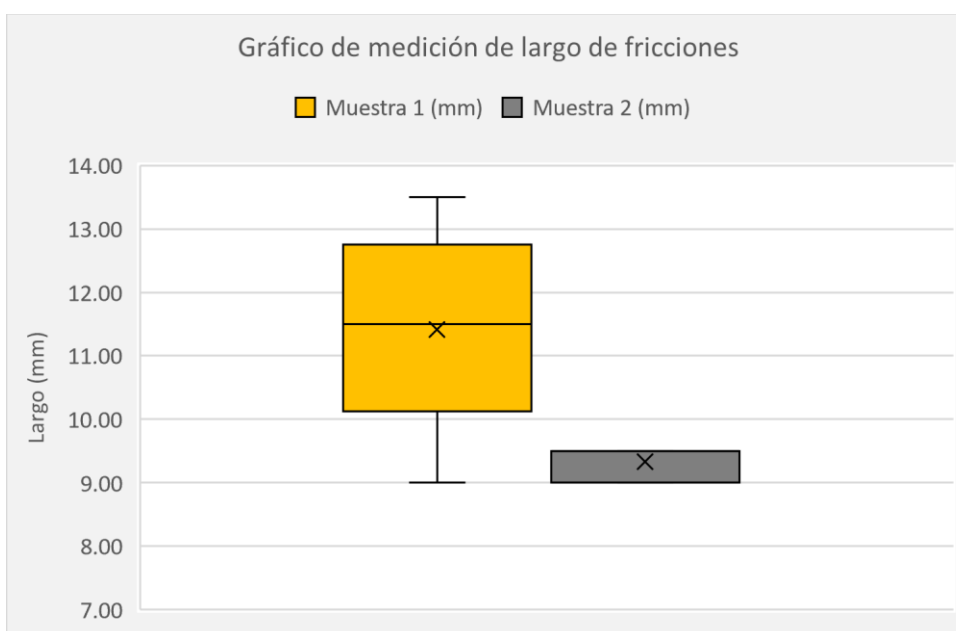


Figura 46. Gráfico de cajas de las mediciones de largo de fricciones de las muestras

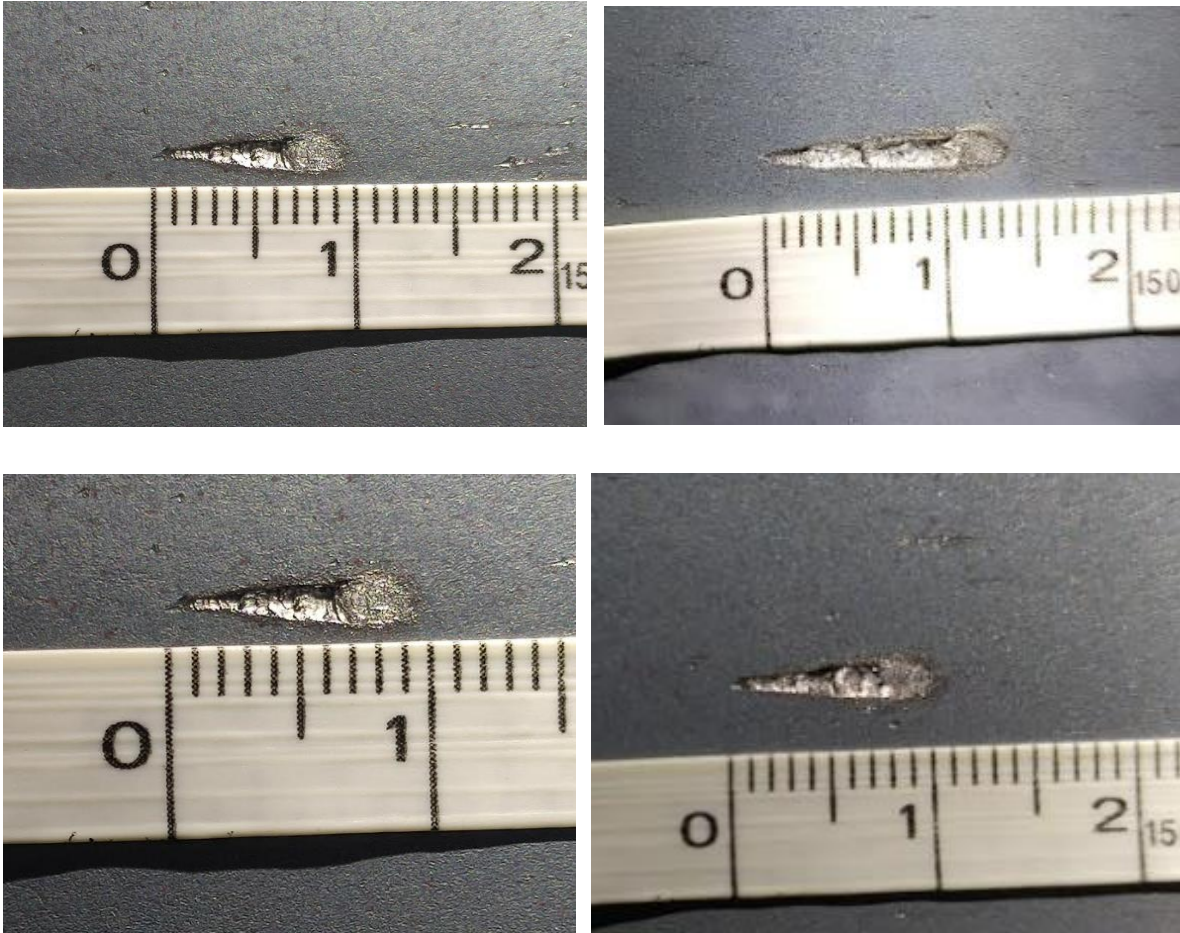


Figura 47. Imágenes de fricciones de muestra 1 (derecha) y muestra 2 (izquierda)

Si bien se pudieron medir con un flexómetro figura 47, se decidió hacer las mediciones de las marcas por medio de un estereoscopio para mayor precisión.

4.1.4 Estereoscopio

Para obtener las imágenes de la caracterización de las muestras se utilizó un microscopio estereoscópico SMZ SMZ745T con las siguientes especificaciones técnicas, figura 48.

- Factor zoom de 7.5
- Distancia de trabajo de 115mm
- Se puede utilizar en ambientes donde la temperatura y humedad son altas
- Puerto triocular con un lente 0.55x

- Montura "C" en el que se pueden utilizar cámaras fotográficas de la serie Nikon Digital Sight.
- Rango de magnificaciones entre 3.35x y 300x (dependiendo de la configuración).
- Par de oculares de campo ancho (22 mm) 10x que posibilitan un aumento máximo de 50x.
- Resolución 1920X1080²¹



Figura 48. Microscopio estereoscópico

Este equipo se encuentra en el Laboratorio Nacional de Material Avanzados de FIME. Después de encender el equipo, se movió el espejo para utilizarlo en el modo ocular, luego se colocó la muestra de lámina con el defecto en la base de equipo, se centró la muestra, se ajustó la magnificación de la imagen en la zona del defecto y luego se utilizó la perilla para enfocar.

Posteriormente se colocó una regla para medir el tamaño del defecto y se procedió a mover el espejo para colocar la cámara Nikon Digital Sight DSFi1 y capturar las imágenes del defecto. Se repitió el procedimiento con las diferentes muestras caracterizadas, figura 49.

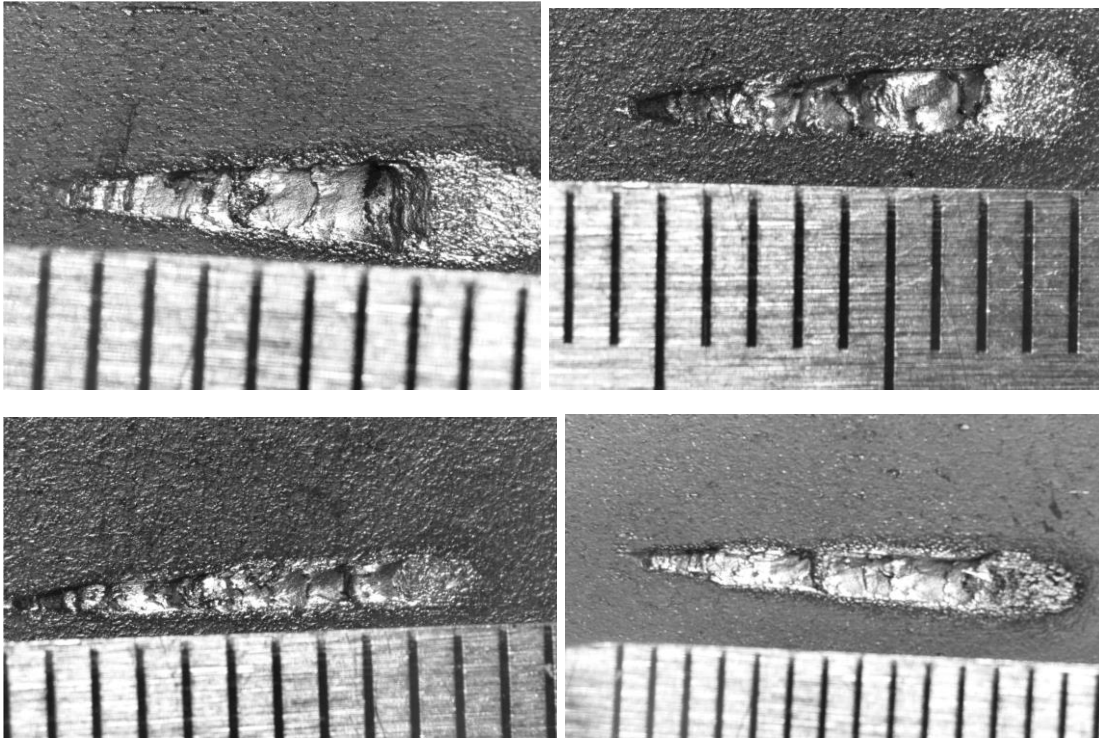


Figura 49. Medición con estereoscopio

No se logró medir con mayor precisión respecto a la medición con flexómetro debido a que se tuvo que usar una escala métrica física para medir las imágenes en el estereoscopio porque no estaba disponible la medición digital del equipo.

4.2 Análisis metalográfico

4.2.1 Preparación de muestras

Se utilizó una cortadora de banda para cortar muestras de tamaños mayores a 30 cm, esto para disminuir el tamaño y que pudiera entrar a la cortadora de disco de carburo de silicio (figura 50).



Figura 50. Cortadora de banda Gontools GT-712N

Posterior a reducir el tamaño de la muestra se colocó dentro de la cortadora de disco de carburo de silicio y se acomodó entre la prensa, se cerró la tapa, y se procedió a bajar el disco para cortar la muestra y disminuir su tamaño aún más para que pudiera entrar a la cortadora de disco de diamante, figura 51:



Figura 51. Cortadora de disco de carburo de silicio Struers Labotom-5

Para finalizar la etapa de corte y poder hacer el acabado más fino alrededor del defecto a analizar se utilizó una cortadora de disco de diamante.

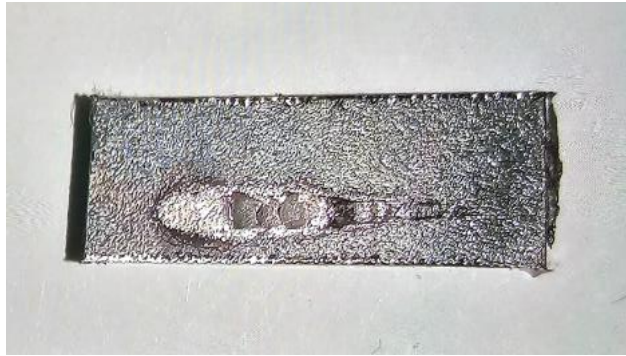


Figura 52. Corte final de la muestra con el equipo Leco VC-50

Posterior al corte de muestra se procede a montar la muestra. El primer paso es poner vaselina a la base del pistón, colocar las muestras en el interior de la base bajando el pistón, después hay que añadir baquelita cuidando que la muestra no se mueva, posterior a eso se bloquea la tapa y utilizando la palanca se comienza a añadir presión al sistema usando el pistón.

Después se coloca más baquelita para encapsular la muestra hasta llegar a una presión de 140 kg/cm^2 , temperatura 180°C , calentado 15 minutos, enfriamiento de 7 minutos hasta llegar a una temperatura final 28°C .

Iniciado el ciclo de encapsulado hay monitorear que la presión no baje de 105 kg/cm^2 , si esto ocurre hay que agregar más presión con la palanca. Esperar a que termine el ciclo, después de eso hay que liberar el vapor de calentamiento haciendo pasar un flujo de agua a temperatura ambiente, después se espera el tiempo de enfriamiento para posteriormente retirar la tapa y sacar la muestra subiendo el pistón (figuras 53 y 54).



Figura 53. Prensa de montaje de muestras Bainmount



Figura 54. Muestra posterior al montaje en la prensa

El primer paso para iniciar el proceso de pulido es preparar lijas diferentes, que van desde la malla 80 a la 4000 (figura 55), después se monta la lija en la pulidora y se presiona ligeramente la muestra durante 1 minuto por tipo de lija y posteriormente se rota 90° a medida que se va cambiando la lija, figura 56.



Figura 55. Lijas utilizadas en el proceso de pulido



Figura 56 Equipo Struers LaboPol-1 utilizado para el proceso de pulido

Posterior al proceso de lijado se hace el proceso de pulido, para esto se utiliza usan lijas de tela llamadas “paños” y se le agrega alúmina con tamaño de grano de $1\ \mu\text{m}$ y de $0.3\ \mu\text{m}$. Se repite el mismo proceso que en el pulido, hasta llegar a un acabado tipo espejo.

Posterior a la etapa del pulido, se le cubre con alcohol etílico a la muestra para protegerla de la oxidación, figura 57.



Figura 57. Estado final de la muestra posterior a la etapa de pulido

Después del proceso de pulido se procede a hacer la caracterización metalográfica, previo a un ataque químico para revelar la microestructura.

4.2.2 Metalografía

La metalografía se realizó en un microscopio metalográfico de la marca Unitron con las siguientes especificaciones:

- Cabezal de observación trinocular, inclinado 45°; división de la observación: 100% binocular, o 20% binocular / 80% cámara
- Oculares de enfoque de gran campo 10x/22mm, protectores oculares desplegados; los oculares aceptan retículas de 26,5mm
- Ajuste interpupilar de 54-75 mm
- Objetivos Infinity M Plan Achromat LWD 5x, 10x, 20xR y semi-Apo 50x
- Revólver quíntuple con movimiento de acción vertical
- Campo claro y polarizador/analizador simple
- Platina mecánica acoplable, con mandos coaxiales a la derecha; rango de recorrido 120mm (X) 78mm (Y)
- Insertos de placa de platina de lágrima de Ø12mm y Ø25mm de apertura
- Condensador de palanca incorporado
- Controles coaxiales de enfoque grueso y fino
- Iluminador LED variable de 5 vatios, diafragmas de campo y apertura, deslizador de filtro
- Filtros de luz diurna azul, verde y esmerilado¹⁰ (Figura 58).

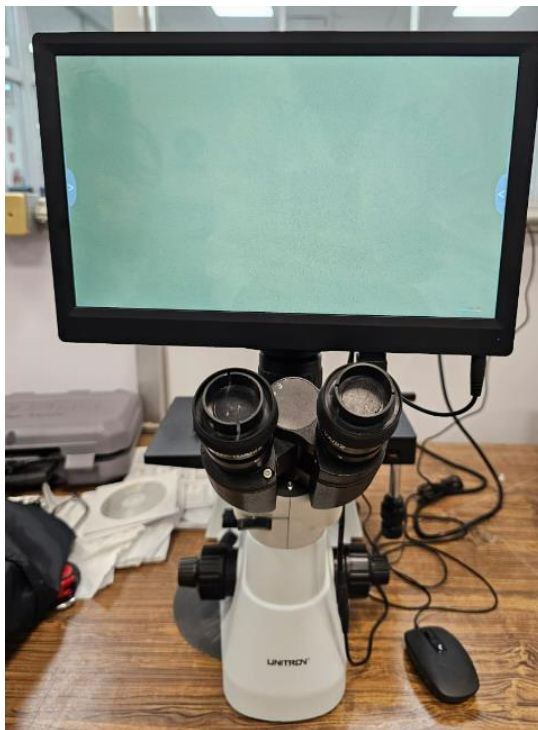


Figura 58. Microscopio metalográfico Unitron

Se procede a tomar 3 metalografías con diferentes aumentos atacando la muestra con una solución de nital al 3.6%, durante 2 segundos y posterior a eso se enjuagó con agua y alcohol etílico, para evitar se siga atacando.



Figura 59. Muestra posterior al ataque químico con nital al 3.6%

Posterior a eso se procedió a tomar 3 metalografías con diferentes aumentos, (figuras 60,61 y 62).



Figura 60. Metalografía con aumento de 5x con ataque de nital 3.6%.



Figura 61. Metalografía con aumento de 10x con ataque de nital 3.6%.

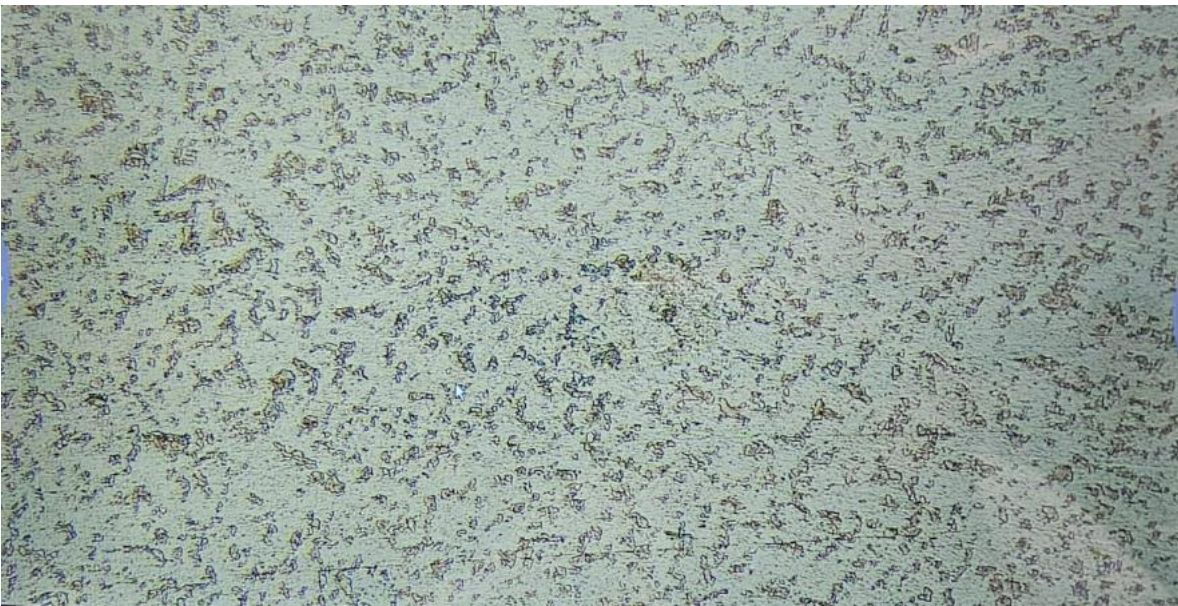


Figura 62. Metalografía con aumento de 20x con ataque de nital 3.6%.

Se realizó de forma paralela el mismo análisis en un Microscopio óptico C-50x en Ternium, figura 63.

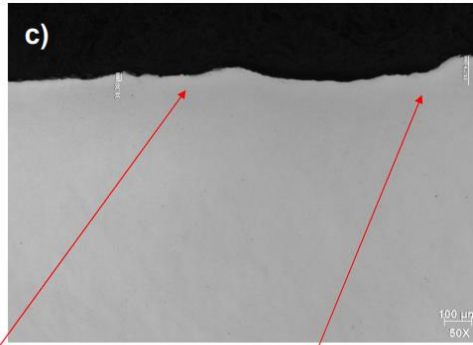


Figura 2. Imágenes tomadas en Microscopio Óptico (c-50X), acabado pulido. Se muestra imagen de zona defecto. Defecto en forma de hundimiento con profundidad apróx de 112.96 μm .

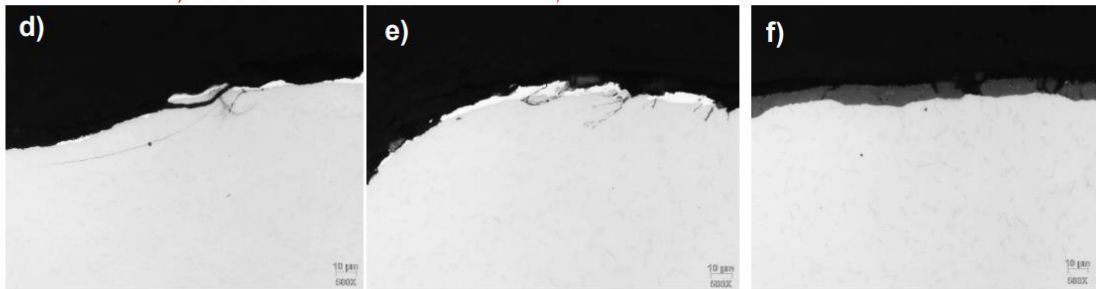


Figura 63. Imágenes tomadas con el microscopio óptico (C-50X)

En la figura 63c se muestra la zona del defecto figura 63d y 63e, se muestra esta zona magnificada, mientras que la figura 63f muestra una zona sin defecto.

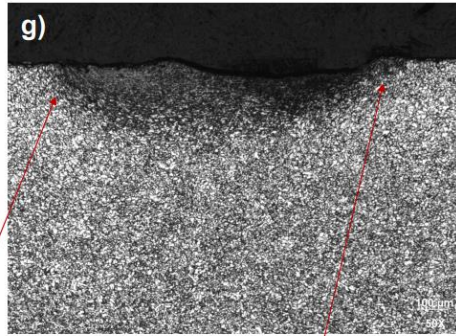


Figura 5. Imágenes tomadas en Microscopio Optico (g-50X) ataque Nital al 3%. Se muestra imagen en zona defecto,

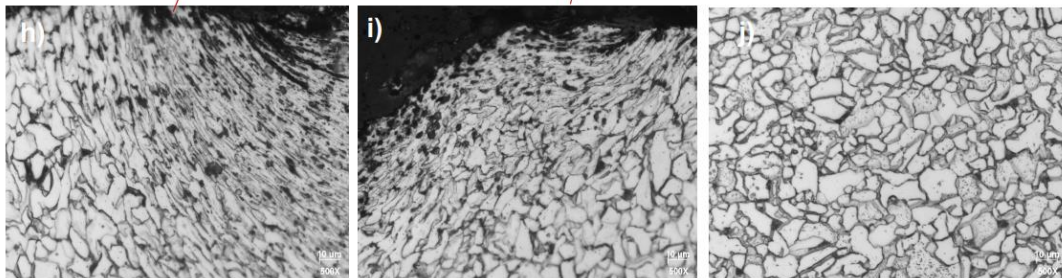


Figura 64. Metalografías con ataque de Nital al 3%

En la figura 64g se observa la zona del defecto, en la 64g y 64i magnificaciones de esta, mientras que en la figura 64j una zona libre de defecto.

4.3 Análisis de topografía tridimensional de superficie (análisis optodigital)

Un análisis optodigital es una técnica que combina la óptica y la digitalización para examinar y analizar muestras de manera detallada. En este caso, se utilizó un equipo llamado Zeiss Smartzoom 5, que utiliza una combinación de microscopía óptica y tecnología de imagen digital para estudiar muestras, en este caso, de acero plano laminado en caliente, figura 68.

4.3.1 Preparación de muestras

Se asegura que la muestra esté limpia libre de contaminación e impurezas, en buenas condiciones y se coloca en el microscopio, no requiere tratamiento químico o corte de muestra debido a que el equipo se puede ajustar al tamaño de la muestra que se analizó.

Se debe asegurar que la muestra esté bien posicionada (muestra plana sin forma ondulada) en el centro de la platina del equipo y no moverse durante su análisis.

4.3.2 Análisis optodigital

El Zeiss Smartzoom 5 es un microscopio digital de alto rendimiento que proporciona una capacidad de ampliación variable y una visualización en tiempo real a través de una cámara integrada. Incorpora tecnologías para el control de calidad y análisis de control de calidad (QA/QC) altamente inteligentes como el motor óptico que combina tres funciones: *zoom*, cámara de vista general e iluminación coaxial, en un único componente²⁶.

Está equipado con una serie de funciones inteligentes y software orientado al flujo de trabajo que resulta fácil de usar, incluye un modo de macro aprendizaje y grabación extraordinario que mejora el flujo de trabajo en análisis de muestras repetitivas.

La interfaz de usuario gráfica QA/QC integrada, combinada con la función de programar una rutina de inspección, permite una navegación fácil en todo momento²⁸ figura 65.



Figura 65. Zeiss Smartzoom 5

En la figura 65 se observa la muestra que se analizó en el microscopio optodigital

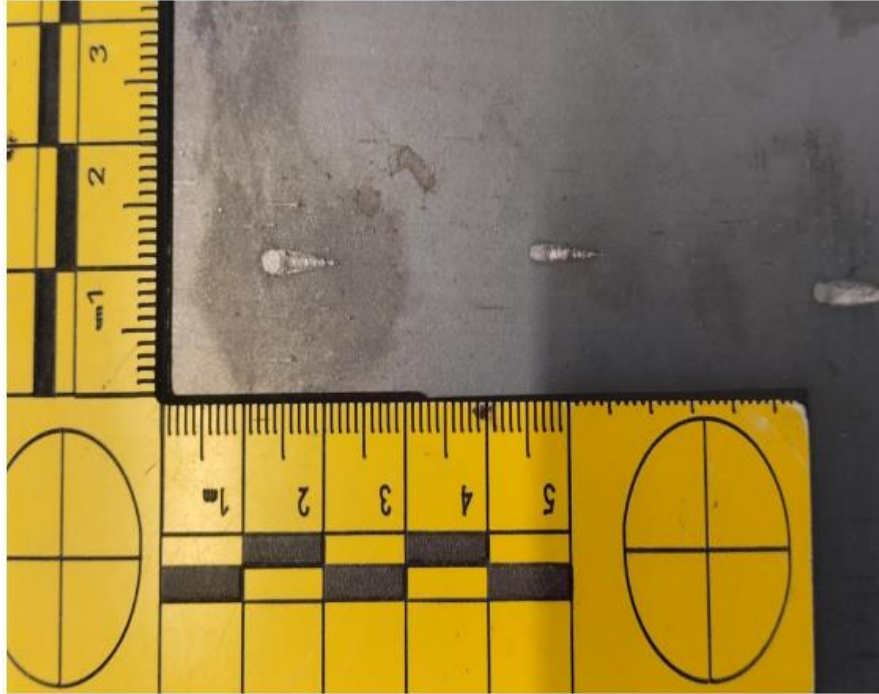


Figura 66. Muestra de marcas por fricción

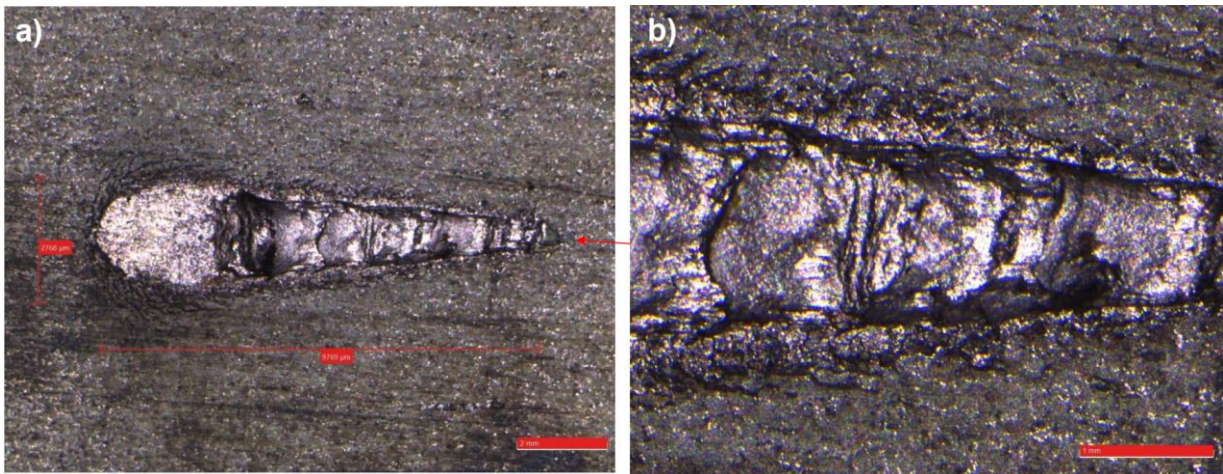


Figura 67. Imágenes de las marcas por fricción

En la figura 66 y 67 se muestran diferentes acercamientos de la marca por fricción con sus respectivas mediciones de ancho y largo hechas por el equipo. Se observa arrastre del material y los bordes con deformación.

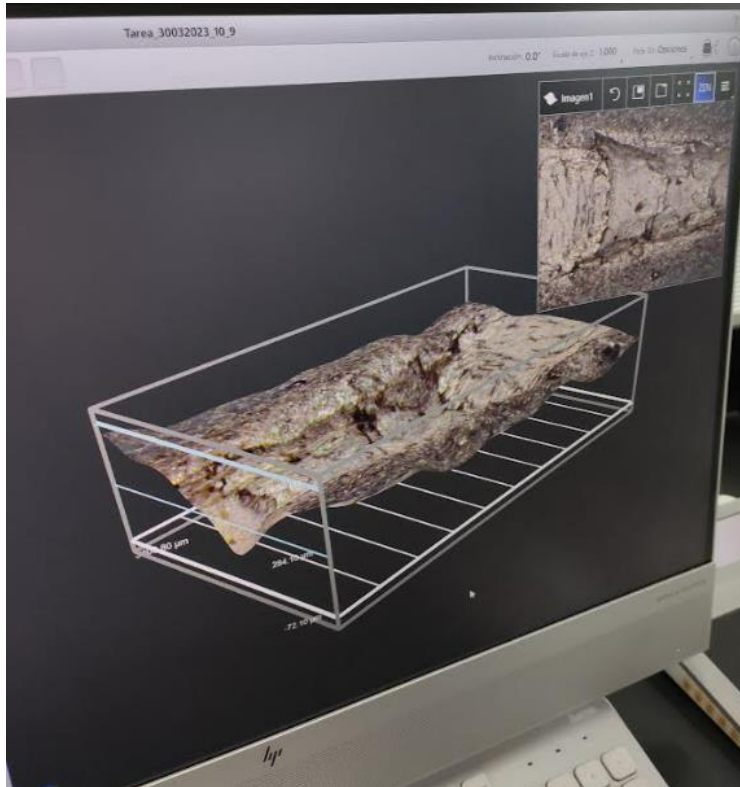


Figura 68. Imagen en 3D de la marca de fricción.

4.4 Análisis de microscopía electrónica de barrido

El microscopio electrónico de barrido (MEB o SEM, por scanning electron microscope) es un tipo de microscopio capaz de producir imágenes de alta resolución de la superficie de una muestra utilizando las interacciones electrón-materia. Aplica un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen.

Los electrones son acelerados por voltajes, los voltajes bajos son utilizados para muestras biológicas o que pueden sufrir alteraciones por esto, y los voltajes elevados se utilizan para muestras metálicas, ya que estas en general no sufren daños como las biológicas y de esta manera se aprovecha la menor longitud de onda para tener una mejor resolución.

Los electrones acelerados salen del cañón, y se enfocan mediante las lentes condensadora y objetiva, cuya función es reducir la imagen del filamento, de manera que incida en la muestra un haz de electrones lo más pequeño posible (para así tener una mejor resolución). Con las bobinas deflectoras se barre este fino haz de electrones sobre la muestra, punto por punto y línea por línea.

Cuando el haz incide sobre la muestra, se producen muchas interacciones entre los electrones de este haz y los átomos de la muestra.

4.4.1 Preparación de muestras

La muestra se corta en pequeños bloques de aproximadamente 1 mm, posterior a eso las muestras se incrustan en baquelita para facilitar su manipulación y mejorar el resultado de la preparación, y luego se pulen de forma que la superficie no presente arañazos ni deformaciones, sea plana y altamente reflectante.

Con ayuda de pinzas o pincel fino y con mucho cuidado, se coloca la muestra en la posición adecuada que corresponde a la zona de interés para la observación en el MEB. El montaje de la muestra debe ser preciso y de ser posible en un solo paso, ya que el adhesivo es muy fuerte. Si la muestra se manipula mucho, se puede dañar o puede quedar con restos de adhesivo que pueden cubrir la superficie de las estructuras de la muestra.

4.4.2 Análisis en microscopio

A continuación, se muestra en la figura 69 los 2 análisis hechos directamente sobre la superficie del defecto.

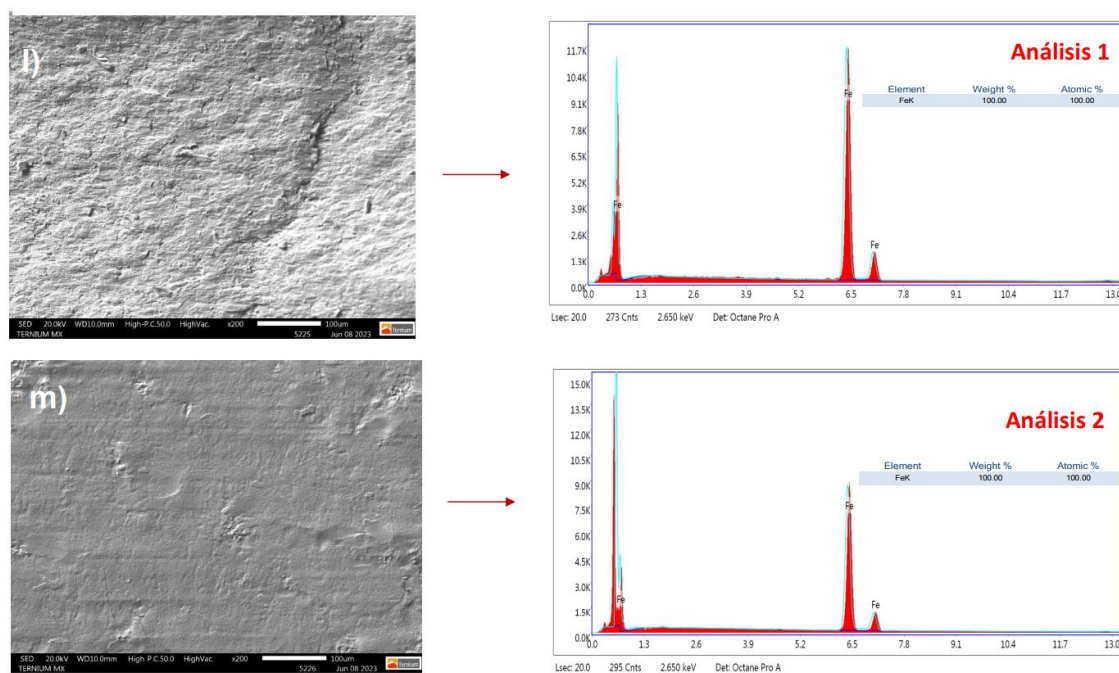


Figura 69. Análisis de microscopía electrónica de barrido

4.5 Caracterización de producto

Para la caracterización de los productos afectados se analizaron los eventos de rollos con fricciones ocurridos entre octubre 2018 y abril 2019 de este análisis se encontró lo siguiente:

El grado de acero con la mayor participación (66%) en eventos fue el 06BTEP, por lo que se decidió tomar como eje de estudio las condiciones de proceso de este producto.

Participación por grado de acero en eventos de fricciones

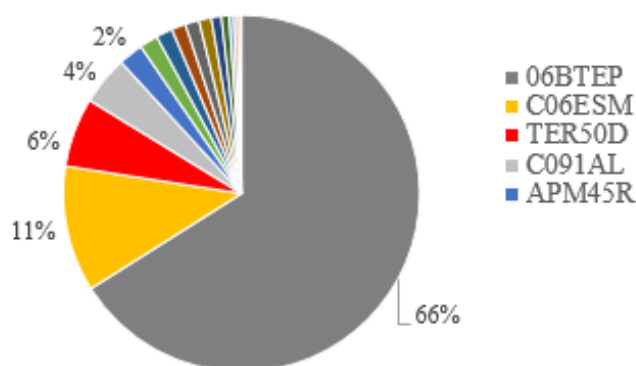


Figura 70. Participación de rollos por grado de acero en eventos de fricciones

Se hizo una caracterización dimensional de todos los productos de grado 06BTEP involucrados en eventos de fricciones, y se encontró que la mayor parte de los casos se encuentran en espesores entre 2.4 y 3.5 mm.

Eventos	Espesor								Total general
	1.8-2.1	2.1-2.4	2.4-2.7	2.7-3	3-3.3	3.3-3.6	3.6-3.9	3.9-4.2	
800-899	14		6		19				39
900-999	2	3	1		18				24
1000-1099	6	2	11	35	39	3	1		97
1100-1199	7	2	11	52	4	4		1	81
1200-1299	2		37	16	30	2	10		97
Total general	31	7	66	103	110	9	11	1	338

Tabla 3. Caracterización dimensional de rollos que participaron en eventos de fricciones

En la tabla 3 se observa que la mayor parte del material afectado con fricciones está entre las dimensiones de 2.4 mm a 3.3 mm de espesor y de 1000 mm a 1300 mm de ancho.

Acero	Elemento							
	C	B	Mo	Mn	Ni	Si	Al	C
06BTEP	0.040	0.003	0.002	0.210	0.000	0.011	0.046	0.040
C06ESM	0.032	0.000	0.001	0.210	0.018	-	0.041	0.032
TER50D	0.070	-	0.002	0.740	0.004	0.024	0.039	0.070
C091AL	0.089	-	0.002	0.330	-	0.019	0.035	0.089

Tabla 4. Elementos principales de los aceros que participaron en eventos de marcas de fricción.

En la tabla 4 de muestran los elementos principales de la composición química de los aceros que se caracterizaron por haber presentado marcas de fricción. Podemos observar que el acero con mayor defectivo tiene bajas cantidades de carbono y altas cantidades de boro respecto a los grados que presentan menor defectivo de marcas de fricción.

4.6 Pruebas de proceso

Con base en la caracterización, se diseñó una prueba en el MC3 de un lote de material del mismo grado y dimensiones modificando la tensión de enrollado, la sobre velocidad del mandril y sobre velocidad del unitario (rodillos formadores).

Después se programaron en SKP4 para validar físicamente la condición de rollo flojo. Por último, se procesaron en lote en la línea de Decapado y se hizo una inspección a fondo del material para revisar si se había generado el defecto.

Posterior a las pruebas de modificación de variables en el MC3 se realizaron pruebas modificando las variables de proceso en SKP4 (velocidad y tensión de desenrollado) para posteriormente inspeccionar este material en la línea de Decapado y evaluar los resultados.

4.7 Variables de proceso

Para las pruebas se modificarán variables de proceso del MC3 y SKP4. Para esto se tomará como referencia las variables de proceso de los rollos detectados con el defecto de marcas por fricción.

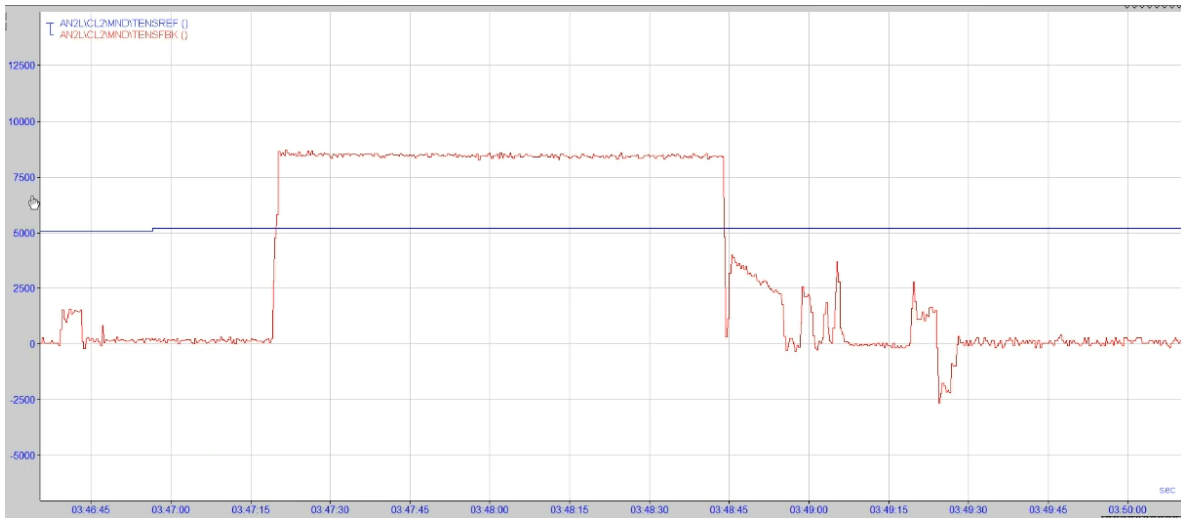


Figura 71. Tensión de enrollado real (rojo) y su referencia (azul) del MC3

La figura 71 muestra la curva de tensión de enrollado de un producto típico en el que se generan las marcas por fricción. El rollo es de grado 06BTEP de 2.69 m de espesor y 1301 mm de ancho.

En las pruebas de proceso en MC3 se mencionan modificaciones al *vernier* de tensión y no directamente la tensión específica de cada rollo debido a que como se mencionó en el punto 2.10.6 la tensión de enrollado depende de variables como el ancho y el espesor, esto quiere decir que cambia de rollo en rollo, por lo tanto, para poder hacer ajustes masivos en el proceso no se puede modificar la tensión específica, sino que se modifica el *vernier* de tensión (sobre tensión).

En la figura 71 se observa que la tensión de enrollado y su referencia no coinciden debido al *vernier* de tensión. Este *vernier* se aplica al 100% de los productos que se enrollan para mejorar el conformado del material. Este *vernier* va del 35% al 60% dependiendo del grado de acero y del espesor de la cinta.

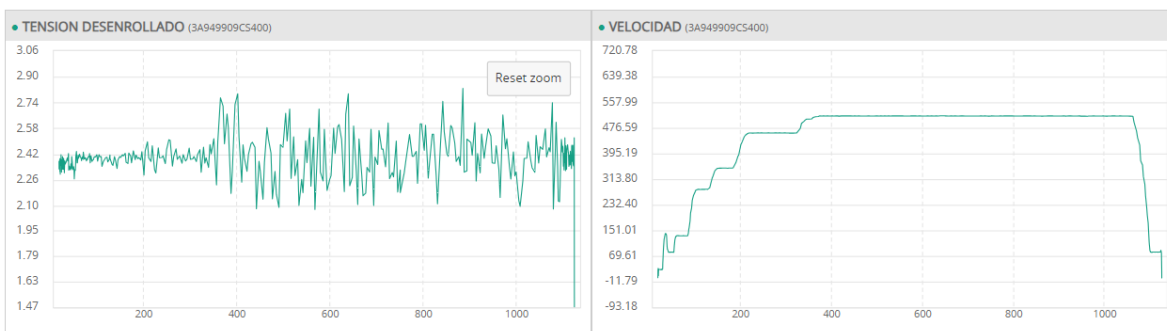


Figura 72. Tensión de desenrollado y velocidad de proceso grado 06BTEP

En la figura 72 se muestran las curvas típicas de velocidad y tensión de desenrollado de un producto típico afectado con las marcas por fricción, este producto es de grado 06BTEP de 2.45 mm de espesor y 1081 mm de ancho.

5. Capítulo V Resultados

En el análisis de las variables se encontró que las condiciones normales de proceso para las dimensiones de este producto que tiene la mayor participación en eventos de fricciones (91% de eventos) se enrollaban a 35% de sobre tensión, y que en las dimensiones menores a 2.1 mm (9% de eventos) se enrollaba a 50% de sobre tensión.

A continuación, se presentan los resultados de la primera prueba con rollos del grado 06BTEP:

Material Salida	Variable probada	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Enrollador	Observaciones
3A926098CM300	Vernier tensión enrollado en 50%	1162	3.286	3	Aceptado sobre orden
3A926099CM300		1158	2.968	2	Aceptado sobre orden
3A926100CM300	Sobre velocidad del mandril en 24%	1156	2.969	3	Aceptado sobre orden
3A926101CM300		1157	2.968	2	Aceptado sobre orden
3A926102CM300	Sobre velocidad de unitarios en 25%	1156	2.969	3	Aceptado sobre orden
3A926103CM300		1157	2.968	2	Aceptado con observaciones, tallones por mala forma
3A926104CM300	Sobre velocidad de mandril 24% y unitarios en 25%	1155	2.968	3	Aceptado con observaciones, tallones por mala forma
3A926105CM300		1158	2.968	2	Aceptado sobre orden
3A926106CM300	Vernier tensión enrollado en 50%, sobre velocidad de mandril 24% y sobre velocidad de unitario 25%	1156	2.968	3	Aceptado sobre orden
3A926107CM300		1156	2.967	2	Aceptado sobre orden

3A926108CM300	Normal, vernier tensión 35%, sobre velocidad de mandril 14% y sobre velocidad de unitario 15%	1161	2.968	3	Aceptado sobre orden
3A926109CM300		1157	2.966	2	Aceptado sobre orden

Tabla 5. Pruebas de modificación de variables de enrollado

La observación “aceptado sobre orden” se refiere a que al rollo no se observó el defecto de marcas de fricción en la inspección.

En general, la prueba en todas sus combinaciones dio buenos resultados, no se presentaron fricciones.

Si bien los rollos no presentaron fricciones, se observó mejor conformado de rollo en los que se les aumentó la tensión de enrollado respecto a los que no.

Posteriormente se preparó una prueba con 20 rollos de grado 06BTEP de las mismas dimensiones, a los cuales a 10 se les modificó la sobre tensión de enrollado a 50% y los otros 10 se enrollaron a 35% de sobre tensión, obteniendo los siguientes resultados.

Prueba sobre tensión	% Defectivo	Rollos analizados
35%	60%	10
50%	10%	10

Tabla 6. Resultados de la primera prueba de modificación de variables de enrollado

A diferencia del resultado de la primera prueba, en los rollos con sobre tensión de 35% se observaron fricciones en un 60% de los rollos. Mientras que en los que se les aumentó 50% se presentó el defecto en el 10% de ellos.

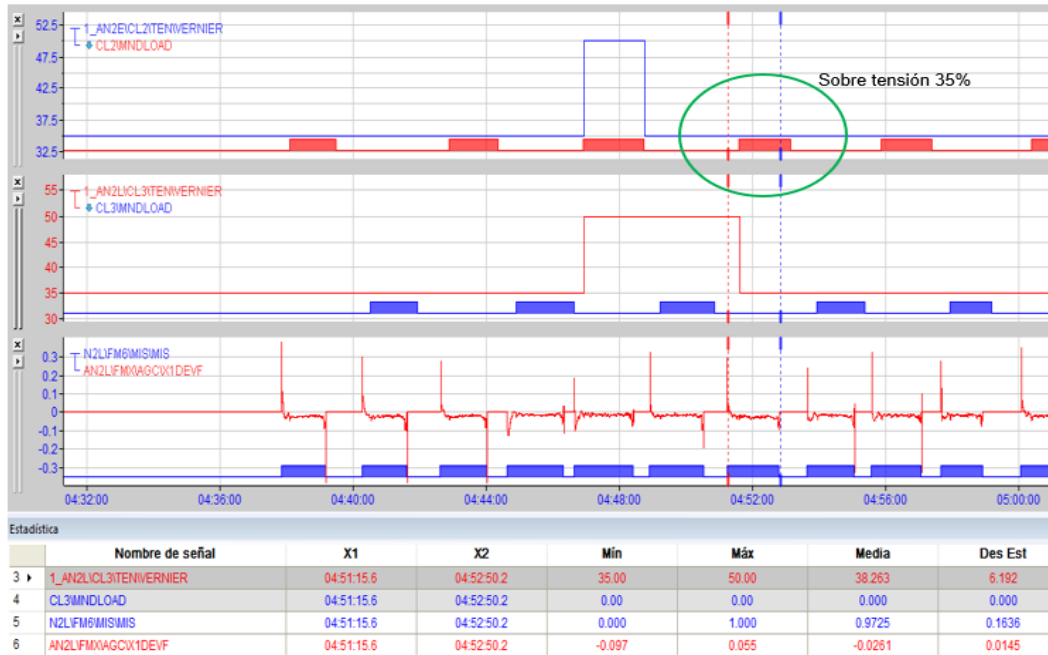


Figura 73. Gráfico de IBA Analyzer con la variable de sobre tensión en 35%

En la figura 73 se muestra el porcentaje de sobre tensión de enrollado con el que se presentaron los rollos con la condición de “flojos”, además de ser la condición estándar de proceso y es la que genera la mayor cantidad de rechazo de marcas de fricción.

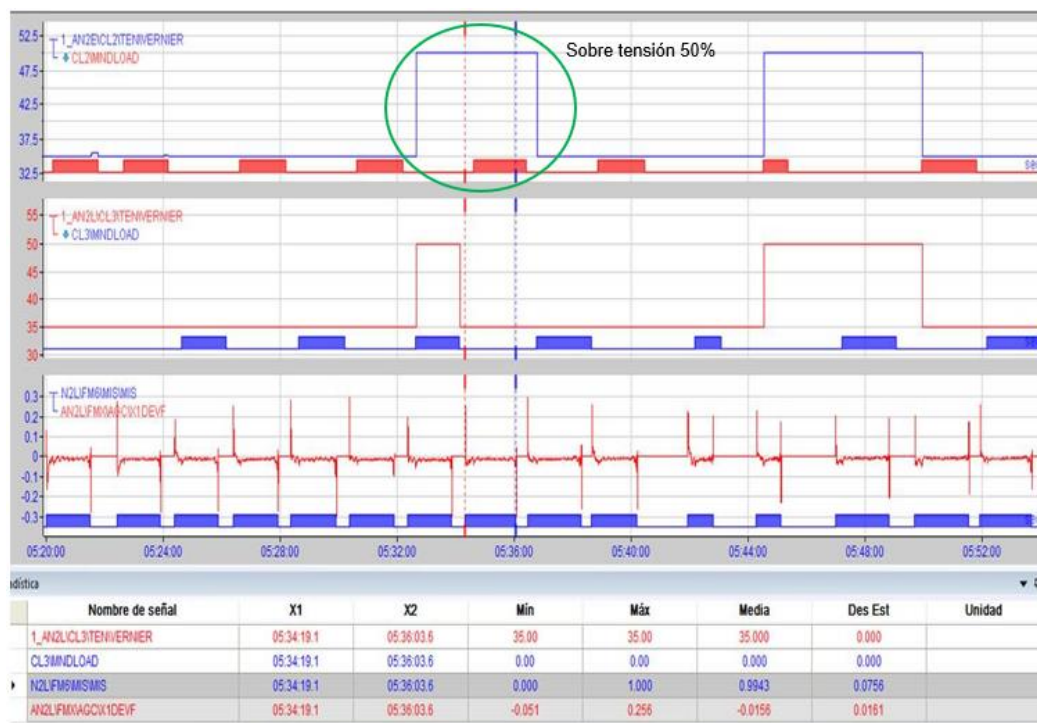


Figura 74. Gráfico de IBA Analyzer con la variable de sobre tensión en 50%

En la figura 74 se muestra el porcentaje de sobre tensión de enrollado con el que se obtuvieron los mejores resultados de las pruebas

La conclusión de esta prueba fue que la variable más importante para la generación del defecto era la sobre tensión de enrollado en SKP4.

Se estableció como práctica operativa que para el grado 06BTEP la modificación de la sobre tensión de enrollado de 35% a 50% en todos los anchos y espesores mayores a 2.1 mm debido a los resultados de las pruebas antes mencionadas.

Durante un mes de aplicación de la práctica, el defecto disminuyó en un 70%. Para mejorar el 30% restante de defectivo se realizaron pruebas en el siguiente proceso de Skin Pass.

Las pruebas consistieron en procesar 20 rollos en Skin Pass con sobre tensión modificada de enrollado del MC3 con estas condiciones:

Prueba con modificación de variables de proceso en Skin Pass 4			
Condición	Rollos (piezas)	Velocidad máxima SKP (mpm)	Tensión de desenrollado (kg/cm²)
1	5	550	2.5
2	5	550	1.8
3	5	350	2.5
4	5	350	1.8

Tabla 7. Prueba final con modificación de variables de tensión de desenrollado y velocidad



Figura 75. Rollo de prueba en SKP4

En la figura 75 se muestra el rollo 3B129916CM300 que fue utilizado en las pruebas de modificación de variables en SKP4.

En figura 76 se muestra el rollo 3A858769CS400 de la prueba de modificación de variables de proceso perteneciente a la condición 1, en el cual se presentaron marcas de fricción, por tanto, esta combinación no fue efectiva.

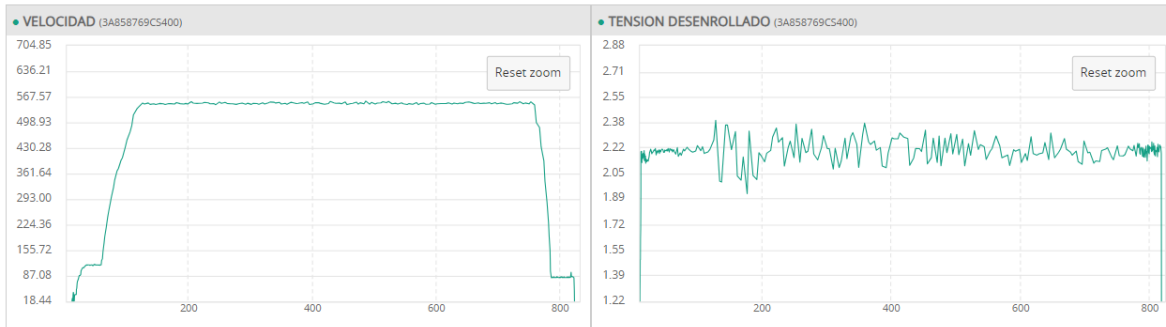


Figura 76. Velocidad de proceso y tensión de desenrollado en SKP4 para el rollo 3A858769CS400

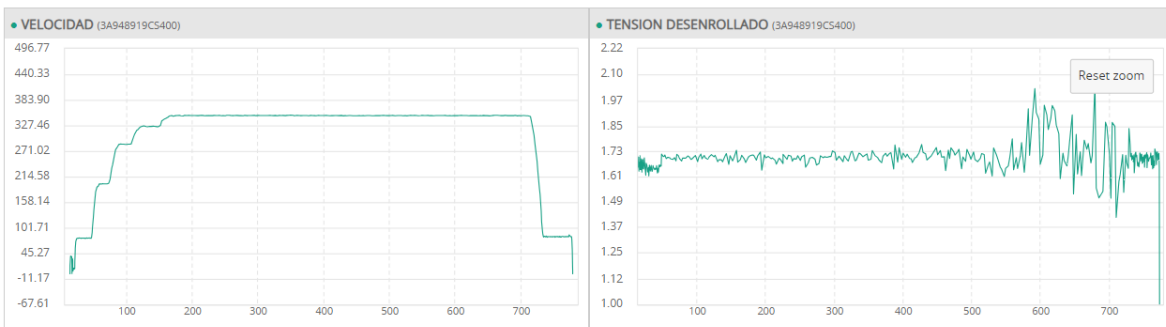


Figura 77. Velocidad de proceso y tensión de desenrollado en SKP4 para el rollo 3A948919CS400

En la figura 77 se muestra el rollo 3A948919CS400 perteneciente a la condición 4. En esta condición no se presentaron marcas de fricción.

Después de la prueba y del análisis de resultados se realizó la modificación de la práctica operativa en Skin Pass en el que todos los rollos de grado 06BTEP las variables de proceso de velocidad máxima y de tensión de desenrollado serían de 350 mpm y de 1.8 kg/cm² respectivamente.

El resultado general de las pruebas apuntó a que las variables de control de procesos más importantes para la generación fueron: Sobre tensión de desenrollado, velocidad de proceso de SKP4 y tensión de desenrollado en SKP4.

De las pruebas realizadas, se generó una práctica de proceso modificando las siguientes variables en MC3 y SKP4:

Variable de proceso	Antes	Después
Sobre tensión de enrollado MC3 (%)	35	50
Velocidad de proceso SKP4 (mpm)	550	350
Tensión de desenrollado SKP4 (kg/cm ²)	2.5	1.8

Tabla 8. Comparación de variables de proceso antes y después de las pruebas

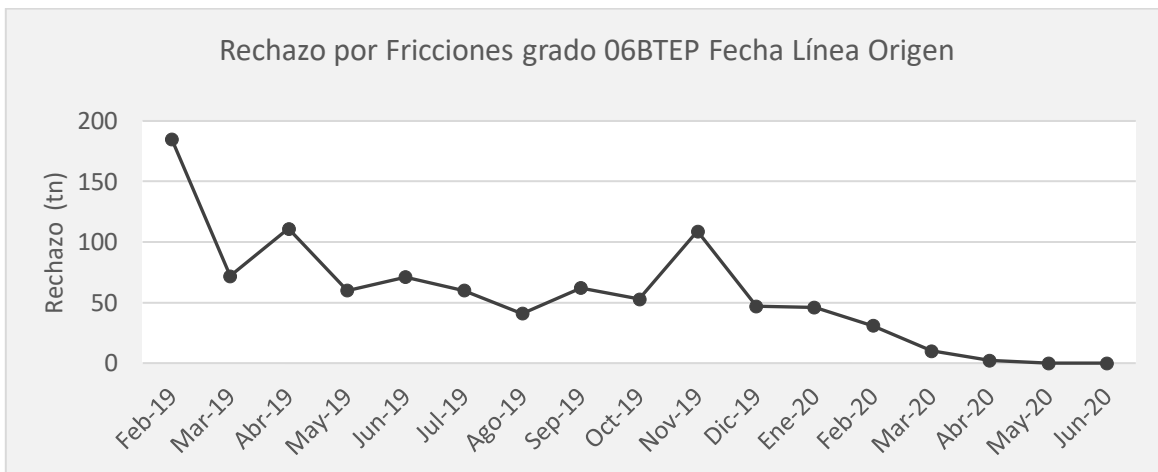


Figura 78. Tendencia de rechazo de material por defecto de fricciones

En la figura 78 se encuentra la tendencia del indicador de rechazo, se observa que después de las acciones, el defectivo disminuyó hasta no presentarse en los últimos 3 meses de producción.

6. Capítulo VI Discusiones

Después realizar las series de pruebas de proceso se determinó que la tensión de enrollado en el MC3 y la tensión de desenrollado en el SKP4 eran las variables clave para disminuir este defecto⁵. Se encontró que si la tensión de enrollado se procesaba con una sobre tensión de 35% las primeras 15 vueltas aproximadamente no quedaban lo suficientemente compactas, esto hacía que al sacar el rollo a los patios de enfriamiento y durante su almacenaje se produjera naturalmente la contracción térmica, más vueltas del diámetro interno se aflojaban.

Cuando el rollo con vueltas flojas se alimentaba al mandril del Skin Pass 4 y este se expandía para iniciar el proceso, esas vueltas flojas dejaban espacio entre espiras lo que provocaba que con tensiones de desenrollado mayores a 1.8 kg/cm² y aceleración inicial de la línea, el molino tensionara directamente a la lámina sobre el mandril desenrollador (debido a que el SKP4 no tiene bridas que controlen la tensión de entrada) provocando un apriete súbito en el rollo friccionándose entre espiras y generando el defecto.

Se podía predecir el defecto del rollo al escuchar el sonido de apriete y observando como el número del rollo y la raya blanca recta, pintada en el canto se distorsionaba.

Al extender el material en la mesa de inspección se podía apreciar el defecto de marcas por fricción.

Este defecto se genera en este producto debido a su química, el grado 06BTEP acero de bajo carbono utilizado para el uso troquelado extra profundo. Este material para ser empleado en este uso debe ser suave comparado con los aceros de alta resistencia en los que no se genera el defecto (revisar anexo 1). El modo en el que se generan las marcas es debido a que en el rollo la lámina tiene en la superficie una capa natural de wüstita (FeO) generada en el MC3 y tiene una mayor dureza que el acero.

Debido a esto, la fuerza de fricción generada entre espiras por la tensión del desenrollador en SKP4 y el efecto de tener un material más duro (óxido ferroso o wüstita) entre las espiras, hace que se favorezcan las condiciones para generar las marcas, y esto ocurre en aceros suaves de bajo carbono a diferencia de los aceros duros de alta resistencia que no presentan este defecto porque soportan más la fuerza de fricción sin deformarse. Este arrastre en el acero se pudo detectar con la caracterización de las muestras que se hizo en el laboratorio.

7. Capítulo VII Conclusiones y recomendaciones

El control de enrollado es multivariable, sin embargo, hay variables más críticas que otras en cuanto al conformado del rollo flojo.

En este estudio se demostró que la tensión de enrollado en el MC3 y la tensión de desenrollado en el SKP4 son las variables más significativas e influyen directamente en la generación del defecto.

Se recomienda que en control de procesos de este tipo de productos se mantengan las variables de proceso que dan mejores resultados para evitar la generación del defecto. Si se disminuye la tensión de enrollado en el MC3 para los aceros con mayor proporción de defectivo o se aumenta la velocidad de proceso o tensión de desenrollado en el SKP4, el material será propenso a generar el defecto de marcas por fricción.

8. Bibliografía

1. Aceropedia. (2023) Acero Wootz. Recuperado el 10 de marzo de 2023. <https://aceropedia.com/tipos-de-acero/acero-wootz/>.
2. Alamy (2023). Rico en hierro imágenes de stock. Recuperado el 15 de junio 2023. <https://www.alamy.es/imagenes/rico-en-hierro.html?sortBy=relevant>.
3. Álvaez, José. (2023). Modelado de procesos de manufactura. Recuperado el 18 de junio de 2023. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/2548/8/08-MPM-Cap5-Final.pdf>.
4. BIRTLH (2023). Procesos de fabricación por corte y conformado. Recuperado el 14 de junio de 2023. https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/DFM/TFM/TFM08/es_DFM_TFM08_Contenidos/website_115_trenes_de_laminacin.html.
5. Blazevic, David T. (1982). Hot Strip Mill Coiling. The inside story mill to mandrel. Homewood, Illinois, E.E.U.U.
6. Braumer Klaus et al (2011). Coil Box between Roughing train and finishing train in a Rolling Mill. Recuperado el 19 de junio de 2023. US7942029B2 - Coil box between roughing train and finishing train in a rolling mill - Google Patents.
7. Comunicación interna Ternium, rechazo (caída) cualitativo 7 de mayo 2019.
8. Deccanherald (2019). Would you lookat Wootz! Recuperado el 15 de junio 2023. <https://www.deccanherald.com/spectrum/spectrum-top-stories/would-you-lookat-wootz-774656.html>.
9. Degner Michael, Thiemann G. (2002) Development of coilbox technology at Bochum hot strip mill. Recuperado el 16 de junio 2023 https://www.researchgate.net/publication/294221821_Development_of_coilbox_technology_at_Bochum_hot_strip_mill.
10. Direct Industry. (2023). Microscopio metalográfico MEC4. Recuperado el 22 de abril 2023. <https://www.directindustry.es/prod/unitron/product-28342-1486745.html>.
11. Enriquez Berciano, Jose L. et al. (2010). Monografías sobre Tecnología del Acero. Parte IV. Recuperado el 15 de junio de 2023. https://oa.upm.es/2074/1/LAMINACION2_MONO_2010.pdf.

12. Gerdau Corsa (2021). Descubrimiento, orígenes y primer desarrollo de acero. Recuperado el 10 de marzo de 2023. <https://www.gerdaucorsa.com.mx/blog/descubrimiento-or%C3%ADgenes-y-primer-desarrollo-del-acero%C2%A0>.
13. GHI Smart Furnances. (2023). Horno para calentamiento de palanquilla de hierro y acero. Recuperado el 12 de marzo de 2023. <https://www.ghihornos.com/hornos-industriales/fundicion-hierro-acero/horno-calentamiento-palanquilla/>.
14. JSW The Japan Steel Works (2023). Rolls for Plate Mills. Recuperado el 15 de junio de 2023. <https://www.jsw.com.sg/products/steel/rolls-for-plate-mills/>
15. Metinvest. (2020). Acero laminado en caliente: desde el Renacimiento hasta hoy. Recuperado el 10 de marzo de 2023. <https://metinvestholding.com/es/media/article/goryachekatanaya-stalj-ot-epohi-vozrozhdeniya-do-nashih-dnej>.
16. Museos Siderurgia Minería CYL (2018). Proceso del pudelado en hornos y el hierro de forja o acero dulce. Recuperado el 15 de junio de 2023. PROCESO DEL PUDELADO EN HORNOS Y EL HIERRO DE FORJA O HIERRO DULCE – Museo siderurgia y minería de Castilla y León (museosiderurgiamineriacyl.es)
17. Peng Rongrong et al (2021). Vibration Characteristics of Hot Rolling Mill Rolls Based on a Elastoplastic Hysteretic Deformation. Recuperado el 18 de junio de 2023. <https://www.mdpi.com/2075-4701/11/6/869>
18. Real Academia Española (2023). Acero. Recuperado el 10 de marzo de 2023. <https://dle.rae.es/acero>
19. SDMT Rolls (2023). Section Mill Work Roll. Recuperado el 14 de junio de 2023. <http://www.sdmtrolls.com/product/section-mill-work-roll>
20. SMS Group (2023). Descaling technology for high quality surfaces. Recuperado el 12 de marzo de 2023. http://sms-group.us/files/W4-316E_Descaling%20technology%20for%20high-quality%20surfaces.pdf
21. Técnica en laboratorios (2023). Microscopios Nikon SMX-745T. Recuperado el 14 de junio 2023. <https://www.tecnicaenlaboratorios.com/Nikon/SMZ745T.htm>

22. The Fabricator, Davenport Michael (2017). Surge el acero avanzado de alta resistencia de tercera generación. Recuperado el 15 de junio de 2023. <https://www.thefabricator.com/thefabricatorenespanol/article/bending/surge-el-acero-avanzado-de-alta-resistencia-de-tercera-generacion>
23. Theyssier M. C. (2015). Manufacturing of advanced high strength steels (AHSS). Recuperado el 15 de junio de 2023. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/roughing-mill#:~:text=Roughing%20mill%20rolling%20of%20reheated,of%20slab%20and%20center%20it.>
24. Thyssenkrupp. (2020). Grobblech aun Warmband S235JR/1.0038. Recuperado el 15 de junio de 2023. Microsoft Word - BB-0004-S235JR-HPA-CPR-21012020 (thyssenkrupp-steel.com)
25. T-MEIC (2011). Soluciones para la Industria Metalúrgica Mundial. Recuperado el 16 de junio de 2023. https://www.tmeic.com/Repository/Others/Soluciones%20para%20la%20Industria%20Metal%C3%BArgica%20Mundial_A4.pdf.
26. Urbe. (2005). Descripción de los hornos de empuje. Recuperado el 10 de marzo de 2023. <https://virtual.urbe.edu/tesispub/0053168/cap04.pdf>
27. Wong Grace. (2021). Mill Roll Classification and Material Selection/Mill Roll Technology- Chapter One. Recuperado el 17 de junio de 2023 <https://www.linkedin.com/pulse/mill-roll-classification-material-selectionmill-one-grace-wang-min/>.
28. ZEISS (2023). ZEISS Smartzoom 5. Recuperado el 15 de junio de 2023. https://pages.zeiss.com/SmartZoom5_moreinfo.html.

9. Anexos

1. Tabla de propiedades mecánicas de diversos tipos de aceros.

Clasificación	Acero	Cedencia RC (KSI)	Tensión RT (KSI)	Dureza (Rockwell B)	RC/RT (KSI/KSI)
Alta resistencia	80LWSI	77.50	91.04	-	0.86
	APM80M	77.13	93.87	-	0.80
	540CR7	75.68	87.99	91.02	0.87
	66427B	68.50	85.75	81.48	0.80
	APM55W	57.42	73.58	-	0.80
	TER50D	55.10	69.50	80.38	0.80
Bajo Carbono	C091AL	38.79	55.26	46.10	0.69
	C091TM	33.17	51.82	64.67	0.63
	06BTEP	32.22	46.84	53.10	0.69
	C071TM	30.42	47.80	60.38	0.63
	C06DDQ	29.09	45.39	55.24	0.64
	C06ESM	27.52	44.37	53.66	0.62
	C06EXP	27.10	43.62	-	0.62
Ultra Bajo Carbono	UBCIMS	25.76	43.69	41.85	0.58