



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y MATERIALES

LICENCIATURA EN INGENIERÍA MINERO METALÚRGICA

**OPTIMIZACIÓN DE LONGITUD DE CORTE DE
PLANCHÓN EN ACERO BAJO CARBONO
(GRADOS C001-C005) EN INICIO Y FIN DE
SECUENCIA EN LAS MÁQUINAS DE
COLADA CONTINUA ARCELORMITTAL
MÉXICO.**

TESIS

Para obtener el título de
Ingeniero Minero Metalúrgico

PRESENTA

Cesar Sandoval Chilino

DIRECTOR DE TESIS

IMM. Carlos David Guzmán León



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

School of Engineering and Basic Sciences

Dirección

Office of the Director

Mineral de la Reforma, Hgo., a 9 de julio de 2026

Número de control: ICBI-D/1312/2026

Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado al egresado de la Licenciatura en Ingeniería Minero Metalúrgica **Cesar Sandoval Chilino**, quien presenta el trabajo de titulación **"OPTIMIZACIÓN DE LONGITUD DE CORTE DE PLANCHON EN ACERO BAJO CARBONO (GRADOS C001-C005) EN INICIO Y FIN DE SECUENCIA EN LAS MAQUINAS DE COLADA CONTINUA ARCELORMITTAL MÉXICO"**, ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: M. en C. María Florina Illescas López

Secretario: Dr. Edgar Cardoso Legorreta

Vocal: Ing. Carlos David Guzmán León

Suplente: Dr. Gustavo Urbano Reyes

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Dr. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI

GVR/MMM

"Amor, Orden y Progreso"



Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo
Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
México. C.P 42184
Teléfono: 52 (771) 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

uaeh.edu.mx

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco a mis padres por su apoyo incondicional, por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia siendo estos fundamentales para culminar esta etapa de mi vida. A mis hermanos por su compañía y respaldo proporcionándome una fuente de fortaleza.

A mi pareja, por su comprensión, respaldo, compañía y cariño durante el desarrollo de la presente tesis

A mis mentores de Arcelormittal México, en especial al área de auditoría técnica por apoyarme, guiarme y asesorarme durante el desarrollo del proyecto.

Asimismo, manifiesto mi reconocimiento a mis asesores de tesis por su orientación y acompañamiento. Finalmente, agradezco a todas las personas que de manera directa o indirecta contribuyeron a la culminación del presente trabajo.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	3
ÍNDICE.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
Introducción	8
Objetivos.....	11
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.....	12
1.1 ACEROS BAJO CARBONO (C001, C002, C003, C004, C005).....	14
1.2 ACERÍA ELÉCTRICA.....	15
1.3 HORNO OLLA (LF).....	16
1.4 COLADA CONTINUA.....	17
1.5 ENSAYO DE TRACCIÓN ASTM E8/E8M.....	21
CAPÍTULO II: OPTIMIZACIÓN DE DESPUNTE EN INICIO Y FIN DE SECUENCIA.....	22
2.1 OPTIMIZACIÓN DE DESPUNTE EN INICIO Y FIN DE SECUENCIA.....	23
2.2 DESPUNTE EN INICIO Y FINAL DE SECUENCIA EN COLADA CONTINUA.....	23
2.3 VARIABLES DE LAS PRUEBAS.....	24
2.4 PERIODO DE PRUEBA.....	25
2.5 PLANCHONES ESTUDIADOS.....	25
2.6 FORMACIÓN DE DEFECTOS EN COLADA CONTINUA.....	25
2.6.1 DEFECTOS SUPERFICIALES.....	26
2.6.2 DEFECTOS INTERNOS.....	27
2.7 INSPECCIÓN VISUAL.....	28
2.8 ENSAYO DE TRACCIÓN.....	30
2.9 REGISTRO OPERATIVOS DEL PROCESO DE COLADA CONTINUA.....	30
2.10 PROCEDIMIENTO.....	31
2.10.1 ETAPA 1. DIAGNOSTICO DE ESTADO DE DESPUNTE.....	31
2.10.2 ETAPA 2: IMPLEMENTACIÓN DE PRUEBA PILOTO.....	32

2.10.3 ETAPA 3. EJECUCIÓN DE PRUEBA FORMAL DE CORTE A 1 METRO EN GRADOS BAJO CARBONO.	35
CAPÍTULO III RESULTADOS.	40
3.1 INSPECCIÓN VISUAL DE PLANCHONES DE INICIO Y FINAL DE SECUENCIA.	41
3.2 OPERATIVOS DE LA COLADA CONTINUA.	41
Grado C005.....	43
3.3 PROPIEDADES MECÁNICAS.	43
3.4 ANÁLISIS DE AHORRO DE MATERIAL.	44
3.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	47
CONCLUSIONES.	49
Referencias:	50

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1.- Proceso productivo de línea de planos ⁵	14
Figura 2.- Horno de Arco Eléctrico.	16
Figura 3.- Adición de ferroaleaciones.....	16
Figura 4.- Horno olla.....	17
Figura 5.- Torre porta ollas.....	18
Figura 6.- Grúa viajera con olla.	18
Figura 7.- Diagrama de la máquina de colada continua ¹⁷	19
Figura 8.- Probeta montada en maquina universal.....	21
Figura 9.- Escoria atrapada en cara superior de planchón.....	26
Figura 10.- Grieta transversal.....	27
Figura 11.- Grieta Longitudinal.	27
Figura 12.- Grieta Transversal.....	27
Figura 13.- Macrografía para detectar segregación.	28
Figura 14.- Medición dimensional de planchón.	29
Figura 15.- Formato de registro de inspección visual.....	30
Figura 16.- Despunte de planchones.	33
Figura 17.- Marca de orientación de carga del planchón.	36
Figura 18.- Carga de planchón al HSM.....	36
Figura 19.- Rollo de acero inspeccionado.	37

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1.- Registro de la prueba piloto	34
Tabla 2.- Registro de planchones de prueba.....	38
Tabla 3.- Parámetros operativos de colada continua.	38
Tabla 4.- Registro de planchones para la prueba formal.....	39
Tabla 5.- Planchones evaluados durante el seguimiento.	41
Tabla 6.- Condiciones operativas grado C001.	42
Tabla 7.- Condiciones operativas grado C002.	42
Tabla 8.- Condiciones operativas grado C003.	42
Tabla 9.- Condiciones operativas grado C004.	43
Tabla 10.- Condiciones operativas grado C005.	43
Tabla 11.- Resultados de ensayos mecánicos de la prueba piloto.....	43
Tabla 12.- Resultados de ensayos mecánicos de la prueba formal.	44
Tabla 13.- Ahorros por planchón.	44
Tabla 14.- Ahorros durante el seguimiento.	45
Tabla 15.- Oportunidad de ahorros con 100% de efectividad.	46
Tabla 16.- Mensuales de inspección.	46

Introducción

La industria siderúrgica cumple un papel fundamental para el desarrollo económico y tecnológico de México, ya que suministra el acero como insumo esencial para distintos sectores como construcción, automotriz y manufacturero. Arcelormittal México, ubicada en Lázaro Cárdenas, Michoacán, es una de las plantas integrales más importantes del país debido a que cuenta con las instalaciones necesarias para transformar la materia prima desde el mineral de hierro hasta semiproductos terminados.

En la Línea de productos planos, la colada continua es una etapa importante del proceso, en la cual el acero líquido es vaciado de forma controlada en un molde de sección abierta, se nombra colada continua porque el planchón se solidifica y extrae de forma ininterrumpida de la máquina con un flujo constante. En esta fase se producen planchones que serán transformados en rollos laminados en caliente en el HSM. En esta etapa, la calidad superficial de los planchones es determinante, ya que cualquier defecto producido durante la colada continua puede propagarse durante el rolado, ocasionando retrabajos, rechazos o exceso de despunte.

Los planchones de inicio y fin de secuencia son los que presentan mayor probabilidad de defectos debido a las variaciones de velocidad y las inestabilidades del arranque y cierre de cada campaña de colada. Por esta razón, en la práctica operativa de Arcelormittal se aplica un despunte estándar de entre 1.5 y 2 metros para eliminar la zona defectuosa. Sin embargo, durante el periodo de septiembre - diciembre del año 2023 esta práctica generó el 1.14% de acero despuntado en los grados C001, C002, C003, C004, C005 que se laminan en el HSM, lo que representa pérdidas significativas mensuales.

Ante este escenario, se planteó realizar una prueba piloto y protocolos para evaluar la viabilidad de reducir el despunte de 150 cm a 100 cm en los planchones de inicio y de 200 cm a 100 cm en los de fin de secuencia, asegurando que esta reducción no afecta la calidad superficial, interna ni mecánica del material laminado. Estas pruebas involucraron el análisis de variables operativas de la colada continua (velocidad de vaciado, adiciones de aluminio), inspección visual y ensayos de tracción, así como el seguimiento del planchón hasta su laminado.

Los resultados preliminares indicaron que es posible reducir el despunte sin comprometer la calidad del material, lo cual dio la oportunidad de incrementar la cantidad de material embarcado y disminuir el desperdicio.

En este contexto, la finalidad es optimizar el proceso actual de corte y despunte en planchones de bajo carbono a través de la evidencia recolectada. Con ello se demuestra, que la reducción de la longitud de despunte es viable, sin afectar la calidad del producto, además se generan beneficios en la eficiencia del proceso económico-productivo.

Por último, este trabajo se organiza en tres capítulos, el primer, denominado generalidades, presenta los fundamentos del proceso productivo de Arcelormittal para las aleaciones bajo carbono.

En el segundo, se describe el desarrollo de las pruebas (piloto y formal) de la reducción de longitud de los planchones seleccionados, donde se determinan las condiciones de producción que afectan el inicio y fin de secuencia en la colada continua, así como la identificación de los defectos presentes durante la inspección y evaluación para validar la optimización.

Finalmente se muestra el impacto en las condiciones operativas y de calidad en los beneficios en la eficiencia del proceso productivo y económico del despunte implementado, así como las conclusiones y discusiones de cada uno de los resultados.

Objetivos.

Objetivo General.

Disminuir el rechazo de acero, reduciendo la longitud de despunte de 150 cm a 100 cm en los planchones de inicio y fin de secuencia de los aceros bajo carbono (C001, C002, C003, C004, C005) producidos en colada continua en la empresa Arcelormittal, garantizando el cumplimiento de calidad superficial, interna y mecánica para la laminación en el Hot Strip Mill (HSM).

Objetivos específicos.

- Realizar la evaluación diagnóstica de las condiciones actuales de los defectos presentes en los inicios y finales de secuencia seleccionando los planchones producidos durante el periodo de estudio en la prueba piloto para determinar acciones de trabajo.
- Dar seguimiento a la prueba piloto con los planchones seleccionados durante el proceso HSM, verificando la viabilidad del corte a 100 cm en el inicio y final de secuencia sin que se generen defectos.
- Identificar los defectos superficiales y segregaciones presentes en los planchones mediante inspección visual y el macroataque.
- Evaluar las propiedades mecánicas del material mediante ensayos de tracción siguiendo la norma ASTM E8/E8M, comparando los resultados con los rangos establecidos para el grado A36.
- Analizar las condiciones operativas de colada continua, especialmente velocidad promedio, velocidad mínima y adición de aluminio, para determinar la influencia en la calidad del planchón.

Cuantificar el beneficio económico mediante la reducción del despunte.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.

La siderúrgica es un pilar fundamental para el desarrollo de México por su aporte de insumos básicos para diversas empresas, debido a esto ocupa el lugar número 15 en la producción de acero a nivel mundial (1) y cuenta con plantas integrales que abarcan desde la extracción del mineral hasta la producción de semiterminados. Arcelormittal México, ubicada en Lázaro Cárdenas, Michoacán es una de las instalaciones más importantes del país debido a su capacidad para producir una amplia gama de aceros planos y largos mediante tecnología de última generación, (2) con mineral de leyes de hasta 60% de hierro proveniente de la mina Las Truchas localizada a 7 km del poblado de La Mira (3).

En la línea de largos se produce palanquilla para la fabricación de varilla corrugada bajo la norma de producción NMX-B-506 destinadas para el sector de la construcción, alambrón que se utiliza para trefilados, laminados en frío, alambre y productos electrosoldados (4). En la línea de productos planos, el proceso productivo se compone por hornos de arco eléctrico alimentados de hierro esponja (DRI), y donde se encuentra ubicado el laminador de rollo en calientes (HSM) que cuenta con la tecnología para la producción de planchones de una gama de diferentes tipos de aceros; Grados comerciales que no requieren que pasen por las etapas de desgasificado al vacío RH (Desgasificado por recirculación) ni DVL (Desgasificación al vacío con lanza) y abarcan las normas ASTM A1010-A1018 utilizados para la elaboración de láminas, tubos y pisos con relieve, Grados estructurales utilizados para hacer productos de construcción como perfiles, tanques de almacenamiento y placas, siguiendo las normas ASTM A36, ASTM A709, SAE J403. Grados de alta resistencia y baja aleación (HSLA). Grados (API) para tubería, Resistentes a la corrosión ambiental, troquelados, Aceros avanzados de alta resistencias AHSS (5)(6).

La figura 1⁵ muestra el proceso productivo de la línea de planos, que se compone de diferentes etapas principales: aceración eléctrica, hornos ollas (LF), colada continua y laminación en caliente.

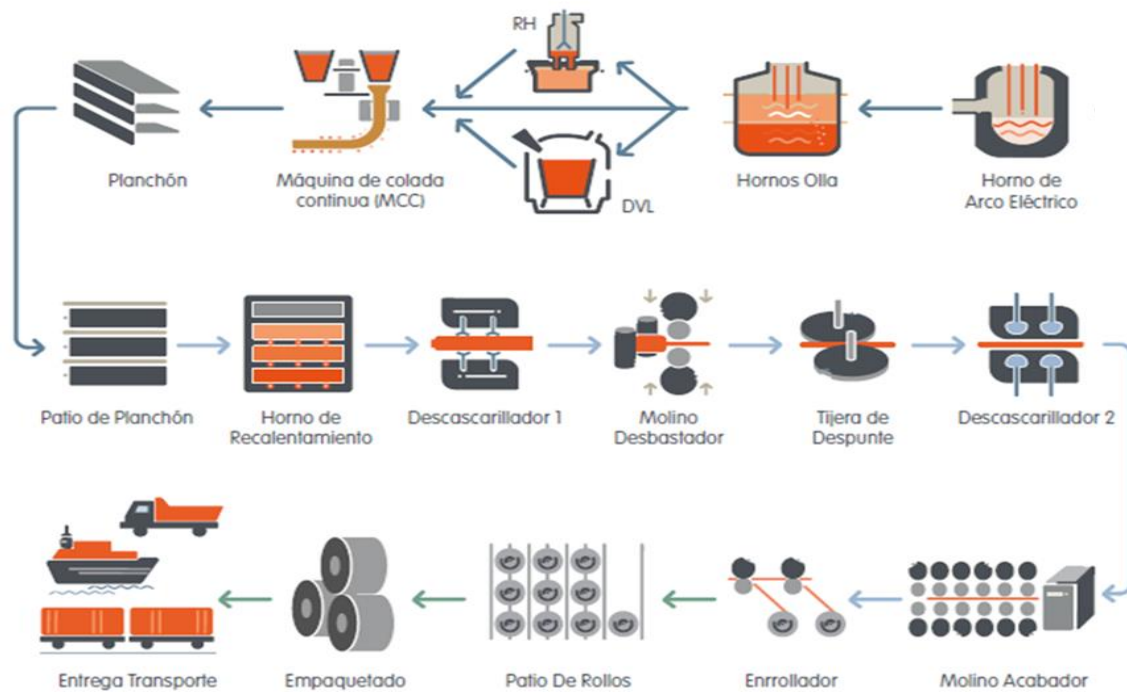


Figura 1.- Proceso productivo de línea de planos⁵.

1.1 ACEROS BAJO CARBONO (C001, C002, C003, C004, C005).

Los grados de acero estudiados, identificados internamente en la planta de Arcelormittal como (C001, C002, C003, C004, C005) corresponden a aceros bajo carbono con composiciones equivalentes a los grados con normas ASTM 1008, ASTM 1010, SAEJ403, A36, respectivamente.

Entre las principales características de estos aceros se encuentran su buena ductilidad dada por su porcentaje de elongación del 23%, que les permite soportar deformaciones plásticas sin fracturarse; su facilidad de laminación, derivada de su baja resistencia a la deformación y de su rango de temperatura de trabajo de 700 a 900°C, los hace ideales para su uso en aplicaciones estructurales y comerciales, tales como placas, láminas, perfiles y componentes utilizados en la industria de la construcción y manufactura en general.

En la fabricación de los grados de acero los elementos aleantes tienen una función específica, es así como cada grado presenta sus propios requerimientos en su composición química.

El contenido de aluminio es especialmente relevante para este proyecto, ya que valores elevados incrementan la probabilidad de formar inclusiones o defectos asociados a la segregación.

Aluminio (Al): Este se adiciona para desoxidar, restringir el tamaño de grano y ayudar a la nitruración.

Cromo (Cr): Incrementa la templabilidad, la tenacidad, las resistencias al desgaste y corrosión.

Manganeso (Mn): Contrarresta la fragilización por el azufre, aumenta la dureza de la superficie y la resistencia a los golpes.

Níquel (Ni): Ayuda en la resistencia a bajas temperaturas, además acrecienta la resistencia a la corrosión

Fósforo (P): Fortalece a los aceros bajo carbono mejorando la maquinabilidad.

Silicio (Si): Eleva las propiedades eléctricas y la resistencia a la oxidación (16).

1.2 ACERÍA ELÉCTRICA.

La acería eléctrica con la que trabaja la línea de planos consta de cuatro hornos de arco eléctrico como el que se muestra en la Figura 2, donde cada uno cuenta con capacidad máxima de carga 300 toneladas, funcionan con tres electrodos de grafito instalados en la parte superior de la bóveda del horno generando un arco eléctrico con el cual funde el acero; estos presentan dos opciones de carga de materias primas para la fabricación de acero: la primera es colocando chatarra junto a arrabio proveniente del alto horno, y la segunda es utilizando 100% de fierro esponja proveniente del proceso de reducción directa (HYL Y MIDREX).



Figura 2.- Horno de Arco Eléctrico.

El tiempo promedio de fusión del acero en el horno es de 60 minutos aproximadamente, una vez completada la fusión el acero es vaciado mediante un sistema basculante en ollas con capacidad de 210 toneladas. Durante el proceso de vaciado se le agregan diferentes materiales como ferrocromo, ferro silicio, Cal siderúrgica, dolomita y aluminio en cono como se muestra en la figura 3, para realizar un ajuste químico primario para obtener una composición química cercana a la deseada.



Figura 3.- Adición de ferroaleaciones.

1.3 HORNO OLLA (LF).

El horno mostrado en figura 4 está constituido por tres electrodos instalados en la parte superior, los que generan un arco eléctrico proporcionando calor para

homogeneizar la temperatura de la carga metálica favoreciendo la reacción química de los elementos aleantes.

Terminada la fusión primaria realizada en el horno de arco eléctrico, el acero líquido es transportado a la siguiente etapa del proceso; el horno olla o de afino, con el fin de refinar el acero mediante la adición de ferroaleantes ajustando químicamente el grado de acero que se está fabricando. Además, se forma una escoria sintética que absorbe y elimina inclusiones no metálicas mediante la agitación controlada del metal. (7).



Figura 4.- Horno olla.

1.4 COLADA CONTINUA.

El acero es transportado por el sistema de grúas que levanta la olla como se observa en la figura 5 y la colocan en la torre porta ollas para el suministro del acero líquido a la máquina de colada continua como se ve en la figura 6. Con la olla de acero posicionada en la torre porta ollas comienza el proceso de colada continua. El cuál es el procedimiento siderúrgico mediante en el que el acero líquido proveniente del horno de afino es vaciado de forma controlada en un molde de sección abierta, con una sección transversal con la forma del semiproducto que se desea fabricar. Este se nombra colada continua porque el planchón se solidifica y extrae de forma

ininterrumpida de la máquina con un flujo constante, hasta que el tundish agote todo el acero del grado que se está fabricando (8).



Figura 6.- Grúa viajera con olla.

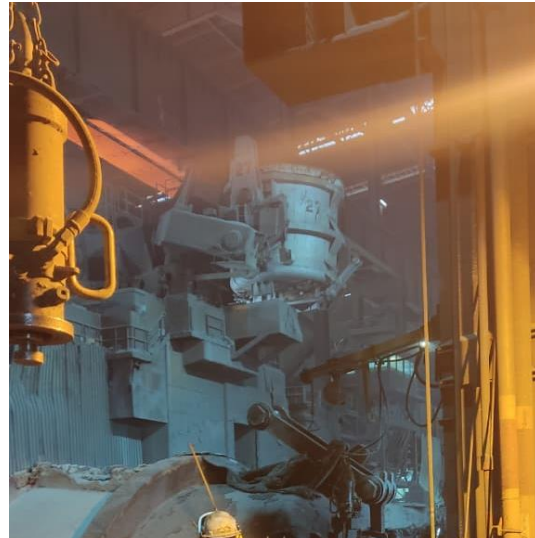


Figura 5.- Torre porta ollas.

El proceso inicia cerrando el fondo abierto del molde por medio de un cabezal metálico y un tapón fabricado con clavos y desperdicio de acero, que tiene la misma longitud de sección transversal que el molde. Este tapón está sujeto a la Barra Falsa que es la que tapona el fondo del molde y evita que el acero se derrame. Esta es sostenida a lo largo de toda su longitud por los rodillos de arrastre. Cuando el acero en el tundish alcanza un nivel suficiente para mantener un flujo estable, se abren los orificios, permitiendo que el chorro de acero líquido fluya hacia los moldes (9).

La máquina de colada continua está conformada por diversos componentes, cada uno con una función específica dentro del proceso de solidificación del acero. Estos elementos trabajan integrados para tener una estabilidad del flujo de acero. La Figura 7 muestra los principales componentes de la máquina de colada continua.

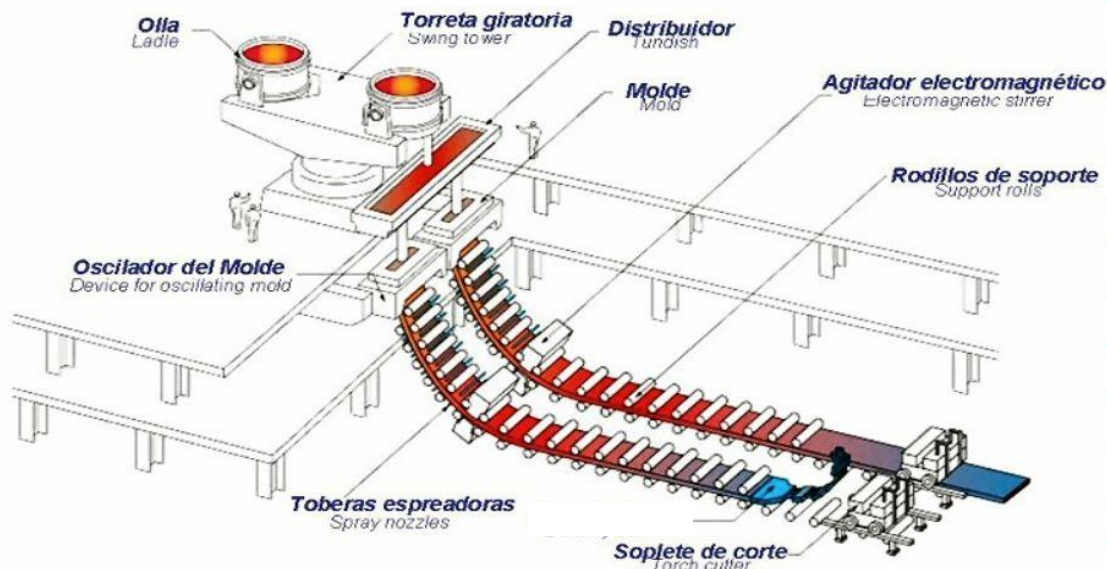


Figura 7.- Diagrama de la máquina de colada continua¹⁷.

1.4.1. Ollas de colada: Estas son los recipientes encargados de recibir, transportar y vaciar el acero líquido proveniente del horno de afino, regulando el flujo hacia el tundish. Están fabricadas en acero y revestidas con ladrillos refractarios de tipo magnésico, los cuales funcionan como aislante térmico evitando pérdidas de calor hacia el exterior. Estas cuentan con un sistema de buza sumergida que funciona como salida del acero por la parte inferior de la olla, y al mismo tiempo evita la oxidación del acero por el contacto con el aire.

1.4.2. Zona de reparación de ollas: Antes de cada colada las ollas son transportadas a la zona de reparación donde se analiza el estado del recubrimiento refractario y en caso de que esté muy desgastado o haya cumplido su vida útil es removido y se coloca un recubrimiento nuevo. En esta área las ollas se precalientan cuidadosamente con el fin de mantener la temperatura en el acero líquido y evitar un enfriamiento prematuro en este.

1.4.3. Torre de Porta ollas: Tiene dos espacios para colocar ollas, en la cual una está alimentando el acero al tundish y la segunda está en espera. Cuando el acero de la olla que lo alimenta se agota la torre gira 180° alrededor de su eje permitiendo

el rápido intercambio de ellas sin interrumpir el proceso, permitiendo secuencias de varias horas.

1.4.4. Tundish: También conocido como distribuidor, es un componente fundamental su función es almacenar de manera temporal el acero líquido proveniente de la olla y suministrar el acero de manera continua y uniforme manteniendo un flujo constante. Además, ayuda a la separación de inclusiones no metálicas mediante la filtración de impurezas hacia la escoria. Cuando la olla suministra tres cuartas partes del volumen del tundish se inicia el flujo hacia el molde. En el caso de Arcelormittal, el tundish tiene dos orificios de salida, que corresponden al número de líneas que tienen sus dos máquinas de colada continua.

1.4.5. Molde y sistema de oscilación. Está fabricado con cobre aleado, cuenta con un sistema de refrigeración por agua a alta presión, en este componente es donde se inicia la solidificación del acero, formando una cáscara sólida que permite la extracción del planchón.

Generalmente se adiciona un lubricante en el interior del molde para actuar como agente separador entre el acero y la superficie de cobre. Además, el molde tiene incorporado un sistema de oscilación complementario. Este sistema mediante movimientos cíclicos mejora la distribución del polvo colador de esta manera se tiene una solidificación uniforme y se reducen los defectos superficiales.

1.4.6. Sistema de refrigeración secundaria: Este es un sistema constituido por aspersores que da un rociado controlado de una mezcla de aire y agua aumentando la velocidad de enfriamiento para lograr una cristalización uniforme.

1.4.7. Rodillos de arrastre: Estos están alineados en serie para soportar y conducir el planchón de forma continua asegurando el movimiento estable del planchón a una velocidad constante, evitando desviaciones o vibraciones que afecten la geometría del material.

1.4.8. Mecanismo de corte de planchón: Este es el encargado de separar el planchón en la longitud requerida por el cliente o por el proceso. Normalmente el

corte se realiza mediante un soplete o equipo de oxicorte. Este constituye un sistema para que el corte sea perpendicular a la línea longitudinal del semiproducto.

1.5 ENSAYO DE TRACCIÓN ASTM E8/E8M.

El ensayo de tracción constituye la metodología para determinar propiedades mecánicas como: resistencia a la tracción, límite elástico y porcentaje de elongación. Estos parámetros permiten verificar que los rollos laminados cumplen con las especificaciones establecidas para sus respectivos grados.

En la figura 8 se muestra una probeta utilizada en el ensayo con medidas estandarizadas libres de muescas, marcas de vibración, ranuras, rebabas o cualquier otro defecto que afecte las propiedades que se van a medir, aseguran que las mediciones sean comparables y reproducibles. En este proyecto, los ensayos fueron aplicados en rollos resultantes de los planchones despuntados, comprobando que la reducción de longitud de corte no afecta la integridad mecánica del producto.



Figura 8.- Probeta montada en maquina universal.

CAPÍTULO II: OPTIMIZACIÓN DE DESPUNTE EN INICIO Y FIN DE SECUENCIA.

2.1 OPTIMIZACIÓN DE DESPUNTE EN INICIO Y FIN DE SECUENCIA.

En este proyecto se propone reducir la longitud de corte de despunte en planchones de acero de los grados C001-C005 producidos en la colada continua de Arcelormittal México durante los inicios y finales de secuencia sin comprometer la calidad del producto final, donde en la práctica operativa estándar los extremos de los planchones son removidos mediante el despunte con el objetivo de eliminar las zonas afectadas por defectos asociados al arranque y cierre de colada. Sin embargo, esta práctica implica una pérdida de material impactando el rendimiento del proceso.

Para lograr la reducción se llevaron a cabo dos pruebas (Piloto y Formal) bajo condiciones reales de operación, dando seguimiento de los planchones desde su producción hasta el HSM, en el cual se inspeccionaron visualmente y se verificaron sus propiedades mecánicas. Asimismo, se llevó una trazabilidad física y documental, apoyado del marcado del sentido del planchón, para tener una asociación de los resultados obtenidos y su origen en la colada continua.

2.2 DESPUNTE EN INICIO Y FINAL DE SECUENCIA EN COLADA CONTINUA.

El despunte es la práctica mediante la cual se elimina un tramo de planchón que, por condiciones inherentes al proceso, presenta mayor presencia o probabilidad de defectos. Los planchones de inicio y fin de secuencia son particularmente críticos porque: En el inicio, la velocidad y temperatura aún no están estabilizadas, la garra utilizada para arrancar la colada genera turbulencia e inclusiones. En el fin de secuencia, la solidificación es irregular debido a la reducción del nivel de acero líquido almacenado en el tundish, generando problemas como rechupes.

El protocolo operativo que se maneja en Arcelormittal es aplicar despuntes de 1.5 metros después de la garra en los planchones de inicio y 2 metros en los planchones de fin para minimizar la cantidad de defectos que lleguen al HSM. Sin embargo, con este proyecto se demuestra que, bajo condiciones operativas controladas. Podría ser viables reducir la longitud de despunte sin afectar la calidad del planchón y del rollo.

2.3 VARIABLES DE LAS PRUEBAS.

Para el desarrollo del proyecto se identificaron las variables con base a su influencia sobre la calidad del planchón y el desempeño de la colada durante los inicios y finales dando validez del análisis y los resultados obtenidos.

- **Longitud de despunte del planchón (cm)** Esta corresponde a la longitud de material recortado en el extremo del planchón, tanto en el inicio como en el final de secuencia, la medida corresponde 50 cm después de la garra. Esta variable depende de la presencia o ausencia de defectos superficiales presentes en la zona de despunte. La longitud estándar de despunte era de 150 cm y se busca una longitud reducida a 100 cm en ambos casos ya sea inicio y final.
- **Velocidad promedio de colada** Esta afecta el equilibrio térmico del molde y el espesor de la cascara solidificada, velocidades excesivamente altas pueden generar cascara delgadas y defectos superficiales, mientras que velocidades bajas incrementan el riesgo de una solidificación irregular.
- **Velocidad mínima de colada durante el arranque** Durante el arranque de secuencia, la velocidad mínima es crítica, ya que define el comportamiento inicial del acero líquido en el molde. Variaciones abruptas en esta etapa se asocian con la aparición de grietas longitudinales y atrapamiento de polvo generando inclusiones.
- **Cantidad total de aluminio adicionado** El aluminio actúa como desoxidante, sin embargo, concentraciones altas favorecen la formación de inclusiones de alúmina, las cuales tienden a quedar atrapadas en la zona de arranque del planchón.

2.4 PERIODO DE PRUEBA.

La prueba piloto se realizó en los meses de enero y febrero de 2024 contemplando un periodo de dos semanas de análisis y presentación de resultados para la aprobación de una segunda prueba siendo la definitiva, posteriormente con la siguiente parte del proyecto aprobada, se contempló la producción de los grados estudiados del mes de marzo de 2024 para esta fase. Sin embargo, el periodo para la segunda prueba se extendió hasta el mes de abril de 2024 debido a un paro extraordinario de operaciones en el área de acería eléctrica, donde se dio otro mes para finalizar con la proyección de los resultados.

2.5 PLANCHONES ESTUDIADOS.

Los planchones estudiados para la prueba piloto fueron 16 de los cuales solo 13 cumplieron con los criterios de inspección para su seguimiento completo. Posteriormente cuando se llevó a cabo la segunda prueba, la cantidad de planchones a estudiar se amplió a todos los planchones de inicio y fin de secuencia producidos de los grados (C001, C002, C003, C004, C005) en las máquinas de colada continua destinados a ser laminados en el HSM, descartando automáticamente a los que no cumplan con los criterios requeridos para el estudio.

2.6 FORMACIÓN DE DEFECTOS EN COLADA CONTINUA.

Uno de los principales desafíos a los que se enfrenta el proyecto es la aparición de defectos en los planchones. Los cuales comprometen la calidad del producto final representando grandes pérdidas significativas en desperdicio, despuntes y retrasos por trabajos de reacondicionamiento de los planchones. La presencia de defectos afecta tanto los costos de operación como la eficiencia del proceso (10).

Los defectos en planchones pueden originarse en el inicio de la secuencia, cuando las condiciones térmicas son más inestables debido a las altas tensiones y gradientes de temperatura generados dentro del molde, fluctuaciones de velocidad, composición química inadecuada o lubricación deficiente. Estos defectos pueden generar problemas en procesos posteriores, como la laminación en caliente. Los defectos se clasifican en dos grupos: Superficiales e internos (11).

2.6.1 DEFECTOS SUPERFICIALES.

Estos defectos generalmente se originan durante las etapas iniciales de solidificación y extracción del planchón, donde las variables térmicas o tensiones mecánicas generan discontinuidades visibles en la superficie del planchón las cuales pueden propagarse durante la laminación en caliente, comprometiendo la calidad del producto final. Entre los defectos más comunes se encuentran:

- **Inclusiones de escoria:** Se generan cuando durante la colada continua, el polvo colador se deposita sobre la superficie del acero líquido dentro del molde, donde se funde y forma una capa de escoria sobre el acero líquido sin embargo en ciertos casos esta escoria se captura en la zona de salida del molde y al avanzar la solidificación (11), se cristaliza dentro de la cáscara del planchón generando lo que se conoce como inclusiones de polvos o inclusiones de escoria como se muestra en la figura 9.



Figura 9.- Escoria atrapada en cara superior de planchón.

- **Grietas transversales y longitudinales:** Estas se generan porque el proceso de colada continua tiene gran predisposición de generar grietas en los planchones, las cuales representan uno de los defectos más costosos en el proceso, frecuentemente es lo que implica despuntes, rechazos o reacondicionamientos, Estas pueden aparecer tanto en dirección longitudinal como transversal como se muestra en las figuras 10, 11, y 12. La alta disipación de calor produce gradientes de temperaturas generando tensiones

en los planchones, así como altos niveles de aluminio, nitrógeno, azufre y cobre que generan más grietas. Si estas son superficiales suelen ser corregidas con desbaste o con el proceso de escarpeado, si son grietas internas se puede llegar a rechazar el planchón (13).

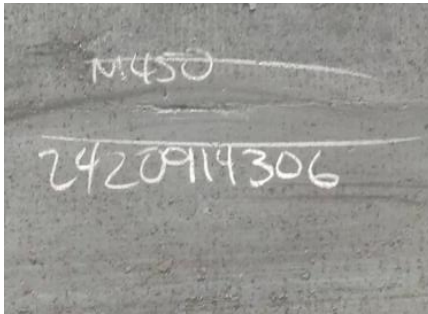


Figura 11.- Grieta Longitudinal.



Figura 12.- Grieta Transversal.



Figura 10.- Grieta transversal.

- **Variaciones de velocidad (Ondulaciones):** Normalmente aparecen como ondulaciones en la superficie del planchón. Su formación está relacionada con el comportamiento termo mecánico durante la solidificación, cuando el acero se somete a una compresión o tracción excesiva generada por la inestabilidad en la velocidad de colado o variaciones repentinas en la extracción del planchón (14) rebasando la resistencia mecánica de la cascara. Además, velocidades elevadas pueden intensificar estos fenómenos al alterar el ritmo de solidificación de la cascara. Por lo general estos defectos se localizan en la zona inicial del planchón, donde la solidificación no ha alcanzado una cascara gruesa (15).

2.6.2 DEFECTOS INTERNOS.

Estos defectos se relación con irregularidades en la estructura del acero que no son visibles a simple vista, pero que pueden afectar significativamente sus propiedades mecánicas. Estos defectos se originan principalmente por fenómenos asociados a

la solidificación del metal líquido y suelen manifestarse durante la laminación. Para la elaboración del proyecto solo se estudió la presentación de segregación.

La segregación se presenta cuando los mecanismos de difusión no son capaces de homogeneizar completamente la composición química del acero durante la solidificación, creando heterogeneidades químicas dentro del planchón, como resultado, se forman zonas con concentraciones altas de distintos solutos en comparación con otras regiones del material.

Durante el cambio de fase de líquido a sólido, el metal que tiende a solidificarse en primer lugar tiende a presentar un menor contenido de soluto, conforme se solidifica la concentración de soluto aumenta progresivamente en la fase sólida, este fenómeno genera variaciones en la composición química, produciendo propiedades físicas y mecánicas que no son uniformes (15). La figura 13 presenta una macrografía realizada a un planchón para detectar presencia de segregación.

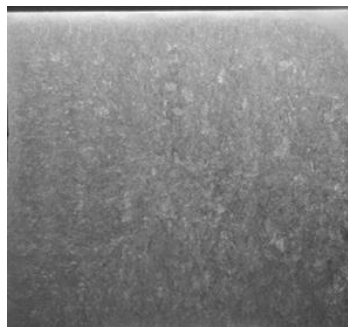


Figura 13.- Macrografía para detectar segregación.

2.7 INSPECCIÓN VISUAL.

Se efectuó una inspección visual en el patio de planchones de colada continua, antes del envío al HSM, con el objetivo de identificar defectos superficiales críticos en la superficie de los planchones seleccionados para la prueba tales como:

- Grietas Longitudinales y transversales
- Inclusiones de polvo visibles
- Ondulaciones (Variaciones de velocidad)

Para la inspección visual se tuvo el apoyo del personal calificado del área de calidad, siguiendo los criterios internos.

Al igual que en el área de inspección visual se verificaron las dimensiones del planchón, mediante cintas métricas calibradas como se observa en la figura 14. Donde se registraron las diferentes longitudes; total de planchón, de la garra, despunte y de presencia de defectos.



Figura 14.- Medición dimensional de planchón.

Estos datos permitieron descartar planchones donde los defectos están presentes 100 cm después de la garra, asimismo cuantificar con precisión el volumen de acero despuntado y recuperado. Estos datos se registraron en formatos con diagramas de los planchones de inicio y final proporcionadas por el área operativa como se muestra en la figura 15.

Grado C003

DIAGRAMA DE PLANCHONES INICIO DE SECUENCIA

INSPECTOR: Zaid M G FECHA: 16/enero/24 ArcelorMittal
 PLANCHON: 10563 307 TURNO: B CARA: Superior

Desp 12300

PUNTA

500

Garra

1300

210

360

500

CORTE 7640

COLA

OBSERVACIONES: _____

Desp 12400

PUNTA

500

Garra

12400

210

360

500

CORTE 7600

COLA

PLANCHON: 24 10563 401 CARA: Superior

OBSERVACIONES: _____

Figura 15.- Formato de registro de inspección visual.

2.8 ENSAYO DE TRACCIÓN.

Los ensayos de tracción se realizaron conforme a la norma ASTM E8/ E8M, utilizando probetas extraídas de la punta de los rollos obtenidos a partir de los planchones evaluados. Las principales propiedades analizadas fueron

- Límite elástico
- Resistencia mecánica
- Porcentaje de elongación

2.9 REGISTRO OPERATIVOS DEL PROCESO DE COLADA CONTINUA.

Estos registros contribuyeron como una fuente de información para el desarrollo de este proyecto, permitiendo documentar y correlacionar las condiciones reales de operación con la calidad de los planchones evaluados. La recopilación de estos datos se realizó a partir de los sistemas de control y monitoreo de proceso de colada continua, los cuales en conjunto con el personal del área registran de manera continua los principales parámetros con los cuales la colada continua opera en cada planchón, colada y secuencia.

Los parámetros considerados para este estudio fueron:

- Velocidad mínima y promedio de colada
- Cantidad de aluminio adicionado durante la colada.
- Numero de colada, secuencia y planchón, lo que permitió la trazabilidad a través del proceso de los planchones evaluados.
- Fecha y turno de fabricación, para el seguimiento en tiempo y forma de los planchones.

Estos registros fueron útiles para verificar que las condiciones operativas en las que se produjeron los planchones incluidos en el estudio. Asimismo, la información permitió relacionar entre los parámetros de colada continua y los resultados de la inspección visual de planchones que cumplían con los parámetros de despunte de 100 cm y con los que no los cumplían, fortaleciendo el análisis del impacto de la reducción de longitud del despunte.

2.10 PROCEDIMIENTO.

El procedimiento que se siguió para el presente proyecto fue diseñado en conjunto con el personal de diferentes áreas operativas para garantizar la trazabilidad completa de los planchones evaluados, desde su producción en la colada continua hasta la validación del rollo como producto final en el laminado en caliente. El desarrollo del estudio se llevó en etapas, permitiendo una evaluación objetiva del impacto de la reducción en la longitud del despunte. Asegurando que los resultados sean verificables.

2.10.1 ETAPA 1. DIAGNOSTICO DE ESTADO DE DESPUNTE.

Como primera etapa se realizó un diagnóstico del estado actual del proceso de colada continua y los despunte de planchones, con el objetivo de establecer una base que permitiera comparar la práctica estándar de despunte con la propuesta de optimización.

En esta etapa se revisaron los registros de planchones inspeccionados mensualmente donde se encontraron los porcentajes promedios de despunte en los aceros de los grados estudiados, lo cual permitió un análisis del impacto económico asociado a los despunte y al desperdicio de acero generado por la

longitud vigente. Lo que permitió justificar la necesidad del estudio y definir el alcance del mismo. Evitando intervenir en grados o condiciones que no represente un impacto significativo.

2.10.2 ETAPA 2: IMPLEMENTACIÓN DE PRUEBA PILOTO.

Con base a lo anterior se solicitó la implementación de una prueba piloto, con un número definido de planchones proporcionados, con el objetivo de evaluar preliminarmente la factibilidad de reducir la longitud de despunte de 150 cm a 100 cm. En esta etapa se diseñó un mecanismo inicial, previo a la prueba formal, con el cual se procedió para identificar los defectos, como proceder y los departamentos de apoyo.

Para la prueba piloto se asignaron 16 planchones a los cuales se les realizó una inspección visual detallada en la zona inmediata posterior al corte, con el objetivo de identificar la presencia de defectos superficiales críticos que pudieran comprometer la aceptación del planchón para su procesamiento posterior. La inspección se llevó a cabo en el patio de planchones, antes del envío al laminador caliente.

En la revisión se consideró la presencia de: Grietas longitudinales y transversales, inclusiones visibles, ondulaciones superficiales. Teniendo en cuenta la continuidad del defecto, su profundidad aparente y la ubicación respecto al extremo del planchón. Únicamente 13 planchones cumplieron con la ausencia de defectos posteriores a los 100 cm de despunte, descartando los 3 restantes.

Una vez inspeccionados los planchones, se aplicó el despunte reducido a 100 cm, medido a partir de 50 cm después de la garra en los planchones de inicio de secuencia y desde el extremo final del planchón en los de cierre de secuencia como lo muestra la figura 16.

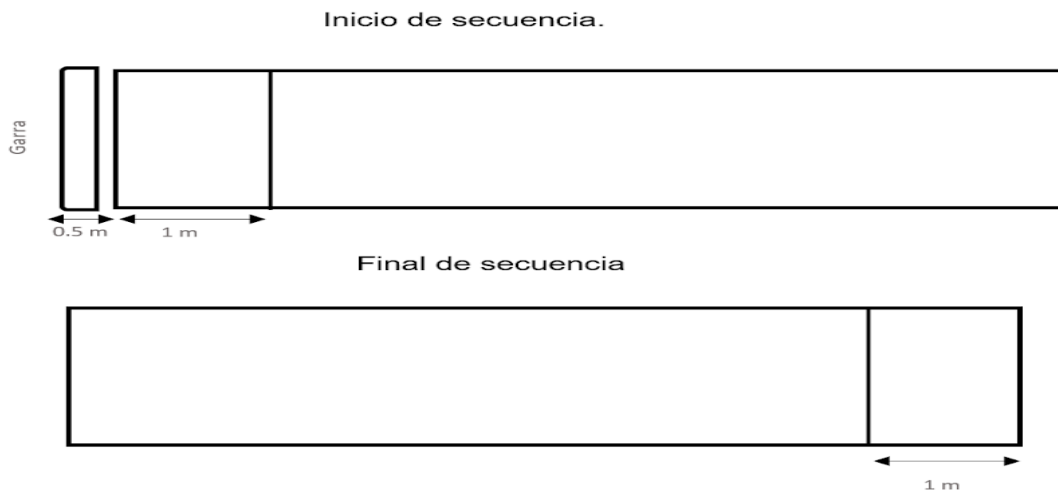


Figura 16.- Despunte de planchones.

Durante la implementación de la prueba piloto, se llevó un registro sistemático y estructurado de toda la información relevante asociada a los planchones evaluados, con el propósito de tener la trazabilidad completa de cada planchón junto a evidencias. La recolección de los datos se realizó desde el momento que los planchones fueron seleccionados hasta la aplicación del despunte reducido pasando la validación inicial de la calidad superficial del planchón. Permitiendo documentar de manera objetiva las condiciones bajo las cuales se evaluó la reducción de la longitud de corte.

Por cada planchón incluido en la prueba piloto se documentaron, como mínimo los siguientes datos:

- Identificación única de cada planchón (ID), vinculada al número de colada, numero de secuencia, fecha de colada, máquina y línea en la que fue producido.
- Grado de acero (C001, C002, C003, C004, C005)
- Condición del planchón: especificando si el planchón correspondía a inicio o fin de secuencia.
- Dimensiones del planchón y longitud de despunte aplicado expresado en milímetros.

- Decisión de aceptación o exclusión del planchón para continuar en la prueba piloto.

La información recopilada fue organizada en un formando de registro mostrado en la Tabla 2, lo que permitió consolidar los datos en tablas comparativas y facilitar su análisis posterior. Con esto se evitó la dispersión de información y errores de registros incompletos.

Tabla 1.- Registro de la prueba piloto

N o	Colada	Grado	Planchón	Despunte	Longitud total mm	Espesor mm	Ancho punta mm	Ancho Cola mm	Garra mm	Longitud real mm
1	2420103	C004	2420103101	Inicio	9560	224	1547	1550	620	8500
2	2420103	C004	2420103201	Inicio	11910	224	1230	1236	910	10970
3	2430121	C005	2430121401	Inicio	11230	224	1225	1239	330	9500
4	2430121	C005	2430121301	Inicio	11200	224	1227	1237	330*	9640
5	2430128	C004	2430128204	final	10300	224	1230	1222	--	9270
6	2430129	C001	2430129201	inicio	12140	224	1238	1245	390	10370
7	2430129	C001	2430129101	inicio	11970	224	1230	1235	330	10400
8	2430133	C004	2430133101	inicio	11300	224	1240	1238	420	9800
9	2430133	C004	2430133201	inicio	12150	224	1245	1247	750	10550
10	2430136	C001	2430136301	inicio	10060	224	1370	1380	290	8740
11	2430136	C001	2430136401	inicio	10820	224	1250	1260	200	9530
12	2430140	C001	2430140301	inicio	9900	224	1360	1370	300	7740
13	2430140	C001	2430140401	inicio	11470	224	1222	1230	260	10170

2.10.3 ETAPA 3. EJECUCIÓN DE PRUEBA FORMAL DE CORTE A 1 METRO EN GRADOS BAJO CARBONO.

Una vez validada la factibilidad de la reducción del despunte mediante la prueba piloto, se procedió a la ejecución de la prueba formal, cuyo objetivo fue evaluar de manera representativa el impacto de la reducción de la longitud de despunte bajo condiciones normales de producción, asegurando la confiabilidad de los resultados obtenidos. Esta etapa fue la más importante del proyecto, ya que confirmó que la optimización propuesta podía implementarse sin afectar la calidad del producto.

Para esta prueba se amplió el conjunto de planchones de inicio y fin de secuencia correspondientes a los grados bajo carbono C001, C002, C003, C004, C005, producidos durante todas las coladas y turnos producidos en los meses de marzo y abril, con el propósito de analizar los resultados bajo todas las condiciones operativas posibles. La selección de los planchones aceptados para la prueba considero la ausencia de defectos críticos después de los 100 cm de despunte.

Durante esta ejecución se implementó el seguimiento continuo de cada planchón evaluado, para tener localizado físicamente el material desde su producción en la máquina de colada continua hasta su procesamiento final en el (HSM). En el cual se incluyó

- **Monitoreo del planchón en patios:** Verificando su condición superficial, su correcta identificación mediante número único de planchón, el estatus del despunte. Una vez aplicado el despunte a 100 cm cada planchón seleccionado fue identificado y marcado físicamente con una flecha en el patio de planchones como se muestra en la figura 17, identificado la orientación en la que el planchón será cargado en los hornos de precalentamiento para su procesamiento en el laminador.



Figura 17.- Marca de orientación de carga del planchón.

- **Seguimiento en el patio de planchones:** Este se dio durante el almacenamiento temporal de los planchones en el patio, verificando que los planchones marcados permanecieran correctamente identificados y que la marca del sentido no se perdiera. Registrando la ubicación del planchón en el patio. Este control evitó la pérdida de ubicación de los planchones de prueba y confusiones con el material producido fuera de ésta.

Durante el traslado previo a la carga de los planchones al HSM, se corroboró nuevamente la orientación del planchón mediante el marcado con fleca, asegurando que el extremo correspondiente al inicio o fin de secuencia sea identificado para la obtención de la probeta para la prueba de tensión y ese sea el sentido de cargado del planchón al HSM como se ve en la Figura 18.



Figura 18.- Carga de planchón al HSM

Una vez laminados los planchones se realizó la evaluación de la calidad final de los rollos con la finalidad verificar que la reducción de la longitud de despunte aplicada

no afecte la calidad superficial ni mecánica del acero laminado. Esta etapa fue el cierre del seguimiento de los planchones.

Con los rollos ubicados en el patio de almacenamiento fueron inspeccionados visualmente con el fin de identificar posibles defectos superficiales en la zona correspondiente a la reducción de despunte como se observa en la Figura 19.



Figura 19.- Rollo de acero inspeccionado.

Finalmente, como parte de la validación de los rollos, se realizaron ensayos de tracción conforme la norma ASTM E8/E8M, utilizando probetas extraídas de la zona correspondiente al despunte. Los valores obtenidos fueron comparados con los rangos establecidos, confirmando que la reducción de despunte no afectó la integridad del material.

Durante esta prueba se estableció un sistema de recolección de datos y trazabilidad, con el objetivo de asegurar el seguimiento continuo de cada planchón evaluado, desde su producción en colada continua hasta su transformación final en el laminador en caliente.

La trazabilidad de los planchones incluidos en la prueba se aseguró mediante la vinculación de información operativa, registros físicos y observaciones de calidad, cada planchón fue asociado a: Numero de colada, condición del planchón (Inicio o fin de secuencia), Grado de acero, dimensiones del planchón, despunte aplicado y ahorro en toneladas de acero plasmado en la tabla 2.

Tabla 2.- Registro de planchones de prueba.

Planchón	Despunte	Longitud total mm	Espesor mm	Ancho mm	Despunte mm	Ahorro mm	Toneladas acero ahorrado
2410592101	Inicio	10360	1175	224	1500	500	01.04
2410592201	Inicio	7900	1235	224	1500	500	01.09
2430718103	Final	10800	1175	224	1000	1000	02.07
2430774101	Inicio	8100	1581	224	1140	860	2.40
2410806106	Final	6610	1551	224	1000	1000	2.73

Durante la prueba se recolectaron los datos de las condiciones operativas relevantes de la colada continua, con el fin de tener una relación de los resultados obtenidos con las condiciones operativas de los planchones aceptados y rechazados. Entre los principales parámetros registrados incluyeron: Velocidad promedio y mínima de colada, adiciones totales de aluminio siendo registrados en la Tabla 3.

Tabla 3.- Parámetros operativos de colada continua.

Planchón	Colada	Despunte	Grado	Velocidad promedio (mm/s)	Velocidad Mínima (mm/s)	Aluminio (ppm)	Aluminio Soluble (ppm)
2430774101	2430774	Inicio	C002	617.548	0	265	244
2430774201	2430774	Inicio	C002	845.925	375	265	244

Toda la información correspondiente a los planchones inspeccionados fue documentada en la tabla 4, creando un historial claro de la prueba. Esta organización facilitó el análisis posterior de los datos y su correlación con los resultados presentados en el siguiente capítulo. La integración de toda la información permitió construir una base de datos confiable reduciendo el riesgo de errores de interpretación.

Tabla 4.- Registro de planchones para la prueba formal.

Colada	Grado	Planchón	Fecha de rolado	Id de rollo	Tipo	%EL Min 23%	Límite Fluencia Kpsi Min 36	Resistencia a la tracción Kpsi Min 58 - 80 Max	Toneladas acero ahorrado	USD Ahorrados
2410592	C001	2410592101	14/03/2024	411R082	SAE1008	Por ser grado comercial no requiere ensayo			1.04	\$496.10
2410592	C001	2410592201	15/03/2024	411P033	SAE1008	Por ser grado comercial no requiere ensayo			1.09	\$521.43
2430774	C002	2430774101	18/04/2024	416D027	SAE1008	Por ser grado comercial no requiere ensayo			2.40	\$1,148.12
2410806	C002	2410806203	10/04/2024	415K086	SAE1008	Por ser grado comercial no requiere ensayo			1.70	\$814.86
2420843	C001	2420843401	06/04/2024	414M077	SAE1006	Por ser grado comercial no requiere ensayo			1.04	\$496.10
2410819	C005	2410819201	14/04/2024	415U006	A36	25	51	73	1.09	\$521.43

CAPÍTULO III RESULTADOS.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la implantación de la reducción de la longitud de despunte de los planchones de inicio y fin de secuencia, de 150 cm a 100 cm, en los grados C001, C002, C003, C004, C005 producidos en las máquinas de colada continua de Arcelormittal México.

3.1 INSPECCIÓN VISUAL DE PLANCHONES DE INICIO Y FINAL DE SECUENCIA.

Todos los planchones de inicio y fin de secuencia fueron sometidos a la inspección visual en el patio de planchones antes de su envío al HSM, donde se clasificaban los que cumplían con los requerimientos para la prueba y los que no. Los defectos que se le evaluaron fueron: Grietas longitudinales, grietas transversales, inclusiones, ondulaciones.

Los resultados mostraron que los planchones seleccionados no mostraron defectos superficiales críticos que no se pudieran reparar con reacondicionamiento y no comprometiera su aceptación del planchón para su laminación. Durante la prueba piloto se inspeccionaron 16 planchones donde 13 no presentaron defectos en la zona evaluada. En el periodo de la prueba formal se produjeron alrededor de 359 planchones de inicio y final de secuencia donde 29 planchones fueron aceptados para la prueba formal.

Tabla 5.- Planchones evaluados durante el seguimiento.

Producción de planchones Marzo - abril 2024			
Planchones aceptados durante el seguimiento		Planchones producidos durante el seguimiento	
Inicios	17	Inicios	179
Finales	12	Finales	180
Total	29	Total	359

3.2 OPERATIVOS DE LA COLADA CONTINUA.

Durante la prueba formal se analizaron las condiciones operativas registradas en la producción de algunos planchones correspondientes a los grados estudiados, se muestran en las tablas 6, 7, 8, y 9 clasificadas por grado las condiciones de trabajo

bajo las cuales fueron producidos; donde las celdas sombreadas indican los planchones aprobados para la prueba.

Grado C001.

Tabla 6.- Condiciones operativas grado C001.

Planchón	Colada	Fecha	Despunte	Grado	Velocidad Promedio (mm/s)	Velocidad Mínima (mm/s)	Aluminio (ppm)	Aluminio Soluble (ppm)
2410592101	2410592	03/10/2024	Inicio	C001	737.726	351	271	253
2410592201	2410592	03/10/2024	Inicio	C001	881.614	0.38	271	253
2420843301	2420843	3/28/2024	Inicio	C001	809.202	0.39	305	263
2420843401	2420843	3/28/2024	Inicio	C001	917.146	313	305	263
2410979101	2410979	04/11/2024	Inicio	C001	709.639	336	203	179
2410886201	2410886	04/03/2024	Inicio	C001	748.246	0	323	286
2421104401	2421104	4/23/24	Inicio	C001	897.583	321	312	299
2421166101	2421166	4/29/2024	Inicio	C001	866.989	0	367	342

Grado C002.

Tabla 7.- Condiciones operativas grado C002.

Planchón	Colada	Fecha	Despunte	Grado	Velocidad Promedio (mm/s)	Velocidad Mínima (mm/s)	Aluminio (ppm)	Aluminio Soluble (ppm)
2430774101	2430774	3/28/2024	Inicio	C002	617.548	0	265	244
2430774201	2430774	3/28/2024	Inicio	C002	845.925	375	265	244
2420859401	2420859	3/30/2024	Inicio	C002	815.818	376	327	292
2421135201	2421135	4/26/2024	Inicio	C002	777.809	402	485	437

Grado C003.

Tabla 8.- Condiciones operativas grado C003.

Planchón	Colada	Fecha	Despunte	Grado	Velocidad Promedio (mm/s)	Velocidad Mínima (mm/s)	Aluminio (ppm)	Aluminio Soluble (ppm)
2420839304	2420839	3/28/2024	Final	C003	105.894	1.041	434	424
2420839406	2420839	3/28/2024	Final	C003	1.052	1.043	434	424

2410855205	2410855	3/28/2024	Final	C003	1.060	1.052	408	394
2410567301	2410567	03/08/2024	Final	C003	692.921	0.39	339	29

Grado C004.

Tabla 9.- Condiciones operativas grado C004.

Planchón	Colada	Fecha	Despunte	Grado	Velocidad promedio (mm/s)	Velocidad Mínima (mm/s)	Aluminio (ppm)	Aluminio Soluble (ppm)
2430940201	2430940	4/16/2024	Inicio	C004	70.552	385	27	248
2411062101	2411062	4/16/2024	Inicio	C004	717.514	0	395	377
2431060101	2431060	4/19/2024	Inicio	C004	678.049	0	366	33
2431157201	2431157	4/27/2024	Inicio	C004	748.431	415	431	414

Grado C005.

Tabla 10.- Condiciones operativas grado C005.

Planchón	Colada	Fecha	Despunte	Grado	Velocidad promedio (mm/s)	Velocidad Mínima (mm/s)	Aluminio (ppm)	Aluminio Soluble (ppm)
2410819201	2410819	3/29/2024	Inicio	C005	0,8474653	0,38	0,0425	0,0403
2410823105	2410823	3/29/2024	Final	C005	0,996375	0,986	0,0535	0,0527

3.3 PROPIEDADES MECÁNICAS.

Los ensayos de tracción realizados conforme a la norma ASTM E8/E8M muestran que las propiedades mecánicas del material evaluado en la prueba piloto se observan en la tabla 10 y los resultados de la prueba formal registrados en la tabla 11 se mantuvieron dentro de los rangos especificados para los grados laminados.

Tabla 11.- Resultados de ensayos mecánicos de la prueba piloto.

Grado	Planchón	Tipo	Ensayos de tracción laboratorio		
			%EL	Límite Fluencia (Ksi)	Resistencia a la tracción (Ksi)
C004	2420103101	A36	33	44	66
C004	2420103201	A36	31	45	66
C005	2430121401	A36	25	55	75

C005	2430121301	A36	33	49	70
C004	2430128204	SS36 T2	36	67	46
C004	2430133101	A36	34	40	63
C004	2430133201	A36	36	43	64

Tabla 12.- Resultados de ensayos mecánicos de la prueba formal.

Grado	Planchón	Tipo	Ensayos de tracción laboratorio		
			%EL (Min 23%)	Límite Fluencia (Ksi) Min 36	Resistencia a la tracción (Ksi) Min 58 - 80 Max
C001	2410592101	SAE1008	Por ser grado comercial no requiere ensayo		
C001	2410592201	SAE1008	Por ser grado comercial no requiere ensayo		
C005	2410819201	A36	25	51	73
C005	2410823105	A36	32	53	72
C005	2430787203	A36	27	54	73
C004	2430940201	A36	32	44	64
C004	2411062101	A36	31	45	65
C005	2411086101	A36	30	51	71
C004	2421039104	SS36 T2	30	46	65
C005	2430888201	A36	34	47	72
C004	2431035201	A36	31	48	65
C005	2431047104	A36	29	53	74
C005	2431066401	SS45	29	53	71

3.4 ANÁLISIS DE AHORRO DE MATERIAL.

La reducción de la longitud de despunte de 150 cm a 100 cm representó en promedio un ahorro de 50 cm por planchón lo que permitió la disminución del material descartado en los planchones de inicio y fin de secuencia. Considerando las dimensiones promedio de los planchones y la densidad del acero de 7.87 t/m³ se calcularon las toneladas aproximadas ahorradas por cada planchón evaluado como se muestra en la tabla 12 donde en promedio por cada 50 cm de despunte ahorrado representa una tonelada de metal.

Tabla 13.- Ahorros por planchón.

Planchón	Despunte	Long	Espesor	Ancho	Despunte	Ahorro	Toneladas	USD
----------	----------	------	---------	-------	----------	--------	-----------	-----

		total mm	mm	mm	mm	mm	acero ahorrado	Ahorrados
2410592101	Inicio	10360	1175	224	1500	500	01.04	\$496.10
2410592201	Inicio	7900	1235	224	1500	500	01.09	\$521.43
2430718103	Final	10800	1175	224	1000	1000	02.07	\$992.19
2430774101	Inicio	8100	1581	224	1140	860	2.40	\$1,148.12
2410806106	Final	6610	1551	224	1000	1000	2.73	\$1,309.69
2410806203	Final	11030	965	224	1000	1000	1.70	\$814.86
2420843301	Inicio	8490	1085	224	1200	800	1.53	\$732.96
2420843401	Inicio	9380	1175	224	1500	500	01.04	\$496.10
2410819201	Inicio	10730	1235	224	1500	500	01.09	\$521.43
2410823105	Final	9680	1235	224	1000	1000	2.18	\$1,042.86
2420839304	Final	11080	1235	224	1000	1000	2.18	\$1,042.86
2420839406	Final	7360	1085	224	1000	1000	1.91	\$916.20
2430787203	Final	10630	1235	224	1000	1000	2.18	\$1,042.86
2430940201	Inicio	8200	1550	233	1200	800	2.27	\$1,089.15
2410855205	Final	8960	224	1551	1000	1000	2.73	\$1,309.69

Al multiplicar el ahorro de material durante la prueba con el valor promedio del acero en el mes de mayo 2024 (479 USD/Ton) se obtuvo el ahorro económico de planchón como se muestra en la tabla 14 donde se indican los resultados del ahorro de material y el benéfico económico.

Tabla 14.- Ahorros durante el seguimiento.

Planchones	Planchones	Toneladas	USD
Inicios	17	22	\$10.529
Finales	12	27	\$12.813
Total	29	49	\$23.342

Contemplados los resultados se calculó la oportunidad de ahorro de material con la prueba si se consigue el 100% de efectividad en los planchones iniciales y finales de todas las secuencias fabricadas en el periodo de la prueba, en la tabla 15 se indican los resultados.

Tabla 15.- Oportunidad de ahorros con 100% de efectividad.

Planchones	Planchones	Toneladas	USD
Inicios	179	231	\$110.863
Finales	180	401	\$192.189
Total	359	633	\$303.052

Extrapolando el ahorro de material durante la prueba a la producción de varios meses de planchones de los grados estudiados, se estimó una reducción porcentual significativa en el acero enviado a chatarra por despuntes mostrado en la figura 20, lo que se refleja en un incremento del acero embarcado como se observa en la figura 21. Los datos de los resultados mensuales se plasman en la tabla 16.

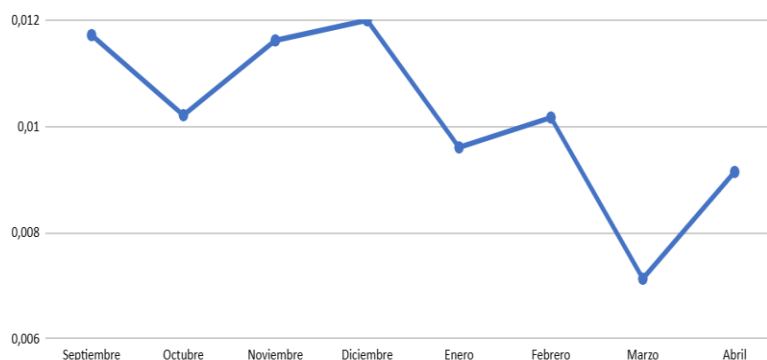


Figura 20.- Acero despuntado.

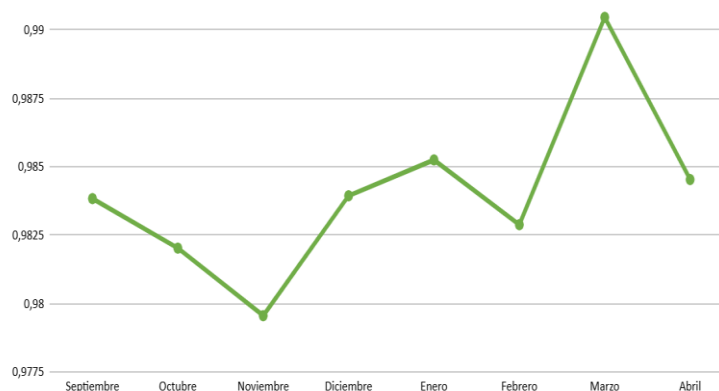


Figura 21.- Acero embarcado.

Tabla 16.- Mensuales de inspección.

Mes	% Despunte	% Embarcado
Septiembre	1,17%	98,38%
Octubre	1,02%	98,20%
Noviembre	1,16%	97,96%
Diciembre	1,20%	98,39%
Enero	0,96%	98,52%
Febrero	1,02%	98,29%
Marzo	0,71%	99,05%
Abril	0,91%	98,45%

3.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

El objetivo general de este trabajo es optimizar la longitud de despunte de los planchones de inicio y fin de secuencia de 150 cm a 100 cm garantizando el cumplimiento de los criterios de calidad superficial, interna y mecánica. Los resultados obtenidos demuestran que la reducción del despunte no generó defectos críticos en los planchones ni en los rollos laminados, lo cual indica que la longitud de corte utilizada puede tener un margen seguridad para evitar la presencia de defectos.

Desde el punto de vista metalúrgico, este comportamiento es consistente con lo descrito en el marco teórico, donde se describe que los defectos asociados al arranque de la máquina colada se concentran en los primeros centímetros del planchón, en especial en la zona afectada por la garra y la inestabilidad del flujo metálico. Al despuntar a 100 cm después de la garra, se remueve la zona sin incurrir en desperdicio excesivo de material.

La inspección visual mostró que la mayoría de los planchones no presentó defectos superficiales críticos después de la reducción de la longitud de corte, estos resultados indican que la zona crítica de defectos como grietas, inclusiones o ondulaciones fue eliminada con el despunte a 100 cm, La implementación de una marca indicando el sentido del planchón mediante una flecha permitió reforzar esta

conclusión, al facilitar la asociación de la ubicación de cualquier defecto superficial y su ubicación original respecto al inicio o fin de secuencia. La evaluación de la calidad superficial de los rollos procedentes de los planchones analizados cumplió con los criterios de aceptación establecidos por la empresa y el cliente.

Los resultados de los ensayos mecánicos demostraron que las propiedades mecánicas se mantuvieron dentro del rango especificado por los requerimientos del cliente. Esto confirma que la reducción de longitud en el despunte no afectó la integridad mecánica del material demostrando que la propuesta de optimización es compatible con los requerimientos mecánicos del producto.

Finalmente, la reducción de despunte representa una disminución directa del material descartado en los planchones de inicio y fin de secuencia. Este resultado implica una mejora en el rendimiento del proceso, al incrementar la longitud útil del planchón. Esta optimización contribuye a una mayor eficiencia en el uso de materia prima reduciendo costos económicos.

CONCLUSIONES.

A partir de los resultados obtenidos durante el desarrollo de este proyecto se permite concluir que es técnicamente viable reducir la longitud de despunte aplicado a los planchones de inicio y fin de secuencia producidos en la máquina de colada continua de Arcelormittal México, para los aceros de bajo carbono (C001, C002, C003, C004, C005), sin afectar la calidad del planchón ni del rollo como producto final.

La implementación de la prueba piloto y la prueba formal demostró que la reducción del despunte hasta 100 cm permite eliminar la zona inicial del planchón donde se concentran la mayoría de los defectos asociados al arranque de la colada, sin comprometer la calidad superficial ni las propiedades mecánicas del acero.

Asimismo, los ensayos de tracción realizados confirmaron que los rollos laminados cumplen con los criterios de calidad superficial y con las propiedades mecánicas para los grados laminados, validando que la optimización propuesta no compromete el desempeño mecánico del material.

Desde el punto de vista operativo y económico, la reducción de la longitud de despunte representa una oportunidad significativa para mejorar el rendimiento metálico del proceso productivo, ya que permite reducir la cantidad de acero descartado sin afectar la calidad del producto final.

La implementación de esta mejora podría generar beneficios importantes en términos de eficiencia productiva y aprovechamiento del material, ya que la reducción del despunte es una disminución directa del desperdicio de acero generado en el proceso. En operaciones de producción continua, reducciones aparentemente pequeñas en la longitud de despunte pueden traducirse en ahorros significativos de metal a lo largo del tiempo, lo que contribuye a mejorar la eficiencia del proceso siderúrgico.

Referencias:

- (1) <https://canacero.org.mx/acero-en-mexico/>
- (2) Secretaría de Economía. (2011). *Monografía del sector siderúrgico*. Gobierno de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/58939/Anexo_1_Monografia_Siderurgico.pdf
- (3) Secretaría de Economía. (s. f.). *Atuto Fe-Mich* [Proyecto minero]. Unidad de Coordinación de Actividades Extractivas, Dirección General de Desarrollo Minero. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/711775/Mc_Reno_Atuto_Fe-Mich.pdf
- (4) ArcelorMittal México. (2024). *Catálogo de productos largos* [Catálogo en PDF]. ArcelorMittal México. <https://mexico.arcelormittal.com/wp-content/uploads/2024/08/Catalogo-largos.pdf>
- (5) ArcelorMittal México. (s. f.). *Un vistazo de ArcelorMittal México*. ArcelorMittal México.
- (6) ArcelorMittal México. (2024). *Catálogo de aceros planos* [Catálogo en PDF]. ArcelorMittal México. <https://mexico.arcelormittal.com/wp-content/uploads/2024/08/Catalogo-planos.pdf>
- (7) Gavilánes Ruiz, D. A. (2016). *Diseño de una escoria sintética desulfurante para el proceso de producción del acero* [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital EPN. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/15187/1/CD-6962.pdf> pag5-8
- (8) Enríquez Berciano, J. L., & Tremps Guerra, E. (2009). *Colada del acero* (Monografías sobre tecnologías del acero, Parte II) [Documento PDF]. Universidad Politécnica de Madrid. https://oa.upm.es/1669/1/MONO_TREMPES_2009_01.pdf pag25
- (9) Enríquez Berciano, J. L., & Tremps Guerra, E. (2009). *Colada del acero* (Monografías sobre tecnologías del acero, Parte II) [Documento PDF]. Universidad Politécnica de Madrid. http://oa.upm.es/1669/1/MONO_TREMPES_2009_01.pdf pag 27-2
- (10) Thomas, B. G. (2003). *Review on modeling and simulation of continuous casting of steel*. **ISIJ International**. https://ccc.illinois.edu/PDF%20Files/Publications/2018_Papers/BGThomas%20Sim%20of%20CC%20SRI_2018%20online%20post.pdf
- (11) Zappulla, M. L. S. (2016). *Grade effects on thermal-mechanical behavior during the initial solidification of steel* (Master's thesis). University of Illinois at Urbana-Champaign. <https://hdl.handle.net/2142/92678> pag 6

- (12) Zappulla, M. L. S. (2016). *Grade effects on thermal-mechanical behavior during the initial solidification of steel* (Master's thesis). University of Illinois at Urbana-Champaign. <https://hdl.handle.net/2142/92678> pag 68
- (13) Zappulla, M. L. S., & Thomas, B. G. (2017). *Depression formation during continuous casting of steel: Mechanisms and analysis* (CCC annual report paper). Continuous Casting Consortium, The University of Illinois at Urbana-Champaign. https://ccc.illinois.edu/PDF%20Files/Publications/2017_Papers/17_TMS2017-Zappulla_Depression_Formation%20reprint%20v3.pdf pag3
- (14) Zappulla, M. L. S., & Thomas, B. G. (2017). *Depression formation during continuous casting of steel: Mechanisms and analysis* (CCC Annual Report Paper). Continuous Casting Consortium, The University of Illinois at Urbana-Champaign. https://ccc.illinois.edu/PDF%20Files/Publications/2017_Papers/17_TMS2017-Zappulla_Depression_Formation%20reprint%20v3.pdf pag 502
- (15) González-Rondón, Y., & Rengel-Hernández, J. E. (2021). *Comportamiento termo fluidodinámico del acero en un molde de colada continua: una revisión*. **Tecnológicas**, **24**(51), 230–262. <http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/v24n51/2256-5337-teclo-24-51-230.pdf>
- (16) Zappulla, M. L. S. (2016). *Grade effects on thermal-mechanical behavior during the initial solidification of steel* (Master's thesis). University of Illinois at Urbana-Champaign. <https://hdl.handle.net/2142/92678> (<https://www.ideals.illinois.edu/items/95097>)
- (17) Jörg Albert Josef Meyer. (2018, 24 de noviembre). *Final Part 6 Procesos Acereros: Solidificación, Colada Continua y Laminación*. LinkedIn. <https://es.linkedin.com/pulse/final-part-6-procesos-acereros-solidificaci%C3%B3n-colada-continua-meyer>