



**“EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA APLICACIÓN DEL SISTEMA DE
AGITACIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN LA PALANQUILLA FABRICADA EN
LA MÁQUINA DE COLADA CONTINUA DE LA EMPRESA SIDERÚRGICA DE
CALDAS S.A”**

SERGIO ENRIQUE GUALDRÓN ARIZA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2010



**“EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA APLICACIÓN DEL SISTEMA DE
AGITACIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN LA PALANQUILLA FABRICADA EN
LA MÁQUINA DE COLADA CONTINUA DE LA EMPRESA SIDERÚRGICA DE
CALDAS S.A”**

SERGIO ENRIQUE GUALDRÓN ARIZA

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Metalúrgico**

Director

**ORLANDO PLATA HERNANDEZ
Ingeniero Metalúrgico**

Tutor

M.Sc. IVAN URIBE PEREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2010

DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad de alcanzar este objetivo en mi vida, porque con él a mi lado se que siempre puedo alcanzar todo lo que me proponga.

A mis padres, quienes han sido mi ejemplo y apoyo más grande, los cuales con su experiencia y gran amor me han guiado con bien durante las diferentes etapas de mi vida, a ellos les dedico especialmente este logro alcanzado en mi vida.

A mi hermana por escucharme, comprenderme y apoyarme en todos los momentos de mi vida.

A mis compadres Julián, Fabián, Alex, Ocaña y Diego con quienes logre formar una gran amistad, los cuales estuvieron presentes siempre que los necesite. A Sebas, Tita, Nelson y Blanca, a quienes agradezco por brindarme una amistad incondicional y sincera durante mi maravillosa estadía en la vida universitaria.

AGRADECIMIENTOS

Al Alma Mater, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales por permitir mi formación personal y profesional.

A la empresa Siderúrgica de Caldas S.A, por permitirme realizar allí mi práctica empresarial. Al Doctor Eduardo Villegas, Gerente Siderúrgica de Caldas S.A, al área administrativa, operativa e ingenieril de Siderúrgica de Caldas S.A. A las personas que de una u otra manera influyeron en el buen desarrollo del presente proyecto.

Un agradecimiento especial al Ingeniero Orlando Plata Hernández, Director de acería de la empresa Siderúrgica de Caldas S.A, por su incondicional apoyo y orientación durante el desarrollo del proyecto y mi práctica empresarial.

A las divisiones de Gestión de Calidad y Diseño de la empresa Siderúrgica de Caldas S.A, por su colaboración durante el desarrollo de este proyecto.

Al M.Sc. Iván Uribe Pérez, Profesor de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Tutor de este Proyecto.

A todos los profesores y técnicos de la Escuela Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la Universidad Industrial de Santander, por su apoyo, consejos y enseñanzas, los cuales influyeron en mi crecimiento como ser humano.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	16
OBJETIVOS	19
OBJETIVO GENERAL	19
OBJETIVOS ESPECIFICOS	19
1. COLADA CONTINUA	20
1.1 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL PROCESO DE COLADA CONTINUA DEL ACERO	20
1.2 MÁQUINA DE COLADA CONTINUA	21
2. SOLIDIFICACIÓN DEL ACERO EN LA MÁQUINA DE COLADA CONTINUA	23
2.1 ESTRUCTURAS DE SOLIDIFICACIÓN DEL ACERO EN EL PROCESO DE COLADA CONTINUA.	24
3. SISTEMA DE AGITACIÓN ELECTROMAGNETICA (EMS)	27
3.1 FUERZA DE LORENTZ	28
3.2 UBICACIÓN DEL EMS EN LA MÁQUINA DE COLADA CONTINUA	29
3.3 EFECTO DE LA APLICACIÓN DEL EMS EN EL PROCESO DE COLADA CONTINUA.	32
3.4 PARÁMETROS PUESTA EN MARCHA DEL EMS	33
3.5 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DEL EMS	34
4. DEFECTOLOGIA DE LOS PRODUCTOS DE COLADA CONTINUA	35
5. DESARROLLO EXPERIMENTAL	41
5.1 RECONOCIMIENTO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL ACERO Y REVISIÓN BIBLIOGRAFICA	42
5.2 SELECCIÓN DE LOS TIPOS DE ACEROS A EVALUAR POR EL PRESENTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	43
5.3 DESARROLLO DE LAS PRUEBAS EN PLANTA	44

5.4 PREPARACIÓN DE MUESTRAS	46
6. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	49
6.1 ANÁLISIS MACROESTRUCTURAL	49
6.1.1 Influencia de la aplicación del ems en el estado superficial de las palanquillas	49
6.1.2 Influencia de la aplicación del EMS, en la porosidad central de las palanquillas	50
6.1.3 Influencia de la variación del EMS, en las estructuras de solidificación de las palanquillas	52
6.1.4 Efecto de la aplicación del EMS, en la defectología de las palanquillas	56
6.2 ANÁLISIS MICROESTRUTURAL	69
6.3 RECOMENDACIONES EN LA APLICACIÓN DEL SISTEMA DE AGITACIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN LA MÁQUINA DE COLADA CONTINUA DE LA EMPRESA SIDERÚRGICA DE CALDAS S.A.	71
7. CONCLUSIONES	77
8. RECOMENDACIONES	79
BIBLIOGRAFIA	81
ANEXOS	84

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Evolución de la producción mundial de acero	20
Figura 2. Esquema de la máquina de colada continua empresa Siderúrgica de Caldas S.A	20
Figura 3. Mecanismos de extracción de calor en el molde	22
Figura 4. Proceso de la solidificación del acero en la máquina de colada continua	22
Figura 5. Esquema de la macroestructura de un lingote en bruto de colada	24
Figura 6. Estructura del EMS	27
Figura 7. Esquema de la posible ubicación del EMS en el proceso de colada continua del acero.	29
Figura 8. Posición del EMS en la MCC de la empresa Siderúrgica de Caldas S.A.	30
Figura 9. Representación del rompimiento de los brazos de las dendritas debido a la aplicación del EMS	32
Figura 10. Sistema de purificación de la refrigeración del EMS	34
Figura 11. Desarrollo experimental	34
Figura 12. Defectos superficiales generados por la sobreagitación en el menisco	48
Figura 13. a) Muestra colada 41119, ASTM A 706 sin EMS; b) Muestra colada 42107, ASTM A 706 con 160 A - 4 Hz.	50
Figura 14. a) Muestra colada 41170, ASTM A 36 sin EMS; b) Muestra colada 42439, ASTM A 36 con 160 A - 4 Hz.	51
Figura 15. a) Muestra colada 41092, ASTM A 572 sin EMS; b) Muestra colada 42568, ASTM A 572 con 160 A - 4 Hz.	51
Figura 16. a) Muestra colada 41216, ASTM A 572 sin EMS; b) Muestra colada 41216, ASTM A 572 con 160 A - 4 Hz.	51

Figura 17. Efecto de la aplicación del EMS en el tamaño de la zona equiaxial de las palanquillas	53
Figura 18. Esquema de la variación del espesor de la capa templada en el acero ASTM A 572 ante la aplicación del EMS	55
Figura 19. Efecto de la variación del EMS en el espesor de la capa templada de las palanquillas	55
Figura 20. a) Muestra Colada 41170, ASTM A 36; b) Muestra colada 41118, ASTM A 706; c) Muestra colada 41092, ASTM A 572.	60
Figura 21. Muestra colada 41216, ASTM A 572.	61
Figura 22.a) Muestra Colada 41170, ASTM A 36; b) Muestra coladas 41119, ASTM A 706; c) Muestra Colada 41092, ASTM A 572.	62
Figura 23. Muestra Colada 41216, ASTM A 572.	63
Figura 24. a) Muestra Colada 41527, ASTM A 572; b) Muestra coladas 41835, ASTM A 36; c) Muestra colada 41828, ASTM A 706.	64
Figura 25. a) Muestra Colada 41576, ASTM A 572; b) Muestra coladas 41784, ASTM A 706; c) Muestra colada 41515, ASTM A 36,	66
Figura 26. Muestra colada 42475, ASTM A 572.	66
Figura 27. a) Muestra Colada 42146, ASTM A 572; b) Muestra colada 42545, ASTM A 706; c) Muestra colada 42439, ASTM A 36	67
Figura 28. Muestra colada 41720, ASTM A 572.	68
Figura 29. Estructura típica de un material en bruto de colada.	69
Figura 30. Ensamble del EMS en el molde de la máquina de colada continua de la empresa Siderúrgica de Caldas S.A.	92
Figura 31. Esquema de los componentes del EMS	93

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Efecto metalúrgico de la aplicación del EMS en diferentes posiciones	31
Tabla 2. Rango de aplicación de los parámetros de agitación del EMS	33
Tabla 3. Cuadro irregularidades de forma	36
Tabla 4. Cuadro defectos superficiales	37
Tabla 5. Cuadro defectos internos	39
Tabla 6. Composición química de los aceros estudiados por el proyecto	43
Tabla 7. Pruebas en planta, realizadas en la primera etapa	44
Tabla 8. Pruebas en planta, realizadas en la segunda etapa	45
Tabla 9. Condiciones de prueba del EMS, en la tercera etapa	45
Tabla 10. Pruebas en planta, realizadas en la tercera etapa	46
Tabla 11. Número de probetas utilizadas en el análisis metalográfico	48
Tabla 12. Efecto condiciones de agitación del EMS en el tamaño de la zona equiaxial central	53
Tabla 13. Resultados de la medición del espesor de la capa templada en el acero ASTM A572	54
Tabla 14. Efecto de la influencia del EMS en el espesor de la capa templada las palanquillas.	55
Tabla 15. Clasificación porosidad interna en palanquilla (Blowholes)	57
Tabla 16. Clasificación grieta central en forma de estrella	57
Tabla 17. Clasificación rechupe central	57
Tabla 18. Clasificación grieta diagonal	57
Tabla 19. Clasificación grieta central	58
Tabla 20. Clasificación depresión	58
Tabla 21. Clasificación escasez	58
Tabla 22. Romboides	58

Tabla 23. Recomendación de la aplicación del EMS en perfiles menores de 3 pulgadas.	72
Tabla 24. Recomendación de la aplicación del EMS en perfiles de 3 pulgadas.	72
Tabla 25. Recomendación de la aplicación del EMS en perfiles de 4 pulgadas.	74
Tabla 26. Recomendación de la aplicación del EMS en condiciones especiales de operación del proceso de colada continua	75
Tabla 27. Análisis de los macroataques realizados en las tres etapas del proyecto.	84
Tabla 28. Registro de las variables de operación del proceso de colada continua en la primera etapa del proyecto.	86
Tabla 29. Registro de las variables de operación del proceso de colada continua en la segunda etapa del proyecto.	87
Tabla 30. Registro de las variables de operación del proceso de colada continua en la tercera etapa del proyecto.	88
Tabla 31. Influencia de las variables de operación del proceso de colada continua del acero en su estructura interna.	94

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. INFORME DEL ANÁLISIS DE LOS MACROATAQUES DE LAS MUESTRAS DE LAS TRES ETAPAS DEL PROYECTO.	84
ANEXO B. REGISTRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN DE LAS COLADAS ANALIZADAS PARA CADA UNA DE LAS TRES ETAPAS DEL PROYECTO.	86
ANEXO C. PLANOS SISTEMA DE AGITACION ELECTROMAGNETICA DE LA MAQUINA DE COLADA CONTINUA DE LA EMPRESA SIDERURGICA DA CALDAS S.A	92
ANEXO D. INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN DEL PROCESO DE COLADA CONTINUA EN LA ESTRUCTURA INTERNA DEL ACERO	94

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA APLICACIÓN DEL SISTEMA DE AGITACIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN LA PALANQUILLA FABRICADA EN LA MÁQUINA DE COLADA CONTINUA DE LA EMPRESA SIDERÚRGICA DE CALDAS S.A.*.

AUTOR: GUALDRON ARIZA SERGIO ENRIQUE**

PALABRAS CLAVES: Agitación electromagnética en el molde, colada continua, acero, estructuras de solidificación, defectología, palanquilla.

RESUMEN: En el mes de junio de 2008 fue adquirida por la empresa Siderúrgica de Caldas S.A una máquina de colada continua de fabricación china que contaba entre sus componentes con un sistema de agitación electromagnética (EMS) en el molde en cada una de sus tres líneas de operación. Este sistema entró en funcionamiento junto con la máquina de colada, y después de transcurrir un año de operación y normalización del proceso se vio la necesidad de desarrollar un trabajo de investigación que evalúe el efecto de la aplicación del EMS en la calidad de la palanquilla fabricada por la división de acería de la empresa. El desarrollo del presente trabajo se dividió en tres etapas, en la primera se analizó el estado de la calidad del producto con las condiciones de agitación actuales de operación (90 Amperios, 3 Hz), en la segunda se analizaron los resultados con el sistema desactivado, y por último, en la tercera fase, se describen los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con diferentes condiciones de agitación, con el fin de determinar los parámetros más adecuados de operación del EMS para cada uno de los perfiles fabricados por la empresa. En las tres fases del proyecto se evaluó la influencia de la aplicación del EMS en tres diferentes tipos de aceros, ASTM A 572, ASTM A 706, ASTM A 36 y dos tipos de secciones, de 120x120 y 130x130 milímetros. Se analizan y comparan los resultados con y sin EMS, con el fin de establecer la influencia del sistema en las estructuras de solidificación, defectología presente y morfología de las palanquillas.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Director: Orlando Plata Hernández

ABSTRACT

TITULO: EVALUATING THE INFLUENCE OF APPLYING THE ELECTROMAGNETIC STIRRING SYSTEM OVER THE FABRICATION OF THE CONTINUOUS CASTED BILLET FROM THE SIDERÚRGICA DE CALDAS COMPANY S.A *

AUTOR: GUALDRON ARIZA SERGIO ENRIQUE **

PALABRAS CLAVES: Electromagnetic Stirring in the mould, continuous casting, steel, solidification structure, defectology, billet.

BRIEF: On June of 2008 the Siderúrgica de Caldas Company acquired a continuous casting machine made in china, which was equipped with an electromagnetic stirring system (EMS) in the mould for each of their three operation lines. Both the system and the casting machine started functioning together and after a year of service and normalization processes had passed it was found the necessity of developing an investigation work which evaluates the results of applying the EMS over the billet quality produced by the metal casting of the company. The development of the actual work was divided in three stages. On the first one, the quality of the product under the currently stirring conditions was evaluated (90 Ampere,3Hz), on the second one, the results were evaluated having the system in off mode, and the last stage, describes the obtained results from the tests run out under different agitation conditions aimed to establish the best stirring conditions for each of the profiles manufactured by the company. On the three stages of the project was studied the application of the EMS over three different kinds of steels, ASTM A 572, ASTM A 706, ASTM A36 and two kinds of square sections of 120x120 and 130x130 mm. The results with and without the EMS are analyzed and compared in order to establish the influence of the system over the solidification structures, the arisen defectology and the morphology of the billets.

* Degree Project

** Faculty of Physicochemical Engineering, School of Metallurgical Engineering and Science of Materials, Director: Orlando Plata Hernández.

INTRODUCCION

La colada continua del acero es un proceso en el cual el acero líquido es permanentemente solidificado en una barra de metal. Dependiendo de las dimensiones de la barra, estos productos semielaborados pueden ser planchones, tochos o palanquillas. Este proceso fue inventado en la década del 1950 en un intento por incrementar la productividad en la fabricación del acero. Anteriormente sólo era posible la colada en lingoteras que todavía tiene sus beneficios y ventajas, pero que no siempre cumple con las demandas productivas. Desde entonces, mediante investigaciones científicas, la colada continua se ha venido desarrollando, lográndose obtener nuevos avances tecnológicos, que permiten incrementar el rendimiento y la calidad del proceso en la fabricación del acero, con lo cual se puede obtener un producto de mayor calidad a un menor costo.

En la industria siderúrgica cuando se está produciendo palanquillas por medio del proceso de colada continua pueden aparecer defectos, los cuales se pueden clasificar en tres tipos: defectos de forma, defectos internos y defectos superficiales, cada uno de los cuales causa problemas en el conformado del material, afectando directamente las confiabilidad y calidad del producto terminado, ocasionando en algunos casos, dependiendo de su criticidad la degradación del producto al patio de chatarra, lo cual genera una disminución de la rentabilidad en proceso de fabricación de acero, ya que cuando un producto es degradado es porque no cumple con los estándares de calidad exigidos para su normal comercialización.

La aparición de defectos en la colada continua del acero puede ocurrir por múltiples razones, debido a que este proceso está sujeto al manejo de diferentes variables como son: velocidad de colada, temperatura de sobrecalentamiento del acero, refrigeración, limpieza del acero, estado del refractario, cuchara, lingotera y

portalingotera, entre otras; estas variables si no son controladas adecuadamente, ocasionan la fabricación de un producto de mala calidad.

Para mejorar y contrarrestar los efectos negativos que pueden aparecer durante el proceso de colada continua, se desarrolló e implementó con el paso del tiempo el uso de agitadores electromagnéticos los cuales por medio de un movimiento rotacional inducido permiten redistribuir y homogenizar eficientemente la temperatura y composición del acero líquido, disminuyendo por lo tanto los gradientes térmicos e impurezas presentes. El uso de agitadores electromagnéticos permite obtener también una mayor estructura equiaxial, menor segregación, menor porosidad central, una disminución de inclusiones no metálicas y un aumento en el espesor de la primera piel solidificada, disminuyendo así la probabilidad de que ocurran fallos en las líneas operativas de producción, fabricándose con esto aceros de mayor calidad. En la práctica, esto significa que se pueden emplear mayores temperaturas y velocidades de colada, es decir, aumentar la producción sin deteriorar la calidad de las barras coladas.

Para obtener el mayor beneficio posible en la aplicación del sistema de Agitación Electromagnética en el molde, es muy importante prestar especial atención al establecer los parámetros de operación del sistema, (Corriente y Frecuencia), ya que si se trabaja con unas condiciones muy elevadas, puede llegar a presentar el efecto contrario al esperado, ya que se produciría una sobreagitación en el menisco ocasionando una reacción de salpicadura de escoria y acero, provocando la aparición de diversos defectos como gotas frías o atrape de escoria en la superficie de las palanquillas.

La empresa Siderúrgica de Caldas S.A adquirió en el mes de junio de 2008 una máquina de colada continua marca SHM de origen chino, la cual cuenta con un Sistema de Agitación Electromagnética en el molde (MEMS) en sus tres líneas de operación, el cual ha venido operando desde que se puso en marcha la máquina

de colada. El ajuste y calibración de los parámetros de operación (Frecuencia y Corriente) del MEMS se realizó con base en datos teóricos entregados por el proveedor de la máquina. Con base en esto, los parámetros que se aplicaron son, una corriente de 90 amperios y una frecuencia de 3 Hz; es decir, en la puesta a punto del sistema no se ejecutó ningún estudio ingenieril de respaldo que corroborará que estas condiciones de trabajo son las más adecuadas en la fabricación de los diferentes tipos y sección de acero allí elaborados. Es por esto que después de un año de operación del sistema, se vió la necesidad de realizar una investigación que permita corroborar el real alcance del EMS en la calidad de la palanquilla, evaluándose la eficiencia del sistema mediante pruebas con y sin EMS estableciéndose así las condiciones más adecuadas de operación en la aplicación del sistema.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la aplicación del Sistema de Agitación Electromagnética en la calidad interna y externa de la palanquilla de la empresa Siderúrgica de Caldas S.A.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar los parámetros de operación más adecuados en la aplicación del Sistema de Agitación Electromagnética de la máquina de colada continua de la empresa Siderúrgica de Caldas S.A.
- Caracterizar y estandarizar los defectos presentes en la palanquilla de la empresa Siderúrgica de Caldas S.A.
- Determinar la influencia del Sistema de Agitación Electromagnética en las estructuras de solidificación del producto fabricado por la división de acería de la empresa Siderúrgica de Caldas S.A.

1. COLADA CONTINUA

1.1 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL PROCESO DE COLADA CONTINUA DEL ACERO

El proceso de colada continua del acero ha sido uno de los mayores avances en la producción del mismo durante el último siglo. Su aplicación comienza a extenderse en los años '60, pero es a partir de la década del '70 cuando su expansión es más pronunciada, reemplazando paulatinamente al método convencional de colado de lingotes (Ver figura 1). La colada continua presenta ventajas frente a los métodos convencionales, pudiéndose destacar un mayor rendimiento, una mayor secuencialidad de operaciones que repercute en forma directa en una mayor eficiencia de la planta y mejor calidad del producto colado. Esto ha originado que actualmente el 90% de la producción mundial de acero sea realizada utilizando el proceso de colada continua, mientras que en la década del '70 sólo el 15% correspondía a este proceso¹.

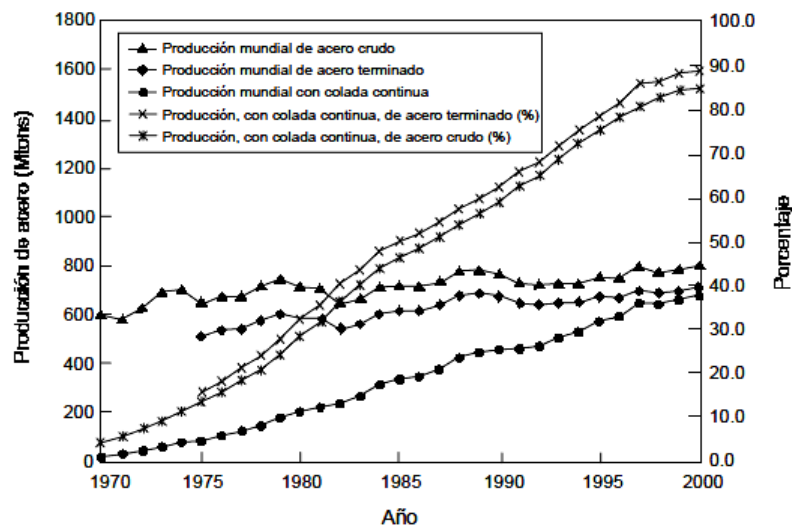


Figura 1. Evolución de la producción mundial de acero¹.

¹ WOLF, M. "Historical aspects and key technologies". The Making, Shaping and Treating of Steel. Ironmaking. Volumen 11th, Chapter 1, Pág 1, 2001.

1.2 MÁQUINA DE COLADA CONTINUA

La colada continua, como proceso para la obtención de acero en bruto, consiste en colar de una manera regular e ininterrumpida el acero fundido. En la Figura 2 se esquematiza el proceso desde que el acero líquido se vierte de la cuchara al distribuidor y del distribuidor a los moldes. El objetivo del distribuidor es repartir el acero líquido en los moldes de forma continua y homogénea a través de un tubo de material refractario llamado buza; en general el distribuidor provee de acero líquido a más de una línea, típicamente de dos a cuatro.

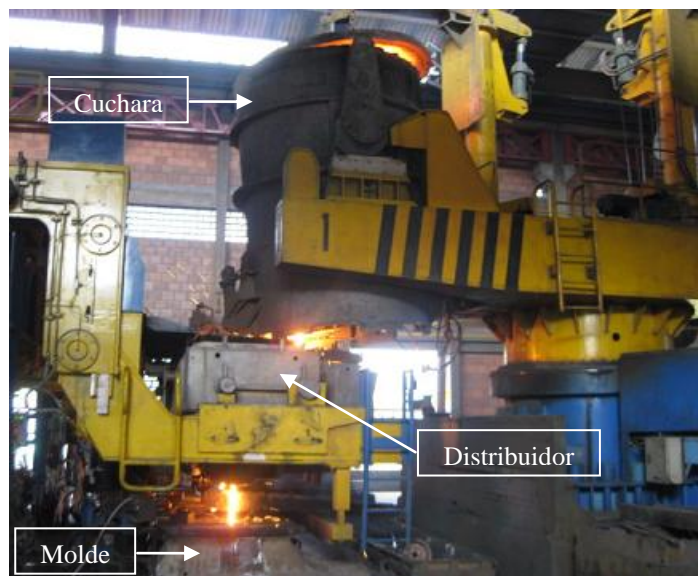


Figura 2. Esquema de la máquina de colada continua empresa Siderúrgica de Caldas S.A

Los moldes generalmente son de cobre refrigerados con agua por medio de canales internos, y su objetivo es realizar el primer enfriamiento del acero líquido, permitiendo que se forme una cáscara solidificada deseablemente libre de defectos y lo suficientemente rígida como para soportar la presión ferrostática (presión ejercida por el acero líquido) al abandonar el mismo. Si se deja que el acero dentro del molde salga demasiado rápido podría ocasionar el estallido de la línea originando así un derrame de acero y sellado provisional de la línea de operación. Si su extracción es demasiado lenta, el rendimiento de la máquina

estaría por debajo de su capacidad y se prolongaría innecesariamente el tiempo de espera del acero líquido en la cuchara, ocasionando problemas varios como el enfriamiento del acero, un mayor desgaste del refractario y la disminución de la trazabilidad del proceso. El nivel del acero en el molde lo controla un sistema automático, que cuenta con una fuente radioactiva que monitorea y regula el nivel de acero en el interior del molde y la velocidad de extracción de colada. La extracción de calor se realiza por medio de canales refrigerados por agua, que se encuentran en la cara fría del molde. El complejo fenómeno de extracción de calor en la zona del molde puede dividirse en cinco grupos distintos (Figura 3), donde cada uno está asociado a un fenómeno de transferencia de calor diferente como se describe a continuación:

- Transferencia de calor por convección en el acero líquido.
- Transferencia de calor por conducción en la cáscara de acero solidificado.
- Transferencia de calor desde la superficie del acero hasta la superficie del molde.
- Transferencia de calor por conducción en las paredes del molde
- Transferencia de calor por convección con el agua de refrigeración.

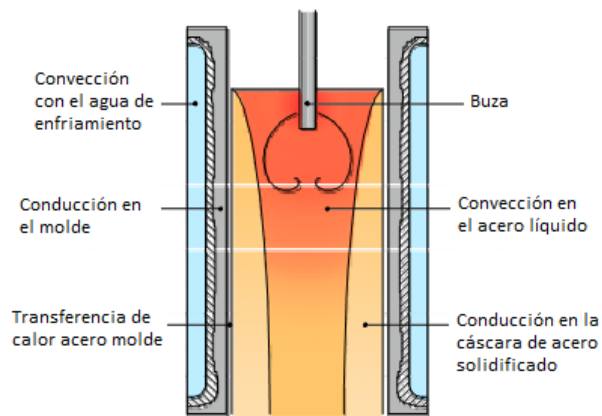


Figura 3. Mecanismos de extracción de calor en el molde²

² GONZALEZ, Marcial. “Modelo inverso de estimación del coeficiente de transferencia de calor acero-molde, en el proceso de colada continua de planchones”. Pág. 18, 2002.

Cuenta además con un movimiento oscilatorio en la dirección de colado, es aplicado al molde para facilitar el avance del acero en esta primer etapa, minimizando la fricción y las posibilidades de un pegado de la cáscara de acero contra la superficie del molde. La forma del producto colado está dada por la geometría del molde, obteniéndose entre otros; palanquillas, planchones y redondos. Una vez abandonado el molde, el producto colado es guiado por medio de rodillos guías y refrigerado por medio de rociadores de agua; este enfriamiento es llamado enfriamiento secundario. Concluida la zona de enfriamiento secundaria, el producto continúa su solidificación exclusivamente por mecanismos de radiación y convección con el medio, llamándose a esta última etapa: enfriamiento terciario. La solidificación de una barra de vaciado o palanquilla, comprende las siguientes cuatro fases principales:

1. Fase de contacto directo metal-lingotera
2. Fase de enfriamiento sin contacto directo
3. Fase de enfriamiento por aspersion
4. Fase de homogenización de temperatura

2. SOLIDIFICACIÓN DEL ACERO EN LA MÁQUINA DE COLADA CONTINUA

Cuando el acero ya ha sido vaciado de la cuchara al distribuidor y este empieza a repartirlo a los moldes se inicia el proceso de solidificación, es decir, la transformación del acero líquido a un producto terminado que puede ser palanquilla, planchón, etc. El molde ofrece dos funciones, fija la forma de la pieza y extrae el sobrecalentamiento y el calor latente de fusión que se librea durante la solidificación, esto quiere decir que las propiedades térmicas del molde tienen sus efectos sobre las estructuras resultantes de solidificación. A medida que avanza el metal dentro de la lingotera, aumenta el espesor del metal solidificado, dejando en el centro de la sección, un cono de metal fundido que alimenta constantemente la contracción del acero al solidificar, como se observa en la figura 4.

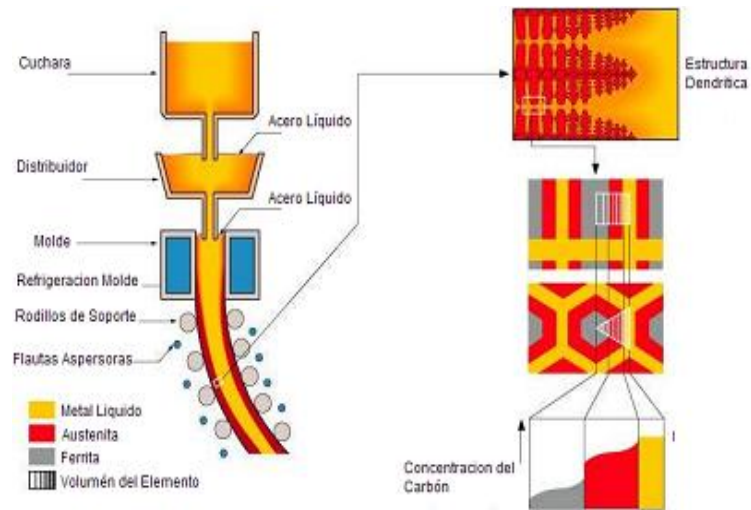


Figura 4. Proceso de la solidificación del acero en la máquina de colada continua³

2.1 ESTRUCTURAS DE SOLIDIFICACIÓN DEL ACERO EN EL PROCESO DE COLADA CONTINUA.

Las piezas de acero con en bruto de colada pueden estar formadas por tres zonas características como se observa en la figura 5⁴:

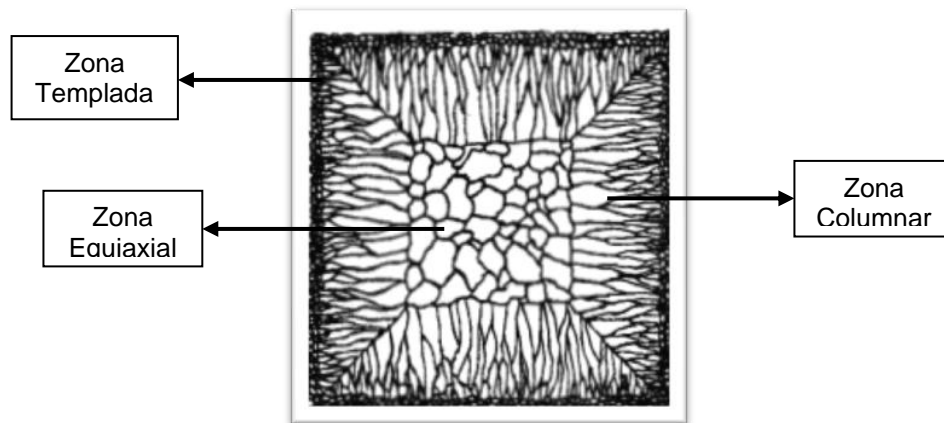


Figura 5. Esquema de la macroestructura de un lingote en bruto de colada

³ Tomado de: CEMES. Casting Processes (Online), (Lyon France), 2001.
<http://tmp.cma.fr/tmp/img-tmp/ppt-tmp/Casting.html>.

⁴ WOLF, M. "Solidification of steel". The Making, Shaping and Treating of Steel". The Making, Shaping and Treating of Steel. Ironmaking. Vol. 11th, Chapter 6, Pág 1, 2001.

Una zona externa llamada **Zona Templada** formada por granos tipos poligonales, normalmente pequeños y sin orientación cristalográfica preferencial, se produce por una muy alta extracción calórica, que es normalmente la parte exterior de la pieza, próxima o en contacto con las paredes del molde. Es la zona afectada por la coquilla, o enfriada muy rápidamente. Cuando el metal sobrecalentado es vaciado dentro del molde, el líquido adyacente a la interfase líquido-metal se enfría rápidamente hasta la temperatura en que las impurezas sólidas que contienen el líquido o la pared del molde, producen su acción catalizadora efectiva sobre la nucleación. En la zona intergranular aparecen pequeñas microporosidades o microrechupes, debidas al cambio de volumen liquido-sólido y a la evolución de gases disueltos en el líquido. La extensión de la zona templada depende de la extensión de la región sobreenfriada antes de que ocurra la nucleación, está a su vez depende del grado de sobrecalentamiento del líquido, temperatura del molde, propiedades térmicas del metal, propiedades térmicas del molde y del potencial catalítico en el líquido y en el molde. En muchos casos los núcleos se forman en la superficie del molde solamente, después de lo cual la solidificación procede en forma columnar.

Un poco más hacia su interior se extiende la **Zona Columnar**, formada por granos alargados hacia la región central, o última zona en solidificar de la pieza, los cuales poseen una gran similitud de orientación cristalográfica, generando textura en la dirección del crecimiento. Puede ocupar la mayor parte o la totalidad de la macroestructura de la pieza cuando se cuelean líquidos puros o de muy baja concentración de aleantes. Asimismo, la tendencia a aumentar de la zona columnar, está asociada al aumento de la extracción calórica y/o utilización de líquidos de baja difusividad térmica. La zona columnar tiende a desaparecer o a ocupar una parte pequeña, cuando se cuelean aleaciones con altos contenidos aleantes, bajas o extremadamente bajas extracciones de calor. Los granos que forman esta zona tienen su origen en los granos de la zona templada y crecen mediante solidificación progresiva hasta ser bloqueados por la presencia de la

zona equiaxial. Para un conjunto dado de condiciones de colada, la longitud de la zona columnar disminuye si⁵:

- El sobrecalentamiento disminuye.
- El rango de solidificación aumenta.
- El número y la actividad catalítica de los agentes nucleantes aumenta.
- Disminuye la longitud del lingote.
- La agitación del líquido aumenta

La zona de crecimiento columnar es la más problemática y su extensión, así como la geometría de las dendritas vendrá determinada por las condiciones de solidificación.

La parte central de la pieza normalmente se encuentra ocupada por la **Zona Equiaxial**, de granos orientados al azar que podrían haberse formado a partir de brazos secundarios de dendritas rotos o refundidos del cuerpo central de la dendrita y que actuarían como semillas para el crecimiento de nuevas dendritas.

En función del proceso de conformado y de cómo se hayan manejado los parámetros de colada durante el mismo, de las propiedades y de la composición de la aleación, es posible obtener piezas en cuya macroestructura puedan estar ausente una, y aún dos, de las zonas características de solidificación de un producto en bruto de colada. Como ejemplo común de piezas que posean macroestructura con las tres zonas descritas se tienen los lingotes de acero, objeto del estudio del presente trabajo.

⁵ BELISARIO, Julio. “Efectos de un campo electromagnético y vibracional sobre las propiedades y solidificación de algunas aleaciones fundidas”. Universidad Industrial de Santander. Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Bucaramanga. Julio 1968.

3. SISTEMA DE AGITACIÓN ELECTROMAGNETICA (EMS)

El principio de operación del **EMS** (Electro**M**agnetic **S**tirring, agitación electromagnética) es similar al de un motor asíncrono trifásico donde el EMS funciona como estator y el acero líquido hace de rotor. El EMS tiene como función proveer una potencia de baja frecuencia y corrientes elevadas, lo cual genera una fuerza electromagnética real en el corazón líquido de la palanquilla que lleva a que el acero líquido se agite producto de un movimiento rotacional inducido. El campo magnético es creado por la circulación de una corriente alterna trifásica generada por las bobinas que circundan el molde. Cuando una corriente fluye a través de un material conductor (sólido o líquido) en presencia de un campo magnético, aparece una fuerza por unidad de volumen (Fuerza de Lorentz), esta fuerza es generada por un inductor magnético y es la que produce la agitación en el acero líquido y su intensidad depende de la corriente eléctrica y de la frecuencia aplicada. La estructura interna del EMS consta de tres partes como se describe en la figura 6:

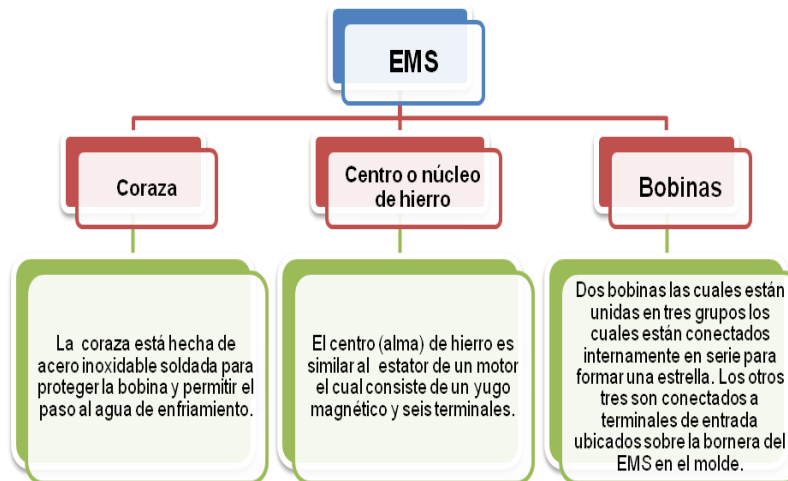


Figura 6. Estructura del EMS

3.1 FUERZA DE LORENTZ

Cuando un conductor que transporta corriente se coloca en un campo magnético se somete a una fuerza llamada Fuerza Electromagnética o Fuerza de Lorentz. Esta fuerza es de vital importancia porque constituye la base de operación de motores, generadores y de muchos instrumentos eléctricos. La magnitud de la fuerza depende de la orientación del conductor con respecto a la dirección del campo magnético. La fuerza es mayor cuando el conductor es perpendicular al campo, y cero cuando es paralelo a él. Supongamos que un material q , se desplaza a una velocidad v , en el interior de un campo magnético B . Este campo genera que aparezca una fuerza F , que actúa sobre el material q , de manera que podemos evaluar dicha fuerza por la expresión⁶:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Como la fuerza es el resultado de un producto vectorial, será perpendicular a los factores, es decir, a la velocidad y al campo magnético. Al ser perpendicular a la velocidad de la carga, también lo es a su trayectoria, por lo cual dicha fuerza no realiza trabajo sobre q , lo que supone que no hay cambio de energía cinética, o lo que es lo mismo, no cambia el módulo de la velocidad. La única acción que se origina, cuando la partícula entra en el campo magnético, es una variación de la dirección de la velocidad, manteniéndose constante el módulo. Este cambio de dirección es debido a que la fuerza que aparece va a actuar como fuerza centrípeta, originando un movimiento de rotación de la partícula en el interior del campo magnético.

⁶HERNANDEZ, Luis Manuel. “Optimización de mantenimiento preventivo a motores de rotor devanado de 3600 Kw, con 6600 voltios, que mueven molinos de cement con capacidad de 120 toneladas por hora”. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, Universidad México DF. 2009.

3.2 UBICACIÓN DEL EMS EN LA MÁQUINA DE COLADA CONTINUA

El sistema EMS es más efectivo al ser aplicado en los tres lugares de la zona de enfriamiento (donde ocurre la solidificación) mostrados a continuación:

1. **Agitador Electromagnético en el molde: MEMS (Mould Electromagnetic Stirrer):** instalado en la parte exterior de la lingotera.
2. **Agitador Electromagnético en la línea: SEMS (Strand Electromagnetic Stirrer):** instalado en la zona de solidificación secundaria.
3. **Agitador Electromagnético final: FEMS (Final Electromagnetic Stirrer):** instalado en la parte final de la zona de solidificación secundaria.

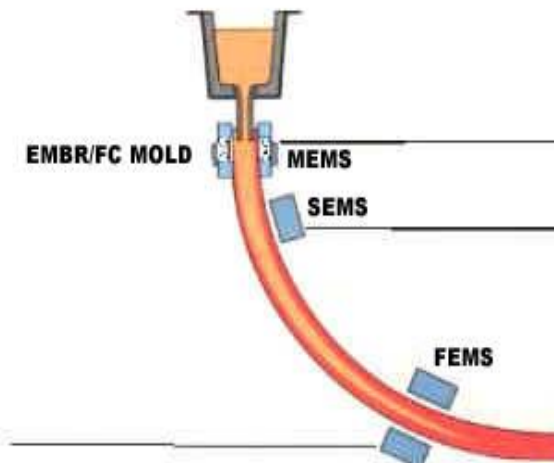


Figura 7. Esquema de la posible ubicación del EMS en el proceso de colada continua del acero.

El sistema de agitación electromagnética de la máquina de colada continua de la empresa Siderúrgica de Caldas S.A, está ubicado en el molde como se ve en la figura 8 y en los planos del anexo C. El molde del EMS consiste esencialmente de dos partes, el molde de cobre y la chaqueta de refrigeración con agua suavizada. El molde está fijo a la chaqueta de agua por medio de cuñas, pero puede

expandirse libremente hacia abajo. En los dos extremos se colocan sellos de agua y en la placa superior va montada la placa de lubricación. Los moldes son de cobre electrolítico fosforizado y tienen una capa de cromo interna para proteger el cobre y aumentar su vida de trabajo.

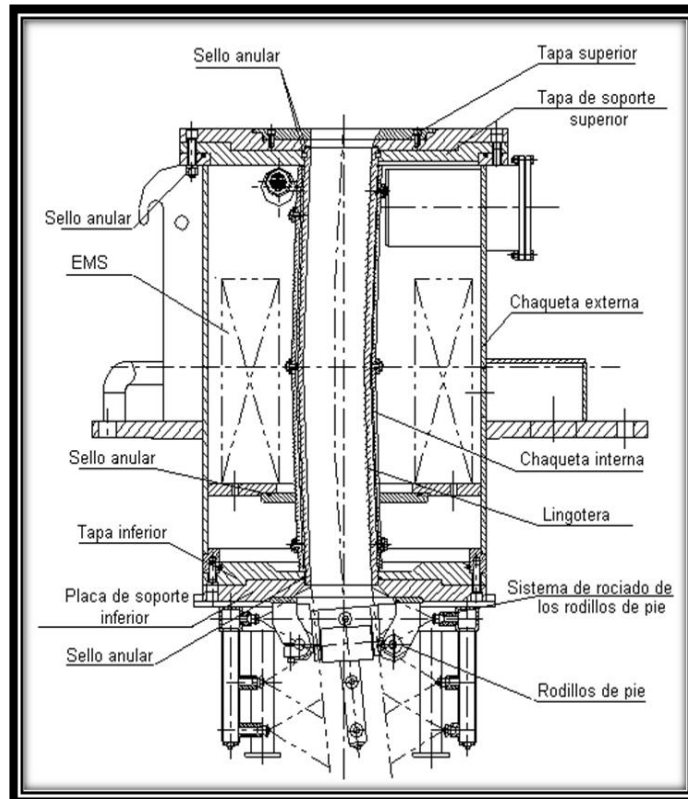


Figura 8. Posición del EMS en la MCC de la empresa Siderúrgica de Caldas S.A.

El EMS en cualquiera de los sitios donde empieza a solidificar el acero tiene un efecto metalúrgico diferente, como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 1. Efecto metalúrgico de la aplicación del EMS en diferentes posiciones

POSICIÓN	MEJORÍA METALÚRGICA	FUNCION	TIPO DE ACERO Y SECCIÓN
MEMS	<p>Aumenta la cantidad de granos equiaxiales.</p> <p>Disminuye la cantidad de blowholes subsuperficiales y los pinholes.</p> <p>Disminuye la cantidad de inclusiones subsuperficiales.</p> <p>Aumenta la homogeneidad en el espesor de la piel de palanquilla.</p> <p>Mejora un poco la porosidad central.</p> <p>Mejora un poco la segregación central</p>	<p>Mueve mecánicamente las inclusiones, blowholes y pinholes fuera de la superficie.</p> <p>Disminuye la oscilación en el menisco</p> <p>Limpia el frente de solidificación</p> <p>Mezcla el acero caliente y frío</p> <p>Promueve la remoción temprana del sobrecalentamiento</p> <p>Promueve formación de la zona equiaxial</p> <p>Reduce mini heterogeneidades</p> <p>Remueve inclusiones fuera de la piel(cascara) de palanquilla</p> <p>Elimina estructura dendrítica</p> <p>Incrementa número de núcleos</p>	Todas las secciones y grados
SEMS	<p>Incrementa la cantidad de grano equiaxial.</p> <p>Reduce la cantidad de grietas internas.</p> <p>Mejora en un grado regular la segregación central.</p> <p>Mejora en un grado medio la porosidad y la contracción central.</p>	Corte de los cristales columnares	Aceros inoxidables Aceros para herramientas
FEMS	<p>Refinador de grano equiaxial.</p> <p>Mejora en un buen grado la segregación central.</p> <p>Mejora en un buen grado la porosidad y contracción central.</p>	Dispersión en acero fundido concentrado	Aceros para resortes Aceros para rodamientos Aceros especiales de alto carbono.

Fuente: Empresa Siderúrgica de Caldas S.A.

3.3 EFECTO DE LA APLICACIÓN DEL EMS EN EL PROCESO DE COLADA CONTINUA.

El agitador electromagnético favorece la transferencia de calor de la piel que se está formando, produciendo una mayor disipación del sobrecalentamiento. Los agitadores magnéticos son diseñados para producir deliberadamente convección en el líquido cercano al frente de solidificación, una fuerte agitación generará fuertes esfuerzos de corte que romperán las dendritas recién formadas en el frente de solidificación ocasionando que esas partículas sólidas sean arrastradas hacia el líquido de mayor temperatura por convección, algunas de ellas son refundidas mientras que otras sobreviven, y son las que actúan como sitios de nucleación, resultando un refinamiento de grano y una microestructura de solidificación no dendrítica, como se observa en la figura 9⁷.

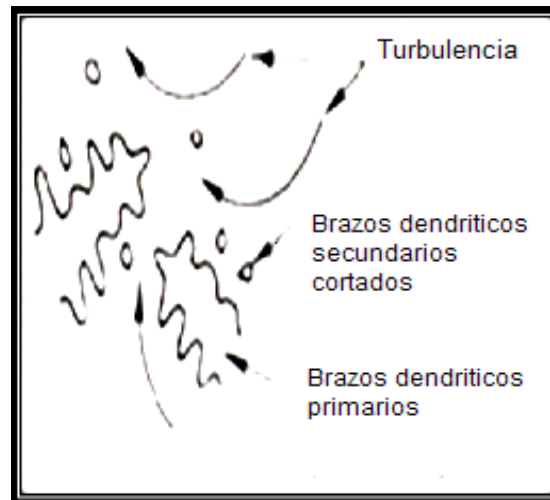


Figura 9. Representación del rompimiento de los brazos de las dendritas debido a la aplicación del EMS

En la práctica, esto significa que se pueden desarrollar mayores temperaturas y velocidades de colado, sin deteriorar la calidad de las palanquillas.

⁷ B.Q Li "Solidification Processing of Materials in Magnetic Fields". Revista JOM., Vol. 50 No 2, Febrero de 1998.

Por lo tanto, el flujo inducido y controlado electromagnéticamente del metal líquido dentro de la piel solidificada, permite influenciar las estructuras de solidificación. Además, tiene la ventaja de homogenizar los elementos de aleación, reducir su porosidad, segregación, y la minimización de grietas internas. También debido al flujo rotacional, este nivela el frente de solidificación evitando así que las inclusiones y las burbujas de gas sean atrapadas.

3.4 PARÁMETROS PUESTA EN MARCHA DEL EMS

Los siguientes valores mostrados en la tabla 2, provienen de los resultados de la experiencia de la utilización y manejo del sistema de agitación electromagnética. Estos valores son clasificados con base en el porcentaje de carbono presente en el acero; sin embargo, el EMS no sólo depende de la composición química sino de factores tales como sección de palanquilla, tecnología de la máquina de colada continua, etc. Es por esto que las condiciones más adecuadas de operación deben ser ajustadas y establecidas junto con el desarrollo de una investigación en planta, que tenga en cuenta todas las variables de operación del proceso de colada continua. En la tabla 2 se observa el rango de clasificación del EMS dado por los proveedores de la máquina de colada continua:

Tabla 2. Rango de aplicación de los parámetros de agitación del EMS

Contenido de carbono en el acero	Corriente de agitación	Frecuencia de agitación
0,15 – 0,20 %	150 – 200 A	3 – 4 Hz
0,20 – 0,45%	150 – 200 A	3 – 4 Hz
0,45 – 0,65%	200 – 250 A	3 – 4 Hz
> 0,65%	250 – 300 A	3 – 4 Hz

El rango de valores mostrados en la tabla, junto con los encontrados en la revisión bibliográfica, sirvieron como punto de referencia para el establecimiento de los valores de prueba de agitación a ejecutar en planta.

3.5 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DEL EMS

La primera consideración cuando se diseña un EMS es como hacer que sus bobinas trabajen estacionariamente durante un tiempo prolongado bajo circunstancias difíciles, tales como la alta temperatura, inmersión en agua, etc. Debido a estas altas exigencias, el EMS requiere de un sistema de purificación de agua que refrigere sus bobinas. La inmersión del centro de hierro en el agua, es la forma en la que disminuye la temperatura de las bobinas (el espacio del centro de hierro y el yugo). El sistema de refrigeración del EMS está compuesto por un circuito cerrado de agua suavizada, purificado mediante el proceso de osmosis inversa. El sistema es sellado lo que evita la entrada de aire y por lo tanto disminuye la erosión del sistema. La tubería por donde circula el agua purificada, es de acero inoxidable. Se debe realizar una inspección regular de la temperatura del agua de salida, el caudal de entrada del agua al EMS, la conductividad del agua y el pH, para garantizar el adecuado funcionamiento del sistema. A continuación se observa en la figura 10 el sistema de purificación del agua que refrigera internamente las bobinas del EMS.



Figura 10. Sistema de purificación de la refrigeración del EMS.

4. DEFECTOLOGIA DE LOS PRODUCTOS DE COLADA CONTINUA

La especial naturaleza del proceso de colada continua requiere un estricto control de calidad y supervisión de cada una de sus variables, ya que durante la operación de colada continua suelen ocurrir la aparición de defectos ampliamente influenciados por:

- Composición química del acero.
- Diseño de la máquina de colada continua.
- Variables de operación de colada, tales como, temperatura de sobrecalentamiento del acero en el distribuidor, velocidad de colada, sistema de refrigeración, estado del molde, sistema de lubricación del molde y la homogeneidad del chorro de acero en el molde durante la colada.



La inspección visual de las palanquillas cortadas a una determinada longitud da una gran información sobre la calidad del producto colado. Si después de un examen cuidadoso de la superficie de la palanquilla y de las caras del corte, no aparecen defectos evidentes y la forma es regular, puede suponerse con un buen grado de certeza que el producto colado es satisfactorio. Si se considera la calidad del acero, la inspección será más detallada después de un acondicionamiento superficial. Cuando se considere necesario, se completará el examen superficial y el subsuperficial, mediante la toma de muestras representativas de las secciones adecuadamente cortadas y atacadas. Lo indicado anteriormente puede ayudar a establecer un buen cuadro sobre la calidad del producto fabricado. La principal ventaja de la colada continua del acero es la obtención de una mayor uniformidad en su composición y una excelente condición superficial. Sin embargo, los defectos pueden, y en realidad ocurren, por diferentes razones. Dichos defectos se pueden dividir en tres grupos:

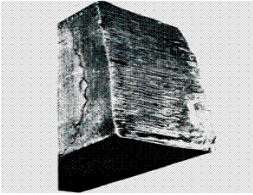
- Irregularidades de forma
- Defectos Superficiales
- Defectos Internos

Aunque están divididos en estas tres categorías, los defectos pueden interrelacionarse; es decir, un problema de forma puede producir defectos superficiales o internos y viceversa.

4.1 IRREGULARIDADES DE FORMA

Tabla 3. Cuadro irregularidades de forma


Romboidez		
Descripción del defecto	Distorsión de la sección transversal de la palanquilla mostrando una diagonal mayor que otra.	
Causas	Normalmente son causadas por una elevada temperatura del acero fundido. (Superior a los 60°C de la temperatura del líquido). Enfriamiento asimétrico en la lingotera y/o en la zona de refrigeración secundaria. Acero con fósforo y azufre elevados y/o relación Manganeso/Azufre insuficiente. Alta velocidad de colada. Alineación incorrecta.	
Acciones a tomar	Regular los caudales de refrigeración. Reducir contenido de residuales y ajustar correctamente la relación Manganeso/Azufre. Revisar temperatura del acero. Revisar alineación.	
Depresión Transversal		
Descripción del defecto	Se inicia en la lingotera; una zona de la palanquilla se enfría más que el resto de la sección, por lo que se separa de la pared del cristalizador antes que el resto.	
Causas	Baja velocidad de colado. Deformación del cristalizador. Excesiva temperatura de colado. Incorrecta alineación de la lingotera con los rodillos de guía.	
Acciones a tomar	Comprobar antes del comienzo de la colada el centrado exacto de la buza. Vigilar la uniformidad en la refrigeración de las caras de la lingotera (programando mantenimiento en las lingoteras). Alineación exacta del molde con respecto a los rodillos pie de molde para evitar una separación irregular de la piel del acero de la pared del cristalizador. Análisis del acero, es característico en aceros con %C entre 0.17 y 0.25 con %S>0.020.	

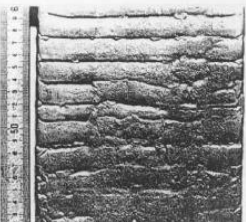
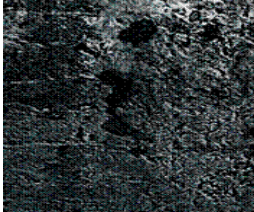
Depresión Longitudinal		
Descripción del defecto	Son depresiones localizadas en la superficie, perpendiculares al eje longitudinal del producto.	
Causas	Esta depresión se debe a la falta de contacto con la pared del cristalizador, puede atribuirse a diferentes factores tales como: a. Inadecuada lubricación. b. Enfriamiento demasiado rápido. c. Niveles de metal fluctuantes en la lingotera.	
Acciones a tomar	Reducción de la refrigeración primaria. Regular adecuadamente la lubricación en la lingotera. Estabilizar el nivel del acero en el cristalizador.	

Fuente. Instruction and Maintenance Manual. Cotinuous Casting Machine for Billets. Concast AG Zurich.
R. Coda, J. Madias, L. Reda, M. Dziuba, C. Genzano, B. Santillana y E. González. "Workshop sobre defectos en productos largos". Instituto Argentino de Siderurgia. 6-8 mayo 2003, Argentina

4.2 DEFECTOS SUPERFICIALES

Tabla 4. Cuadro defectos superficiales

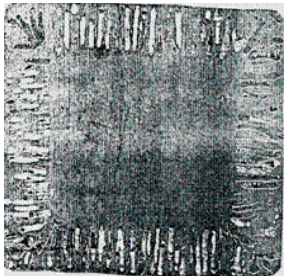
Poros superficiales (Pinholes)		
Descripción del defecto	Pequeñas cavidades de profundidad variable, distribuidas al azar, y que afloran en la superficie del producto. Si hay gran cantidad de "pinholes" o si son particularmente profundos, pueden dar lugar a defectos inaceptables. También el tiempo de permanencia y la temperatura en el horno de recalentamiento, si la palanquilla tiene pinholes puede agravar la situación. El fenómeno inverso a la porosidad superficial es la doble piel, generado por la falta de aceite. Algunas veces, la heterogeneidad en la distribución de aceite puede ser tan grande como para que se observe en distintas caras de la palanquilla, "pinholes" y doble piel.	
Causas	Las porosidades que aparecen en la superficie pueden provenir del aceite de lubricación empleado (si se utiliza) o de la formación de gases durante la solidificación. Sin embargo, es mucho mayor la influencia de los niveles de "O ₂ libre". Las posibles reacciones para la formación de gases son: $2[H] \rightarrow H_2$; $2[N] \rightarrow N_2$; $[O]+2[H] \rightarrow H_2O$; $[O]+[C] \rightarrow CO$ Los poros superficiales presentan formación de óxido de hierro en la superficie y cierta decarburización en la matriz metálica alrededor del poro. Esto es una diferencia importante con los poros subsuperficiales o "blowholes". El óxido de hierro impide que se suelde el defecto durante la laminación.	
Acciones a tomar	Para minimizar la formación de pinholes, no solo es importante estar seguro que la adición de aceite este en los valores normales, haciendo curvas de calibración de los reóstatos, sino que también es importante verificar que la distribución de aceite sea homogénea en la sección transversal. Evitar el contacto del acero líquido con el aire. Vigilar que el tundish esté perfectamente limpio y seco.	

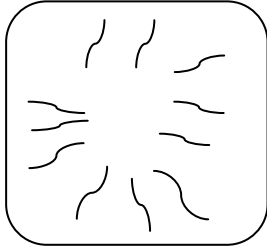
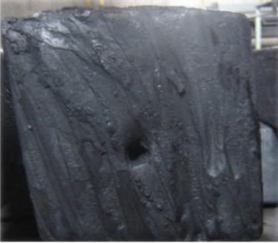
Marcas de Oscilación		
Descripción del defecto	Malformación local de las marcas de oscilación cuando no existe sincronización entre la velocidad del molde y la de extracción.	
Causas	Exceso de conicidad en el molde. Bajo contenido de carbono. Lubricación incorrecta del molde. Oscilaciones irregulares. Choques del molde a lo largo de la oscilación. Relación no apropiada entre frecuencia de oscilación y velocidad de colada.	
Acciones a tomar	Revisar lubricación del molde. Revisar oscilaciones, tanto los movimientos mecánicos, como la correcta relación entre amplitud y frecuencia.	
Escoria atrapada en las caras		
Descripción del defecto	Incrustaciones de materiales no metálicos de aspecto arenoso, vítrico o esponjoso, situados en las caras de los productos. La incrustación de escoria o nata atrapada, es un defecto superficial que implica la degradación o descarte de la palanquilla por ser un defecto importante en el producto de colado; eventualmente puede llegar a producir perforaciones en la línea. En laminación suele dar lugar a defectos superficiales que implican el rechazo del producto laminado.	
Causas	La acumulación de óxidos provenientes de la reoxidación de acero en cantidades crecientes sobre la superficie del líquido forma lo que se denomina nata. El atrape de la nata en la superficie del producto depende tanto de la cantidad como de las características del óxido producido. El contenido de carbono es una variable importante por cuanto el quemado del carbono en forma preferencial tiene un efecto protector al prevenir la oxidación de otros elementos; si bien existen algunas discrepancias se acepta que aceros de bajo carbono tiene mayor tendencia a la formación de natas. Suciedad en las paredes del molde. Refractarios de mala Calidad. Chorro de colada con turbulencias. Baja relación Mn/Si en palanquilla, especialmente cuando se cuela sin protección de chorro.	
Acciones a tomar	Mantener limpias las lingoteras. Utilizar refractarios de Calidad garantizada.	

Fuente. Instruction and Maintenance Manual. Cotinuous Casting Machine for Billets. Concast AG Zurich. R. Coda, J. Madias, L. Reda, M. Dziuba, C. Genzano, B. Santillana y E. González. “Workshop sobre defectos en productos largos”. Instituto Argentino de Siderurgia. 6-8 mayo 2003, Argentina

4.3 DEFECTOS INTERNOS

Tabla 5. Cuadro defectos internos

Poros subcutáneos (Blowholes)		
Descripción del defecto	<p>Son burbujas de forma ovalada que están en el interior del producto, próximas a la superficie y orientadas según el eje de las dendritas de la zona columnar. Algunas veces llegan a aflorar a la superficie. Agrupados en forma de nidos (colmenas). Usualmente contienen CO y algo de H₂ y se asocian ocasionalmente con inclusiones. Si son abiertos durante el sobrecalentamiento y posterior laminado, la superficie de los huecos se oxida, y por lo tanto se formarán frecuentemente grandes huecos ocasionado defectos como rayas o doble piel. Blowholes pequeños y que no estén en grandes cantidades (racimos) pueden ser laminados y no originar defectos. Los poros comienzan a unos 5 mm de la piel, después de la capa templada, y terminan a unos 20 mm, cuando la presión ferrostática compensa la presión de los gases disueltos en el acero.</p>	
Causas	<p>Los poros internos pueden aparecer en todos los tipos de aceros y sistemas de colado. Si la porosidad está controlada, y la cantidad de poros no es importante, a menos que los poros queden abiertos durante el precalentamiento en el horno, no se presentarán problemas de calidad ya que los poros quedan soldados durante la laminación. Si por alguna razón, por ejemplo durante el acondicionamiento de la palanquilla, los poros quedasen expuestos a la atmósfera de recalentamiento del horno, habrá desarrollo de cascarilla y los poros no se soldarán, generando defectos superficiales en el producto laminado.</p> <p>El gashole en la palanquilla ocurre debido a las siguientes condiciones:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Desoxidación insuficiente el cual da como resultado dicho defecto. 2. Aire que ingresa en aceros calmado (con Al) durante la transferencia del metal al molde para formar pinholes. 3. Inyección de Ar para prevenir la obstrucción de las buzas que a su vez también forman pinholes. 4. Calentamiento con oxígeno en el tundish. 5. Exceso de aceite en la lubricación de la lingotera o del agua presente en la misma. 6. Insuficiencia en la adición de agentes desoxidantes. 7. Prolongado contacto del acero líquido con el aceite. 	
Acciones a tomar	<p>Buena desoxidación del acero en cuchara. Conseguir que todos los elementos de la instalación y todos los productos de adición estén bien secos. Protección del acero contra reoxidación de cuchara a tundish y de tundish a la lingotera. El aceite de la lingotera no debe sobrepasar los parámetros asignados. Inyección de aluminio en el molde</p>	

Grietas en zona intermedia		
Descripción del defecto	Fisuras que forman un complejo entramado en la zona columnar a medio camino entre la porosidad central y la superficie.	
Causas	Tensiones térmicas producidas por recalentamiento de la capa externa una vez que ha salido de la refrigeración secundaria. El calor interno recalienta la capa externa la cual se dilata produciendo grietas en la zona columnar. Refrigeración secundaria muy fuerte. Alta temperatura del acero. P y S elevados. Velocidad lenta.	
Acciones a tomar	Control exacto del caudal y forma de rociado. Evitar temperatura elevada. Agitación electromagnética. Aceros de bajo P y S.	
Rechupe: Porosidad Central		
Descripción del defecto	Aparece en el centro del producto, variando su aspecto desde un agujero central de mayor o menor diámetro, hasta una zona porosa más o menos acusada. Al laminar el producto con un grado de reducción suficiente, este defecto suelda, aunque deja la conocida segregación central.	
Causas	Algunas dendritas de la zona bifásica crecen más rápidamente que las otras y, en la zona central, se unen con otras provenientes de otras fuentes de solidificación, formando pequeñas cavidades cerradas que no pueden llenar con metal líquido. Según su número y tamaño, formarán el rechupe central o la zona porosa. Contribuyen a la formación de este defecto: Velocidad de colada elevada. Colar a muy alta temperatura. Refrigeración excesiva en el molde y/o en zona secundaria. Incorrecta solidificación del acero por disminución de la presión de los rodillos unido a una disminución del acero en dicha zona.	
Acciones a tomar	Colar a velocidad adecuada Emplear la temperatura de colada más baja posible Ajustar caudales de refrigeración Correcta separación de rodillos para mantener una presión adecuada Reducir el contenido de residuales, principalmente el fósforo y el azufre	

Fuente. Instruction and Maintenance Manual. Cotinuous Casting Machine for Billets. Concast AG Zurich.
R. Coda, J. Madias, L. Reda, M. Dziuba, C. Genzano, B. Santillana y E. González. "Workshop sobre defectos en productos largos". Instituto Argentino de Siderurgia. 6-8 mayo 2003, Argentina

5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Las etapas contempladas en la realización del presente trabajo son relacionados en la figura 11:

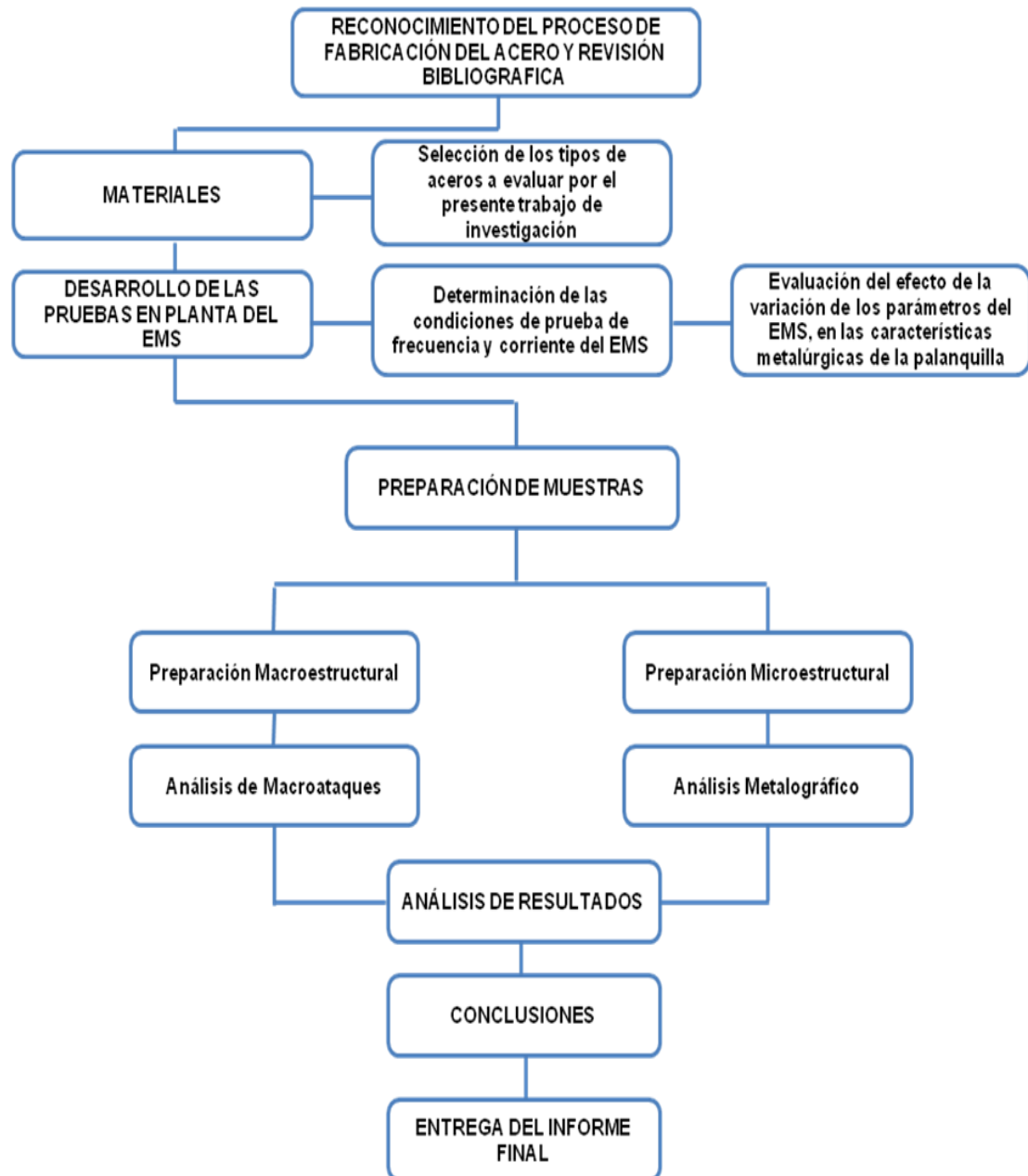


Figura 11. Desarrollo experimental

Este proyecto de investigación es el resultado de la realización de la práctica empresarial en la empresa Siderúrgica de Caldas S.A. El presente trabajo fue desarrollado en el sector de la colada continua de palanquillas, en la división de acería, con el apoyo y seguimiento a cargo del Ingeniero Orlando Plata Hernández, Director de Acería de Siderúrgica de Caldas S.A. La realización de este trabajo requirió de la utilización de conocimientos propios de la carrera de Ingeniería Metalúrgica, junto con el manejo adquirido del proceso de colada continua en planta.

5.1 RECONOCIMIENTO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL ACERO Y REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

En la primera etapa de la elaboración del proyecto se realizó un reconocimiento integral del proceso de la fabricación del acero; iniciando en el área de selección y preparación de la chatarra, hasta la elaboración del producto terminado mediante laminación en caliente. Una vez terminada esta etapa, se procedió a realizar una recopilación de los conceptos necesarios para la estructuración del proyecto, como los son: conocimiento del proceso de colada continua, defectología presente en la solidificación del acero, principios de operación y funcionamiento del Sistema de Agitación Electromagnética (EMS), conocimiento de las normas que evalúan la calidad de la palanquilla, influencia de las variables de operación del proceso colada continua en la fabricación de palanquillas, refinación del acero, entre otros. Esta búsqueda se desarrolló desde dos frentes, el primero en forma teórica, mediante diferentes medios especializados como libros, trabajos de grado, revistas, artículos técnicos e internet; complementándose con el segundo frente, mediante el trabajo en planta el cual consistió en consultar al personal técnico y de ingenieros de las áreas de de mantenimiento eléctrico, diseño, máquina de colada continua y calidad todo lo referente al manejo del EMS; como planos del sistema, funcionamiento eléctrico, sistema de refrigeración del EMS, condiciones actuales de operación, métodos utilizadas para la evaluación de la calidad

superficial e interna de la palanquilla, parámetros operacionales del sistema, entre otros, obteniéndose de este modo un manejo integral de los conceptos y variables necesarios para la estructuración y desarrollo del proyecto

5.2 SELECCIÓN DE LOS TIPOS DE ACEROS A EVALUAR POR EL PRESENTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Los aceros sometidos a estudio por el presente trabajo, son los descritos a continuación por la siguiente tabla:

Tabla 6. Composición química de los aceros estudiados por el proyecto

ASTM A 36		
Elemento	Norma NTC 1920	Norma ACASA
% C	Máx. 0,26	0.14 - 0.18
% Mn	-	0.55 - 0.65
% P	Máx. 0,04	0.030 Máx.
% S	Máx. 0,05	0.030 Máx.
% Si	Máx. 0,40	0.20 - 0.25
% Cu	Máx. 0,40 cuando se especifique	0.30 Máx.

ASTM A 572		
Elemento	Norma NTC 1985	Norma ACASA
% C	Máx. 0,23	0.17 - 0.22
% Mn	Máx. 1,35	0.85 - 0.85
% P	Máx. 0,04	Máx. 0.030
% S	Máx. 0,05	Máx. 0.030
% Si	Máx. 0,40	0.20 - 0.30
% Cu	-	Máx. 0.30
%Nb	0,005 - 0,05	0.020 - 0.030

ASTM A 706		
Elemento	Norma NTC 2289	Norma ACASA
% C	Máx. 0,30	0.25 - 0.30
% Mn	Máx. 1,50	1,05 - 1,15
% P	Máx. 0,35	Máx. 0.030
% S	Máx. 0,45	Máx. 0.040
% Si	Máx. 0,50	0,20 - 0,26
% Cu	-	Máx. 0.40
%Nb	-	0.022 - 0.025

Fuente. Norma Técnica Colombiana

5.3 DESARROLLO DE LAS PRUEBAS EN PLANTA

Se realizaron un total de 20 pruebas en planta, para un total de 56 muestras, distribuidas en tres etapas de la siguiente manera:

ETAPA 1: En esta primera etapa, se evaluó la influencia de los actuales parámetros de operación del sistema de agitación electromagnética (Corriente: 90 Amperios, Frecuencia: 3 Hertz) en la calidad de la palanquilla, para tres tipos de acero y dos diferentes secciones de palanquilla, como se observa en la tabla 7.

Tabla 7. Pruebas en planta, realizadas en la primera etapa

ETAPA 1					
Prueba Número	Tipo Acero	Sección (mm)	Condiciones EMS actuales (90 Amperios, 3 Hertz)		
			Inicio Colada	Mitad Colada	Final Colada
1	ASTM A36	120*120	1	1	1
2	ASTM A706	120*120	1	1	1
3	ASTM A572	120*120	1	1	1
4		130*130	1	1	1

Número de muestras: 12

Esta fase inicial del proyecto, permitió a su vez, identificar y clasificar los defectos que aparecían con mayor frecuencia en la palanquilla fabricada por la división de acería y establecer así la criticidad que cada uno de ellos puede tener en el conformado del producto final.

ETAPA 2: Una segunda etapa, en la cual se evaluó la calidad obtenida en las palanquilla con el agitador electromagnético desactivado, con los mismos tipos y secciones de acero de la etapa 1, como se observa en la tabla 8.

Tabla 8. Pruebas en planta, realizadas en la segunda etapa

ETAPA 2				
Prueba Número	Tipo Acero	Sección (mm)	Sin EMS	
			Muestra Inicial	Muestra Final
5	ASTM A36	120*120	1	1
6	ASTM A706	120*120	1	1
7	ASTM A572	120*120	1	1
8		130*130	1	1

Número de muestras: 8

ETAPA 3: En la tercera etapa se determinaron las condiciones más adecuadas de operación del EMS para los diferentes tipos de acero y secciones de palanquilla fabricados por la división de acería de la empresa Siderúrgica de Caldas S.A. Las condiciones de prueba escogidas se muestran en la tabla 9. Las pruebas en planta realizadas en la etapa 3, se observan en la tabla 10.

Tabla 9. Condiciones de prueba del EMS, en la tercera etapa

ETAPA 3		
Condición	Parámetros EMS	
	Frecuencia (Hz)	Corriente (A)
1	110	4
2	130	3
3	160	4

Tabla 10. Pruebas en planta, realizadas en la tercera etapa

ETAPA 3					
Prueba Número	Tipo Acero	Sección (mm)	Condiciones de prueba del EMS		
			Inicio Colada	Mitad Colada	Final Colada
9,10,11	ASTM A36	120*120	3	3	3
12,13,14	ASTM A706	120*120	3	3	3
15,16,17	ASTM A572	120*120	3	3	3
18,19,20		130*130	3	3	3

Número de muestras: 36

Todas las pruebas se realizaron en la línea 3 de la máquina de colada continua SHM de la división de acería, con velocidades de colada de 1,3 a 1,7 m/min, valores de sobrecalentamiento en tundish de 20-60 °C y un diámetro de buza de 12 mm. En cada prueba, se registraron las variables del proceso de la colada continua acabadas de mencionar, a fin de garantizar, que en el momento y durante el transcurso de cada unas de las pruebas, la máquina de colada continua se encontraba trabajando en completa normalidad, este registro se describe en el Anexo B. Para cada prueba, se tomaron muestras al inicio, mitad y final de cada colada, para observar el efecto de la aplicación del EMS durante una colada completa, en la calidad superficial e interna de las palanquillas.

5.4 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

En el presente trabajo, se realizaron dos tipos de análisis: el primero, de tipo macroestructural, por medio de la técnica de macroataques, la cual es una prueba simple, que revela información valiosa sobre la homogeneidad de las muestras a analizar. Esta prueba provee información sobre: (1) las variaciones en la estructura columnar, dendritas, líneas de flujo; (2) variaciones en la composición química, tales como segregación y microsegregación, y (3) la presencia de discontinuidades tales como grietas, poros, pliegues. Y el segundo, de tipo

microestructural, mediante el análisis metalográfico, que revela información sobre la morfología interna e impurezas presentes, con la ayuda del microscopio óptico.

Preparación Macroestructural: El desarrollo de las pruebas vía macroataques se hizo según lo descrito por la norma ASTM E 381:

Toma de la muestra, con una longitud de: 15 a 20 cm, la cual se corta del siguiente modo:

- Primero, un corte transversal de la muestra de 5 cm de longitud aproximadamente
- Segundo, un corte longitudinal por toda zona central de la palanquilla.
- Tercero, se realiza el ataque: Fue utilizado como reactivo ácido clorhídrico comercial diluido en agua, con una proporción en volumen de 1:1, con un tiempo de exposición de la muestra de 15- 30 minutos, a una temperatura de 70 – 80 °C.

Análisis Macroestructural: Se realizaron 56 macroataques, distribuidos de la siguiente forma, 12 en la primera etapa, 8 en la segunda etapa y 36 en la tercera etapa.

Preparación Metalográfica: El desarrollo de las pruebas metalográficas se hizo según lo descrito por la norma ASTM E 3:

La finalidad de la preparación es obtener una superficie plana y especular, para analizar, al ser atacado, el estado del material internamente. Se preparó el material de la siguiente forma:

- Corte fino
- Montaje de baquelita

- Desbaste con papel esmeril No 50
- Pulido, con papel esmeril No 240, 320, 400, 600
- Pulido fino, al cual en su paño se le adiciono abrasivo de alúmina de 0,5 μ .
- Ataque, se utilizó el reactivo Nital al 2% durante un tiempo de 15 segundos.

Análisis Metalográfico: 15 probetas, distribuidas de la siguiente forma: 3 en la primera etapa (una probeta por cada tipo de acero estudiado, sometidos a esta condición de agitación), 3 en la segunda etapa (una probeta por cada tipo de acero estudiado, sometidos a esta condición de agitación), y 9 en la tercera etapa (una probeta por cada tipo de acero estudiado, sometidos a estas 3 condiciones de agitación), como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 11. Número de probetas utilizadas en el análisis metalográfico

Tipo de Acero	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3		
	90 A - 3 Hz	Sin EMS	110 A - 4 Hz	130 A - 3 Hz	160 A - 4 Hz
ASTM A 36	1	1	1	1	1
ASTM A 572	1	1	1	1	1
ASTM A 706	1	1	1	1	1
	Número de probetas: 3	Número de probetas: 3	Número de probetas: 9		

6. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

6.1 ANÁLISIS MACROESTRUCTURAL

Se realizó este análisis, para evaluar el efecto de la variación de las condiciones de agitación del EMS, en la calidad superficial e interna de la palanquilla. Evaluándose por medio de la técnica de macroataques, los siguientes aspectos:

- La influencia de la aplicación del EMS, en la calidad superficial de las palanquillas.
- La influencia de la aplicación del EMS, en la porosidad central de las palanquillas.
- El efecto de la variación de la agitación del EMS, en las estructuras de solidificación de la palanquilla.
- El efecto de la aplicación del EMS, en la defectología de las palanquillas.

6.1.1 Influencia de la aplicación del ems en el estado superficial de las palanquillas. Se realizó un seguimiento en el patio de almacenamiento de las palanquillas, mediante una inspección visual, a cada una de las coladas de prueba sometidas a condiciones de agitación diferentes, para establecer la influencia de la aplicación del EMS en la calidad superficial del material. El resultado de esta inspección mostró que, a partir de un cierto valor de intensidad de corriente (220 Amperios), se incrementaba: (1) la distorsión y profundidad de las marcas de oscilación, y (2) la frecuencia de aparición de de gotas frías en la palanquilla, debido a la sobreagitación, generada por un alto valor de corriente del EMS en el menisco, como se observa en la figura 12.



Figura 12. Defectos superficiales generados por la sobreagitación en el menisco

6.1.2 Influencia de la aplicación del EMS, en la porosidad central de las palanquillas. A continuación se observa, de la figura 13 a la 16, el efecto favorable de la aplicación del EMS, en la porosidad central de las palanquillas. Se realiza una comparación entre probetas con: (1) el EMS desactivado, y (2) el EMS con una condición de agitación de 160 amperios y 4 Hertz; para los tres tipos de aceros estudiados por el presente trabajo.

SECCIÓN 120 X 120 mm

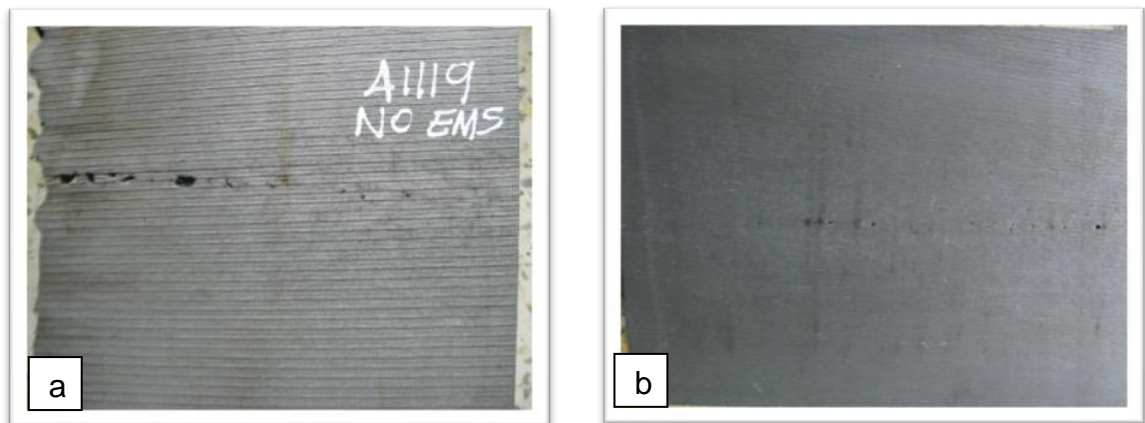


Figura 13. a) Muestra colada 41119, ASTM A 706 sin EMS; b) Muestra colada 42107, ASTM A 706 con 160 A - 4 Hz.

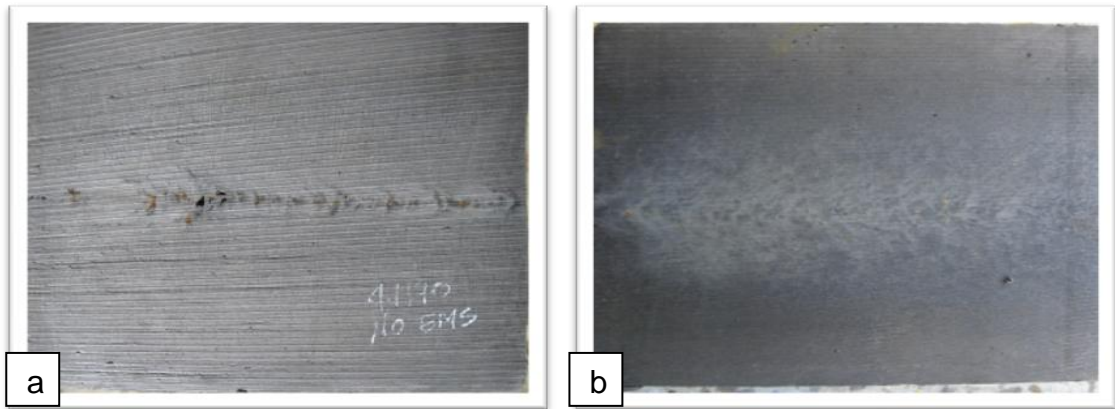


Figura 14. a) Muestra colada 41170, ASTM A 36 sin EMS; b) Muestra colada 42439, ASTM A 36 con 160 A - 4 Hz.

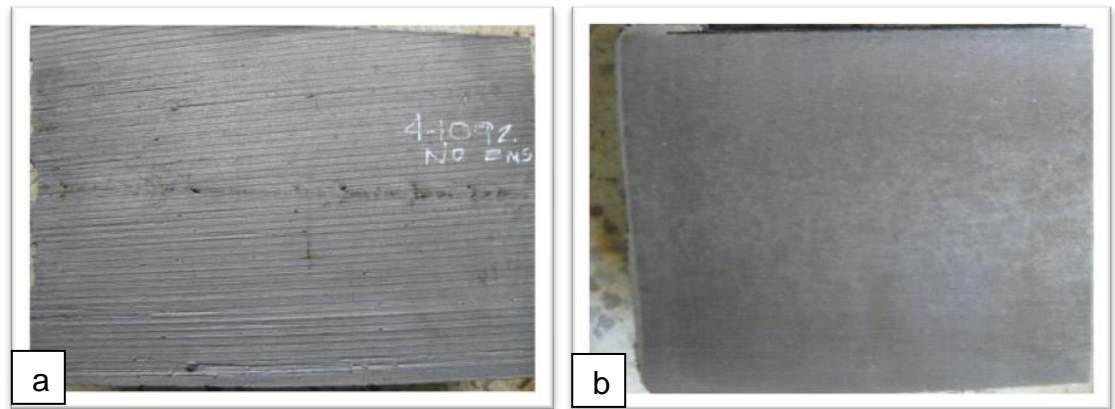


Figura 15. a) Muestra colada 41092, ASTM A 572 sin EMS; b) Muestra colada 42568, ASTM A 572 con 160 A - 4 Hz.

SECCION 130 X 130 mm

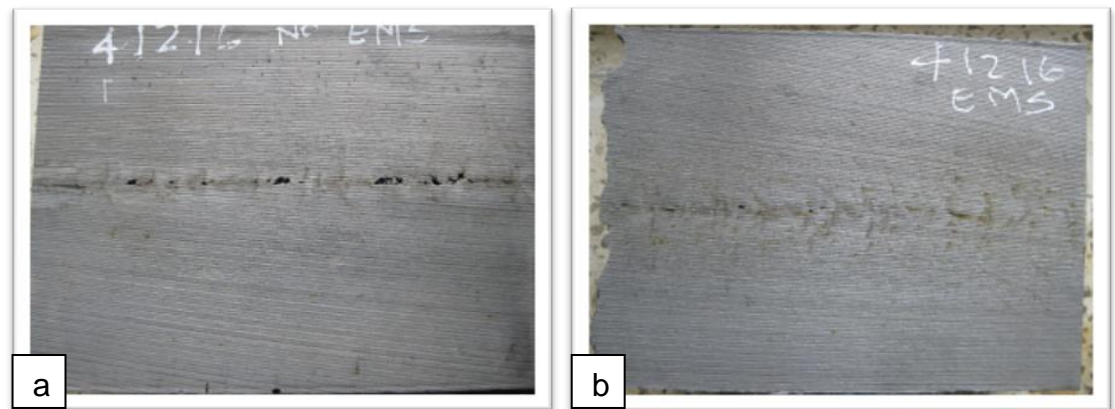


Figura 16. a) Muestra colada 41216, ASTM A 572 sin EMS; b) Muestra colada 41216, ASTM A 572 con 160 A - 4 Hz.

El patrón de porosidad observado es diferente para las muestras con y sin EMS. Mientras que en las barras sin EMS se aprecia una porosidad central continua, profunda y de forma alargada, las barras con EMS tienen un aspecto superficial mucho más homogéneo y libre de defectos, en donde la porosidad central es casi nula, mejor distribuida y poco profunda, corroborándose así, el efecto positivo causado por el EMS en la porosidad central de las palanquillas. Esta es la condición de agitación, de entre todas las evaluadas, que presenta una distribución más homogénea, a través de toda la sección longitudinal de las palanquillas.

6.1.3 Influencia de la variación del EMS, en las estructuras de solidificación de las palanquillas. Con el propósito de revelar el tipo de grano solidificado, se realizaron macroataques en muestras del material fabricado, con diferentes condiciones de agitación. Se estableció con las pruebas de macroataque, la distribución mediante porcentaje, de cada una de las zonas de solidificación características para muestras con y sin EMS.

6.1.3.1 Efecto del EMS en el espesor de la zona equiaxial de las palanquillas. En general se observó que las barras coladas con EMS tienen una zona equiaxial más amplia y centrada a medida que se aumentan las condiciones de agitación. Para evaluar la influencia del EMS en la macroestructura de las palanquillas se determinó, en cada caso, la proporción de la zona equiaxial (Z_{EQ}) y se la comparó con los valores obtenidos en muestras sin EMS. Para cada condición de uso del EMS, se estableció el incremento de la zona equiaxial central ($\Delta_{Z_{EQ}}$) respecto a la condición sin agitación. La figura 17 y la tabla 12 muestran que al aumentar los parámetros de operación del EMS (frecuencia y corriente) se incrementa el valor de $\Delta_{Z_{EQ}}$ en los tres tipos de acero estudiados. Este aumento en la zona equiaxial se produce por dos motivos: el primero, debido a la dispersión de los núcleos originados por la nucleación copiosa en la región periférica al molde, y el segundo, debido al efecto de multiplicación cristalina que genera el EMS en el frente de

solidificación, el cual rompe las puntas de las dendritas, creando nuevos cristales, para luego, ser distribuidas por toda la masa líquida de la sección transversal de la palanquilla por medio de las corrientes de convección.

Sección de 120 mm					Sección 130 mm
Condiciones EMS		$\Delta_{ZEQ.} (\%)$			
I (Amperios)	F (Hertz)	ASTM A 36	ASTM A 572	ASTM A 706	ASTM A 572
0	0	15	13,33	13,33	16,22
90	3	26,38	21,66	21,7	24,72
110	4	30,28	27,66	24,56	28,85
130	3	32,18	30,52	26,42	34,58
160	4	36,66	31,66	30,33	36,92

Tabla 12. Efecto condiciones de agitación del EMS en el tamaño de la zona equiaxial central

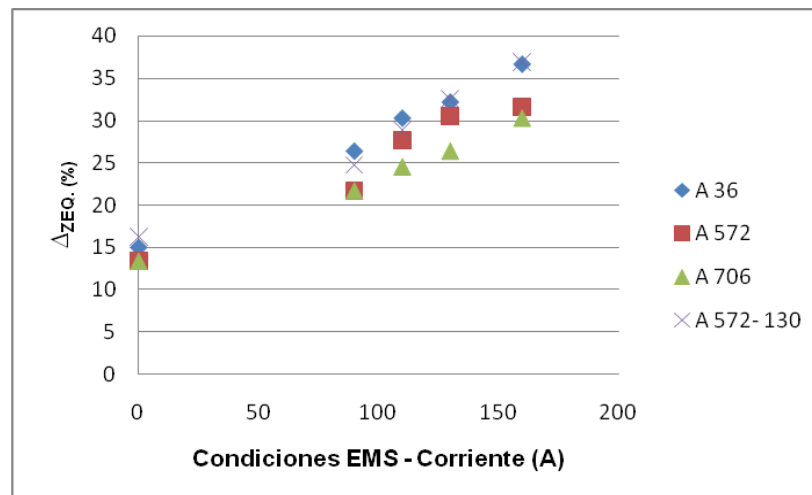


Figura 17. Efecto de la aplicación EMS en el tamaño de la zona equiaxial de las palanquillas

6.1.3.2 Efecto del EMS en el espesor de la capa templada de la palanquilla.

Por medio de macroataques se pudo visualizar la extensión de la capa templada a través de la sección transversal de la palanquilla para diferentes condiciones de agitación. El cálculo de la zona templada se realizó tomando 4 medidas en cada

una de las cuatro caras de la sección transversal de cada probeta, en muestras con y sin EMS. Se estudiaron cinco diferentes condiciones de agitación para tres diferentes tipos de aceros según la metodología planteada. Los resultados de las mediciones realizadas se resumen en la tabla 14. Se graficaron en la figura 18 los resultados de la medición del espesor de la capa templada en el acero ASTM A 572, donde se observó que, el uso del EMS provoca un aumento en el espesor de la capa templada en comparación con muestras sin EMS, esto ocurre debido a que la agitación permite en esta zona: (1) redistribuir mejor el sobrecalentamiento, debido a la reducción de los gradientes térmicos y homogenización de la temperatura a través de toda la sección transversal de la palanquilla, (2) aumenta la extracción calórica de la aleación por conducción, entre el molde y el acero, (3) aumenta la difusividad térmica de la aleación, ya que permite en el frente de solidificación ajustar rápidamente la temperatura del líquido a la de sus alrededores (sólido). Por otro lado, la figura 19 muestra también que, un aumento en las condiciones del EMS provoca un incremento en el espesor de la capa templada para los tres tipos de acero analizados.

Sección 120 mm - ASTM A 572					
Número de cara de la barra	Espesor capa templada (mm)				
	Sin EMS	90 A - 3Hz	110 A - 4 Hz	130 A - 3Hz	160 A - 4Hz
1	6	8,5	9,7	10,5	11,7
2	7,7	7,6	8,5	10	10,9
3	7,9	7,5	9,5	9,3	11,4
4	6,4	8,4	8,4	9,8	10
Promedio	7	8,0	9,0	9,9	11
Σ	0,94	0,52	0,67	0,50	0,74

Tabla 13. Resultados de la medición del espesor de la capa templada en el acero ASTM A572

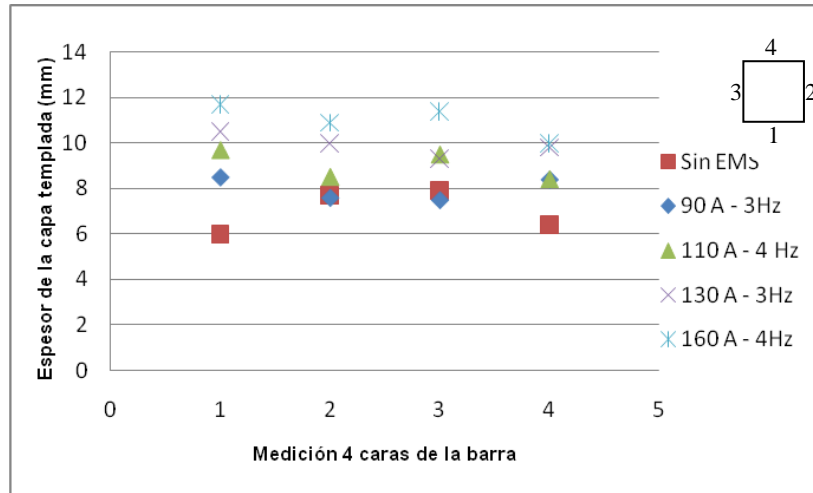


Figura 18. Esquema de la variación del espesor de la capa templada en el acero ASTM A 572 ante la aplicación del EMS

Condiciones EMS		Espesor capa templada (mm)							
Frecuencia (Hz)	Corriente (Amp)	ASTM A 572				ASTM A 36		ASTM A 706	
		Sección 120 Prom (mm)	σ	Sección 130 Prom (mm)	σ	Prom (mm)	Σ	Prom (mm)	Σ
0	0	7,0	0,94	7,8	0,91	7,5	0,77	6,5	0,8
3	90	8,0	0,52	9	0,62	8,5	0,48	7,2	0,54
4	110	9,1	0,67	10,2	0,7	9,8	0,24	8,3	0,54
3	130	9,9	0,50	11,4	0,52	10,6	0,36	9,2	0,41
4	160	11	0,74	12,5	0,65	12,0	0,4	11,5	0,55

Tabla 14. Efecto de la influencia del EMS en el espesor de la capa templada

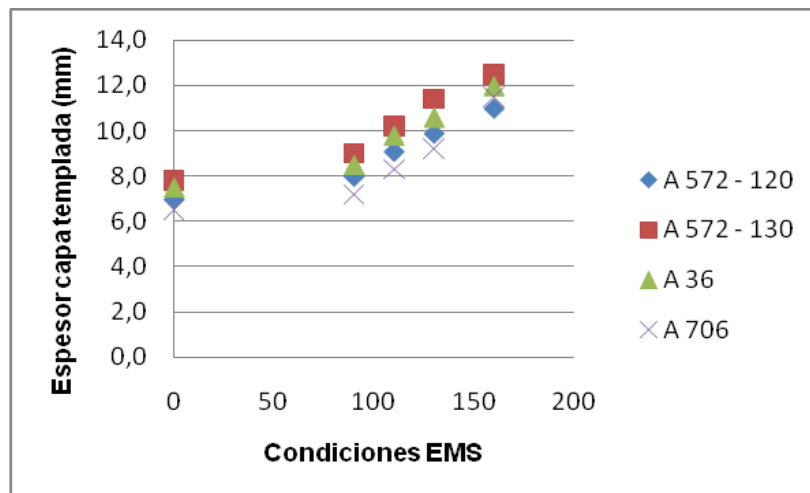


Figura 19. Efecto de la variación del EMS en el espesor de la capa templada de las palanquillas.

6.1.4 Efecto de la aplicación del EMS, en la defectología de las palanquillas.

Para poder evaluar el efecto de la aplicación del EMS en la calidad externa e interna de las palanquillas se realizó una clasificación de los defectos presentes con mayor frecuencia en el proceso de colada continua, de modo que permita establecer con base a este estándar, si un material se acepta o se rechaza.

6.1.4.1 Clasificación y estandarización de la defectología presente en la palanquilla fabricada por la empresa Siderúrgica de Caldas S.A. Los defectos que se originan durante el proceso de solidificación pueden formarse en el proceso de colada continua de forma superficial o interna. Estos defectos, dependiendo su gravedad, pueden ocasionar la degradación del material. Es por esto que cada planta debe contar con una clasificación de la defectología presente en las palanquillas, en la cual se establezca la criticidad del defecto. Por lo tanto, previamente a la realización de las pruebas con macroataques, se realizó una clasificación de los defectos presentes con mayor frecuencia en el proceso de la colada continua del acero de la división de acería, tomando como base la elaborada por los integrantes del área de gestión de calidad de la empresa Siderúrgica de Caldas S.A. Las tablas de clasificación son el soporte para establecer si una palanquilla se degrada o se acepta. La clasificación está dividida en cinco tipos, desde el A hasta el E, siendo el tipo A, aquel que está libre del defecto y los tipos D y tipo E los denominados críticos y que afectan el buen desarrollo del conformado del material en etapas posteriores.

DEFECTOS INTERNOS

Tabla 15. Clasificación porosidad interna en palanquilla (Blowholes)

Tipo de defecto	% presencia del defecto en área de la palanquilla
Tipo A	Sin presencia de blowholes
Tipo B	0 – 15
Tipo C	15 – 30
Tipo D	30 – 45
Tipo E	45 en adelante

Tabla 16. Clasificación grieta central en forma de estrella

Tipo de defecto	Longitud de la grieta (mm)
Tipo A	Sin grietas
Tipo B	0 – 5
Tipo C	5 – 15
Tipo D	15 – 20
Tipo E	20 en adelante

Tabla 17. Clasificación rechupe central

Tipo de defecto	Diámetro del rechupe (mm)	Profundidad del rechupe (mm)
Tipo A	Sin rechupe	Sin rechupe
Tipo B	0 – 1	0 – 5
Tipo C	1 – 2	5 – 10
Tipo D	2 – 4	10 – 20
Tipo E	4 – 8	20 en adelante

Tabla 18. Clasificación grieta diagonal

Tipo de defecto	Longitud de la grieta (mm)
Tipo A	Sin grietas
Tipo B	0 – 10
Tipo C	10 – 20
Tipo D	20 – 30
Tipo E	30 – 40

Tabla 19. Clasificación grieta central

Tipo de defecto	Longitud de la grieta (mm)
Tipo A	Sin grietas
Tipo B	0 – 10
Tipo C	10 – 20
Tipo D	20 – 30
Tipo E	30 en adelante

IRREGULARIDADES DE FORMA

Tabla 20. Clasificación depresión

Tipo de defecto	Profundidad (mm)
Tipo A	Sin depresión
Tipo B	0 – 5
Tipo C	5 – 10
Tipo D	10 – 15
Tipo E	15 en adelante

Tabla 21. Clasificación escasez

Tipo de defecto	Diámetro del rechupe (mm)
Tipo A	Sin escasez
Tipo B	0 – 5
Tipo C	5 – 10
Tipo D	10 – 15
Tipo E	15 en adelante

Tabla 22. Romboides

Tipo de defecto	% de romboides
Tipo A	Sin Romboides
Tipo B	0 – 2
Tipo C	2 – 4
Tipo D	4 – 6
Tipo E	6 en adelante

6.1.4.2 Resultado de los macroataques realizados durante el desarrollo de las tres etapas del proyecto

El procedimiento de observación macroscópica más utilizado es el macroataque, el cual puede clasificarse en dos tipos, a altas temperaturas y a bajas temperaturas (ambiente), el cual en general solo necesita que la superficie tenga una superficie de corte esmerilada. Los tiempos de ataque son en general muy superiores a los de un ataque de tipo microestructural. La estructura revelada por esta técnica muestra los resultados de la solidificación denominada también estructura de lingote generada en este caso por la colada continua. La aplicación de esta técnica se realizó en base a las normas ASTM E340-00 “Standard test method for macroetching Metals and Alloys” y ASTM E381-01 “Standard method of macroetch testing steel bars, billets, blooms and forgings”. Estas pruebas se realizaron con el propósito de evaluar el efecto de la aplicación del EMS en la calidad de la palanquilla, para tres diferentes tipos y secciones de aceros. Se tomaron y analizaron muestras con diferentes condiciones de agitación en una misma línea a lo largo de toda una colada. En el anexo A se observan los resultados del análisis de los macroataques realizados durante las tres etapas del proyecto. A continuación se observan los resultados de los macroataques realizados durante el desarrollo del presente trabajo.

6.1.4.2.1 Etapa 1: Muestras trabajadas con las actuales condiciones de agitación (90 A – 3Hz):

A continuación en la figura 20.a.b.c, se observan los resultados del análisis de los macroataques de los tres tipos de acero estudiados, con una sección de 120 mm, con las condiciones actuales de operación del EMS (90 Amperios y 3 Hertz).

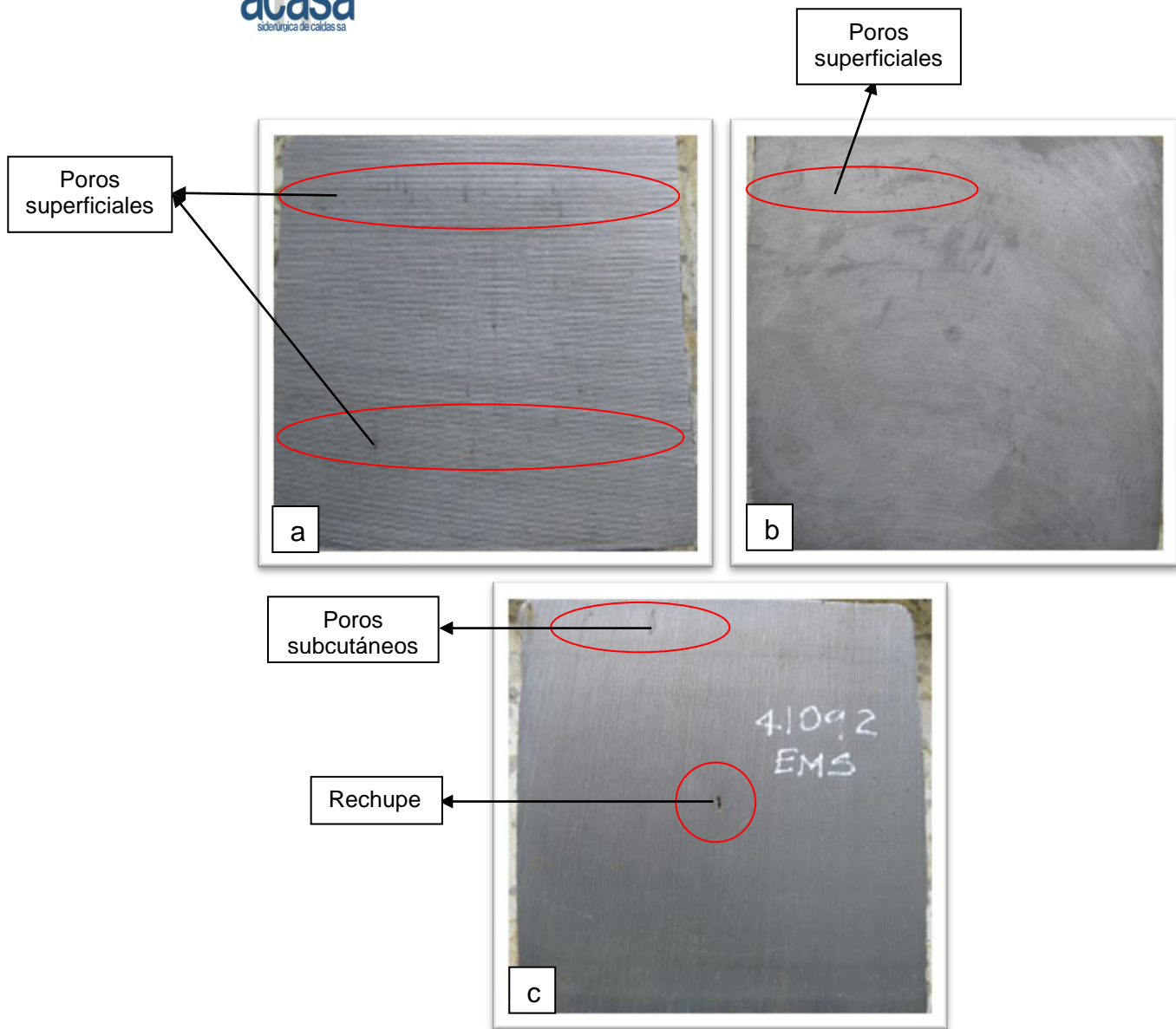


Figura 20. a) Muestra Colada 41170, ASTM A 36; b) Muestra colada 41118, ASTM A 706; c) Muestra colada 41092, ASTM A 572.

En la figura 20.a, el defecto que presenta mayor relevancia en la estructura interna de la muestra, es la aparición de poros internos tipo C. Este tipo de defecto al encontrarse en la parte interna del producto y ser poco profundas, al ser laminados será soldado y desaparecido. En la figura 20.b, se observa la presencia de poros superficiales tipo B, este defecto es leve y no genera ningún problema al ser laminado, como redondo corrugado, perfil para el cual se destino laminar esta colada. En esta colada, se trabajó con una temperatura de sobrecalentamiento en

el tundish elevada (1575 °C, 60 °C grados por encima de la temperatura de líquidus). Al analizar la calidad interna de la muestra, no se detecta la presencia de ningún defecto crítico, a pesar de la alta temperatura de trabajo. Esto se debe a la eficiente distribución de los gradientes térmicos por parte del EMS. En la figura 20.c, se observa la presencia de un rechupe central poco profundo, junto con una cantidad pequeña de poros superficiales en la sección transversal de las muestras atacadas, los cuales desaparecerán durante el conformado del material.

A continuación en la figura 21, se observan los resultados del análisis del macroataque realizado a un acero ASTM A 572 con sección de 130 mm (para un perfil de 4 pulgadas), con las condiciones actuales de operación del EMS (90 Amperios y 3 Hertz).

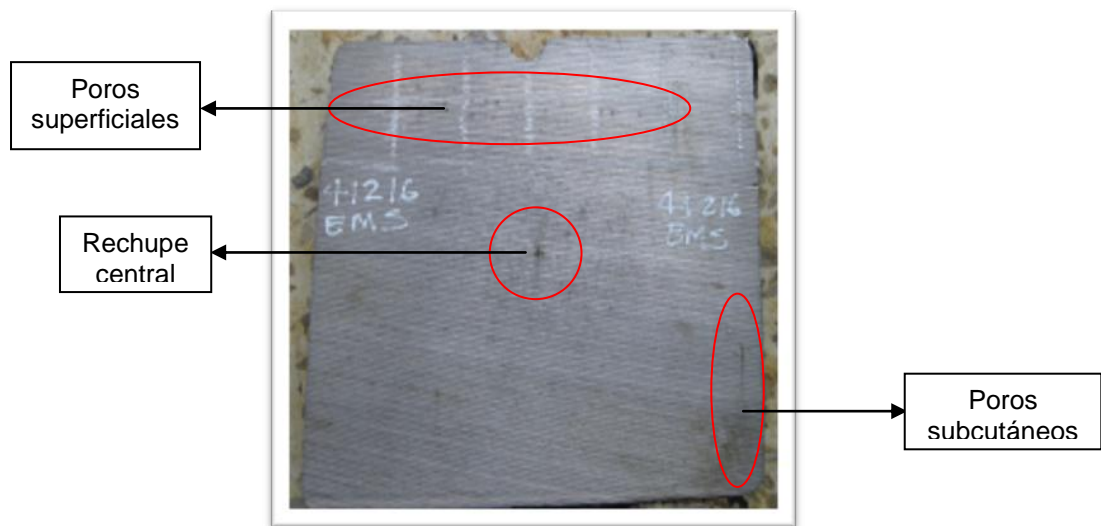


Figura 21. Muestra colada 41216, ASTM A 572.

Se observa en esta muestra, una gran cantidad de poros superficiales distribuidos a través de toda la sección transversal de la palanquilla, junto con la presencia de poros subcutáneos puntuales, que aunque están en poca cantidad, por estar en la periferia de la palanquilla pueden generar problemas al ser laminado el producto.

6.1.4.2.2 Etapa 2: Muestras trabajadas con el EMS desactivado:

A continuación en la figura 22.a.b.c, se observan los resultados del análisis de los macroataques de los tres tipos de acero estudiados, con una sección de 120 mm, con el EMS desactivado.

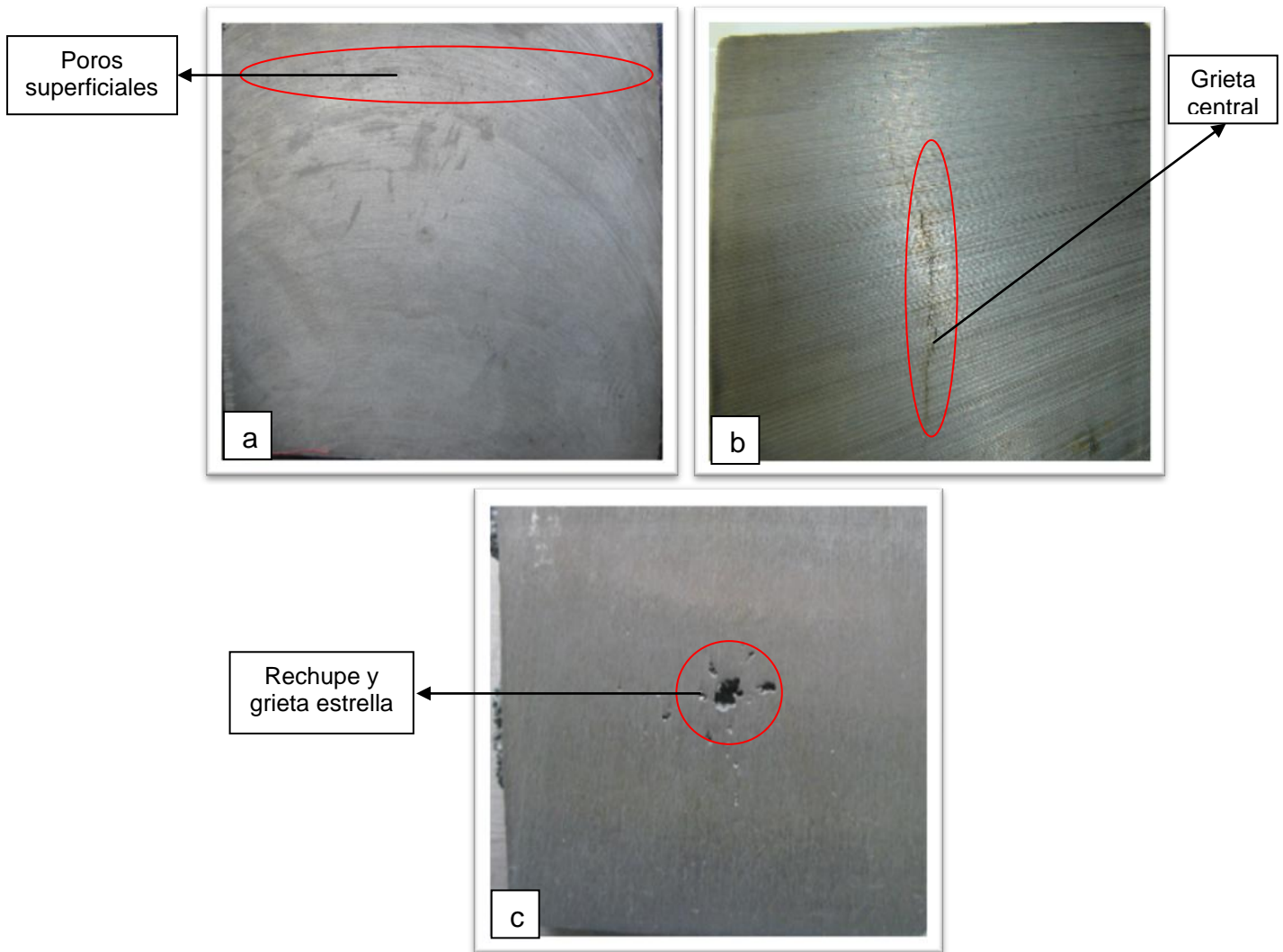


Figura 22.a) Muestra Colada 41170, ASTM A 36; b) Muestra coladas 41119, ASTM A 706; c) Muestra Colada 41092, ASTM A 572.

En el análisis de las muestras de sección transversal con el EMS desactivado se observa un aumento considerable en la defectología interna de las palanquillas, en comparación con las muestras trabajadas con el sistema en funcionamiento, esto

demuestra la efectividad de la aplicación del EMS en la calidad de la palanquilla, y se ratifica la necesidad de mantener siempre encendido el EMS. En la figura 22.c, la colada se observa una muy pobre calidad interna, debido al momento en que la muestra fue tomada. La muestra se tomó en las palanquillas finales de la colada 41092, instante en el cual se desactivó el EMS, con el agravante de que esta colada era una última secuencial. Se realizó esta prueba, con el fin de verificar el efecto nocivo que genera el desactivar el EMS en pleno funcionamiento.

A continuación en la figura 23, se observan los resultados del análisis del macroataque realizado a un acero ASTM A 572 con sección de 130 mm (para un perfil de 4 pulgadas), con el EMS desactivado.

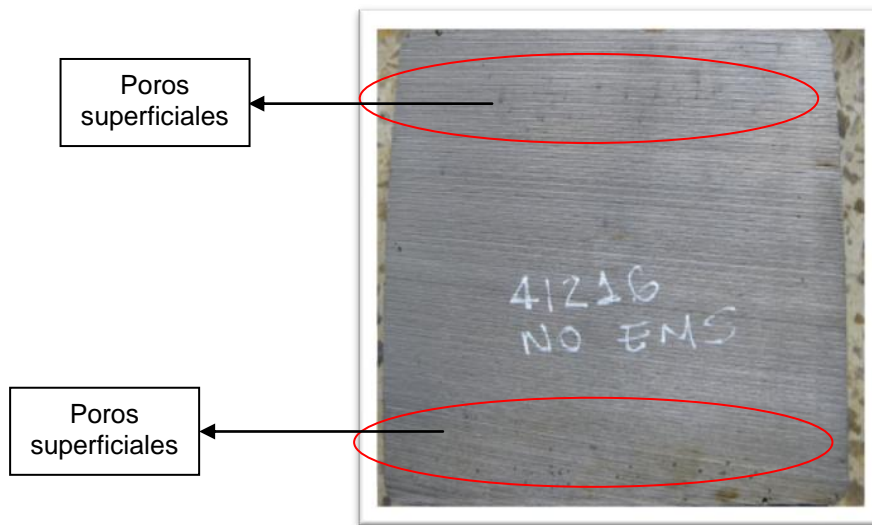


Figura 23. Muestra Colada 41216, ASTM A 572.

Se observa en esta muestra, una gran cantidad de poros superficiales distribuidos a través de toda la sección transversal de la palanquilla, que puede generar después del precalentamiento previo a la laminación la aparición de un defecto longitudinal en la barra laminada.

6.1.4.2.3 Etapa 3: Muestras trabajadas con las condiciones de prueba del EMS:

- **Condición de prueba 1:** Corriente: 110 Amperios – Frecuencia: 4 Hertz

A continuación en la figura 24.a.b.c, se observan los resultados del análisis de los macroataques de los tres tipos de acero estudiados, con una sección de 120 mm, con una condición de agitación de: 110 Amperios y 3 Hertz.

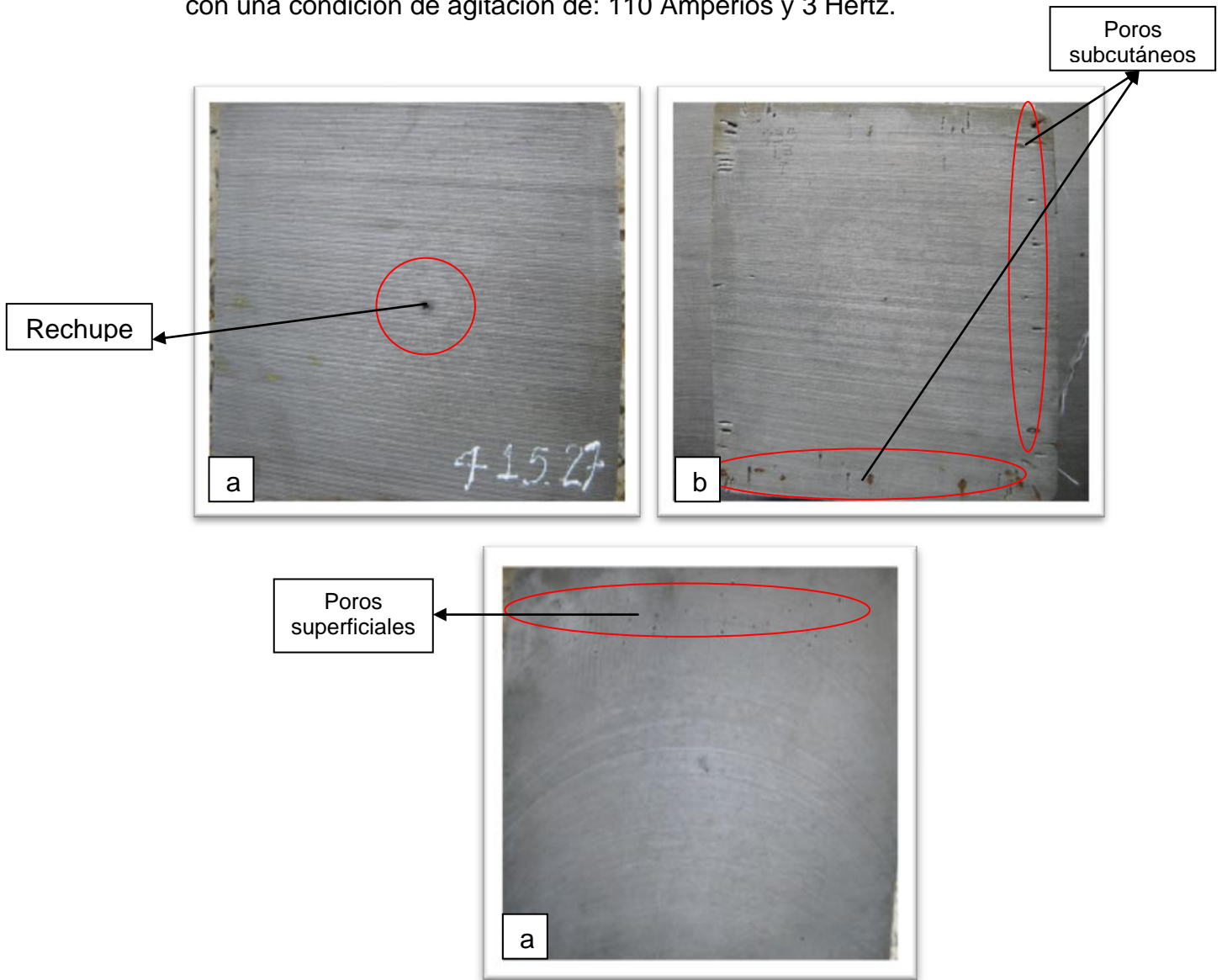
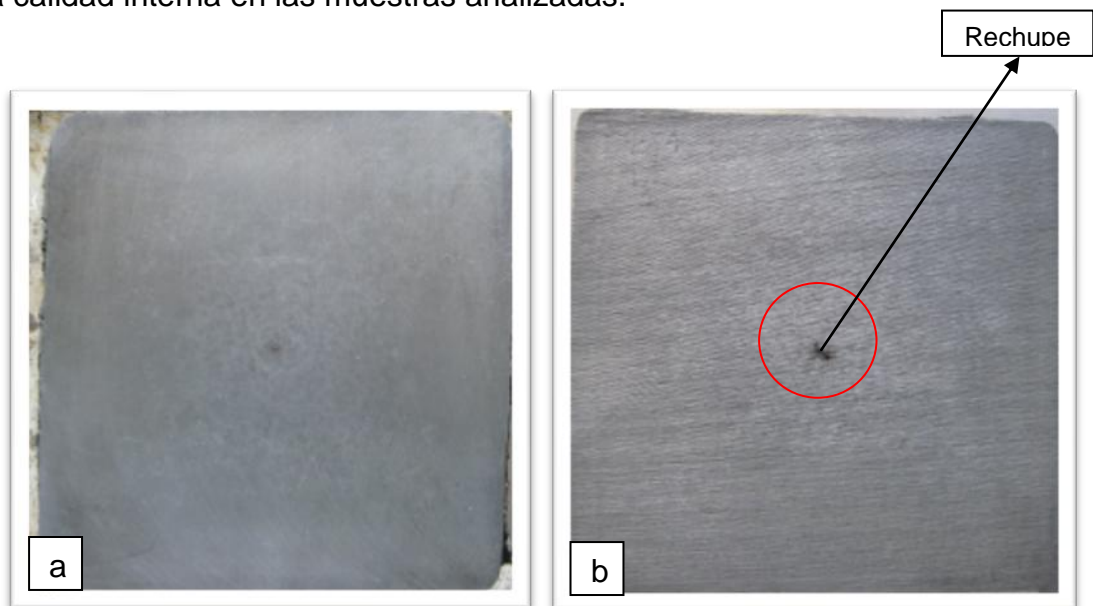


Figura 24. a) Muestra Colada 41527, ASTM A 572; b) Muestra coladas 41835, ASTM A 36; c) Muestra colada 41828, ASTM A 706.

En la figura 24.a, se presenta en la muestra un rechupe central poco profundo y una mínima presencia de blowholes en la sección transversal de la palanquilla; en la figura 24.b, se observa la presencia de blowholes tipo D, generado por una deficiencia en la lubricación del aceite y con el equipo de inyección de aluminio; en la figura 24.c, se observa la presencia de una cantidad aceptable de poros superficiales en la colada 41828, ;estos defectos encontrados en la superficie interna de las muestras con esta condición de agitación, indican que, se necesita aplicar una mayor agitación para así obtener superficies homogéneas libres de defectos que permitan fabricar perfiles con espesores mayores de 3 pulgadas.

- **Condición de prueba 2:** Corriente: 130 Amperios – Frecuencia: 3 Hertz

A continuación en la figura 25.a.b.c, se observan los resultados del análisis de los macroataques de los tres tipos de acero estudiados, con una sección de 120 mm, con una condición de agitación de: 130 Amperios y 3 Hertz. Se obtiene con la aplicación de: 130 Amperios - 3Hz, para los tres tipos de acero estudiados una la alta calidad interna en las muestras analizadas.



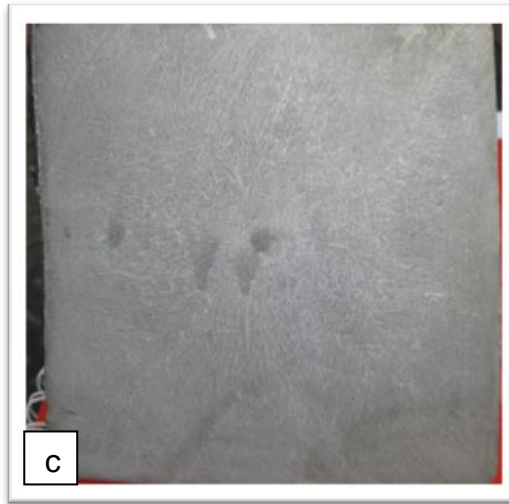


Figura 25. a) Muestra Colada 41576, ASTM A 572; b) Muestra coladas 41784, ASTM A 706; c) Muestra colada 41515, ASTM A 36,

A continuación en la figura 26, se observan los resultados del análisis del macroataque realizado a un acero ASTM A 572 con sección de 130 mm (para un perfil de 4 pulgadas), con una condición de agitación de: 130 A y 3 Hz. Hertz

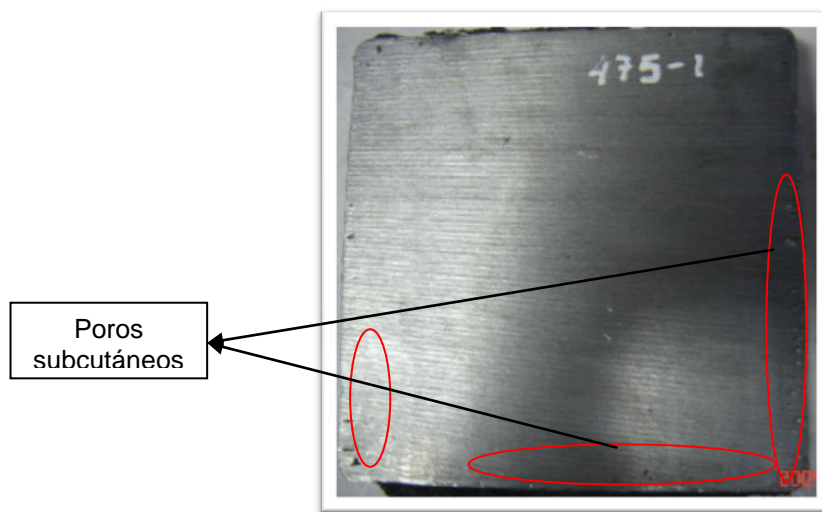


Figura 26. Muestra colada 42475, ASTM A 572.

Para este tipo de sección, aún con esta agitación se presentan defectos internos considerables como, la formación de poros subcutáneos, se recomienda entonces

la aplicación de unas condiciones de agitación mayores para garantizar el desarrollo de campañas de 4 pulgadas eficientes.

- **Condición de prueba 2:** Corriente: 160 Amperios – Frecuencia: 4 Hertz

A continuación en la figura 27.a.b.c, se observan los resultados del análisis de los macroataques de los tres tipos de acero estudiados, con una sección de 120 mm, con una condición de agitación de: 160 Amperios y 4 Hertz.

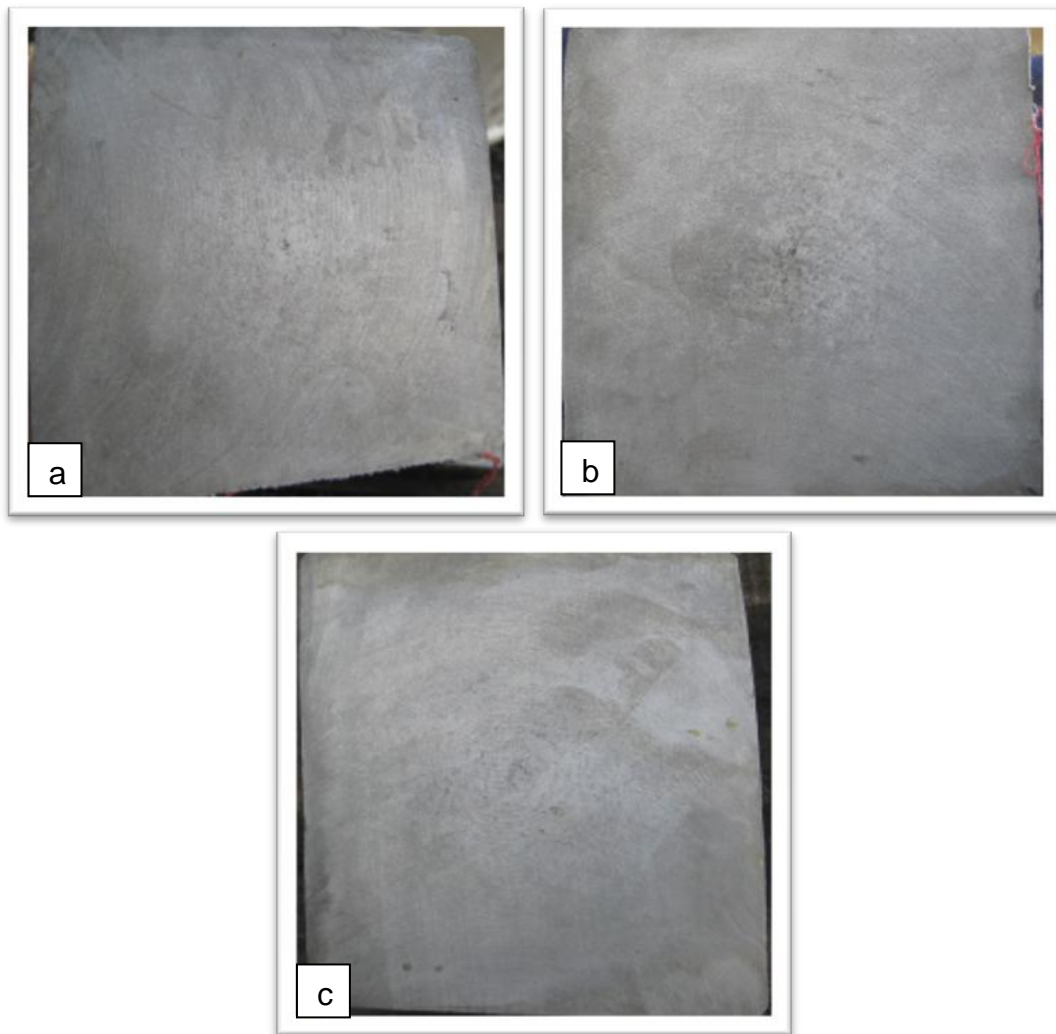


Figura 27. a) Muestra Colada 42146, ASTM A 572; b) Muestra colada 42545, ASTM A 706; c) Muestra colada 42439, ASTM A 36

A continuación en la figura 28, se observan los resultados del análisis del macroataque realizado a un acero ASTM A 572 con sección de 130 mm (para un perfil de 4 pulgadas), con una condición de agitación de: 160 Amperios y 4 Hertz.



Figura 28. Muestra colada 41720, ASTM A 572.

Al trabajar el sistema de agitación electromagnética con unas condiciones de operación de, corriente de 160 Amperios y una frecuencia de 4Hertz, el empuje y velocidad del sistema en el acero líquido aumentan, generando una mayor rotación, desplazando las posibles impurezas presentes hacia el centro de la palanquilla debido al efecto remolino causado, disminuyendo así la posibilidad de la aparición de defectos superficiales severos, causantes de las degradaciones de material al ser laminado. Trabajar con estas condiciones implica un sobre costo adicional en la fabricación del producto, pero al evaluar y realizar un balance costo-beneficio, se concluye que, es mínimo este valor adicional en energía en comparación con el aumento en la calidad obtenido, recomendándose por lo tanto la aplicación de estas condiciones de agitación para campañas de 4 pulgadas.

6.2 ANÁLISIS MICROESTRUTURAL

En el análisis metalográfico se evaluaron los siguientes parámetros:

- Efecto de la variación de las condiciones de operación del EMS, en las estructuras internas de solidificación de la palanquilla.
- Medición del espesor, homogeneidad y forma de la zona equiaxial y la zona templada en las palanquillas; con y sin EMS.

La microestructura encontrada en las pruebas de los productos en bruto de colada (palanquilla), presentaron una cristalización en forma de estructura Widmanstätten, en la cual la ferrita aparece como elemento proeutectoide (es la ferrita formada antes del eutectoide en los límites de grano de la austenita), que acompaña a la perlita (esta relación perlita y ferrita proeutectoide depende del porcentaje inicial de carbono), y surge en forma de agujas o bandas aciculares orientadas en la dirección de los planos cristalográficos de la austenita, como se observa en la figura 29. Aquí parte de la ferrita proeutectoide se precipitó en forma de agujas dirigidas hacia el interior de los granos, en lugar de depositarse en la envolvente reticular o formar cristales independientes.

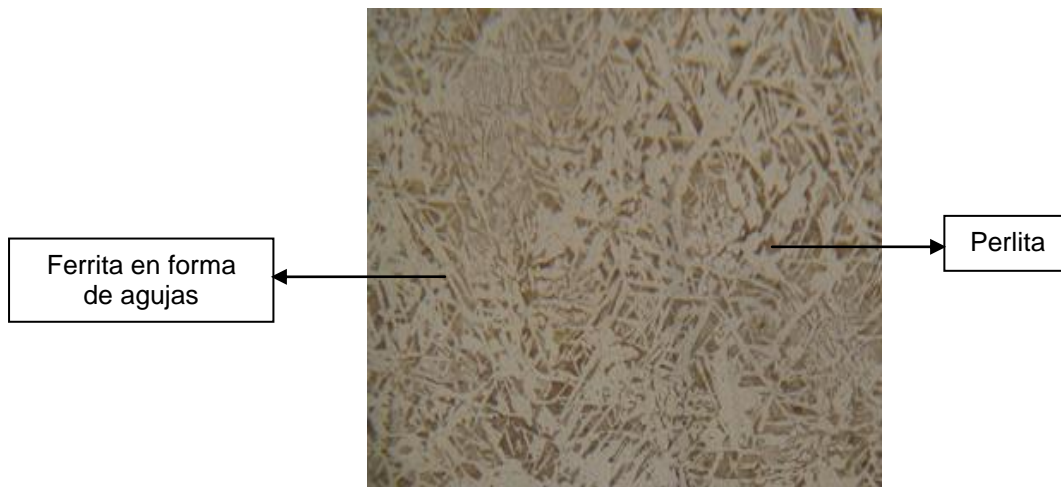


Figura 29. Estructura típica de un material en bruto de colada. Microestructura a 100x.

Las metalografías de las muestras observadas a continuación se tomaron en un área cercana al centro de la palanquilla (A 4 cm de la periferia), con el fin de evaluar el efecto del EMS en las estructuras de solidificación de las palanquillas. La figura 30.a.b.c, muestra la microestructura obtenida en probetas con y sin agitación electromagnética. En el literal a, se observa que al trabajar con el EMS desactivado, se presenta la formación de una estructura de tipo Widmanstätten. En literal b y c, se observa el efecto de la aplicación del EMS en la microestructura de la palanquilla, presentándose un refinamiento de grano, aumentando así la proporción de la zona equiaxial central en la sección central de la palanquilla.

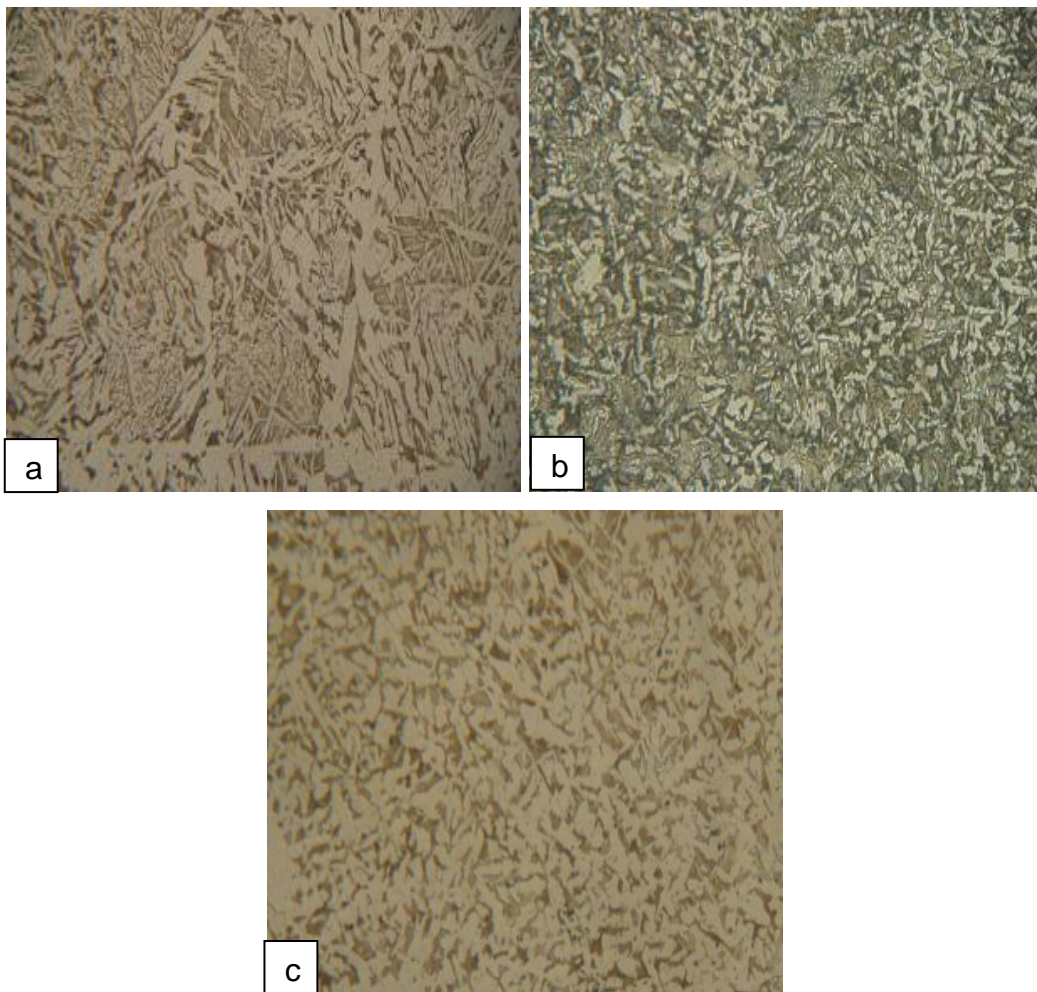


Figura 30. a) Metalografía colada 41170, sin EMS; b) Metalografía colada 41515, con 130 A y 3 Hz; c) Metalografía colada 42439, con 160 A y 4 Hz. Microestructura a 100x.

Como se observa en los resultados de las metalografías anteriores, el EMS provoca un cambio de estructura, al pasar de una de tipo dendrítica a una de tipo equiaxial; este cambio en la morfología es debido a que la nucleación ocurre en más sitios dentro del volumen del líquido. Este aumento de los núcleos se debe a la fragmentación de las dendritas en el frente de solidificación, provocado por los esfuerzos cortantes que genera el movimiento rotacional del EMS a través de toda la sección transversal de la palanquilla. En las muestras con EMS no se observa como en el caso sin EMS, dendritas columnares llegando hasta el centro de la barra. Una zona equiaxial más amplia, reduce la posibilidad de obtener heterogeneidades en la estructura de las piezas, las cuales son las causantes de la aparición de defectos como: rechupe, segregación o grietas. Con base en los resultados obtenidos, se establece que el EMS en gran medida ayuda a la obtención de productos con altos requerimientos de calidad.

6.3 RECOMENDACIONES EN LA APLICACIÓN DEL SISTEMA DE AGITACIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN LA MÁQUINA DE COLADA CONTINUA DE LA EMPRESA SIDERÚRGICA DE CALDAS S.A.

Basado en los resultados arrojados por el estudio sobre el efecto de la aplicación del Sistema de Agitación Electromagnética (EMS) en la máquina de colada continua de la empresa Siderúrgica de Caldas S.A se concluye lo siguiente:

1. Las condiciones de agitación mostradas en la tabla 23, son según el estudio las más adecuadas para procesar los siguientes tipos y perfiles de acero.

Tabla 23. Recomendación de la aplicación del EMS en perfiles menores de 3 pulgadas.

Sección 120 x 120 mm			
Condición EMS		Clase de acero	Perfil
Corriente (A)	Frecuencia (Hz)		
90	3	ASTM A 36	Perfiles menores de 3 pulgadas
		ASTM A 572	Perfiles menores de 3 pulgadas
		ASTM A 706	Todos los perfiles

La calidad obtenida según el estudio bajo la condición de agitación de 90 A – 3 Hz, para los tipos de acero mencionados es la más adecuada para fabricar perfiles menores de 3 pulgadas como se describe en la tabla 16, ya que presenta un nivel bajo de defectos y no críticos, los cuales cuando el material es laminado, van a ser soldados debido a la alta reducción de área sufrida durante el proceso de deformación plástica del material, hasta llegar a obtener un producto terminado que cumple con todos los requerimientos de calidad exigidos. Por lo tanto para este tipo de perfiles no se necesita de una mayor condición de agitación, ya que generaría un sobre costo de energía adicional no justificable. Además según los índices de calidad de la empresa para estos tipos de perfiles el porcentaje de productos degradados es mínimo y bien controlado.

2. Para la fabricación de los siguientes tipos perfiles, la condición de aplicación de agitación más adecuada según los resultados del estudio son la mostrada en la tabla 24:

Tabla 24. Recomendación de la aplicación del EMS en perfiles de 3 pulgadas.

Sección 120 x 120 mm			
Condición EMS		Clase de acero	Perfil
Corriente (A)	Frecuencia (Hz)		
130	3	ASTM A 36	Perfiles de 3 pulgadas (Canal 3")
		ASTM A 572	Perfiles de 3 pulgadas

En este caso para fabricar este tipo de perfiles se genera la necesidad de obtener productos con una alta calidad superficial e interna, debido a que junto con los perfiles de 4 pulgadas son los productos de mayor cuidado debido al alto porcentaje de degradación a línea comercial o línea chatarra que presentan según los índices de la sección de gestión de calidad, con lo cual se requiere la aplicación de una condición de agitación mayor a la de trabajo normal como lo es la de, I: 130 A, F: 3 Hz, la cual va a permitir obtener una mejor redistribución de la temperatura, una mayor homogenización del acero líquido dentro de la lingotera, una mayor capacidad de arrastre hacia el interior de la sección de las inclusiones, poros u otros tipos de defectos que debido a la rápida solidificación del acero en el molde no alcanzan a salir o ser retirados en el menisco por los operadores de hilo de la máquina de colada continua, generando producto de estos beneficios un acero de mayor calidad.

3. La empresa Siderúrgica de Caldas S.A en la actualidad es la única empresa en el país que fabrica perfiles de 4 pulgadas, debido a la alta complejidad y al control riguroso que sobre la elaboración de este producto debe llevarse. Por lo tanto según la investigación realizada en el área de acería sobre el efecto de la aplicación del EMS en la calidad de la palanquilla , este sistema influye en la obtención de un producto de mayor calidad, debido a que reduce en buena medida como ya observamos en el análisis de los macroataques la aparición de defectos que puedan provocar la degradación de un producto final, reduciendo así la rentabilidad del proceso productivo debido al sobre costo que causa recircular el material por el no cumplimiento de los estándares de calidad exigidos para la comercialización de este tipo de producto.

Es por esto que para este tipo de perfiles se debe aplicar las condiciones de agitación mostradas en la tabla 25:

Tabla 25. Recomendación de la aplicación del EMS en perfiles de 4 pulgadas.

Sección 130 x 130 mm			
Condición EMS		Clase de acero	Perfil
Corriente (A)	Frecuencia (Hz)		
160	4	ASTM A 36	Canal 4"
		ASTM A 572	Perfiles de 4 pulgadas

El desarrollo de este tipo de material es a pedido, por lo tanto se fabrica por campañas de 2 a 3 días, el cual debido al alto espesor y poca reducción de área al ser laminado en caliente, se requiere ejecutar un protocolo de control especial y riguroso en todas las etapas del proceso de fabricación. Dentro de este protocolo está incluido la aplicación del EMS con las condiciones de agitación de 160 A y 4 Hz, que según el estudio realizado, son las más adecuadas para la elaboración de este tipo de perfil.

NOTA 1: La empresa Siderúrgica de Caldas S.A fabrica también aceros de alto carbono como lo son AISI-SAE 1045 y AISI-SAE 1060, este material quedo fuera del estudio del trabajo, ya que su fabricación es muy poco común y es a pedido, además durante el tiempo que se estuvo en el desarrollo de la práctica solo se produjo una campaña, llevándose a cabo cuando tenía poco tiempo de permanencia en la empresa y no se tenía aun planificado la estructuración del proyecto, motivo por el cual no se incluyo en el proyecto. Pero se recomienda la aplicación del EMS con las condiciones de 160 A y 4 Hz para estos tipos de aceros debido a los problemas frecuentes y graves de segregación que suelen presentar los aceros con alto porcentaje de carbono.

NOTA 2: Cuando se presenten los siguientes casos durante el proceso de colada continua del acero, se recomienda la aplicación de la siguiente condición de agitación (160 A - 4 Hz):

Una temperatura de sobrecalentamiento del acero proveniente del horno cuchara y velocidades de colada muy altas:

Tabla 26. Recomendación de la aplicación del EMS en condiciones especiales de operación del proceso de colada continua

Casos especiales					
Condición EMS		Clase de acero	Perfil	Temperatura Sobrecalentamiento (°C)	Velocidad de colada (m/min)
Corriente (A)	Frecuencia (Hz)				
160	4	A 36, A 572, A 706	Todos	Mayor a 1665	Mayor a 2

Cuando el sistema del control de nivel automático de acero en el molde no esté trabajando adecuadamente, es decir, este presentando fluctuaciones constantemente se recomienda emplear esta condición (160 A – 4 Hz), para evitar el estallido de líneas y la obtención de una palanquilla defectuosa, estos problemas se reducen ya que al aumentar la agitación aumenta la distribución de la temperatura dentro del molde generando así una primera capa de acero solidificada más fuerte y homogénea, la cual generará una mayor oposición a las deformaciones que sufre el acero cuando está muy caliente y cuando el sistema de control de nivel no está funcionando adecuadamente, lo cual puede provocar sino es controlado adecuadamente la generación de pequeñas grietas superficiales en la palanquilla.

Cabe mencionar que el estallido de líneas no solo es provocado por una temperatura de sobrecalentamiento y velocidad de colada muy altas, también la puede a provocar una lubricación insuficiente y no homogénea, un mal estado de la lingotera o una refrigeración deficiente, aunque como se mencionó el EMS operando a estas condiciones (160 A - 4 Hz) reduce la probabilidad de que ocurra este problema, no lo hace completamente, por lo que se debe llevar el siguiente control: Si llegado al caso se presentan los problemas acabados de mencionar,

pero no hay estallido de línea, pueden llegar producto de estos factores a aparecer en la palanquilla defectos de todo tipo, tanto internos como externos. Es por esto que se debe realizar un muestreo en la colada que se presente este fenómeno mediante macroataques y una revisión visual del material cuando sea enfriado a fin de prevenir posibles complicaciones cuando el material se lamine en caliente.

7. CONCLUSIONES

1. Para las condiciones analizadas en el presenta trabajo se observó que un aumento en las condiciones de agitación del EMS modifican la estructura de solidificación de las barras de colada continua, incrementando la zona equiaxial central y aumentando el espesor de la capa templada.
2. La utilización del EMS con los parámetros de operación seleccionados para cada tipo de perfil fabricado por la empresa Siderúrgica de Caldas S.A, permitieron reducir apreciablemente la presencia de defectos subsuperficiales e internos encontrados en las palanquillas.
3. Se determinaron las condiciones de operación más adecuadas en la aplicación del sistema de agitación electromagnética de la máquina de colada continua de la empresa Siderúrgica de Caldas S.A para los tres tipos de acero y sección estudiados, proponiéndose además una serie de recomendaciones acerca del beneficio que puede generar la aplicación del sistema en presencia de ciertos casos problema, como lo son coladas con una alta temperatura de sobrecalentamiento y velocidad de colada muy altas, las cuales pueden llegar a generar complicaciones en la continuidad de la obtención de aceros de alta calidad
4. Para poder realizar el proyecto fue necesario conocer integralmente el proceso de la colada continua del acero, para identificar cual es el efecto causado por la variación de los parámetros de operación del sistema en beneficio de la calidad de la palanquilla.
5. Se determinó en acuerdo con el área de gestión de calidad de la empresa Siderúrgica de Caldas S.A que los problemas que están afectando actualmente la

calidad de la palanquilla son de tipo superficial más que internos, esto quiere decir que con la implementación de la aplicación de las condiciones recomendadas por el presente proyecto sobre el EMS, se debe tener un control riguroso en las otras variables del proceso como lo son: limpieza del acero, manejo adecuado del refractario, sistema de refrigeración controlado, entre otras.

6. La calidad subsuperficial e interna de la palanquilla obtenida con las condiciones de agitación recomendadas, cumple con los estándares de calidad exigidos para la elaboración de aceros de tipos estructural y de construcción.

7. Cuando se hace circular una corriente a través de un material conductor en presencia de un campo magnético rotacional, aparece una fuerza por unidad de volumen la cual produce un movimiento en espiral produciendo efectivamente la destrucción de la estructura dendrítica de colada como se observó en la microestructura de las pruebas realizadas con diferentes condiciones de agitación.

8. En el seguimiento realizado a la calidad superficial de la palanquilla en frío, se encontró que para secciones de 120 x 120 mm, al trabajarse con una condición de agitación mayor a 220 amperios, se presentaba la aparición de defectos superficiales, generándose un efecto contrario al esperado, esto debido al incremento en la salpicadura del acero en la región del menisco con esta condición de agitación.

8. RECOMENDACIONES

1. En los seguimientos realizados en conjunto con el área de gestión de calidad de la empresa Siderúrgica de Caldas S.A a las campañas de 4 pulgadas, se han logrado identificar problemas que están afectando la calidad superficial de la palanquilla, especialmente en este tipo de perfiles, como los son el sistema de lubricación y el control de nivel automático del acero en el molde. Por lo tanto se recomienda investigar de forma más extensa en pro de mejorar la calidad de la palanquilla.
2. Se recomienda realizar un modelamiento matemático mediante una simulación de los efectos electromagnéticos y fluido dinámicos producidos por el EMS con el fin de determinar el valor de corriente y la velocidad para la cual en la región del menisco ocurre sobreagitación.
3. Realizar periódicamente según el manual de operación del EMS, por medio de un control adecuado del desgaste de los filtros y membrana del sistema de purificación del agua del EMS, una revisión frecuente de la dureza, conductividad y pH del agua del sistema.
4. Las condiciones de aplicación del sistema de refrigeración del EMS son propias de cada planta. Es por esto que se recomienda no utilizar los mismos parámetros en otra planta, pero si se pueden aplicar como referencia para posibles investigaciones que se desarrollen en tipos y secciones de acero similares a los de este trabajo.
5. Cuando se esté trabajando el proceso de colada continua con una temperatura de sobrecalentamiento y velocidades de colada muy alta, puede dar lugar a fallas en el sistema de lubricación y en el sistema de refrigeración, si no se tiene un

control adecuado, por lo tanto se recomienda realizar un muestreo de la colada problema por medio de macroataques y un seguimiento visual del material del material en frío, a fin de prevenir futuras complicaciones cuando en el material sea laminado.

6. Cuando se esté fabricando aceros AIS-SAE 1045 y AISI-SAE 1060 se recomienda aplicar las condiciones de agitación propuestas por este trabajo, y realizar un muestreo superficial e interno, con el fin de establecer el efecto que tiene el EMS en la calidad de las palanquillas con un alto porcentaje de carbono.

BIBLIOGRAFIA

[1] WOLF, M. "Historical aspects and key technologies". The Making, Shaping and Treating of Steel. Ironmaking. Volumen 11th, Chapter 1, Pág 1, 2001.

[2] GONZALEZ, Marcial. "Modelo inverso de estimación del coeficiente de transferencia de calor acero-molde, en el proceso de colada continua de planchones". Pág. 11-14, 2002.

[3] CEMES. Casting Processes (Online), (Lyon France), 2001
<http://tmp.cma.fr/tmp/img-tmp/ppt-tmp/Casting.html>

[4] WOLF, M. "Solidification of steel". The Making, Shaping and Treating of Steel". The Making, Shaping and Treating of Steel. Ironmaking. Vol. 11th, Chapter 6, Pág 1, 2001.

[5] BELISARIO, Julio. "Efectos de un campo electromagnético y vibracional sobre las propiedades y solidificación de algunas aleaciones fundidas". Universidad Industrial de Santander. Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Bucaramanga. Julio 1968.

[6] HERNANDEZ, Luis Manuel. "Optimización de mantenimiento preventivo a motores de rotor devanado de 3600 Kw, con 6600 voltios, que mueven molinos de cement con capacidad de 120 toneladas por hora". Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, Universidad México DF. 2009.

[7] B.Q Li "Solidification Processing of Materials in Magnetic Fields". Revista JOM. Febrero 1998, Vol. 50 No 2.

[8] W. Santamaria, F. Fuhr, M. Dziuba, J. Madías, A. Dindart. “Evaluación de la estructura de solidificación de palanquillas de acero de alto carbono”. IAS, ASCINDAR, San Nicolas, Argentina.

[9] GHOSH, A. “Segregation in cast products”. Department of Materials and Metallurgical Engineering, Indian Institute of Technology, Kanpur, India.

[10] THOMAS, Brian. “Curso de colada continua”. IAS, San Nicolás, Argentina, Junio de 1999.

[11] Instruction and Maintenance Manual. Cotinuous Casting Machine for Billets. Concast AG Zurich.

[12] BALZARETTI, Daniel. “Principios Básicos de piezas fundidas y lingotes”. Instituto Argentino de Siderúrgia, Argentina. Octubre 1988.

[13] R. Coda, J. Madias, L. Reda, M. Dziuba, C. Genzano, B. Santillana y E. González. “Workshop sobre defectos en productos largos”. Instituto Argentino de Siderurgia. 6-8 mayo 2003, Argentina.

[14] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for macroetching Metals and Alloys. (ASTM E340-00). Reapproved 2006.

[15] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard method of macroetch testing steel bars, billets, blooms and forgings Metals and Alloys. (ASTM E381-01). 1990.

[16] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Guide for Lpreparation of metallographic specimens. (ASTM E3).

[17] ARCINIEGAS, Javier. “Determinación de los criterios de operación del nuevo sistema de refrigeración automático en la máquina de colada continua para la fabricación de palanquilla en la empresa Acerías de Caldas S.A”. Universidad Industrial de Santander, 2005.

[18] A. Campos, F. Fuhr, C. Cicutti, T. Pérez, A. Dindart. “Resultados de la aplicación del agitador electromagnético en la colada continua de SIDERCA”. Trabajo presentado en 12° seminario IAS, 2-5 Noviembre 1999, Buenos Aires, Argentina.

[19] MOFFATT, H.K. “Electromagnetic Stirring”. Department of applied mathematics and theoretical physics, Universidad de Cambridge, Inglaterra. 1990.

[20] J. Principe, G. Sanchez, A. Pignotti, M. Goldschmit. “Numerical model of electromagnetic stirring used in the tenaris group continuous casting facilities”. Centro de investigaciones industriales, FUDETEC, Campana, Argentina. 2001.

[21] LAVERS, Douglas. “State of the art of numerical modeling for electromagnetic processing of metallic material”. ECE Department, Department, Universidad de Toronto. 2008.

[22] MUÑOZ CALVO, Jessica. Departamento Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, UPC, Barcelona, España. Capítulo 2, Pág. 23. Febrero 2006.

ANEXOS

ANEXO A. INFORME DEL ANÁLISIS DE LOS MACROATAQUES DE LAS MUESTRAS DE LAS TRES ETAPAS DEL PROYECTO.

Tabla 27. Análisis de los macroataques realizados en las tres etapas del proyecto.

Sección 120 x 120 mm											
Condición EMS	Colada	Acero	Grieta central	Grieta diagonal	Grieta estrella	Pinholes	Rechupe	Depresión	% R	Escasez	Blowholes
90 A - 3 Hz	41170	A 36	A	A	A	C	B	A	7,46	A	A
	41118	A 706	A	A	A	B	B	A	3,1	A	A
	41092	A 572	A	A	A	B	B	A	3,59	B	A
Sección 130 x 130 mm											
90 A - 3 Hz	41216	A 572	A	A	A	C	B	A	5,97	A	B

Sección 120 x 120 mm											
Condición EMS	Colada	Acero	Grieta central	Grieta diagonal	Grieta estrella	Pinholes	Rechupe	Depresión	% R	Escasez	Blowholes
NO EMS	41170	A 36	E	A	A	B	B	A	3,8	A	D
	41119	A 706	A	A	A	B	A	A	6,4	A	A
	41092	A 572	A	A	D	B	E	A	2,4	A	B
Sección 130 x 130 mm											
NO EMS	41216	A 572	A	A	A	C	A	A	5,5	B	B

Sección 120 x 120 mm											
Condición EMS	Colada	Acero	Grieta central	Grieta diagonal	Grieta estrella	Pinholes	Rechupe	Depresión	% R	Escasez	Blowholes
110 A - 4 Hz	41527	A 572	A	A	A	B	B	A	3,39	A	B
	41828	A 706	A	A	A	B	A	A	7,57	A	A
	41835	A 36	A	A	A	B	B	A	5,29	A	C

Sección 120 x 120 mm											
Condición EMS	Colada	Acero	Grieta central	Grieta diagonal	Grieta estrella	Pinholes	Rechupe	Depresión	% R	Escasez	Blowholes
130 A - 3 Hz	41515	A 36	A	A	A	A	B	A	4,34	A	A
	41784	A 706	A	A	A	A	B	B	1,54	A	A
	41576	A 572	A	A	A	A	B	A	5,76	A	A
Sección 130 x 130 mm											
130 A - 3 Hz	41475	A 572	A	A	A	B	A	A	5,32	A	D

Sección 120 x 120 mm											
Condición EMS	Colada	Acero	Grieta central	Grieta diagonal	Grieta estrella	Pinholes	Rechupe	Depresión	% R	Escasez	Blowholes
160 A - 4 Hz	42439	A 36	A	A	A	A	B	A	3,34	A	A
	42545	A 706	A	A	A	A	B	A	4,74	A	A
	42146	A 572	A	A	A	A	B	A	3,76	A	A
Sección 130 x 130 mm											
160 A - 4 Hz	41720	A 572	A	A	A	A	A	A	3,79	A	A

Fuente: El autor.

ANEXO B. REGISTRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN DE LAS COLADAS ANALIZADAS PARA CADA UNA DE LAS TRES ETAPAS DEL PROYECTO.

Tabla 28. Registro de las variables de operación del proceso de colada continua en la primera etapa del proyecto.

HOJA DE MARCHA					
Clase de Acero	Colada No	T(°C) tundish	Frecuencia Oscilación (Ciclos/min)	Velocidad Línea (m/min)	Línea
A 36	41170	1563	141	1,41	3
CUCHARA					
Hora condiciones	Hora muestra	Weight tundish (Tn)		Peso Muestra (Kg)	
16:25:44	16:43:50	3,92		54540	
EMS			PROCESO		
Corriente (A)	Frecuencia (Hz)	Sección Transversal (mm)		Diámetro Buza (mm)	
90	3	120		12	

HOJA DE MARCHA					
Clase de Acero	Colada No	T(°C) tundish	Frecuencia Oscilación (Ciclos/min)	Velocidad Línea (m/min)	Línea
A 706	41118	1575	151	1,51	3
CUCHARA					
Hora condiciones	Hora muestra	Weight tundish (Tn)		Peso Muestra (Kg)	
15:19:12	15:39:59	4,19		54400	
EMS			PROCESO		
Corriente (A)	Frecuencia (Hz)	Sección Transversal (mm)		Diámetro Buza (mm)	
90	3	120		12	

HOJA DE MARCHA					
Clase de Acero	Colada No	T(°C) tundish	Frecuencia Oscilación (Ciclos/min)	Velocidad Línea (m/min)	Línea
A 572	4092	1574	148	1,48	3
CUCHARA					
Hora condiciones	Hora muestra	Weight tundish (Tn)		Peso Muestra (Kg)	
7:32:12	7:49:25	4,25		35170	
EMS			PROCESO		
Corriente (A)	Frecuencia (Hz)	Sección Transversal (mm)		Diámetro Buza (mm)	
90	3	120		12	

Tabla 29. Registro de las variables de operación del proceso de colada continua en la segunda etapa del proyecto.

HOJA DE MARCHA					
Clase de Acero	Colada No	T(°C) tundish	Frecuencia Oscilación (Ciclos/min)	Velocidad Línea (m/min)	Línea
A 36	41170	1563	138	1,38	3
CUCHARA					
Hora condiciones	Hora muestra	Weight tundish (Tn)		Peso Muestra (Kg)	
16:30:21	16:48:62	3,88		53260	
EMS			PROCESO		
Corriente (A)	Frecuencia (Hz)	Sección Transversal (mm)		Diámetro Buza (mm)	
-	-	120		12	

HOJA DE MARCHA					
Clase de Acero	Colada No	T(°C) tundish	Frecuencia Oscilación (Ciclos/min)	Velocidad Línea (m/min)	Línea
A 572	41092	1574	138	1,38	3
CUCHARA					
Hora condiciones	Hora muestra	Weight tundish (Tn)		Peso Muestra (Kg)	
7:57:12	8:16:35	4,25		29150	
EMS			PROCESO		
Corriente (A)	Frecuencia (Hz)	Sección Transversal (mm)		Diámetro Buza (mm)	
-	-	120		12	

HOJA DE MARCHA					
Clase de Acero	Colada No	T(°C) tundish	Frecuencia Oscilación (Ciclos/min)	Velocidad Línea (m/min)	Línea
A 706	41119	1571	148	1,47	3
CUCHARA					
Hora condiciones	Hora muestra	Weight tundish (Tn)		Peso Muestra (Kg)	
17:05:28	17:23:56	4,15		52790	
EMS			PROCESO		
Corriente (A)	Frecuencia (Hz)	Sección Transversal (mm)		Diámetro Buza (mm)	
-	-	120		12	

HOJA DE MARCHA					
Clase de Acero	Colada No	T(°C) tundish	Frecuencia Oscilación (Ciclos/min)	Velocidad Línea (m/min)	Línea
A 572	41216	1575	160	1,60	3
CUCHARA					
Hora condiciones	Hora muestra	Weight tundish (Tn)		Peso Muestra (Kg)	
16:04:30	16:21:53	6.33		53520	
EMS			PROCESO		
Corriente (A)	Frecuencia (Hz)	Sección Transversal (mm)		Diámetro Buza (mm)	
-	-	130		12	

Tabla 30. Registro de las variables de operación del proceso de colada continua en la tercera etapa del proyecto.

HOJA DE MARCHA					
Clase de Acero	Colada No	T(°C) tundish	Frecuencia Oscilación (Ciclos/min)	Velocidad Línea (m/min)	Línea
A 572	41527	1550	148	1,48	3
CUCHARA					
Hora condiciones	Hora muestra	Weight tundish (Tn)		Peso Muestra (Kg)	
11:35:06	11:56:27	4.49		55530	
EMS			PROCESO		
Corriente (A)	Frecuencia (Hz)	Sección Transversal (mm)		Diámetro Buza (mm)	
110	4	120		12	

HOJA DE MARCHA					
Clase de Acero	Colada No	T(°C) tundish	Frecuencia Oscilación (Ciclos/min)	Velocidad Línea (m/min)	Línea
A 706	41828	1564	167	1,69	3
CUCHARA					
Hora condiciones	Hora muestra	Weight tundish (Tn)		Peso Muestra (Kg)	
17:14:29	17:35:34	5.86		45610	
EMS			PROCESO		
Corriente (A)	Frecuencia (Hz)	Sección Transversal (mm)		Diámetro Buza (mm)	
110	4	120		12	

HOJA DE MARCHA					
Clase de Acero	Colada No	T(°C) tundish	Frecuencia Oscilación (Ciclos/min)	Velocidad Línea (m/min)	Línea
A 36	41835	1548	144	1,43	3
CUCHARA					
Hora condiciones	Hora muestra	Weight tundish (Tn)		Peso Muestra (Kg)	
11:08:34	11:25:30	4.51		35970	
EMS			PROCESO		
Corriente (A)	Frecuencia (Hz)	Sección Transversal (mm)		Diámetro Buza (mm)	
110	4	120		12	

HOJA DE MARCHA					
Clase de Acero	Colada No	T(°C) tundish	Frecuencia Oscilación (Ciclos/min)	Velocidad Línea (m/min)	Línea
A 572	41936	1551	156	1,56	3
CUCHARA					
Hora condiciones	Hora muestra	Weight tundish (Tn)		Peso Muestra (Kg)	
16:49:30	17:06:00	3,87		42270	
EMS			PROCESO		
Corriente (A)	Frecuencia (Hz)	Sección Transversal (mm)		Diámetro Buza (mm)	
130	3	120		12	

HOJA DE MARCHA					
Clase de Acero	Colada No	T(°C) tundish	Frecuencia Oscilación (Ciclos/min)	Velocidad Línea (m/min)	Línea
A 706	41784	1567	163	1,63	3
CUCHARA					
Hora condiciones	Hora muestra	Weight tundish (Tn)		Peso Muestra (Kg)	
17:04:42	17:20:16	5,99		45880	
EMS			PROCESO		
Corriente (A)	Frecuencia (Hz)	Sección Transversal (mm)		Diámetro Buza (mm)	
130	3	120		12	

HOJA DE MARCHA					
Clase de Acero	Colada No	T(°C) tundish	Frecuencia Oscilación (Ciclos/min)	Velocidad Línea (m/min)	Línea
A 36	41515	1533	136	1,36	3
CUCHARA					
Hora condiciones	Hora muestra	Weight tundish (Tn)		Peso Muestra (Kg)	
8:09:40	8:28:53	3,85		44810	
EMS			PROCESO		
Corriente (A)	Frecuencia (Hz)	Sección Transversal (mm)		Diámetro Buza (mm)	
130	3	120		12	

HOJA DE MARCHA					
Clase de Acero	Colada No	T(°C) tundish	Frecuencia Oscilación (Ciclos/min)	Velocidad Línea (m/min)	Línea
A 572	42475	1570	150	1,50	3
CUCHARA					
Hora condiciones	Hora muestra	Weight tundish (Tn)		Peso Muestra (Kg)	
8:11:08	8:26:53	6,85		39740	
EMS			PROCESO		
Corriente (A)	Frecuencia (Hz)	Sección Transversal (mm)		Diámetro Buza (mm)	
130	3	130		12	

HOJA DE MARCHA					
Clase de Acero	Colada No	T(°C) tundish	Frecuencia Oscilación (Ciclos/min)	Velocidad Línea (m/min)	Línea
A 36	42439	1547	143	1,43	3
CUCHARA					
Hora condiciones	Hora muestra	Weight tundish (Tn)		Peso Muestra (Kg)	
10:07:03	10:258:18	4,95		32750	
EMS			PROCESO		
Corriente (A)	Frecuencia (Hz)	Sección Transversal (mm)		Diámetro Buza (mm)	
160	4	120		12	

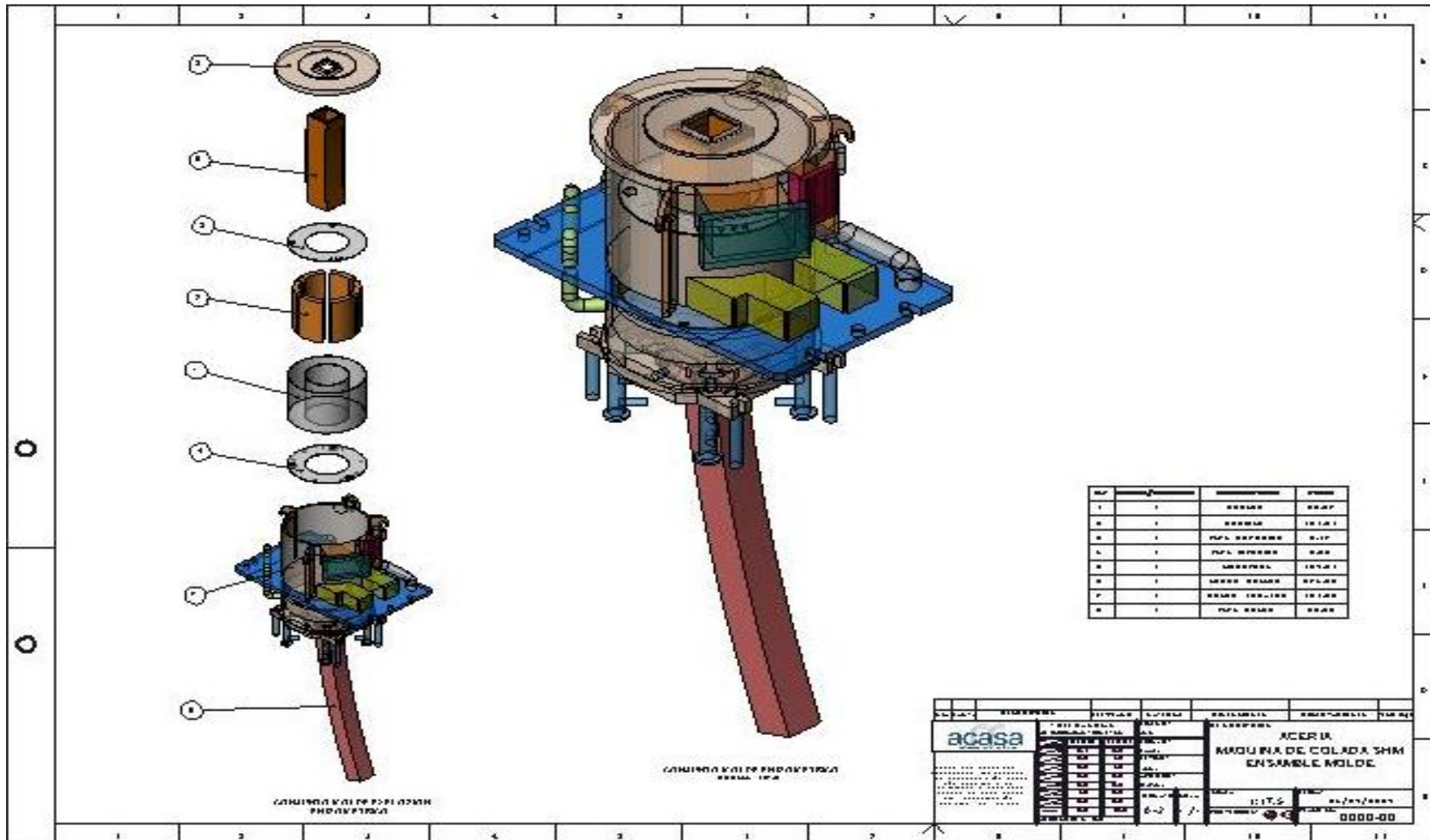
HOJA DE MARCHA					
Clase de Acero	Colada No	T(°C) tundish	Frecuencia Oscilación (Ciclos/min)	Velocidad Línea (m/min)	Línea
A 706	42545	1575	168	1,68	3
CUCHARA					
Hora condiciones	Hora muestra	Weight tundish (Tn)		Peso Muestra (Kg)	
11:03:57	11:14:25	5,97		34070	
EMS			PROCESO		
Corriente (A)	Frecuencia (Hz)	Sección Transversal (mm)		Diámetro Buza (mm)	
160	4	120		12	

HOJA DE MARCHA					
Clase de Acero	Colada No	T(°C) tundish	Frecuencia Oscilación (Ciclos/min)	Velocidad Línea (m/min)	Línea
A 572	42146	1561	166	1,65	3
CUCHARA					
Hora condiciones	Hora muestra	Weight tundish (Tn)		Peso Muestra (Kg)	
15:06:27	15:21:48	4,07		37960	
EMS			PROCESO		
Corriente (A)	Frecuencia (Hz)	Sección Transversal (mm)		Diámetro Buza (mm)	
160	4	120		12	

HOJA DE MARCHA					
Clase de Acero	Colada No	T(°C) tundish	Frecuencia Oscilación (Ciclos/min)	Velocidad Línea (m/min)	Línea
A 572	41216	1575	158	1,58	3
CUCHARA					
Hora condiciones	Hora muestra	Weight tundish (Tn)		Peso Muestra (Kg)	
16:34:30	16:51:43	6.80		40520	
EMS			PROCESO		
Corriente (A)	Frecuencia (Hz)	Sección Transversal (mm)		Diámetro Buza (mm)	
160	4	130		12	

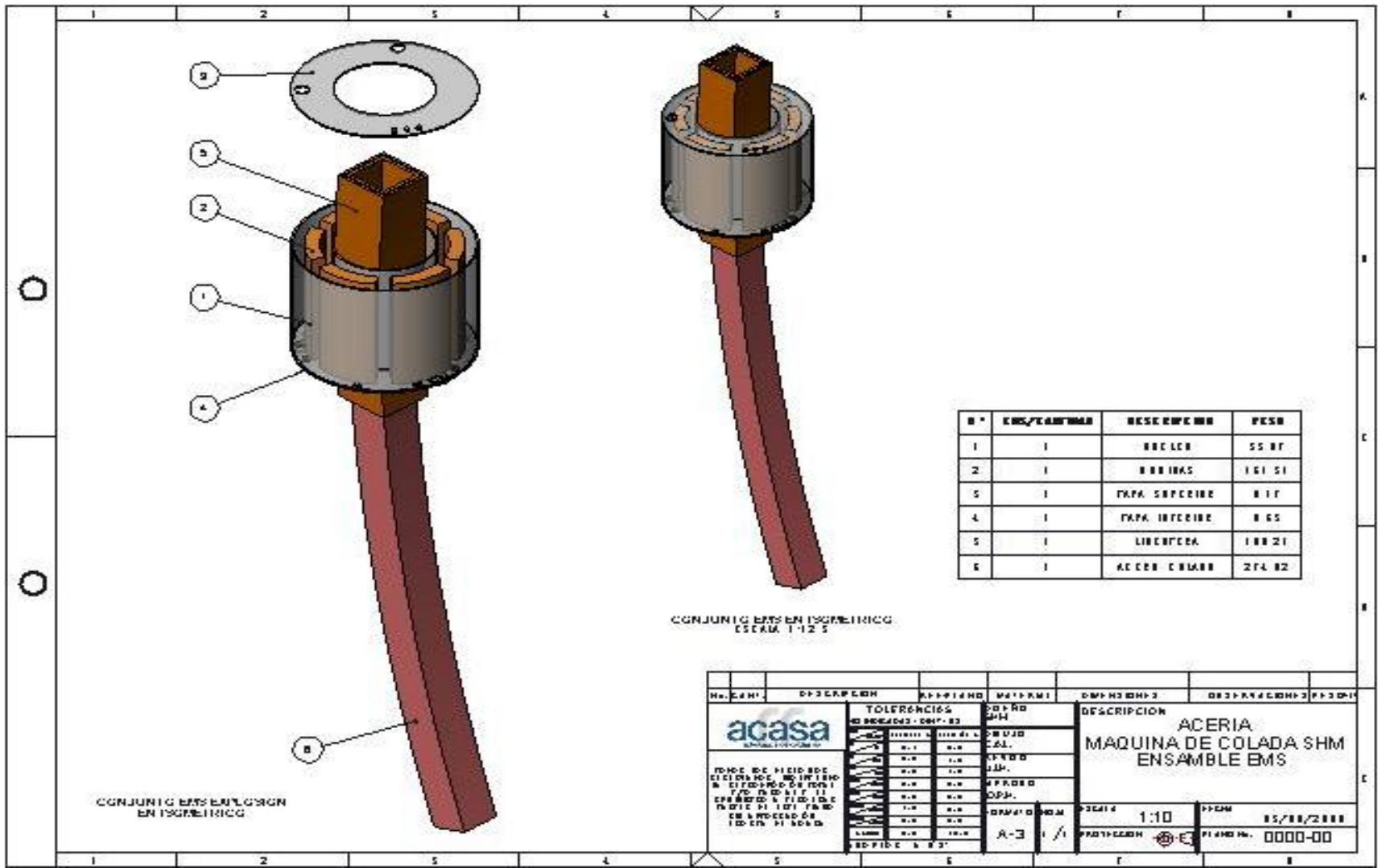
ANEXO C. PLANOS SISTEMA DE AGITACION ELECTROMAGNETICA DE LA MAQUINA DE COLADA CONTINUA DE LA EMPRESA SIDERURGICA DA CALDAS S.A

Figura 30. Ensamble del EMS en el molde de la máquina de colada continua de la empresa Siderúrgica de Caldas S.A.



Fuente: Empresa Siderúrgica de Caldas S.A.

Figura 31. Esquema de los componentes del EMS



CONJUNTO EMS EN ISOMETRICO
ESCALA 1:12.5

CONJUNTO EMS EN ISOMETRICO
EN ISOMETRICO

NO. C.A.H.	DESCRIPCION	ASIGNADO	MATERIA	DEPARTAMENTO	OPERACION	PROCESO
	acasa siderúrgica de caldas sa					
	FORMA DE HIERRO ESTRUCUTURA DE HIERRO B. SIEMPRE DE HIERRO Y/O HIERRO Y/O CERAMICO A TRAVES DE INDICAR EN LA FORMA DE HIERRO O INDICAR EN LA FORMA					
TOLERANCIAS ISO 286-2-01-03 H7/g6 H8/g7 H9/g8 H10/g9 H11/d9 H12/d10 H13/d11 H14/d12 H15/d13 H16/d14 H17/d15 H18/d16 H19/d17 H20/d18 H21/d19 H22/d20 H23/d21 H24/d22 H25/d23 H26/d24 H27/d25 H28/d26 H29/d27 H30/d28 H31/d29 H32/d30 H33/d31 H34/d32 H35/d33 H36/d34 H37/d35 H38/d36 H39/d37 H40/d38 H41/d39 H42/d40 H43/d41 H44/d42 H45/d43 H46/d44 H47/d45 H48/d46 H49/d47 H50/d48 H51/d49 H52/d50 H53/d51 H54/d52 H55/d53 H56/d54 H57/d55 H58/d56 H59/d57 H60/d58 H61/d59 H62/d60 H63/d61 H64/d62 H65/d63 H66/d64 H67/d65 H68/d66 H69/d67 H70/d68 H71/d69 H72/d70 H73/d71 H74/d72 H75/d73 H76/d74 H77/d75 H78/d76 H79/d77 H80/d78 H81/d79 H82/d80 H83/d81 H84/d82 H85/d83 H86/d84 H87/d85 H88/d86 H89/d87 H90/d88 H91/d89 H92/d90 H93/d91 H94/d92 H95/d93 H96/d94 H97/d95 H98/d96 H99/d97 H100/d98 H101/d99 H102/d100 H103/d101 H104/d102 H105/d103 H106/d104 H107/d105 H108/d106 H109/d107 H110/d108 H111/d109 H112/d110 H113/d111 H114/d112 H115/d113 H116/d114 H117/d115 H118/d116 H119/d117 H120/d118 H121/d119 H122/d120 H123/d121 H124/d122 H125/d123 H126/d124 H127/d125 H128/d126 H129/d127 H130/d128 H131/d129 H132/d130 H133/d131 H134/d132 H135/d133 H136/d134 H137/d135 H138/d136 H139/d137 H140/d138 H141/d139 H142/d140 H143/d141 H144/d142 H145/d143 H146/d144 H147/d145 H148/d146 H149/d147 H150/d148 H151/d149 H152/d150 H153/d151 H154/d152 H155/d153 H156/d154 H157/d155 H158/d156 H159/d157 H160/d158 H161/d159 H162/d160 H163/d161 H164/d162 H165/d163 H166/d164 H167/d165 H168/d166 H169/d167 H170/d168 H171/d169 H172/d170 H173/d171 H174/d172 H175/d173 H176/d174 H177/d175 H178/d176 H179/d177 H180/d178 H181/d179 H182/d180 H183/d181 H184/d182 H185/d183 H186/d184 H187/d185 H188/d186 H189/d187 H190/d188 H191/d189 H192/d190 H193/d191 H194/d192 H195/d193 H196/d194 H197/d195 H198/d196 H199/d197 H200/d198 H201/d199 H202/d200 H203/d201 H204/d202 H205/d203 H206/d204 H207/d205 H208/d206 H209/d207 H210/d208 H211/d209 H212/d210 H213/d211 H214/d212 H215/d213 H216/d214 H217/d215 H218/d216 H219/d217 H220/d218 H221/d219 H222/d220 H223/d221 H224/d222 H225/d223 H226/d224 H227/d225 H228/d226 H229/d227 H230/d228 H231/d229 H232/d230 H233/d231 H234/d232 H235/d233 H236/d234 H237/d235 H238/d236 H239/d237 H240/d238 H241/d239 H242/d240 H243/d241 H244/d242 H245/d243 H246/d244 H247/d245 H248/d246 H249/d247 H250/d248 H251/d249 H252/d250 H253/d251 H254/d252 H255/d253 H256/d254 H257/d255 H258/d256 H259/d257 H260/d258 H261/d259 H262/d260 H263/d261 H264/d262 H265/d263 H266/d264 H267/d265 H268/d266 H269/d267 H270/d268 H271/d269 H272/d270 H273/d271 H274/d272 H275/d273 H276/d274 H277/d275 H278/d276 H279/d277 H280/d278 H281/d279 H282/d280 H283/d281 H284/d282 H285/d283 H286/d284 H287/d285 H288/d286 H289/d287 H290/d288 H291/d289 H292/d290 H293/d291 H294/d292 H295/d293 H296/d294 H297/d295 H298/d296 H299/d297 H300/d298 H301/d299 H302/d300 H303/d301 H304/d302 H305/d303 H306/d304 H307/d305 H308/d306 H309/d307 H310/d308 H311/d309 H312/d310 H313/d311 H314/d312 H315/d313 H316/d314 H317/d315 H318/d316 H319/d317 H320/d318 H321/d319 H322/d320 H323/d321 H324/d322 H325/d323 H326/d324 H327/d325 H328/d326 H329/d327 H330/d328 H331/d329 H332/d330 H333/d331 H334/d332 H335/d333 H336/d334 H337/d335 H338/d336 H339/d337 H340/d338 H341/d339 H342/d340 H343/d341 H344/d342 H345/d343 H346/d344 H347/d345 H348/d346 H349/d347 H350/d348 H351/d349 H352/d350 H353/d351 H354/d352 H355/d353 H356/d354 H357/d355 H358/d356 H359/d357 H360/d358 H361/d359 H362/d360 H363/d361 H364/d362 H365/d363 H366/d364 H367/d365 H368/d366 H369/d367 H370/d368 H371/d369 H372/d370 H373/d371 H374/d372 H375/d373 H376/d374 H377/d375 H378/d376 H379/d377 H380/d378 H381/d379 H382/d380 H383/d381 H384/d382 H385/d383 H386/d384 H387/d385 H388/d386 H389/d387 H390/d388 H391/d389 H392/d390 H393/d391 H394/d392 H395/d393 H396/d394 H397/d395 H398/d396 H399/d397 H400/d398 H401/d399 H402/d400 H403/d401 H404/d402 H405/d403 H406/d404 H407/d405 H408/d406 H409/d407 H410/d408 H411/d409 H412/d410 H413/d411 H414/d412 H415/d413 H416/d414 H417/d415 H418/d416 H419/d417 H420/d418 H421/d419 H422/d420 H423/d421 H424/d422 H425/d423 H426/d424 H427/d425 H428/d426 H429/d427 H430/d428 H431/d429 H432/d430 H433/d431 H434/d432 H435/d433 H436/d434 H437/d435 H438/d436 H439/d437 H440/d438 H441/d439 H442/d440 H443/d441 H444/d442 H445/d443 H446/d444 H447/d445 H448/d446 H449/d447 H450/d448 H451/d449 H452/d450 H453/d451 H454/d452 H455/d453 H456/d454 H457/d455 H458/d456 H459/d457 H460/d458 H461/d459 H462/d460 H463/d461 H464/d462 H465/d463 H466/d464 H467/d465 H468/d466 H469/d467 H470/d468 H471/d469 H472/d470 H473/d471 H474/d472 H475/d473 H476/d474 H477/d475 H478/d476 H479/d477 H480/d478 H481/d479 H482/d480 H483/d481 H484/d482 H485/d483 H486/d484 H487/d485 H488/d486 H489/d487 H490/d488 H491/d489 H492/d490 H493/d491 H494/d492 H495/d493 H496/d494 H497/d495 H498/d496 H499/d497 H500/d498 H501/d499 H502/d500 H503/d501 H504/d502 H505/d503 H506/d504 H507/d505 H508/d506 H509/d507 H510/d508 H511/d509 H512/d510 H513/d511 H514/d512 H515/d513 H516/d514 H517/d515 H518/d516 H519/d517 H520/d518 H521/d519 H522/d520 H523/d521 H524/d522 H525/d523 H526/d524 H527/d525 H528/d526 H529/d527 H530/d528 H531/d529 H532/d530 H533/d531 H534/d532 H535/d533 H536/d534 H537/d535 H538/d536 H539/d537 H540/d538 H541/d539 H542/d540 H543/d541 H544/d542 H545/d543 H546/d544 H547/d545 H548/d546 H549/d547 H550/d548 H551/d549 H552/d550 H553/d551 H554/d552 H555/d553 H556/d554 H557/d555 H558/d556 H559/d557 H560/d558 H561/d559 H562/d560 H563/d561 H564/d562 H565/d563 H566/d564 H567/d565 H568/d566 H569/d567 H570/d568 H571/d569 H572/d570 H573/d571 H574/d572 H575/d573 H576/d574 H577/d575 H578/d576 H579/d577 H580/d578 H581/d579 H582/d580 H583/d581 H584/d582 H585/d583 H586/d584 H587/d585 H588/d586 H589/d587 H590/d588 H591/d589 H592/d590 H593/d591 H594/d592 H595/d593 H596/d594 H597/d595 H598/d596 H599/d597 H600/d598 H601/d599 H602/d600 H603/d601 H604/d602 H605/d603 H606/d604 H607/d605 H608/d606 H609/d607 H610/d608 H611/d609 H612/d610 H613/d611 H614/d612 H615/d613 H616/d614 H617/d615 H618/d616 H619/d617 H620/d618 H621/d619 H622/d620 H623/d621 H624/d622 H625/d623 H626/d624 H627/d625 H628/d626 H629/d627 H630/d628 H631/d629 H632/d630 H633/d631 H634/d632 H635/d633 H636/d634 H637/d635 H638/d636 H639/d637 H640/d638 H641/d639 H642/d640 H643/d641 H644/d642 H645/d643 H646/d644 H647/d645 H648/d646 H649/d647 H650/d648 H651/d649 H652/d650 H653/d651 H654/d652 H655/d653 H656/d654 H657/d655 H658/d656 H659/d657 H660/d658 H661/d659 H662/d660 H663/d661 H664/d662 H665/d663 H666/d664 H667/d665 H668/d666 H669/d667 H670/d668 H671/d669 H672/d670 H673/d671 H674/d672 H675/d673 H676/d674 H677/d675 H678/d676 H679/d677 H680/d678 H681/d679 H682/d680 H683/d681 H684/d682 H685/d683 H686/d684 H687/d685 H688/d686 H689/d687 H690/d688 H691/d689 H692/d690 H693/d691 H694/d692 H695/d693 H696/d694 H697/d695 H698/d696 H699/d697 H700/d698 H701/d699 H702/d700 H703/d701 H704/d702 H705/d703 H706/d704 H707/d705 H708/d706 H709/d707 H710/d708 H711/d709 H712/d710 H713/d711 H714/d712 H715/d713 H716/d714 H717/d715 H718/d716 H719/d717 H720/d718 H721/d719 H722/d720 H723/d721 H724/d722 H725/d723 H726/d724 H727/d725 H728/d726 H729/d727 H730/d728 H731/d729 H732/d730 H733/d731 H734/d732 H735/d733 H736/d734 H737/d735 H738/d736 H739/d737 H740/d738 H741/d739 H742/d740 H743/d741 H744/d742 H745/d743 H746/d744 H747/d745 H748/d746 H749/d747 H750/d748 H751/d749 H752/d750 H753/d751 H754/d752 H755/d753 H756/d754 H757/d755 H758/d756 H759/d757 H760/d758 H761/d759 H762/d760 H763/d761 H764/d762 H765/d763 H766/d764 H767/d765 H768/d766 H769/d767 H770/d768 H771/d769 H772/d770 H773/d771 H774/d772 H775/d773 H776/d774 H777/d775 H778/d776 H779/d777 H780/d778 H781/d779 H782/d780 H783/d781 H784/d782 H785/d783 H786/d784 H787/d785 H788/d786 H789/d787 H790/d788 H791/d789 H792/d790 H793/d791 H794/d792 H795/d793 H796/d794 H797/d795 H798/d796 H799/d797 H800/d798 H801/d799 H802/d800 H803/d801 H804/d802 H805/d803 H806/d804 H807/d805 H808/d806 H809/d807 H810/d808 H811/d809 H812/d810 H813/d811 H814/d812 H815/d813 H816/d814 H817/d815 H818/d816 H819/d817 H820/d818 H821/d819 H822/d820 H823/d821 H824/d822 H825/d823 H826/d824 H827/d825 H828/d826 H829/d827 H830/d828 H831/d829 H832/d830 H833/d831 H834/d832 H835/d833 H836/d834 H837/d835 H838/d836 H839/d837 H840/d838 H841/d839 H842/d840 H843/d841 H844/d842 H845/d843 H846/d844 H847/d845 H848/d846 H849/d847 H850/d848 H851/d849 H852/d850 H853/d851 H854/d852 H855/d853 H856/d854 H857/d855 H858/d856 H859/d857 H860/d858 H861/d859 H862/d860 H863/d861 H864/d862 H865/d863 H866/d864 H867/d865 H868/d866 H869/d867 H870/d868 H871/d869 H872/d870 H873/d871 H874/d872 H875/d873 H876/d874 H877/d875 H878/d876 H879/d877 H880/d878 H881/d879 H882/d880 H883/d881 H884/d882 H885/d883 H886/d884 H887/d885 H888/d886 H889/d887 H890/d888 H891/d889 H892/d890 H893/d891 H894/d892 H895/d893 H896/d894 H897/d895 H898/d896 H899/d897 H900/d898 H901/d899 H902/d900 H903/d901 H904/d902 H905/d903 H906/d904 H907/d905 H908/d906 H909/d907 H910/d908 H911/d909 H912/d910 H913/d911 H914/d912 H915/d913 H916/d914 H917/d915 H918/d916 H919/d917 H920/d918 H921/d919 H922/d920 H923/d921 H924/d922 H925/d923 H926/d924 H927/d925 H928/d926 H929/d927 H930/d928 H931/d929 H932/d930 H933/d931 H934/d932 H935/d933 H936/d934 H937/d935 H938/d936 H939/d937 H940/d938 H941/d939 H942/d940 H943/d941 H944/d942 H945/d943 H946/d944 H947/d945 H948/d946 H949/d947 H950/d948 H951/d949 H952/d950 H953/d951 H954/d952 H955/d953 H956/d954 H957/d955 H958/d956 H959/d957 H960/d958 H961/d959 H962/d960 H963/d961 H964/d962 H965/d963 H966/d964 H967/d965 H968/d966 H969/d967 H970/d968 H971/d969 H972/d970 H973/d971 H974/d972 H975/d973 H976/d974 H977/d975 H978/d976 H979/d						

ANEXO D. INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN DEL PROCESO DE COLADA CONTINUA EN LA ESTRUCTURA INTERNA DEL ACERO

Tabla 31. Influencia de las variables de operación del proceso de colada continua del acero en su estructura interna.

	Macroestructura					Segregación		Cavidades				
	% Zona Templada	% Zona Columnar	% Zona Equiaxial	Tamaño de grano en zona columnar	Tamaño de grano en zona equiaxial	Segregación	Micro segregación	Tamaño rechupe externo	Micro rechupes internos	Sopladuras	Fisuras	
Composición de la aleación	-	↓	↑	↓	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↑	
Pendiente línea líquidus, ml	?	↑	↓	?	↑	-	-	-	-	-	-	
Temperatura de fusión	↑	↑	↓	↓	↓	-	-	-	-	-	-	
Calor latente de fusión		↓	↑	?	↓	-	-	-	-	-	-	
Difusividad térmica de la aleación, $a = \frac{k}{c \cdot p}$	↑	↓	↑	↓	↓	-	-	-	-	-	-	
Contracción liquido-sólido	-	-	-	-	-	-	↑	↑	↑	↑	↑	
Coefficiente de dilatación del líquido	-	-	-	-	-	-	↑	↑	↑	-	-	
Coefficiente de dilatación de la aleación sólida	-	-	-	-	-	-	↑	↓	↓	-	↑↑	
Sobrecalentamiento	↓	↑	↓	↑	↑	-	↑	↑↑	-	-	-	
Corrientes de convección, antes y después	↓	↓	↑	↑↓	↓	↑↑	-	↓	↑	↑	-	
Difusividad calórica del molde	↑	↑	↓	↓	↓	-	↓		-	-	-	
Temperatura de precalentamiento del molde	↓↓	↑↓	↑↓	-	↓	-	↑		-	-	-	
Tipo de molde	Refrigerado	↑↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	-	-	
	Metálico	↑	Intermedia								-	-
	Cerámico (arena)	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑↑	-	
Espesor del molde (bajo espesor)	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑	-	-	

↑	Aumento
↑↑	Aumento muy importante
↓	Disminución
↓↓	Disminución muy importante
-	Variación poco importante en el rango normal del parámetro analizado
↑↓	Aumenta o disminuye según el valor del parámetro
?	No se conoce su influencia

Fuente: BALZARETTI, Daniel. "Principios Básicos de piezas fundidas y lingotes". Instituto Argentino de Siderurgia, Argentina. Octubre 1988.

