

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante
Eugenia Araneda Hernández
Ingeniero Supervisor
Jorge Muñoz Acuña

PERFIL DE SOLIDIFICACIÓN DE ACERO BAJO DISTINTAS
CONDICIONES OPERACIONALES EN COLADA
CONTINUA DE PALANQUILLAS



JUAN PABLO PULGAR HORMAZÁBAL

Informe de Memoria de Título
para optar al título de
Ingeniero Civil Metalúrgico

Diciembre 2017

Agradecimientos

En primer lugar agradezco a mi familia, a mis padres Pablo y Mónica, su apoyo y amor fueron el pilar fundamental para vivir una etapa universitaria plena, llena de hermosos recuerdos y grandes vivencias.

A mis abuelos, Alejandro y Juana que siempre han abierto las puertas de su corazón y me han tratado y cuidado con esmero traspasándome sus experiencias y enseñanzas.

A Patricia, mi tía y madrina de toda la vida, por abrirme las puertas de su hogar durante el ciclo universitario y hacerme sentir como en casa, por traspasarme conocimientos y consejos que llevaré siempre conmigo.

A Don Jorge Muñoz, quien me guió durante mi práctica y tesis en CAP Acero S.A; gracias por enseñarme más allá de los secretos de la metalurgia, por ser paciente y amable en todo momento y situación, será por siempre un referente para mí.

A Don Claudio Reyes, quien me acogió en su oficina y fue alegre compañero durante el desarrollo de la presente tesis.

A Don Marco Carrasco, Sergio Zanforlin, Gonzalo Arqueros, Andrés Lorza, Miguel Seguel, Helena Escalona, Andrés Neira y Alfonso Lagos por amenizar mi estadía por la oficina de ingeniería de procesos y tener siempre la mejor de las disposiciones para enseñarme.

A todo el personal de producción de la Acería y al personal de laboratorio, quienes siempre tuvieron la mejor de las disposiciones para guiarme e integrarme a las actividades productivas. Un estudiante no podría pedir mejor escuela.

A mi María Francisca, por ser mi fiel compañera y mi más grande colaboradora en los ensayos de laboratorio; gracias por cada noche que pasaste lijando piezas de acero a mi lado.

A mi profesora patrocinante Eugenia Araneda, por su profesionalismo, simpatía y disponibilidad ante cualquier interrogante.

A todos mis amigos de infancia y compañeros de universidad, quienes se han transformado en parte fundamental de mi vida y los llevo siempre en mi corazón, muchas gracias.

RESUMEN

Durante la solidificación de acero en procesos industriales como la colada continua, tiene lugar un fenómeno conocido como segregación central, el cual consiste en un enriquecimiento de los elementos de aleación en la zona central de la pieza colada, lo que resulta perjudicial para la calidad de los productos obtenidos en bruto y sus derivados.

En CAP Acero S.A, se emplea el proceso de colada continua de palanquillas dentro de su línea de producción. La formación de segregación central durante este proceso es mitigada por el uso de agitadores electromagnéticos, tanto en la salida de los moldes de cobre del sistema de enfriamiento primario como al final del sistema de enfriamiento secundario, los que se conocen como agitadores de molde y de hebra respectivamente.

El funcionamiento de los agitadores electromagnéticos de hebra es relativo, esto debido a que la optimización de su rendimiento depende de variables operacionales de colada continua, que influirán en la solidificación misma del acero en este proceso.

En este trabajo se estudió el perfil de solidificación de aceros en colada continua de palanquillas bajo distintas condiciones operacionales, tales como la velocidad de colada y el tipo de acero tratado.

Los resultados obtenidos en este trabajo indican que los aceros de alto carbono solidifican más rápidamente que los aceros de contenido de carbono inferior, usando condiciones operacionales de colada continua similar. De igual forma, se determinó que la ausencia de agitadores de hebra durante la colada continua de aceros alto carbono en CAP Acero S.A, no tuvo un efecto considerable en la formación de segregación central en las palanquillas producidas a partir de esta condición.

Se concluye que los agitadores electromagnéticos de hebra se encuentran en una posición incorrecta dentro de la línea de colada continua para el procesamiento de aceros de alto carbono, por lo tanto, su funcionamiento no tienen un efecto considerable en la mitigación de segregación central y su eliminación resulta factible sin provocar una considerable disminución en la calidad interna del producto en bruto colado.

ABSTRACT

During the solidification of steel in industrial processes such as continuous casting, occurs a phenomena known as central segregation, which consists of an enrichment of the alloying elements in the central area of the casting, which is detrimental to the quality of the castings. raw products and their derivatives

In CAP Steel S.A., the process of continuous casting of billets is used within its production line. The formation of central segregation during this process is mitigated by the use of electromagnetic stirrers, one at the output of the primary cooling systems and other at the end of the secondary cooling system, which are known as mold and strand stirrers. respectively.

The operation of the strand electromagnetic stirrer are highly questioned, because the optimization of their performance depends on the operational variables of continuous casting, which will influence the solidification of the steel in this process.

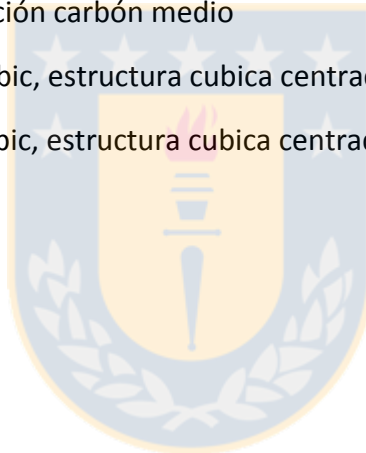
In this work the solidification profile of steels in continuous casting of billets under different operational conditions, such as the casting speed and the type of steel treated, was studied.

The obtained results indicate that high carbon steels solidify more rapidly than lower carbon steels, using similar continuous casting operating conditions. Likewise, it was found that the absence of strand stirrers during the continuous casting of high carbon steels in CAP Steel S.A., did not have a considerable effect on the formation of central segregation in billets produced from this condition.

It is concluded that the strand electromagnetic stirrers are in an incorrect position within the continuous casting line for the processing of high carbon steels, therefore, their operation does not have a considerable effect in the mitigation of central segregation and its elimination it is feasible to without causing a considerable decrease in the internal quality of the cast raw product.

NOMENCLATURA Y ABREVIACIONES

- CAP: Compañía Aceros del Pacifico
- GAP: Espacio de aire entre dos objetos
- SH: Super Heat, Temperatura del acero por sobre la temperatura líquidus
- Vc: Velocidad de colada
- MEMS: Mold Electromagnetic Stirrer, agitadores electromagnéticos de molde
- FEMS: Final Electromagnetic Stirrer, agitadores electromagnéticos de final de pozo
- IS: Índice de segregación
- IS CM: Índice de segregación carbón medio
- BCC: Body centered cubic, estructura cubica centrada en el cuerpo
- FCC: Face centered cubic, estructura cubica centrada en las caras



ÍNDICE

Agradecimientos	i
RESUMEN	ii
ABSTRACT	iii
NOMENCLATURA Y ABREVIACIONES	iv
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
CAPITULO 2. ANTECEDENTES	3
2.1 Proceso productivo de la compañía siderúrgica	3
2.2 Proceso de colada continua	4
2.2.1 Sistema de enfriamiento Primario	5
2.2.2 Sistema de enfriamiento secundario	7
2.2.3 Enfriamiento por radiación	8
2.3 Estructuras de solidificación del acero en el proceso de colada continua.....	9
2.4 Segregación	10
2.4.1 Comportamiento de elementos de aleación en la segregación	12
2.5 Agitadores electromagnéticos en el proceso de colada continua	14
2.5.1 Principio de la agitación electromagnética	14
2.5.2 Posición agitadores electromagnéticos	15
2.6 Largo metalúrgico	17
2.7 Efecto de la posición de agitadores electromagnéticos de hebra.....	17
2.8 Efectos estructurales de la agitación electromagnética sobre la solidificación	19
CAPITULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL	23
3.1 Ensayos metalográficos en muestras coladas bajo distintas condiciones operacionales	23
3.1.1 Macro impresiones con Ácido Clorhídrico	23
3.1.1.1 Equipamiento y materiales	24
3.1.1.2 Procedimiento experimental	24
3.1.1.3 Extracción de muestras	25
3.1.1.4 Condiciones experimentales de colada continua de las muestras extraídas	26
3.1.2 Impresiones de Baumman	28

3.1.2.1 Equipamiento y materiales	28
3.1.2.2 Procedimiento experimental	29
3.1.2.3 Muestras.....	30
3.2 Perfil de concentración de piezas coladas.....	31
3.2.1 Leco CS-400	31
3.2.2 Muestras	32
3.3 Efecto de la eliminación de agitadores de hebra durante la colada continua de aceros alto carbono	34
3.3.1 Índice de segregación central	35
3.3.1.2 Muestras.....	36
3.3.2 Método estándar de macro evaluación de palanquillas.....	37
3.3.2.1 Muestras.....	38
3.3.3 Análisis de composición central de barras laminadas	38
3.3.3.1 Espectrómetro ARL 3460	38
3.3.3.2 Muestra	39
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	40
4.1 Resultados de análisis para distintos tipos de acero	40
4.1.1 Aceros de bajo carbono	40
4.1.1.1 Macro impresiones con ácido clorhídrico.....	40
4.1.2 Aceros medio carbono	42
4.1.2.1 Macro impresiones con ácido clorhídrico.....	42
4.1.2.2 Impresiones de Baumman.....	45
4.1.3 Aceros altos carbono	46
4.1.3.1 Macro impresiones con ácido clorhídrico.....	46
4.1.3.2 Impresiones de Baumman.....	48
4.2 Perfil de concentración de piezas coladas.....	50
4.2.1 Acero medio carbono con y sin agitación electromagnética de hebra.....	50
4.2.2 Acero alto carbono con agitación electromagnética de molde y de hebra.....	52
4.3 Efecto de eliminación de agitadores electromagnéticos de hebra durante la colada continua de aceros alto carbono	58
4.3.1 Índice de segregación central para palanquillas y barras.....	58
4.3.2 Método estándar de macro evaluación de palanquillas.....	60
4.3.3 Análisis de composición central de barras laminadas	62
Capítulo 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
5.1 Conclusiones	63
5.2 Recomendaciones.....	64

6. BIBLIOGRAFÍA	65
7. ANEXOS.....	67
7.1 Anexo A: Diagrama de flujo del proceso productivo de CAP Acero S.A	67
7.2 Anexo B: Calculo de la constante de solidificación	69
7.3 Anexo C: Índices de segregación para sección transversal de palanquillas medio carbono..	70
7.4 Anexo D: Índices de segregación para perfil de composición de acero alto carbono	71
7.5 Anexo E: Metodología para cálculo de índice de segregación central para palanquillas	72
7.6 Anexo F: Macrografías de palanquillas procesadas sin agitación electromagnética de hebra	73

Índice de figuras

Figura 1. Vaciado de acero líquido al proceso de colada continua	4
Figura 2. Esquema de transferencia de calor en el molde	6
Figura 3. Macro estructura en sección de acero colado	9
Figura 4. Perfil de concentración típico en colada continua de planchones	11
Figura 5. Esquema de líneas solidus y liquidus en diagrama hierro-carbono.....	12
Figura 6. Esquema de efecto de agitadores electromagnéticos en el flujo del acero líquido.....	14
Figura 7. Posiciones posibles de los agitadores electromagnéticos en la línea de colada continua	16
Figura 8. Esquema desprendimiento dendrítico causado por agitación	17
Figura 9. Esquema efectos posición de agitador de hebra.....	18
Figura 10. Agitadores de hebra instalados en la máquina de colada continua.....	19
Figura 11. Micrografía revelada mediante tratamiento con prical/nital.	20
Figura 12. Banda blanca en sección transversal de palanquilla, revelada con impresión de azufre.	20
Figura 13. Ilustración esquemática del mecanismo de lavado de soluto.....	21
Figura 14. Equipamiento para realizar macro impresión con ácido clorhídrico.....	24
Figura 15. Esquema de cortes realizados en palanquillas	25
Figura 16. Equipamiento para realizar impresiones de Baumman	28
Figura 17. Esquema procedimiento para análisis de Carbón y Azufre	32
Figura 18. Posición de perforaciones para perfil de concentración acero medio carbono.....	32
Figura 19. Posición de perforaciones para determinar el perfil de concentración de la muestra de acero alto carbono	34
Figura 20. Esquema perforaciones para análisis de índice segregación central en palanquillas	35
Figura 21. Esquema perforaciones para análisis de índice segregación central en barras laminadas	36
Figura 22. Patrón fotográfico de la norma ASTM-E381 para evaluar segregación central	37
Figura 23. Espectrómetro de emisión óptica ARL 3460	39
Figura 24. Esquema de extracción de muestra para espectrometría óptica.....	39
Figura 25. Macro impresiones en aceros bajo carbono.....	40
Figura 26. Macro impresiones con ácido clorhídrico en muestras longitudinales, aceros medio carbono.....	41
Figura 27 . Macro impresiones en acero Medio carbono sin agitación electromagnética.....	42

Figura 28. Macro impresiones en acero Medio carbono con agitación electromagnética de hebra.	42
Figura 29. Macro impresión en acero Medio carbono con agitación electromagnética de hebra	44
Figura 30. Impresiones de Baumman en aceros medio carbono con agitación electromagnética de hebra.....	45
Figura 31. Macro impresiones con ácido clorhídrico en secciones transversales de acero alto carbono procesado a velocidad de colada estándar con presencia de grieta central.....	46
Figura 32. Macro impresiones con ácido clorhídrico en secciones transversales de acero alto carbono procesado a elevadas velocidades de colada continua.....	46
Figura 33. Macro impresiones con ácido clorhídrico en secciones longitudinales de aceros alto carbono procesado a elevadas velocidades de colada continua.....	47
Figura 34. Impresiones de Baumman en secciones transversales de acero alto carbono procesado a velocidad de colada normal.	48
Figura 35. Impresiones de Baumman en secciones transversales de acero alto carbono procesado a elevadas velocidades de colada continua.	48
Figura 36. Impresiones de Baumman en secciones longitudinales de acero alto carbono procesado a elevadas velocidades de colada continua.	49
Figura 37. Perfil de concentración de carbono en secciones transversales de acero medio carbono	50
Figura 38. Perfil de concentración de azufre en secciones transversales de acero alto carbono....	51
Figura 39. Perfil de concentración de carbono para sección transversal de acero alto carbono	52
Figura 40. Perfil de concentración de azufre para sección transversal de acero alto carbono	52
Figura 41. Esquema de pozos líquidos estimados por perfil de composición en secciones transversales de acero alto carbono.	53
Figura 42. Medición de temperatura en zona central de molde para colada de acero 0.25% carbono (bajo carbono).....	54
Figura 43. Medición de temperatura en zona central de molde para colada de acero 0.7% carbono (alto carbono).....	54
Figura 44. Vista interna de breakouts en palanquillas para diferentes contenidos de carbono	55
Figura 45. Mediciones de espesor de piel interna a partir de breakouts para palanquilla para aceros de composición 0.05% y 0.9% de carbono.	56
Figura 46. Fragmento de diagrama binario Hierro-Carbono.....	57
Figura 47. Evaluación de segregación central para palanquillas de aceros alto carbono durante enero y agosto del 2017 agrupado por sobrecalentamiento.....	61
Figura 48. Proceso de reducción de mineral de hierro en Alto Horno para obtención de arrabio....	67
Figura 49. Conversión de arrabio en acero mediante convertidor al oxígeno.	68
Figura 50. Proceso de afino de acero y laminación.....	68
Figura 51. Macrografía palanquilla hornada 1 línea 2.....	73
Figura 52. Macrografía palanquilla hornada 1 línea 4 y 5	73
Figura 53. Macrografía palanquilla hornada 2 línea 2.....	74
Figura 54. Macrografía palanquilla hornada 2 línea 4 y 5	74

Índice de Tablas

Tabla 1. Coeficientes de distribución en equilibrio para diferentes elementos	13
Tabla 2. Rango del contenido de carbono para la clasificación de aceros	26
Tabla 3. Clasificación del sobrecalentamiento	26
Tabla 4. Muestras utilizadas en macro impresiones con ácido clorhídrico	27
Tabla 5. Muestras utilizadas en impresiones de Baumman	30
Tabla 6. Condiciones de colada para hornadas de acero alto carbono sin agitador de hebra	34
Tabla 7. Identificación de palanquillas para análisis de índice de segregación central	37
Tabla 8. Calificación de segregación central bajo patrón de norma ASTM-E381	37
Tabla 9. Índices de segregación central para palanquillas y barras procesadas sin agitación electromagnética de hebra durante la colada continua.	58
Tabla 10. Índice de segregación central para palanquillas de CAP Acero S.A de alto carbono con agitación electromagnética de hebra.	59
Tabla 11. Índice de segregación barras de acero alto carbono CAP	59
Tabla 12. Resultados de evaluación macroscópica de palanquillas coladas sin agitador de hebra bajo norma ASTM-E381	60
Tabla 13. Índice de segregación para elementos segregables en barras asociadas a hornadas sin uso de agitación electromagnética de hebra durante colada continua.	62
Tabla 14. Planilla de largo metalúrgico	69
Tabla 15. Índices de segregación obtenidos para perfil de composición aceros medio carbono con y sin agitación electromagnética de hebra	70
Tabla 16. Índices de segregación obtenidos para perfil de composición aceros alto carbono con agitación electromagnética de molde y de hebra colado en condiciones normales.	71
Tabla 17. Esquema de cálculo de índice de segregación central para palanquillas	72

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

CAP Acero S.A. es una siderúrgica integrada que produce acero a partir de materias primas, entregando al mercado una gama de productos, tales como alambón, barras para molienda y barras hormigón entre otros.

Dentro de la variedad de procesos que tienen lugar durante la fabricación de acero existe la colada continua de palanquillas, proceso bajo el cual el acero sufre la transformación de su estado líquido a estado solidificado, adoptando la forma de palanquillas de 160 mm de sección cuadrada y distintas longitudes.

Durante la solidificación de acero en el proceso de colada continua, se da lugar el fenómeno de segregación, éste consiste en la redistribución progresiva de elementos de aleación a medida que la solidificación avanza, produciendo así zonas en la sección colada, enriquecidas de solutos. Esta segregación tiene lugar en la última fracción de acero líquido en solidificar y correspondiente a la zona central de los productos colados, a este fenómeno se le conoce más particularmente como segregación central y puede producir problemas en los productos derivados del acero colado.

Para mitigar los efectos del fenómeno de segregación central durante el proceso de colada continua, se utiliza agitación electromagnética. Actualmente se tienen instalados dos tipos de agitadores, el primero actúa en la etapa temprana de solidificación y es conocido como agitador electromagnético de molde, el segundo actúa en la última etapa de solidificación y es conocido como agitador electromagnético de hebra. Ambos ampliamente utilizados en el procesamiento de aceros de alto carbono, debido a que estos presentan mayor tendencia a la segregación central.

El uso de los agitadores electromagnéticos de molde es indispensable, su empleo produce grandes beneficios en la calidad externa e interna del acero colado bajo cualquier condición operacional. Por otro lado, el beneficio generado por el uso de los agitadores electromagnéticos de hebra estará sujeto a la evolución que tuvo la solidificación del acero al momento de ser sometido bajo su campo electromagnético, por lo tanto, su rendimiento depende de las condiciones operacionales utilizadas durante el proceso de colada continua.

CAP Acero S.A produce una amplia gama de aceros, los cuales son obtenidos bajo distintas condiciones operacionales durante el proceso de colada continua, por este motivo surge la necesidad de estudiar cómo evolucionó la solidificación del acero bajo distintas condiciones operacionales de colada continua. A partir de este conocimiento, será posible optimizar el rendimiento de los agitadores electromagnéticos de hebra.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Determinar el perfil de solidificación de acero en el proceso de colada continua de palanquillas CAP Acero, bajo distintas condiciones operacionales.

1.2.2. Objetivos específicos

Determinar la constante de solidificación para distintos aceros procesados durante la colada continua de palanquillas de CAP Acero S.A.

Implementar una metodología para la estimación de la proporción acero solidificado y líquido que se encuentra presente al momento de pasar por la agitación electromagnética, al final del proceso de colada.

Estudiar la factibilidad de la eliminación del uso de agitadores electromagnéticos de hebra durante la colada continua de palanquillas.

CAPITULO 2. ANTECEDENTES

2.1 Proceso productivo de la compañía siderúrgica

La compañía siderúrgica CAP Acero S.A, es una siderúrgica integrada, esto quiere decir que produce acero a partir de materias primas, estas son: mineral de hierro, caliza y coque metalúrgico, este último, es obtenido a partir del proceso de destilación seca realizado en la planta de coque.

La etapa inicial del proceso es el Alto Horno, que es un gran reactor vertical en contracorriente, donde el aire precalentado es insuflado para combustionar coque a elevadas temperaturas y de esta forma reducir mineral de hierro, fundir la carga y obtener hierro líquido a la forma de arrabio. Este último es transportado por medio de carros torpedos al departamento de Acería y Colada Continua.

La segunda etapa consiste en la refinación de arrabio para su transformación en acero. Éste se realiza en los Convertidores al Oxígeno (Basic Oxygen Furnace BOF) de la acería, en donde el arrabio proveniente del alto horno se carga en estos convertidores junto con la chatarra de acero y de hierro. Debido a la acción del oxígeno puro que se inyecta al convertidor, se combustiona el carbono, silicio y fósforo del arrabio. Todas estas reacciones son exotérmicas, permitiendo llegar a las temperaturas deseadas sin necesidad de agregar ningún combustible. Producto de la adición de cal, se forma la escoria en que se fijan las impurezas oxidadas. Este acero líquido producido es sangrado en cucharas y es transportado a la estación de ajuste metalúrgico.

En la estación de ajuste metalúrgico se obtiene la composición química deseada agregándole distintos elementos aleantes, que entregan las características principales a los diversos tipos de acero. Adicionalmente, se realiza un aporte térmico al baño de acero mediante electrodos de grafito, esto para evitar la solidificación prematura del acero en la cuchara antes de llegar a la etapa final del proceso. Luego el acero es transportado a la Colada Continua, en este proceso el acero líquido solidifica y se transforma en palanquillas que corresponden a productos semiterminados.

Estas palanquillas son transportadas a la unidad de laminación, que básicamente consiste en un proceso de transformación en caliente por medio del uso de rodillos de laminación, se modifica la forma de los productos, reduciendo la sección y aumentando el largo.

Un diagrama de flujo de todo el proceso se encuentra en anexo A adjunto.

Debido a que el presente estudio está enfocado en las variables de proceso en el que incide la solidificación de acero, se explicará detalladamente el proceso de colada continua.

2.2 Proceso de colada continua

La colada continua, es un proceso diseñado para obtener acero en bruto de forma regular e ininterrumpida a partir de acero fundido. Para ello, el acero líquido proveniente de la estación de ajuste metalúrgico, es vertido desde la cuchara de acero hacia una artesa, la que consiste en una batea revestida con material refractario y que tiene como función distribuir el acero de forma homogénea a los moldes instalados en cada una de las líneas de colada en operación tal y como se muestra en Figura 1. En CAP acero se tiene capacidad de trabajar hasta con un máximo de 5 líneas.

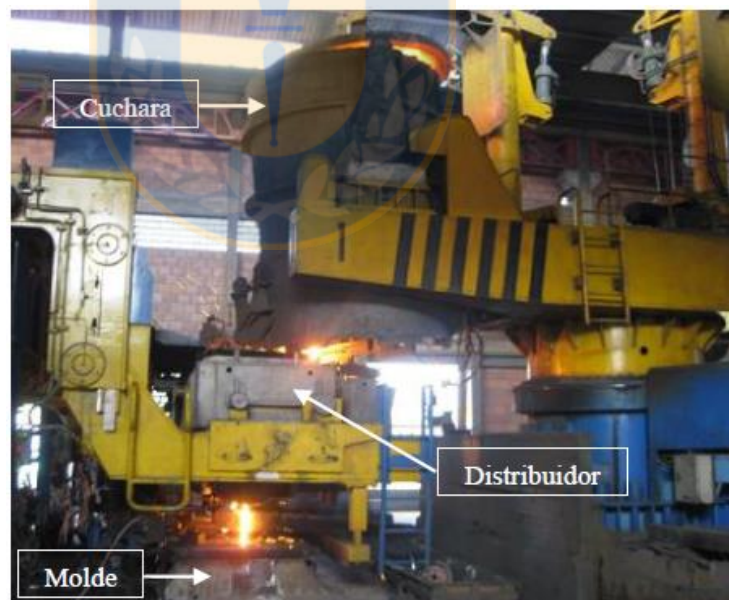


Figura 1. Vaciado de acero líquido al proceso de colada continúa

La solidificación de acero durante el proceso de colada continua tiene lugar en tres zonas características de la máquina de colada continua:

2.2.1 Sistema de enfriamiento Primario

Es el mecanismo inicial en el proceso de solidificación de colada continua, donde el acero líquido es vaciado en moldes de cobre, adoptando así la forma de estos al mismo tiempo que se solidifica. El objetivo de este sistema es generar una piel solidificada, libre de defectos y de un espesor lo suficientemente resistente para soportar la presión ferrostática ejercida por el acero líquido al momento de salir del molde.

La extracción de calor se genera a través de los moldes, cuya cara externa se encuentra cubierta por una chaqueta de agua que trabaja con grandes caudales, generando una variación entre la temperatura del agua que entra y sale del sistema de enfriamiento primario, conocido como ΔT_{molde} , su cuantificación permite evaluar la extracción de calor durante la solidificación primaria.

En la solidificación primaria, la extracción de calor se lleva a cabo a través de tres mecanismos:

- 1) Conducción horizontal desde la palanquilla hacia el agua de enfriamiento del molde, a través de este mismo molde.
- 2) Conducción vertical hacia la parte inferior de la palanquilla.
- 3) Radiación desde el menisco de acero hacia el exterior.

El primer mecanismo es el principal, mientras que los dos restantes son poco significativos, sobre todo cuando se utiliza polvo de colada como lubricante, puesto que la radiación vertical es neutralizada por este polvo aislante.

A medida que el acero solidifica desde el menisco hacia la salida del molde, se genera una contracción del mismo, causando intersticios de aire entre el acero y el molde, conocido como GAP. Para contrarrestar este fenómeno, en CAP Acero S.A, se utilizan moldes de cobre con forma cónica, su diámetro disminuye a medida que avance el acero por el molde, de tal forma que se compensa la formación de espacio entre acero y molde durante la solidificación.

El complejo fenómeno de extracción de calor en el molde puede dividirse en cinco mecanismos [1], cuyo detalle se muestra esquemáticamente en Figura 2.

- Convección del acero líquido
- Conducción en la piel solidificada
- Transferencia de calor acero-molde
- Conducción a través del molde
- Convección con el agua de enfriamiento

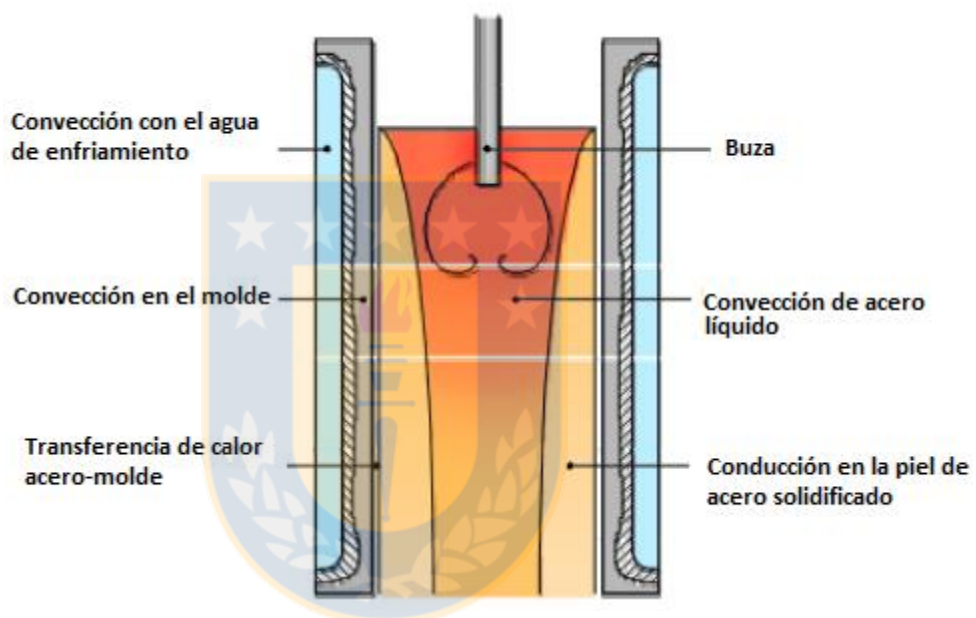


Figura 2. Esquema de transferencia de calor en el molde

Existen variables que influirán en la extracción de calor durante la solidificación del acero en el molde, las que se describen a continuación:

- Sobrecalentamiento del acero: El sobrecalentamiento del acero se define como la diferencia entre la temperatura a la cual es colado el acero y la temperatura líquidus teórica que tiene el acero, el cual depende de su composición química. A mayores sobrecalentamientos, se necesitará extraer más calor para poder formar una piel solidificada lo suficientemente resistente para soportar la presión ferrostática del acero aún líquido.

- Velocidad de colada: Es uno de los factores más determinantes, al ser el caudal en la chaqueta de agua constante, un aumento de la velocidad de colada implica un menor tiempo de residencia del acero dentro del molde, esto produce la disminución en la disipación de sobrecalentamiento que presentaba el acero al momento de entrar al sistema. El aumento de la velocidad de colada disminuirá entonces el espesor de la piel solidificada.

- Contenido de carbono: La velocidad de transmisión térmica para los aceros bajo carbono es menor que para el acero de medio carbono.

- Lubricación: Durante la colada continua se utilizan lubricantes para favorecer la transferencia de calor y evitar la adherencia del acero en las paredes del molde. Estos lubricantes pueden ser aceite o polvos sintéticos, el uso de cada uno dependerá del tipo de acero colado.

Una vez que solidifica la piel externa, el acero adopta la forma del molde y evacua de éste llegando a la zona de enfriamiento secundario.

2.2.2 Sistema de enfriamiento secundario

Este sistema tiene como función solidificar el acero líquido aun remanente dentro de la sección colada, formando una piel estable y evitando la formación de grietas internas u otros defectos. El sistema está constituido por rociadores de agua agrupados por zonas específicas, la extracción de calor se logra generando una película de vapor de agua estable sobre el producto colado para obtener una extracción de calor uniforme, para esto es necesario mantener un caudal de agua controlado. Se estima que entre un 30% y 40% del calor que entra al sistema de enfriamiento primario es extraído por este sistema.

La transferencia de calor se puede calcular mediante la Ley de enfriamiento de Newton, dada por la expresión:

$$q_w = h_w(T_s - T_w) \quad (1)$$

Donde:

h_w : Coeficiente local de transferencia de calor el que depende principalmente de la cantidad de agua empleada

T_s : Temperatura superficial de la palanquilla

T_w : Temperatura del agua empleada

Se conoce como curva de agua a la cantidad y distribución de agua que se proporciona al acero en las diferentes alturas y posiciones de la máquina de colada continua. La curva de agua está diseñada para cumplir siempre con el caudal específico $\left[\frac{\text{Litro agua}}{\text{Kg acero}} \right]$, de tal modo que la cantidad de agua en cada zona de rociadores se adapta para diferentes velocidades de colada garantizando que se cumpla siempre con el caudal específico de diseño para cada tipo de acero.

El caudal específico de diseño utilizado para cada tipo de acero es sugerido por el proveedor de la máquina de colada continua, estos son diseñados con el objetivo de asegurar una óptima calidad interna y externa del producto colado.

2.2.3 Enfriamiento por radiación

En esta etapa, la solidificación tiene lugar de forma natural por radiación desde la superficie incandescente del acero hacia el medio ambiente. La transferencia de calor se puede calcular mediante la ecuación de Stefan-Boltzman, dada por la expresión:

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

Donde:

ε : emisividad $0 < \varepsilon < 1$

σ : constante de Stefan-Boltzman $5.67 \times 10^8 \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$

T : temperatura absoluta de la superficie del cuerpo

El enfriamiento por radiación continúa hasta llegar a la mesa de corte, el que se realiza mediante lanzas oxicorte de modo de cortar la palanquilla en longitudes predefinidas.

2.3 Estructuras de solidificación del acero en el proceso de colada continua

Las piezas de acero en bruto obtenidas mediante colada continua, pueden estar formadas por tres zonas características como se observa en Figura 3:

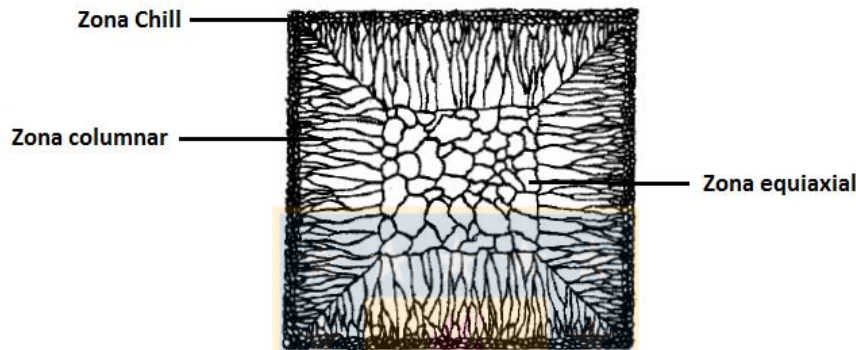


Figura 3. Macro estructura en sección de acero colado. [2]

Al comienzo de la solidificación se formará una capa externa llamada **Zona Chill**, la cual está constituida por granos poligonales, normalmente pequeños y sin orientación cristalográfica preferencial. Esta capa se produce por una muy alta extracción de calor debido al contacto con los moldes de cobre en el sistema de solidificación primaria. Cuando el acero sobrecalentado es vaciado en las paredes del molde, el líquido adyacente es rápidamente enfriado hasta la temperatura en que las impurezas sólidas producen una acción catalizadora efectiva sobre la nucleación. La extensión de la zona Chill depende de la extensión de la zona sub enfriada antes de que ocurra la nucleación. En muchos casos los núcleos se forman solamente en la superficie del molde por lo que la solidificación luego procede en la forma columnar.

La **Zona Columnar** está formada por granos alargados y orientados hacia el centro de la sección colada, estos poseen gran similitud en la orientación cristalográfica, generando textura en la dirección de extracción de calor. Puede ocupar la mayor parte o la totalidad de la pieza colada. El aumento de esta extensión está asociado a altos niveles de extracción calórica, los granos de esta

forma tienen su origen en los granos de la zona chill y crecen por solidificación progresiva hasta ser bloqueados por la presencia de granos equiaxiales. La extensión de esta zona disminuye sí ^[3]:

- El sobrecalentamiento disminuye
- El rango de solidificación aumenta
- El número de agentes nucleantes aumenta
- La agitación del líquido aumenta

La parte central de la sección colada generalmente está caracterizada por la **Zona Equiaxial**, conformado por granos orientados al azar que podrían estar formados a partir de brazos dendríticos secundarios rotos, que actúan como semillas para el crecimiento de nuevas dendritas.

2.4 Segregación

Todas las aleaciones metálicas contienen elementos o impurezas, las cuales son redistribuidas de forma aleatoria durante la solidificación. Esto genera heterogeneidades en la composición química del producto colado conocido como segregación.

La segregación composicional en productos colados se presenta de dos formas ^[4], estas son:

- **Microsegregación:** Durante la solidificación de una aleación metálica, desde la intercara líquido-sólido, el soluto es rechazado lateralmente de las dendritas secundarias y se redistribuyen por difusión en un contorno local de 10 a 300 μm .

Macrosegregación: Es la variación de composición a una escala de milímetros e incluso centímetros. Las causas de esta tienen relación con el movimiento de porciones de masa segregadas a través de las dendritas primarias ¹ durante el proceso de solidificación, esto debido a que la mayoría de los elementos tienen solubilidad más baja en la fase sólida que en la líquida, por lo tanto, el rechazo de soluto desde la fase sólida, incrementa la composición de la fase líquida.

¹ Dendritas primarias: Son estructuras con ramificaciones repetitivas, las cuales se forman durante el proceso de solidificación de acero. La ramificación base se conoce como dendrita primaria y de ella nacen ramificaciones más pequeñas conocidas como dendritas secundarias.

Aunque ambos fenómenos ocurren inevitablemente durante la solidificación de aleaciones, Gosh (2001) sugiere que la microsegregación no constituye mayores problemas para la calidad, esto debido a que los efectos de la microsegregación pueden ser removidos durante el subsecuente recocido o trabajado. La macrosegregación por otro lado persiste y produce problemas tales como zonas de menor punto de fusión, las que pueden refundir en tratamientos térmicos posteriores. [5]

En los productos derivados de colada continua, la macrosegregación es conocida como segregación central. Los productos de colada y sus derivados, presentan un enriquecimiento de solutos en la zona central, como se muestra en Figura 4, en la que se observa que el contenido de carbono desde la superficie del producto colado se mantiene casi invariante hasta llegar al centro donde se tiene un aumento significativo del contenido de carbono.

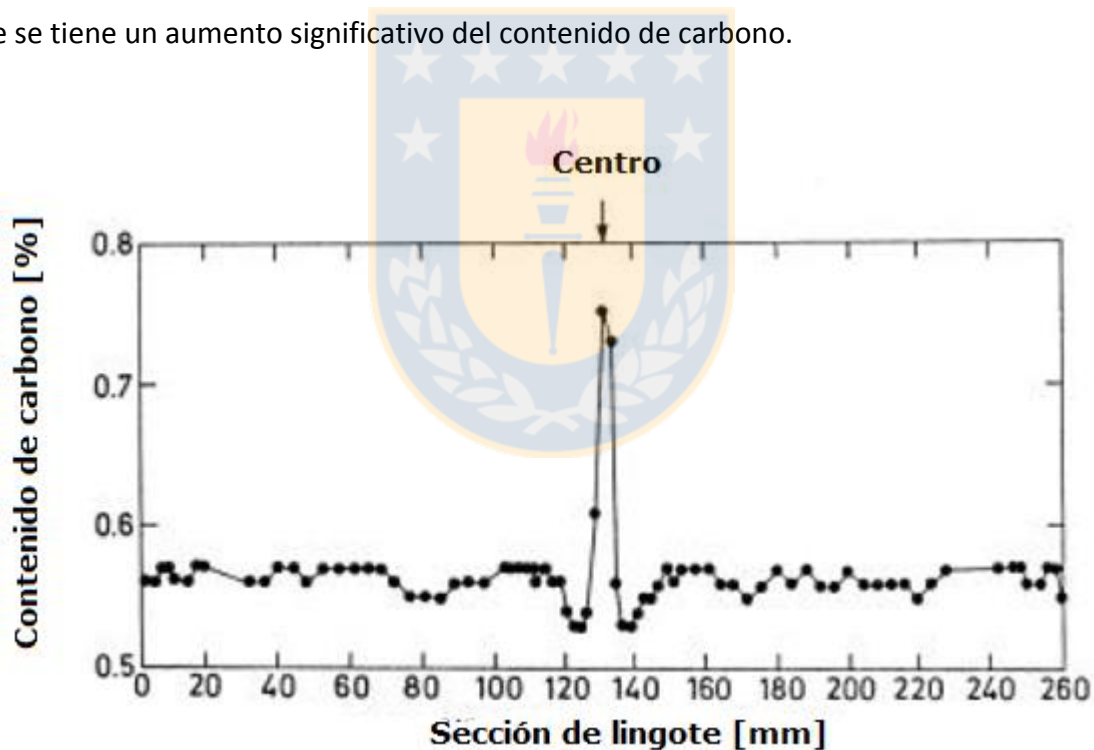


Figura 4. Perfil de concentración típico en colada continua de planchones. [5]

Esta segregación central puede resultar en la formación de segundas fases de no equilibrio, usualmente frágiles, en porosidades y en heterogeneidades en la concentración de las fases involucradas. Estas situaciones producen un material con propiedades físicas y mecánicas no uniformes [5].

2.4.1 Comportamiento de elementos de aleación en la segregación

En un diagrama de fases binario, como el Fe-C de Figura 5, se puede apreciar que las líneas sólidas y líquidas son representadas como rectas.

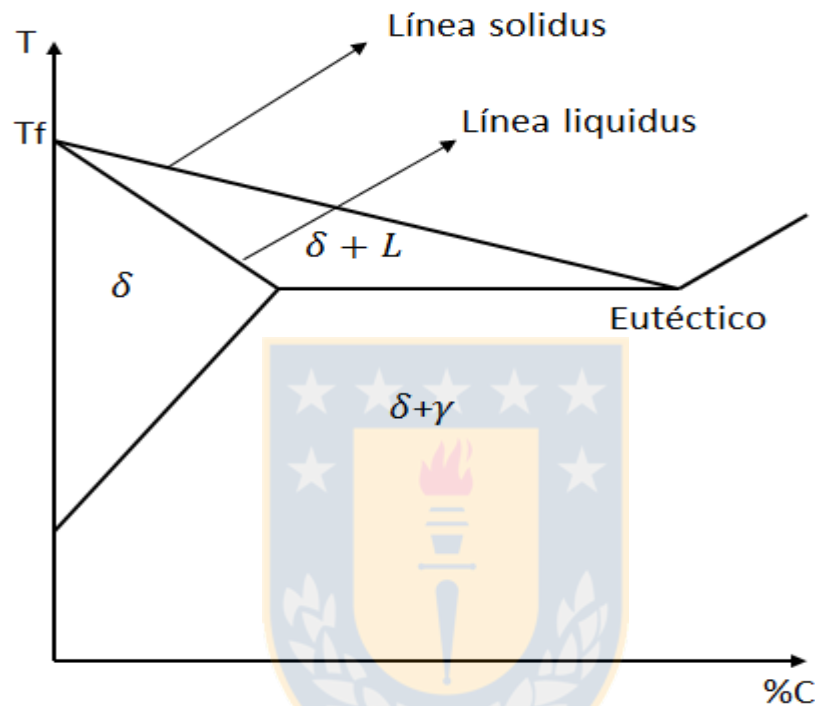


Figura 5. Esquema de líneas sólidas y líquidas en diagrama hierro-carbono. [4]

Tanto la línea sólida como la línea líquida pueden ser descritas mediante una ecuación de la recta donde la temperatura es una función del contenido de carbono. Estas líneas se representan mediante la siguiente ecuación:

$$T = mC + T_f \quad (3)$$

Donde:

T : temperatura

m : pendiente de la línea sólida o líquida

C : concentración de carbono en porcentaje en masa, C_s para línea sólida, C_L para línea líquida

T_f : temperatura de fusión de hierro puro

Asumiendo que las líneas líquidas y sólidas son rectas en el diagrama de fases binario, el cociente entre ambas pendientes se denomina como coeficiente de distribución en equilibrio y se designa como k^* , este se representa como:

$$k^* = \frac{m_s}{m_l} = \frac{C_s}{C_l} = \frac{t_f - t_l}{t_f - t_s} \quad (4)$$

El valor de k suele ser menor a 1, esto quiere decir que el elemento de estudio tiene preferencias por la fase líquida por sobre la fase sólida. Entre menor el valor de k^* , mayor la tendencia del elemento de estudio a segregarse durante la solidificación.

A continuación en tabla 1 se presentan algunos valores del coeficiente de partición k^* para la solidificación de aleaciones binarias de hierro, tanto para hierro δ como para hierro γ .

Tabla 1. Coeficientes de distribución en equilibrio para diferentes elementos [6]

Elemento	Fe- δ	Fe- γ
Al	0.92	-
C	0.13	0.36
Cr	0.95	0.85
H	0.32	0.45
Mn	0.84	0.95
Mo	0.80	0.60
Ni	0.80	0.95
N	0.28	0.54
O	0.02	0.02
P	0.13	0.06
Si	0.66	0.5
S	0.02	0.02
Ti	0.14	0.07
V	0.9	-

A partir de la tabla 1, se observa que los elementos que tienen mayor tendencia a la segregación son el azufre y el oxígeno, mientras que el carbón, el fósforo y el titanio, presentan valores considerables.

2.5 Agitadores electromagnéticos en el proceso de colada continua

Los agitadores electromagnéticos se utilizan en el proceso de colada continua para mitigar el fenómeno de segregación central. Estos consisten en bobinas que circundan el producto colado, generando un campo magnético rotativo de frecuencia a intensidad ajustable. La interacción del campo magnético con el producto colado produce un movimiento de giro de la fracción de acero que aún se encuentra líquida dentro de la palanquilla, tal como se muestra en Figura 6:

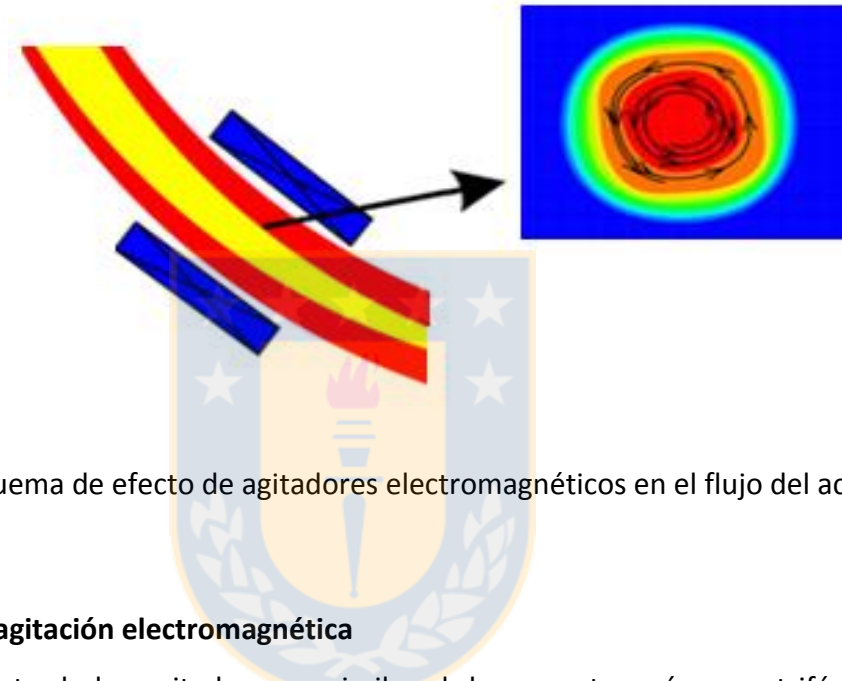


Figura 6. Esquema de efecto de agitadores electromagnéticos en el flujo del acero líquido.

2.5.1 Principio de la agitación electromagnética

El funcionamiento de los agitadores es similar al de un motor asíncrono trifásico, donde la bobina inductora funciona como estator y el acero líquido hace de rotor.

Un campo magnético variable (B), aplicado sobre un conductor como el acero, ya sea en estado sólido o líquido, inducirá una corriente eléctrica (j) sobre el conductor, también conocida como corriente de Foucault. Estas corrientes circulares de Foucault crean electroimanes con campos magnéticos que se oponen al efecto del campo magnético aplicado.

De igual manera, las corrientes de Foucault (j) generadas sobre el acero, están sometidas a la acción del campo magnético variable (B), esto se conoce como Fuerza de Lorentz, y está dado por la siguiente expresión:

$$F = j \times B \quad (5)$$

Debido a esta Fuerza de Lorentz, se genera un torque en el acero líquido que le proporciona un movimiento rotatorio. El torque generado depende de la intensidad de corriente, número de devanados de la bobina, frecuencia y geometría del sistema.

2.5.2 Posición agitadores electromagnéticos

Existen tres posiciones posibles para el uso de los agitadores electromagnéticos durante la colada continua, los cuales se representan en figura 7, su ubicación dependerá del efecto que se desea lograr sobre los productos colados, los agitadores por su posición se clasifican en:

1. Agitador electromagnético de molde (MEMS): Instalado en la parte exterior del molde o lingotera
2. Agitador electromagnético en sistema de enfriamiento Secundario (SEMS): Instalado en la zona de enfriamiento secundario
3. Agitador de final de pozo (FEMS): Instalado al término del sistema de enfriamiento secundario, también es conocido como agitador de hebra.

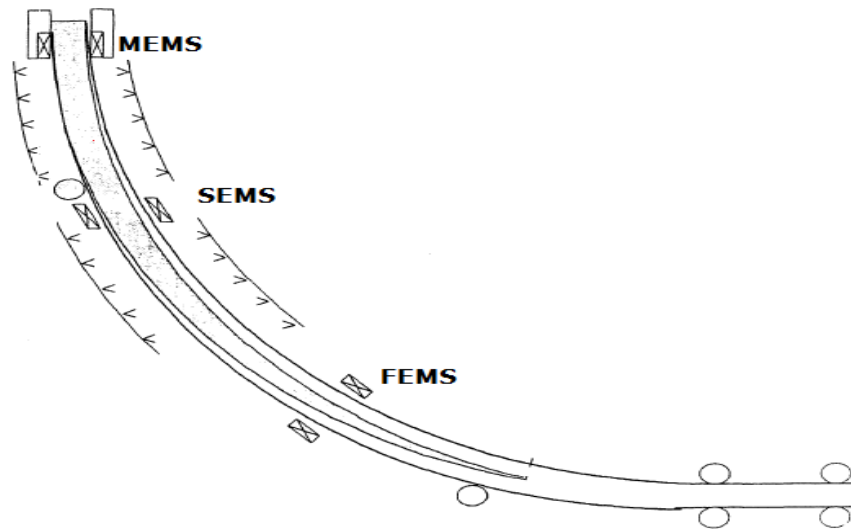


Figura 7. Posiciones posibles de los agitadores electromagnéticos en la línea de colada continua.

Los agitadores, dependiendo de la posición, tendrán efectos diferentes. A continuación se describen los efectos generados por los agitadores instalados en la máquina de colada continua de palanquillas de CAP acero.

Agitadores de Molde (MEMS):

- a) Aumenta la proporción de granos equiaxiales en la zona central del producto colado.
- b) Disminuye los Pinholes, la porosidad y segregación central.

Agitadores de final de pozo (FEMS):

- a) Refinador de granos equiaxiales en la sección central.
- b) Disminuye la porosidad y segregación central.

Dentro de los efectos más importantes que tienen los agitadores electromagnéticos durante el proceso de colada continua, está el aumento de la proporción de granos equiaxiales al centro del producto colado.

El aumento de la proporción de granos equiaxiales se explica mediante el mecanismo conocido como desprendimiento dendrítico. En este mecanismo, los núcleos para la formación de granos equiaxiales resultan de los granos predendríticos formados en la etapa más temprana de solidificación en el molde. Estos granos son arrancados por la agitación y luego redistribuidos hacia

el centro de la sección colada, como se representa en Figura 8. Si estos gérmenes o núcleos sobreviven al sobrecalentamiento, crecen y dan lugar a granos equiaxiales [7].

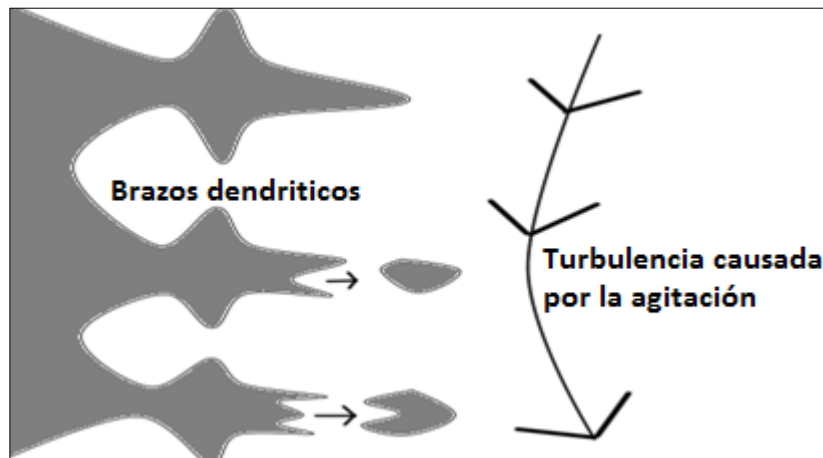


Figura 8. Esquema desprendimiento dendrítico causado por agitación.

2.6 Largo metalúrgico

El largo metalúrgico en el proceso de colada continua se define como la posición dentro de la línea de colada donde tiene lugar la última solidificación del producto colado.

El largo metalúrgico es el resultado de diversos factores que interfieren en la velocidad de solidificación dentro de la palanquilla, el fenómeno que gobierna esta solidificación es la transferencia de calor, la cual se ve afectada por condiciones operacionales como:

- Temperatura de acero en la artesa
- Composición química del acero
- Velocidad de colada
- Intensidad del enfriamiento secundario

2.7 Efecto de la posición de agitadores electromagnéticos de hebra

La posición de los agitadores electromagnéticos de hebra dentro de la máquina de colada continua tiene un efecto considerable en la disminución de la segregación central del producto colado. A continuación se describen los efectos de las distintas posiciones de los agitadores electromagnéticos de hebra:

- a) Posición alta: La posición del agitador se encuentra en etapas muy tempranas de solidificación, la porción de acero que aun no solidificó es muy grande y la segregación central tendrá lugar aunque se utilice agitación electromagnética.
- b) Posición óptima: Existe una proporción ideal entre la fracción solidificada y la líquida, el rendimiento del agitador es maximizado con esta proporción.
- c) Posición muy baja: La solidificación se encuentra muy avanzada, la viscosidad de la zona pastosa es muy alta y no se puede mitigar la segregación central.

Los tres casos distintos son respectivamente representados en Figura 9:

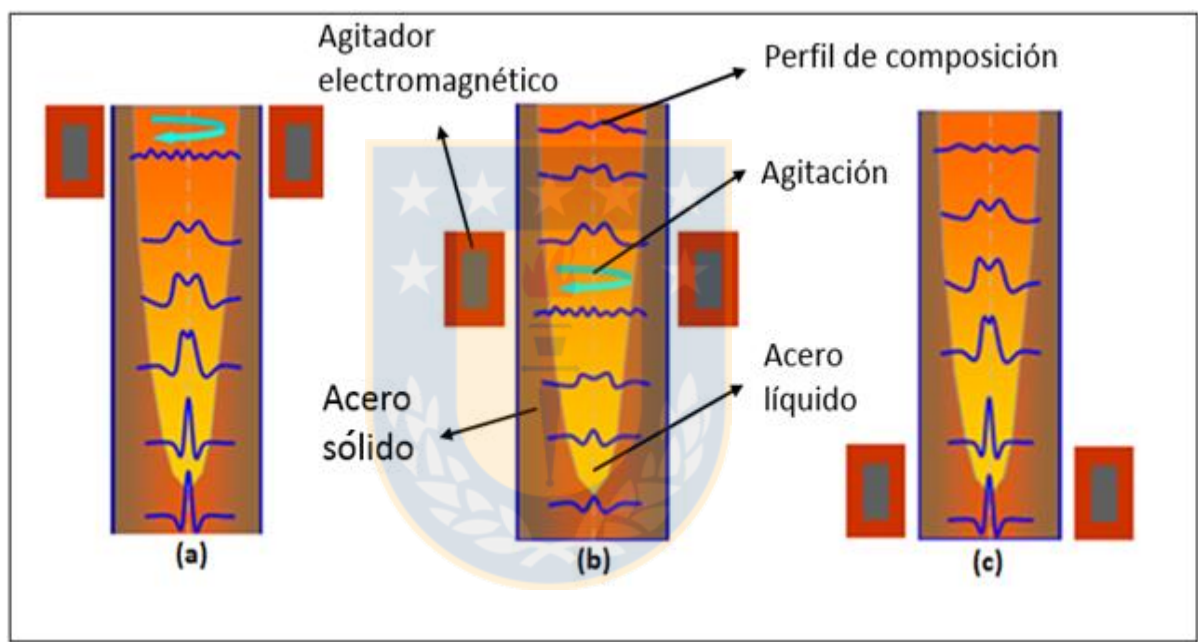


Figura 9. Esquema efectos posición de agitador de hebra.

De Figura 9 se pueden apreciar que la segregación central es controlada únicamente cuando se tiene el agitador en una posición óptima.

Conocer la cantidad de acero líquido que llega al agitador de hebra (Figura 10) resulta esencial para optimizar el funcionamiento de éste.

Para el caso particular del proceso de colada continua de palanquillas de CAP Acero S.A, se recomienda tener una sección no solidificada de 50 mm de espesor al momento de llegar a los agitadores electromagnéticos de hebra ^[8], lo cuales se muestran en Figura 10:



Figura 10. Agitadores de hebra instalados en la máquina de colada continua.

2.8 Efectos estructurales de la agitación electromagnética sobre la solidificación

La agitación electromagnética durante el proceso de colada continua producirá modificaciones en el proceso de solidificación, ésto debido a la agitación que provoca en la porción de acero líquido aun remanente dentro del producto colado. Dentro de los efectos de esta agitación se destacan:

Curvatura dendrítica: Las dendritas existentes en la interfase sólido-líquido de la sección colada, son estructuralmente modificadas por la agitación que se provoca al momento de someterse al efecto del campo electromagnético. Esta agitación provocará una modificación en la dirección de solidificación de las dendritas columnares (Figura 11) o resultarán en la transición de granos columnares a granos equiaxiales.

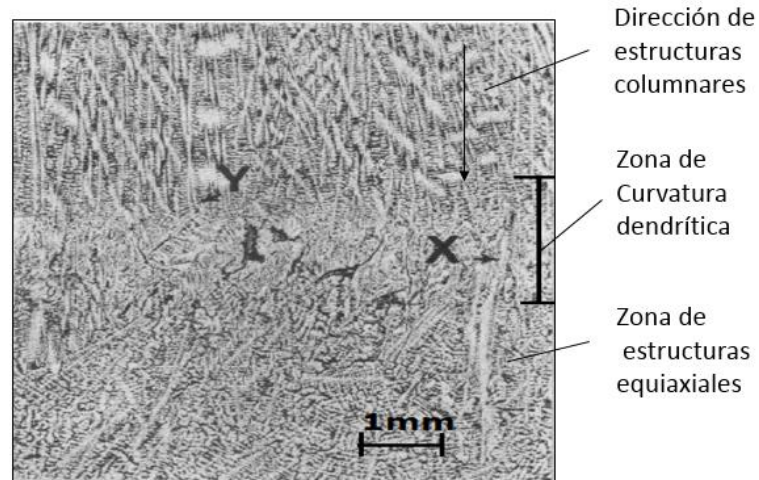


Figura 11. Micrografía revelada mediante tratamiento con prical/nital.^[9]

Banda de segregación: El uso de agitación electromagnética durante el proceso de colada continua produce un defecto visual denominado banda de segregación o también conocida como banda blanca. La banda blanca es apreciable en la sección transversal del producto colado luego de realizarse un macro ataque con reactivos sobre la muestra en estudio.

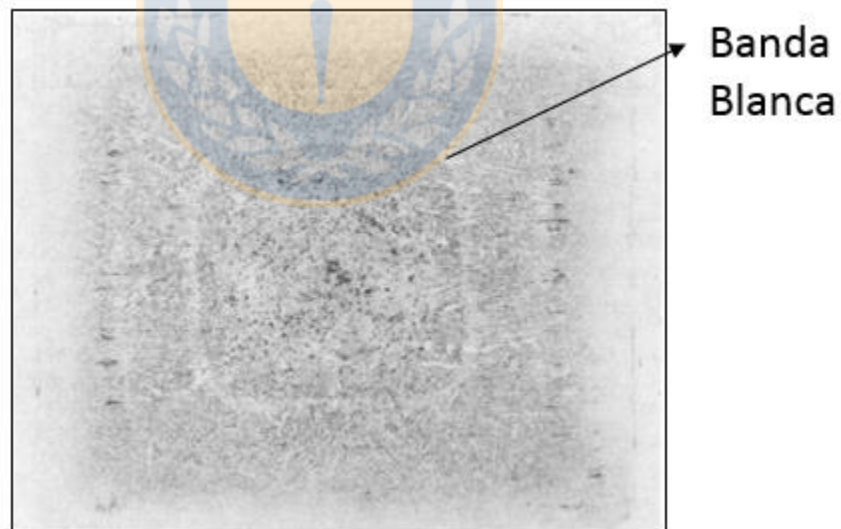


Figura 12. Banda blanca en sección transversal de palanquilla, revelada con impresión de azufre. ^[9]

En ese sentido Bridge y Rogers sugieren que la banda blanca es una zona de segregación negativa² y a menudo se encuentra en productos colados con agitación electromagnética, esta banda blanca corresponde a la posición del frente de solidificación durante la agitación [9].

De igual manera Álvarez de Toledo, Campo y Láñez [10] reportan que la agitación electromagnética produce una banda blanca que delinea la situación de la intercara sólido/líquido en el momento de actuar la agitación. Esta banda blanca se aprecia no sólo en la palanquilla de bruto de colada, sino también en el producto laminado. Experimentalmente, se ha comprobado que la concentración de elementos segregables en esta zona, es inferior a la concentración en la matriz. Esta disminución se debe a que el movimiento del acero líquido, producido por la agitación, perturba el equilibrio térmico y a la concentración existente en la intercara; por otro lado, se puede producir el efecto de lavado del líquido segregado de la intercara, por lo que el nuevo líquido que solidificará lo hará con una concentración de elementos de aleación inferior [10].

En efecto Bridge et al. [9] propone que el mecanismo de formación de la banda blanca es lavado de soluto. En este proceso, el flujo turbulento causado por la agitación electromagnética, penetra la red interdendrítica y redistribuye el líquido enriquecido de solutos llevándolo al seno del acero líquido, tal como se muestra en Figura 13:

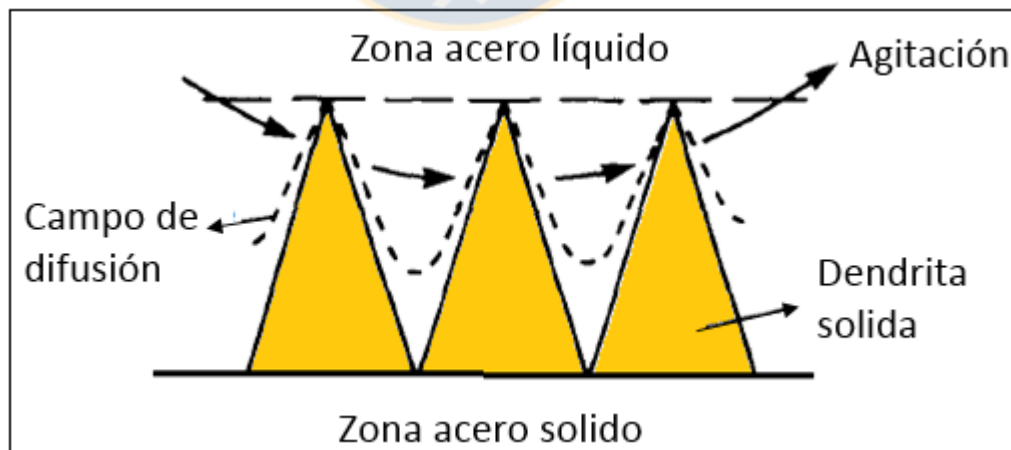


Figura 13. Ilustración esquemática del mecanismo de lavado de soluto. [9]

² Segregación negativa: Ocurre cuando la concentración o composición del punto estudiado es inferior a la composición nominal de la matriz.

La posición de la banda blanca permite determinar la constante de solidificación parcial K , mediante la expresión de Field ^[11]:

$$S = K \sqrt{t} \quad (6)$$

Donde:

S : profundidad de la banda blanca [mm]

K : constante de solidificación [$\text{mm min}^{-0.5}$]

t : tiempo de solidificación [min]

La constante de solidificación es un parámetro que permite calcular el avance del frente de solidificación con respecto al tiempo transcurrido desde el inicio de colada continua. Esta constante es una función de la composición del acero colado y su valor según el proveedor de la máquina de colada continua puede fluctuar entre 24 y 31 $\text{mm min}^{-0.5}$.

A medida que aumenta el valor de la constante de solidificación, aumenta la velocidad con la que solidifica el acero durante la colada continua de palanquillas.

Para los aceros alto carbono procesados en CAP Acero S.A, la constante de solidificación óptima para llegar con un pozo líquido de 50 mm de diámetro a la posición de los agitadores electromagnéticos de hebra tiene un valor aproximado de 29.9 $\text{mm min}^{-0.5}$.

CAPITULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Con el objetivo de estudiar el efecto de variables operacionales sobre el perfil de solidificación durante la colada continua y evaluar el desempeño de los agitadores de hebra, se realizaron pruebas industriales en el proceso de colada continua de palanquillas de CAP Acero S.A, de las cuales se obtuvieron muestras del producto colado que fueron posteriormente llevadas a análisis.

Las muestras de los productos colados fueron caracterizados mediante:

- 1) Ensayos metalográficos realizados en piezas coladas bajo diferentes condiciones operacionales de colada continua.
- 2) Determinación de perfil de concentración en secciones transversales de piezas coladas.
- 3) Determinación del índice de segregación central en muestras coladas sin agitación electromagnética de hebra.

3.1 Ensayos metalográficos en muestras coladas bajo distintas condiciones operacionales

El objetivo de los ensayos metalográficos, o también conocidos como macro impresiones, es revelar información detallada sobre las macro estructuras, fenómenos y defectos que tuvieron lugar durante la solidificación de piezas coladas. Estas macro impresiones se obtienen mediante la aplicación de reactivos sobre la muestra en estudio, la interacción de ambas revelará la información buscada. Existe una gran diversidad de reactivos para la elaboración de macro impresiones, cuya selección dependerá de la información buscada y la naturaleza de la muestra en estudio.

A continuación se describen las macro impresiones empleadas en el presente estudio:

3.1.1 Macro impresiones con Ácido Clorhídrico

El principio de éste, es someter la pieza de estudio a una solución acuosa de ácido clorhídrico para así revelar información específica de la muestra. Dicho ensayo es ampliamente utilizado en la evaluación de piezas coladas y productos derivados de éstas. La macro impresión con ácido clorhídrico revelará:

- Variación de estructuras, como presencia de dendritas y estructuras columnares.
- Variación en composición, como segregación y bandeado.
- Presencia de discontinuidades o macro defectos como grietas, porosidades y rechupes.

3.1.1.1 Equipamiento y materiales

Se empleó ácido clorhídrico técnico marca Furet, agua destilada, bandeja de calentamiento de muestras, contenedores de vidrio en variadas dimensiones, cronómetro, termómetro, campana extractora de gases; tal como se muestra en Figura 14:



Figura 14. Equipamiento para realizar macro impresión con ácido clorhídrico

3.1.1.2 Procedimiento experimental

Estas pruebas se realizaron en base a la Norma ASTM-E340 ^[12].

A continuación se presenta una descripción simplificada del procedimiento experimental:

- a) Preparación de reactivo de ataque, que consiste en la mezcla de ácido clorhídrico concentrado con agua destilada, en una proporción 1:1.
- b) Vertimiento de mezcla en contenedor de vidrio y posterior calentamiento hasta alcanzar 75°C, para luego dejar la solución a temperatura constante y siempre bajo campana de extracción de gases.
- c) Inmersión de la muestra dentro del baño ácido siempre manteniendo la superficie de estudio orientada hacia arriba. El tiempo de contacto entre muestra y reactivo oscila entre 20 a 30 minutos.
- d) Extracción, lavado y secado de la muestra para su posterior inspección.

3.1.1.3 Extracción de muestras

Se utilizaron secciones cortadas de las palanquillas coladas, estas secciones pueden ser clasificadas de acuerdo a la orientación en la cuales fueron cortadas, de acuerdo al esquema de extracción de Figura 15, donde se aprecian las superficies obtenidas una vez se realiza el corte de extracción.

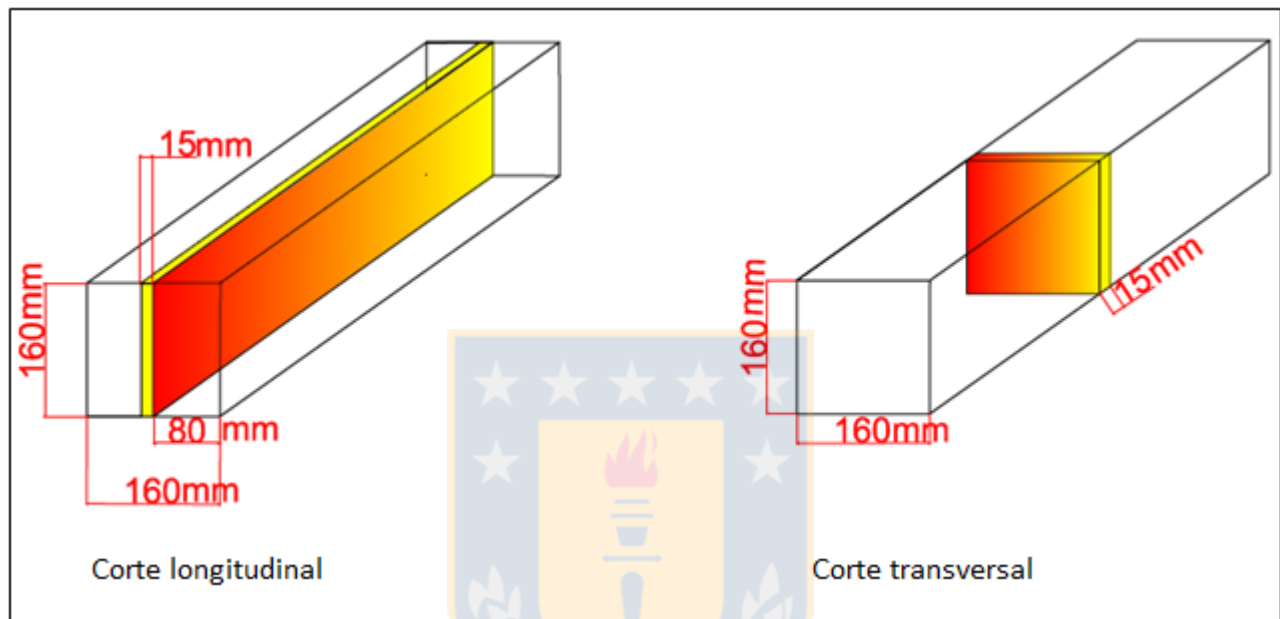


Figura 15. Esquema de cortes realizados en palanquillas

De igual manera, las muestras se clasifican de acuerdo al acabado superficial que presentan. Las macro impresiones con ácido clorhídrico están definidas para ser empleadas con muestras que provienen directamente del corte sierra, sin embargo, las superficies con mejor acabado como el lijado y posterior pulido obtendrán una mejora en los detalles y evitarán la interferencias generadas por el corte sierra.

3.1.1.4 Condiciones experimentales de colada continua de las muestras extraídas

Se consideran las condiciones experimentales bajo las cuales las muestras fueron obtenidas durante el proceso de colada continua. Los parámetros más determinantes en la evolución de estructuras durante la solidificación son:

- Tipo de acero: Depende mayoritariamente del contenido de carbono, para el presente estudio se clasificaron en 3 niveles tal como se detalla en Tabla 2.

Tabla 2. Rango del contenido de carbono para la clasificación de aceros

Tipo Acero	Bajo Carbono	Medio Carbono	Alto Carbono
Rango de composición , %]0.008 - 0.25]]0.25 - 0,6]]0.6 - 2.11]

- Velocidad de colada V_c : Se distinguen 4 velocidades de colada distintas, las que están representadas bajo las etiquetas de A, B, C y D , lo que se relacionaron de acuerdo a:

$$A < B < C < D$$

- Sobrecalentamiento SH : Se clasificó en 3 niveles tal como se detalla en Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación del sobrecalentamiento

Sobrecalentamiento	Bajo	Medio	Alto
Rango , °C]0 -15]]15- 35]]35- 45]

- Intensidad del enfriamiento secundario (Intensidad): se distinguen 3 niveles, éstos se identifican como bajo, medio y alto. Es importante destacar que no existe gran variación en el caudal específico entre los niveles mencionados, siendo la diferencia de $0.2 \left[\frac{L}{Kg} \right]$ entre 2 niveles contiguos.
- Tipo de agitación: El uso de agitadores electromagnéticos durante la colada continua puede tener importantes efectos en las estructuras que se forman durante la solidificación, por esta razón se considera el uso de agitadores de molde y de hebra.

A continuación en tabla 4 se identifican las muestras analizadas:

Tabla 4. Muestras utilizadas en macro impresiones con ácido clorhídrico

Muestra	Tipo de acero	Vc	SH	Intensidad	Tipo de agitación	Orientación del corte	Tipo de acabado
1	Bajo carbono	D	Medio	Alta	Molde	Transversal	Corte sierra
2	Bajo carbono	C	Medio	Alta	Molde y Hebra	Transversal	Corte sierra
3	Bajo carbono	C	Medio	Alta	Molde y Hebra	Longitudinal	Brillo espejo
4	Medio carbono	D	Medio	Media	Sin agitación	Transversal	Corte sierra
5	Medio carbono	D	Medio	Media	Hebra	Transversal	Corte sierra
6	Medio carbono	B	Alto	Media	Hebra	Transversal	Corte sierra
7	Medio carbono	B	Alto	Media	Hebra	Longitudinal	Brillo espejo
8	Alto Carbono	A	Medio	Media	Molde y Hebra	Transversal	Corte sierra
9	Alto Carbono	C	Medio	Media	Molde y Hebra	Transversal	Corte sierra
10	Alto Carbono	C	Alto	Baja	Molde y Hebra	Transversal	Corte sierra
11	Alto Carbono	C	Medio	Media	Molde y Hebra	Longitudinal	Brillo espejo
12	Alto Carbono	C	Alto	Baja	Molde y Hebra	Longitudinal	Brillo espejo

3.1.2 Impresiones de Baumman

Este tipo de ensayo entrega una evaluación macroscópica de la distribución de sulfuros en la pieza de estudio, siempre y cuando éste tenga un contenido de azufre entre 0.01% y 0.4% en peso. Aquellas muestras que contengan sulfuros complejos como sulfuros de titanio o de cromo, no responden bien a este ensayo.

3.1.2.1 Equipamiento y materiales

Se empleó papel fotográfico fotosensible marca ILFORD, ácido sulfúrico concentrado marca Furet, agua destilada, solución para fijación fotográfica, contenedores planos, esponja, guantes de látex, llave de agua para lavado, habitación de revelado fotográfico .Los implementos son presentados en Figura 16:



Figura 16. Equipamiento para realizar impresiones de Baumman

3.1.2.2 Procedimiento experimental

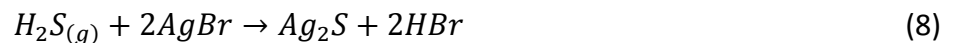
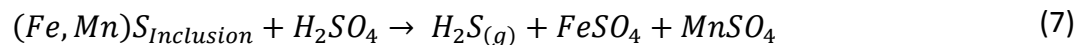
El procedimiento empleado en estos ensayos fue en base a la Norma ASTM-E1180 [13].

Como precaución se debe evitar radiación directa proveniente del sol, por lo que se recomienda el uso de habitación oscura con iluminación apropiada para conservar propiedades del papel fotosensible.

A continuación una descripción simplificada del procedimiento experimental:

- 1) Se preparó una solución acuosa de ácido sulfúrico al 2%, la cual es vertida en un contenedor plano.
- 2) Inmersión de papel fotográfico fotosensible dentro del contenedor plano, por un periodo de 3 minutos.
- 3) Se posicionó el papel emulsionado con la solución ácida sobre la superficie de la pieza de estudio.
- 4) Para la eliminación de intersticios de aire entre el papel y la superficie se aplicó un rodillo de goma o esponja empapada en solución ácida, garantizando así, el total contacto entre papel y la superficie de muestra. Se Mantuvo un tiempo de contacto de 90 segundos.

La interacción entre el ácido sulfúrico y el azufre contenido en la muestra, en la forma de sulfuros de hierro FeS o sulfuros de manganeso MnS, genera gas sulfhídrico $H_2S_{(g)}$, este interactúa con la delgada capa de bromuro de plata contenida en el papel fotográfico, quedando así impresa la distribución de azufre de la pieza en estudio sobre el papel fotográfico. Las reacciones se presentan a continuación [14]:



- 5) Extracción del papel fotográfico para ser lavado en fregadero durante 15 minutos.

6) Se preparó solución de fijado fotográfico y se vació en un contenedor plano, luego se sumergió el papel fotográfico previamente lavado, el contacto con el fijador se efectuó durante 20 minutos.

7) Se lavó finalmente el papel fotográfico en fregadero durante 30 minutos.

3.1.2.3 Muestras

Se utilizaron secciones cortadas transversalmente de las palanquillas coladas, estas secciones son clasificadas al igual que en la sección 3.2.1.2 y en detalle de las mismas se presentan en Tabla 5.

Tabla 5. Muestras utilizadas en impresiones de Baumman

<i>Muestra</i>	<i>Tipo de acero</i>	<i>Vc</i>	<i>SH</i>	<i>Intensidad</i>	<i>agitación</i>	<i>Corte</i>	<i>Acabado</i>
1	Medio carbono	D	Medio	Media	Hebra	Transversal	Rectificado y Lijado
2	Medio carbono	D	Medio	Media	Hebra	Longitudinal	Rectificado y Lijado
3	Alto Carbono	A	Medio	Media	Molde y Hebra	Transversal	Rectificado y Lijado
4	Alto Carbono	C	Medio	Media	Molde y Hebra	Transversal	Rectificado y Lijado
5	Alto Carbono	C	Alto	Baja	Molde y Hebra	Transversal	Rectificado y Lijado
6	Alto Carbono	C	Medio	Media	Molde y Hebra	Longitudinal	Rectificado y Lijado
7	Alto Carbono	C	Alto	Baja	Molde y Hebra	Longitudinal	Rectificado y Lijado

3.2 Perfil de concentración de piezas coladas

El perfil de concentración es un elemento clave en el estudio del fenómeno de segregación generado durante la solidificación de aceros. Este análisis nos permite visualizar el comportamiento de los solutos durante el desarrollo del proceso de colada continua, y de igual manera, la naturaleza de algunos defectos generados durante la misma.

Para estos análisis se utilizó el equipo Leco CS-400, el que permite analizar el contenido de Carbono y azufre de las muestras en estudio.

3.2.1 Leco CS-400

Se basa en la completa e instantánea oxidación de la muestra mediante una combustión con oxígeno puro a una alta temperatura. Los productos de combustión CO_2 (g) y SO_2 (g) son posteriormente cuantificados mediante celdas de infrarrojo. En el presente estudio las muestras utilizadas correspondieron a virutas extraídas mediante perforaciones realizadas con taladro a las zonas de interés. Una vez obtenida la muestra, se procedió a rellenar un pequeño crisol con ella y de igual manera se adicionó un acelerador de ignición marca LECOCEL, este conjunto (Figura 17) es introducido en la plataforma de ignición donde finalmente se accionó el botón de inicio y el equipo procede de forma automática a combustionar y a analizar la muestra. Los resultados de contenido de carbono y azufre de la muestra en porcentaje másico, fueron mostrados automáticamente en la pantalla del equipo.



Figura 17. Esquema procedimiento para análisis de Carbón y Azufre

3.2.2 Muestras

Las muestras seleccionadas fueron secciones transversales de palanquillas. El presente análisis fue realizado en función de los resultados obtenidos en las macro impresiones con ácido clorhídrico y las impresiones de Baumman.

A continuación se describen detalladamente las muestras analizadas:

a) Acero medio carbono sin y con agitación electromagnética de hebra

La aplicación de agitación electromagnética de hebra durante el proceso de colada continua, produjo la aparición del fenómeno banda blanca, el cual es observable con el uso de macro impresiones con ácido clorhídrico o con el empleo de las impresiones de Baumman. Con el objetivo de estudiar la naturaleza de este defecto, se realizó un perfil de composición a muestras con y sin la presencia de este fenómeno. Se posicionó una lectura (Punto n°4 en Figura 18) precisamente sobre la zona de banda blanca para establecer su naturaleza.

Las muestras utilizadas corresponden a las 4 y 5 de Tabla 4.

A continuación se muestra las posiciones de las perforaciones realizadas a cada muestra para su posterior análisis:

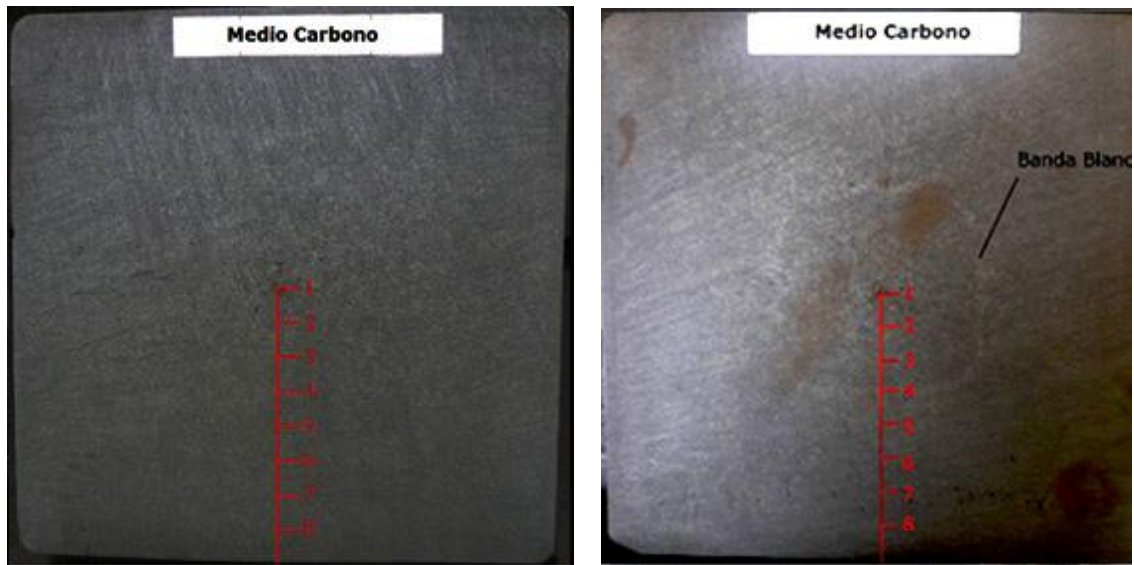


Figura 18. Posición de perforaciones para perfil de composición acero medio carbono.

- b) Acero alto carbono con agitación electromagnética en el molde y agitación electromagnética de hebra.

Los aceros alto carbono siempre utilizan agitación electromagnética de hebra durante el proceso de colada continua, sin embargo, no se genera el fenómeno de banda blanca, por este motivo se realizó un barrido completo de una sección de acero alto carbono colado. Ésto con el objetivo de detectar alguna anomalía en la forma en que segregaron los solutos y atribuirla al accionamiento del agitador de hebra.

La muestra analizada corresponde a la muestra 9 de Tabla 4.

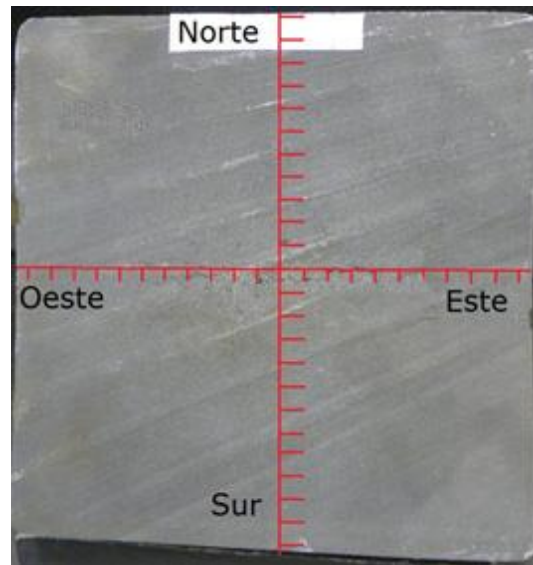


Figura 19. Posición de perforaciones para determinar el perfil de concentración de la muestra de acero alto carbono

Para este análisis se utilizaron brocas de 4 mm de diámetro, esto con el objetivo de obtener la mayor cantidad de puntos posibles. La distancia entre los centros de los puntos fue de 7 mm aproximadamente.

3.3 Efecto de la eliminación de agitadores de hebra durante la colada continua de aceros alto carbono

Con el objetivo de evaluar el efecto de la ausencia de agitación electromagnética de hebra durante la colada continua de aceros de alto carbono, se procesaron dos hornadas completas sin el uso de estos agitadores. Las condiciones de operación empleadas se presentan en Tabla 6:

Tabla 6. Condiciones de colada para hornadas de acero alto carbono sin agitador de hebra

<i>Hornada</i>	<i>Tipo de acero</i>	<i>Vc</i>	<i>SH</i>	<i>Intensidad</i>	<i>Agitación</i>
1°	Alto carbono	A	medio	media	Molde
2°	Alto carbono	A	medio	media	Molde

De estas dos hornadas se obtuvieron palanquillas y posteriormente barras provenientes del departamento de laminación, las cuales fueron llevadas a análisis, los cuales serán explicados a continuación:

3.3.1 Índice de segregación central

Este análisis se emplea para evaluar la segregación central de las piezas coladas y de productos laminados, éste se realiza a muestras representativas a la forma de virutas extraídas desde la zona central y otras en la zona sub superficial de la sección colada. Las virutas³ obtenidas van luego a análisis elemental por carbono, mediante Leco CS-400. Para realizar este análisis se necesitan muestras de palanquillas o barras de al menos 500 mm de largo. Se realizó un corte en sentido longitudinal y se procedió a realizar perforaciones tal como se muestran en Figura 20 y Figura 21, el contenido de carbono de las perforaciones del centro es comparado con respecto a las perforaciones no centrales y así se cuantifica el aumento de carbono al centro del producto colado.

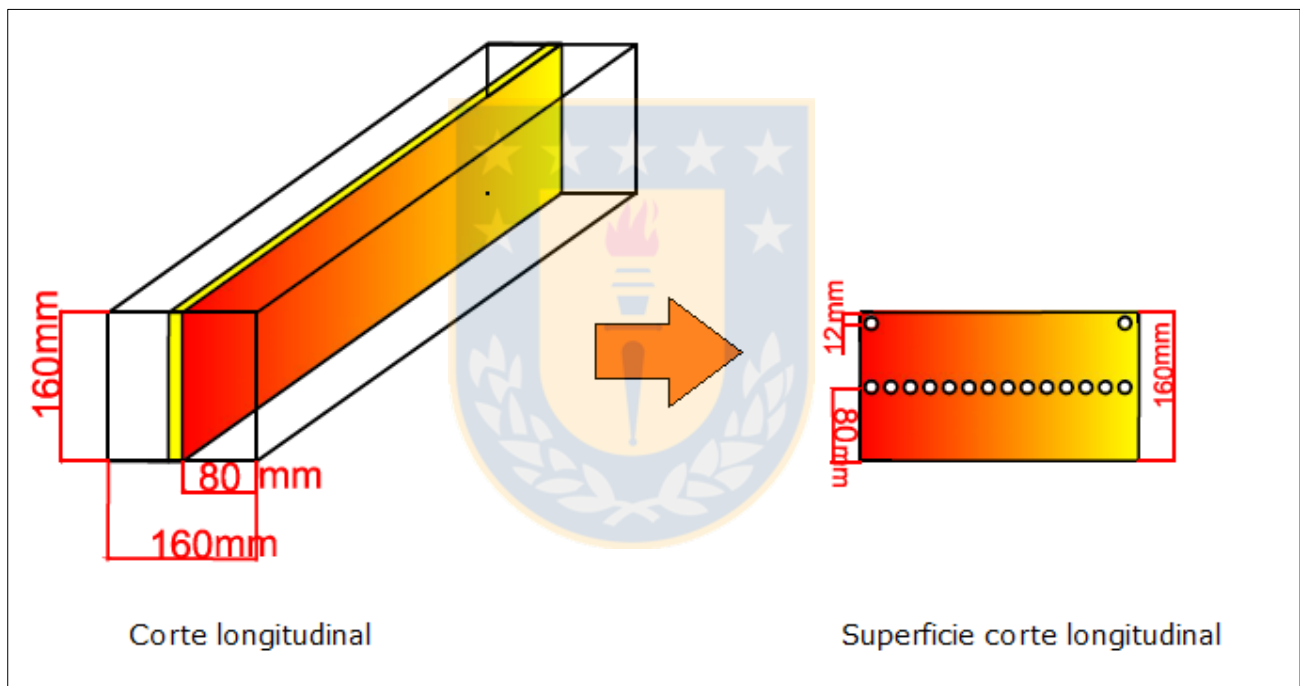


Figura 20. Esquema perforaciones para análisis de índice segregación central en palanquillas

³ Las virutas obtenidas para este análisis se obtuvieron mediante el uso de brocas de acero al tungsteno y 7 mm de diámetro.

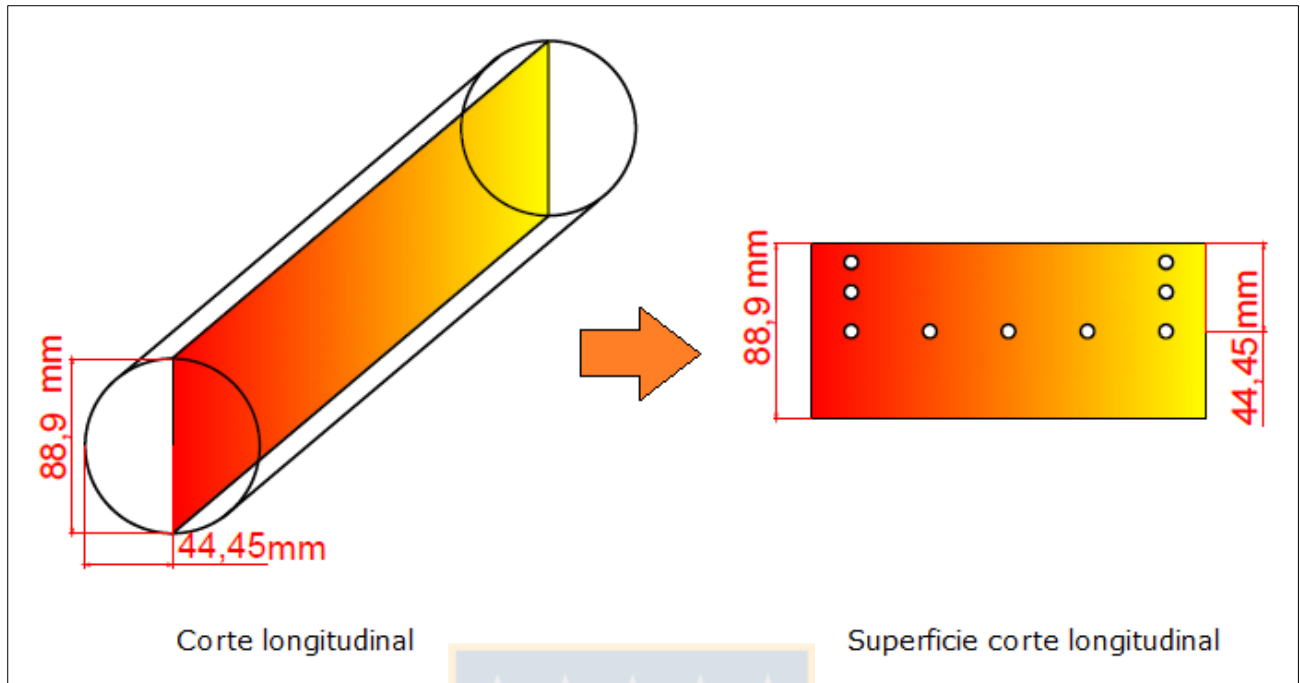


Figura 21. Esquema perforaciones para análisis de índice segregación central en barras laminadas

3.3.1.2 Muestras

Las 2 hornadas se procesaron mediante el empleo de 3 líneas durante el proceso de colada continua, tomándose así una muestra de 500mm de palanquilla proveniente de cada línea de colada para cada una de las 2 hornadas.

De igual forma se obtuvieron muestras de 500mm de barras laminadas de 88.9 mm de diámetro provenientes del departamento de laminación. Éstas corresponden a las palanquillas procesadas sin agitador de hebra y que fueron enviadas desde el departamento de acería y colada continua. Las muestras obtenidas se detallan en Tabla 7.

Tabla 7. Identificación de palanquillas para análisis de índice de segregación central

Hornada	Línea	Muestra	Hornada	Línea	Muestra
1	2	Palanquilla	1	2	Barra
1	4	Palanquilla	1	4	Barra
1	5	Palanquilla	1	5	Barra
2	2	Palanquilla	2	2	Barra
2	4	Palanquilla	2	4	Barra
2	5	Palanquilla	2	5	Barra

3.3.2 Método estándar de macro evaluación de palanquillas

Se realizó una evaluación macroscópica de las piezas coladas luego de aplicar un reactivo que revele las imperfecciones o estructuras presentes en la pieza de estudio. En el laboratorio de CAP Acero, se utiliza una solución acuosa de ácido clorhídrico. Este ensayo se realizó en base a la Norma ASTM-E381 [15]

El defecto de interés evaluado en las muestras es la segregación central, para la cual se distinguen 3 niveles de intensidad tal como se muestra en Figura 22.

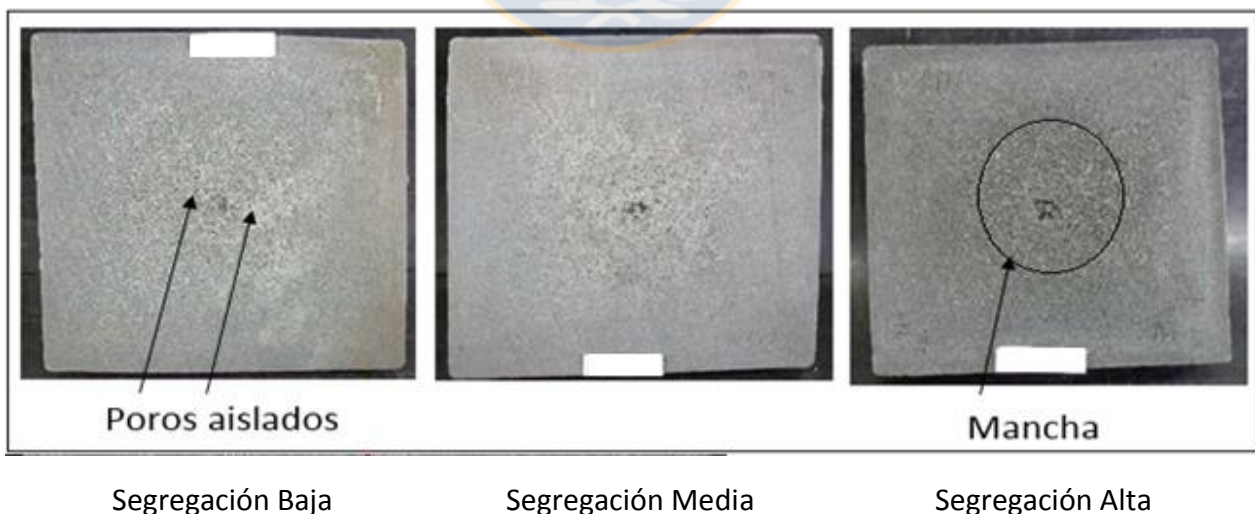


Figura 22. Patrón fotográfico de la norma ASTM-E381 para evaluar segregación central

Tabla 8. Calificación de segregación central bajo patrón de norma ASTM-E381

Segregación central	Característica	Calificación
Baja	2 o 3 poros aislados	X
Media	Mancha de 5 a 10 mm de diámetro	XX
Alta	Mancha de más de 10 mm de diámetro	XXX

3.3.2.1 Muestras

Las muestras analizadas correspondieron a cortes en sentido transversal, obtenidos de las palanquillas coladas sin agitador electromagnético de hebra. Se extrajo una muestra por línea de colada, de cada una de las 2 hornadas.

3.3.3 Análisis de composición central de barras laminadas

Con el objetivo de analizar la segregación central de todos los elementos que tienden a segregarse durante la solidificación, se realizó un análisis de composición central a las barras laminadas producidas a partir de las palanquillas que no presentaron agitación electromagnética de hebra durante la colada continua.

Para cumplir con este objetivo se utilizó un espectrómetro de emisión óptica modelo ARL 3460 (Figura 23).

3.3.3.1 Espectrómetro ARL 3460

La espectrometría de emisión óptica es una técnica que analiza las longitudes de onda de los fotones emitidos por los átomos o moléculas, durante su transición desde un estado excitado a un estado inferior de energía, esto se consigue con una chispa de alto voltaje entre el electrodo y la propia muestra. Cada elemento emite un conjunto característico de longitudes de onda discretas en función de su estructura electrónica. Mediante la observación de estas longitudes de onda puede determinarse la composición elemental de la muestra.

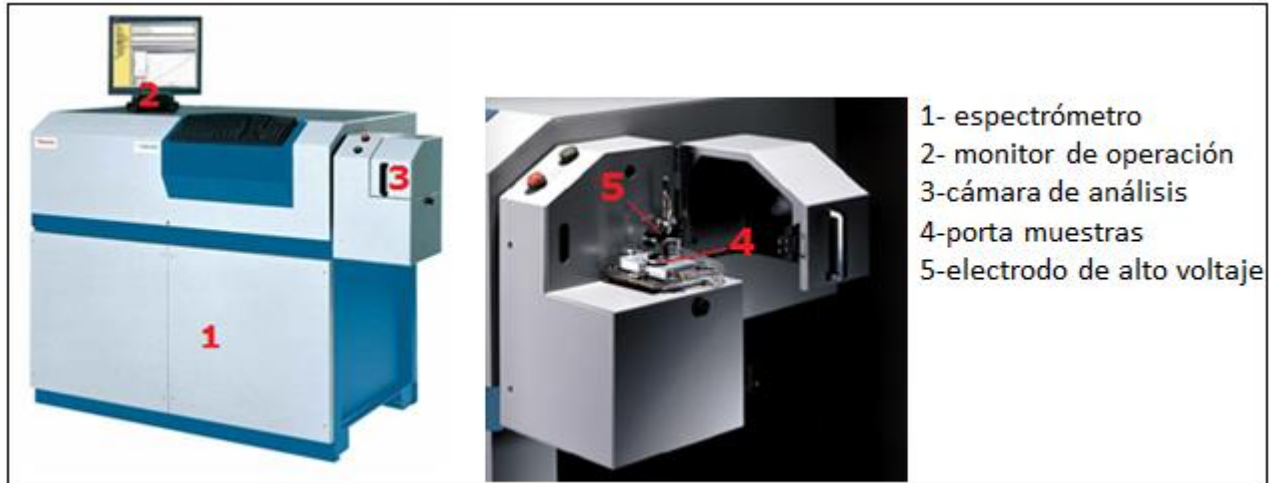


Figura 23. Espectrómetro de emisión óptica ARL 3460

3.3.3.2 Muestra

Se extrajeron muestras desde la zona central, tal como se muestra en Figura 26, provenientes de las barras obtenidas a partir de las palanquillas procesadas sin agitación electromagnética de hebra. Se analizaron un total de 6 barras haciendo una lectura central de composición a cada una.

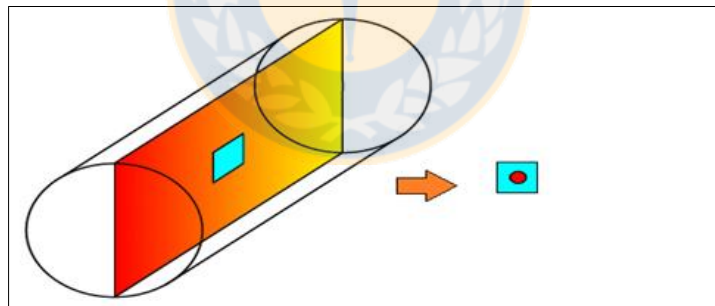


Figura 24. Esquema de extracción de muestra para espectrometría óptica

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Resultados de análisis para distintos tipos de acero

A continuación, se presentan los resultados de las macro impresiones con ácido clorhídrico y los resultados de las impresiones de Bauman, realizados para cada tipo de acero procesado en distintas condiciones operacionales de colada continua de palanquillas.

4.1.1 Aceros de bajo carbono

4.1.1.1 Macro impresiones con ácido clorhídrico

En Figura 25 se muestra los resultados para las muestras 1 y 2 de Tabla 4 correspondiente a aceros de bajo carbono con y sin agitación electromagnética de hebra.

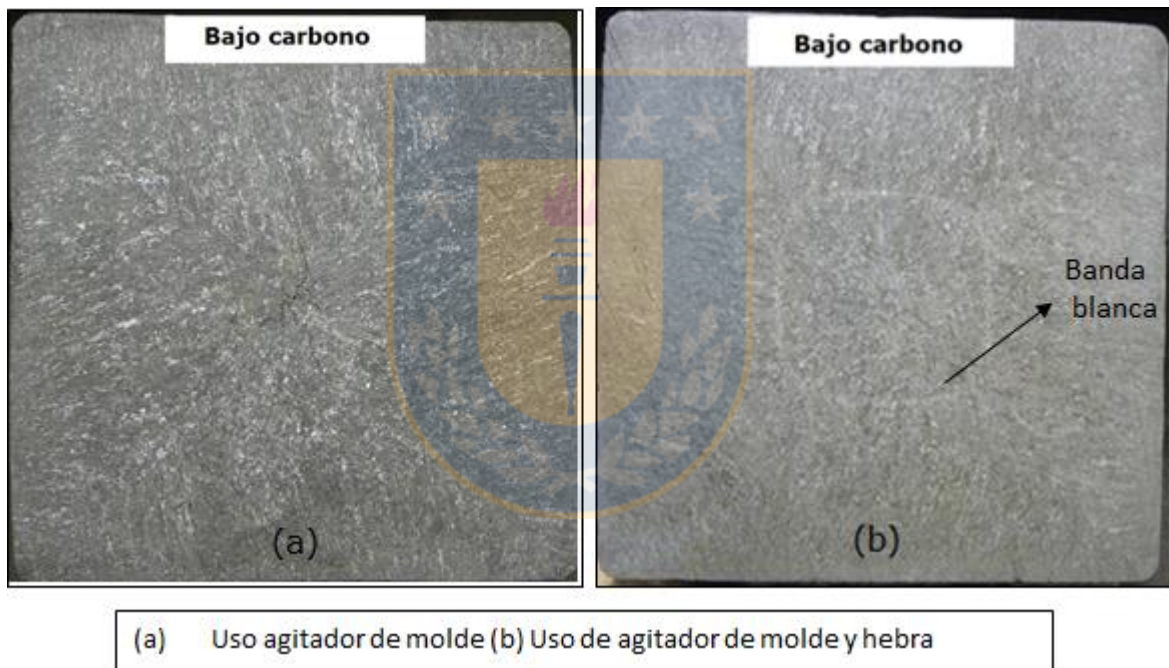


Figura 25. Macro impresiones en aceros bajo carbono

Las macro impresiones en las secciones transversales de palanquilla, muestran estructuras columnares que se extienden desde la sub superficie hasta el centro mismo de la sección colada, aun cuando se aplicó agitadores electromagnéticos de molde para ambas muestras. Se puede apreciar la presencia del fenómeno banda blanca, el que fue originado por la acción del agitador electromagnético de hebra durante la solidificación.

Dicha banda blanca tiene un diámetro promedio de 60 mm. Este antecedente permite calcular la constante de solidificación parcial k , la cual tiene un valor de $28,87 \text{ [mm min}^{-0.5}]$ para este tipo de acero mediante la expresión de Field. (Ejemplo de cálculo en Anexo B)

En Figura 26 se muestran los resultados de la muestra obtenida en sentido longitudinal, para la cual se extrajo una probeta de 50 mm de ancho y llevada a un acabado brillo espejo, la muestra corresponde a la 3 de Tabla 4:

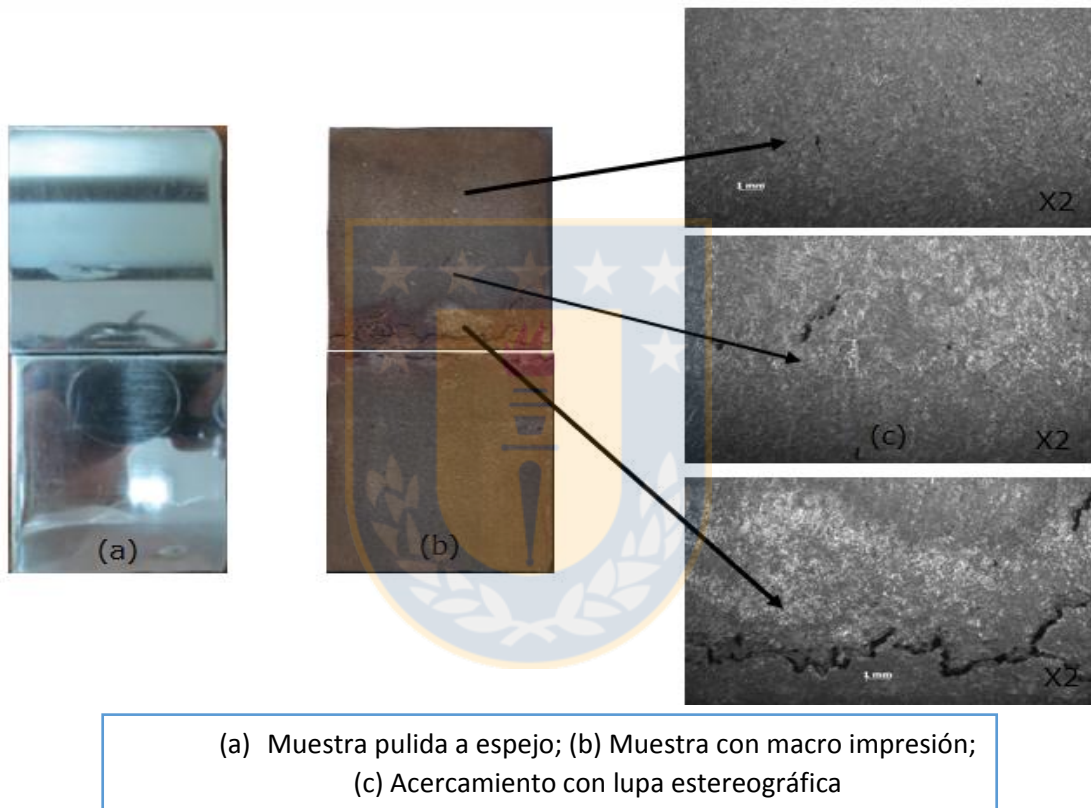


Figura 26. Macro impresiones con ácido clorhídrico en muestras longitudinales, aceros medio carbono

La macro impresión en la sección longitudinal de la palanquilla obtenida con agitación electromagnética de molde y de hebra, reveló la existencia de líneas longitudinales que demarcaban el fenómeno banda blanca, teniendo estas líneas una separación de 60 mm. El espesor de esta banda blanca es de 2 mm aproximadamente.

4.1.2 Aceros medio carbono

4.1.2.1 Macro impresiones con ácido clorhídrico

En la Figura 27 y Figura 28 se muestra los resultados correspondientes a las muestras 4, 5 y 6 de Tabla 4.

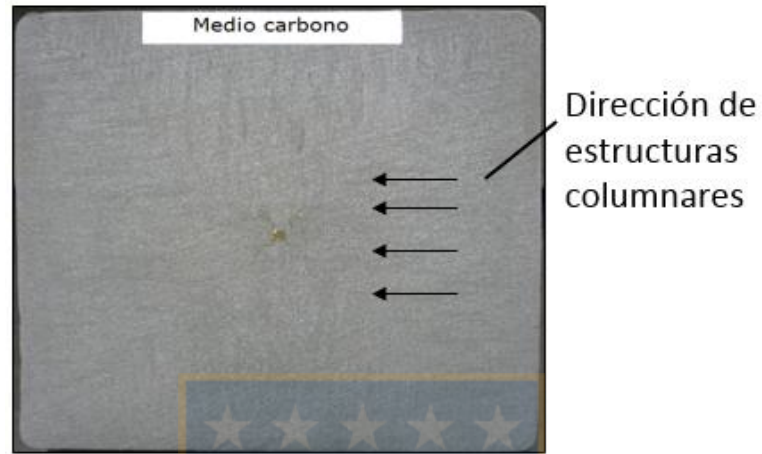


Figura 27 . Macro impresiones en acero Medio carbono sin agitación electromagnética

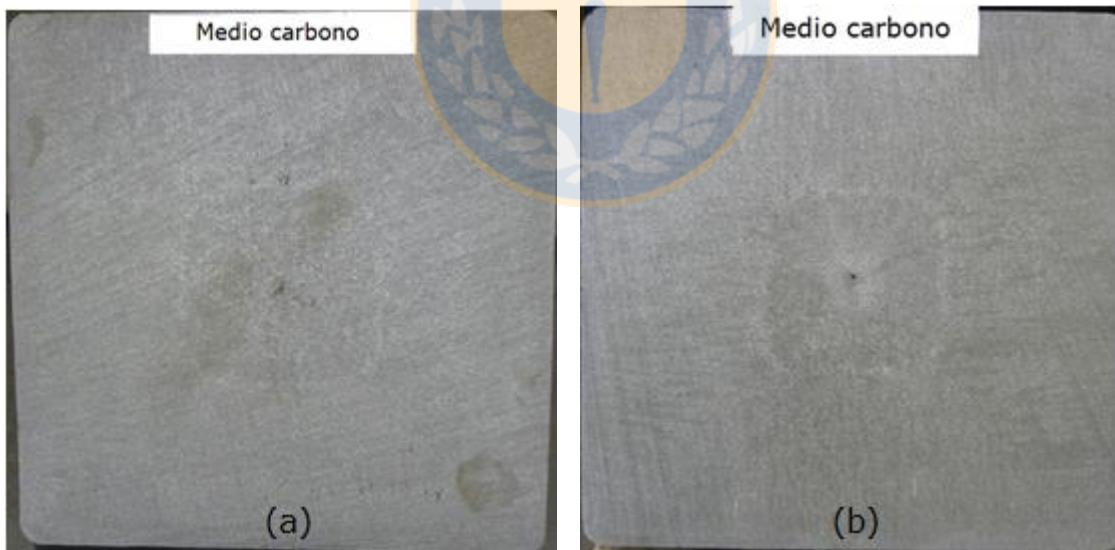
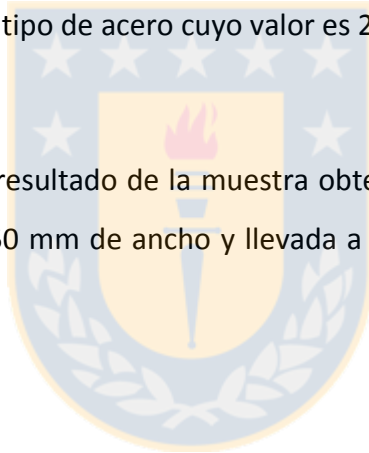
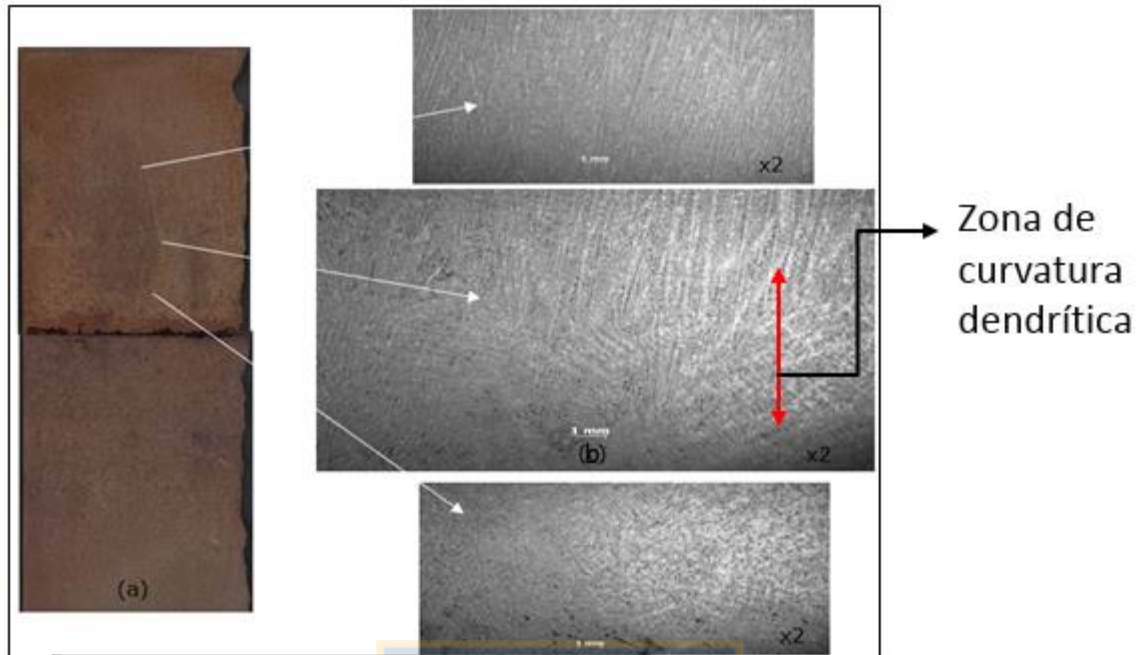


Figura 28. Macro impresiones en acero Medio carbono con agitación electromagnética de hebra, (a) muestra con velocidad de colada D y (b) muestra con velocidad de colada B.

Las macro impresiones en las secciones transversales de palanquilla que no presentaron ningún tipo de agitación durante el proceso de colada continua (Figura 27), muestran estructuras columnares que se extienden desde la sub superficie hasta el centro de la sección colada. Para las muestras que obtenidas con agitación electromagnética de hebra durante la colada continua (Figura 28) presentan el fenómeno banda blanca, con diámetros aproximados de 60 mm y 56 mm, respectivamente. Resulta evidente que el aumento de la velocidad de colada aumenta el diámetro promedio de la banda blanca. A partir de este diámetro en cada muestra, es posible calcular la constante de solidificación parcial k , la que resulta en $29.42 \text{ [mm min}^{-0.5}]$ y $29.44 \text{ [mm min}^{-0.5}]$ para muestra con alta y baja velocidad de colada, respectivamente. La constante de solidificación es característica de cada tipo de acero y teóricamente es invariante de la velocidad de colada, la similitud de las dos constantes calculadas es evidencia de ello. Se asume entonces una constante de solidificación promedio para este tipo de acero cuyo valor es $29.43 \text{ [mm min}^{-0.5}]$.

En figura 29 se muestra el resultado de la muestra obtenida en sentido longitudinal, para la cual, se extrajo una probeta de 50 mm de ancho y llevada a un acabado brillo espejo, la muestra corresponde a la 7 de Tabla 4.





(a) Muestra luego de macro impresión; (b) Acercamiento con lupa electrónica

Figura 29. Macro impresión en acero Medio carbono con agitación electromagnética de hebra

La macro impresión en la sección longitudinal de la palanquilla que presentaba agitación electromagnética de hebra (Figura 29 (b)), reveló la existencia de líneas longitudinales que demarcaban el fenómeno banda blanca, acompañado igualmente de una transición de estructuras columnares a una zona mixta de estructuras columnares y equiaxiales. Se destaca que esta zona de transición está caracterizada por una curvatura de las estructuras columnares producto de la agitación electromagnética.

4.1.2.2 Impresiones de Baumman

Se realizaron impresiones de Baumman en muestras que presentaron agitación electromagnética de hebra durante la colada continua, estas corresponden a las muestras 1 y 2 de Tabla 5:

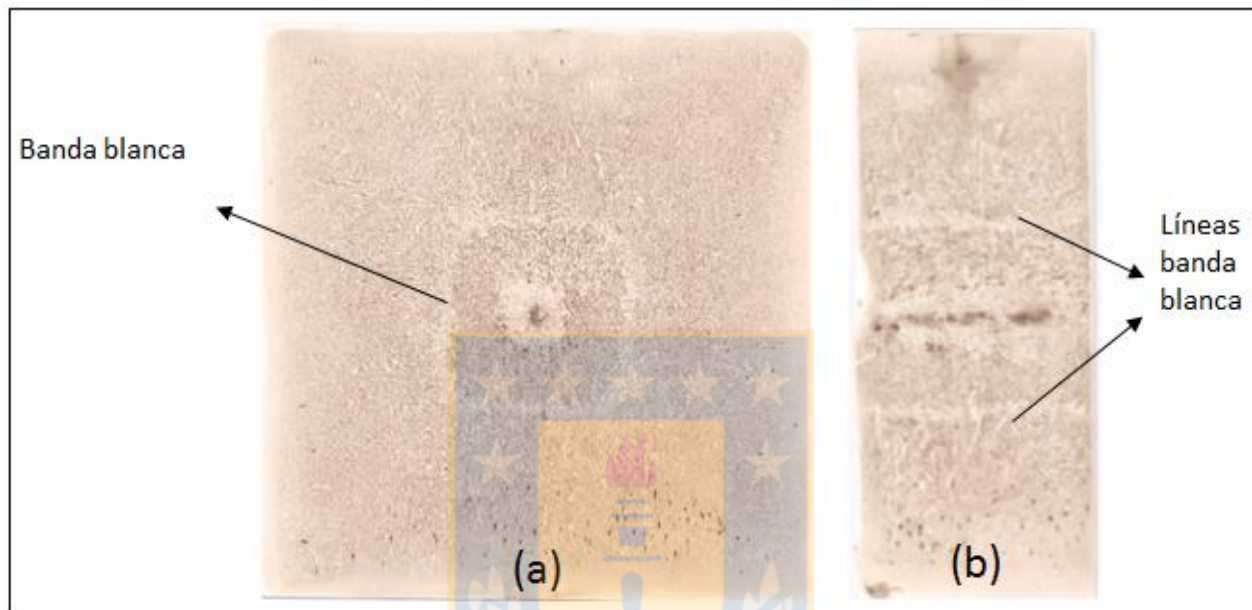


Figura 30. Impresiones de Baumman en aceros medio carbono con agitación electromagnética de hebra, (a) corte en sentido transversal y (b) corte en sentido longitudinal.

Los resultados de las impresiones de Baumman mostraron un realce del fenómeno banda blanca observado anteriormente en las macro impresiones con ácido clorhídrico, de igual manera, en Figura 30 se muestran con claridad las estructuras columnares que se desplazan desde la sub-superficie de la pieza hasta el límite que demarca la banda blanca, formándose luego una zona central con estructuras equiaxiales y columnares. Es importante destacar que las impresiones de Baumman tienen la capacidad de realzar las macro estructuras presentes en el producto colado y además muestran con mayor claridad el fenómeno de banda blanca.

4.1.3 Aceros altos carbono

4.1.3.1 Macro impresiones con ácido clorhídrico

Los resultados de las macro impresiones con ácido clorhídrico para las muestras 8, 9 y 10 de Tabla 4 se muestran en la Figura 31 y Figura 32:



Figura 31. Macro impresiones con ácido clorhídrico en secciones transversales de acero alto carbono procesado a velocidad de colada estándar con presencia de grieta central.

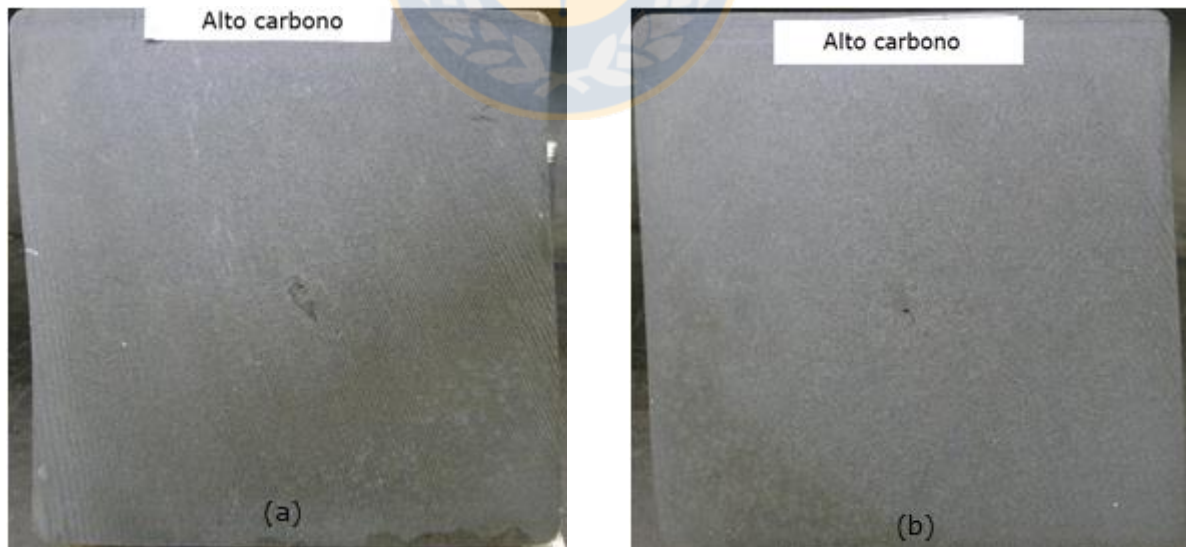


Figura 32. Macro impresiones con ácido clorhídrico en secciones transversales de acero alto carbono procesado a elevadas velocidades de colada continua, (a) muestra con velocidad de colada C y sobrecalentamiento medio y (b) muestra con velocidad de colada C y alto sobrecalentamiento.

De los análisis realizados, en ningún caso se visualizó la aparición del fenómeno banda blanca aun después de utilizar grandes velocidades de colada, en combinación con alto sobrecalentamiento y baja intensidad en el sistema de enfriamiento secundario.

La muestra 8 (Figura 31) representa la condición normal bajo la cual se procesan los aceros alto carbono dentro de CAP Acero S.A, dadas estas condiciones, las palanquillas nunca han presentado el fenómeno de banda blanca asociado al uso de agitadores de hebra, este hecho es evidencia de la condición a la cual se encontraba el centro de la palanquilla al momento de pasar por la agitación electromagnética, la que en este caso es una solidificación ya avanzada, de tal forma que el torque producido por el campo magnético, no es el suficiente para agitar la fracción líquida-pastosa aún remanente dentro de la palanquilla, debido a que la viscosidad es muy alta.

La muestra 10 (Figura 32) reúne las condiciones operacionales para favorecer la existencia de un centro líquido al momento de ser agitado por el campo magnético, sin embargo, las macro impresiones con ácido clorhídrico no revelan la presencia del fenómeno banda blanca para esta muestra, lo que evidencia que estas condiciones no son suficientes para alcanzar el pozo líquido óptimo de 50 mm recomendado.

Las muestras anteriores presentan una estructura equiaxial al centro de la palanquilla, aun cuando se procesaron con altos sobre calentamientos durante la colada continua.

A continuación en Figura 33 se muestra los resultados para las muestras 11 y 12 de la Tabla 4:

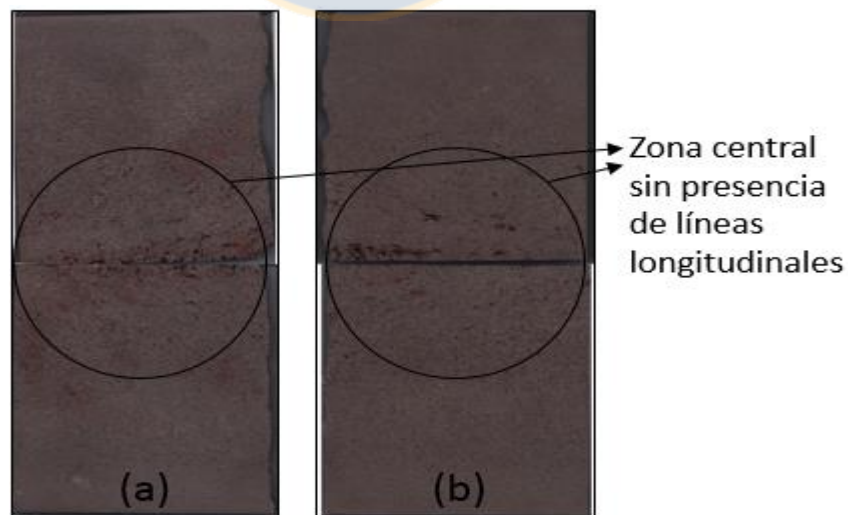


Figura 33. Macro impresiones con ácido clorhídrico en secciones longitudinales de aceros alto carbono procesado a elevadas velocidades de colada continua, (a) muestra acero colado con sobrecalentamiento medio y (b) muestra con sobrecalentamiento alto.

La macro impresión en la sección longitudinal de la palanquilla de aceros alto carbono colados a grandes velocidades mostrados en Figura 33, no mostraron líneas longitudinales asociadas a la agitación electromagnética de hebra como las observadas para muestras de acero de bajo y medio carbono.

4.1.3.2 Impresiones de Baumman

Se muestra los resultados para las muestras 3, 4 y 5 de Tabla 5 en Figura 34 y Figura 35.

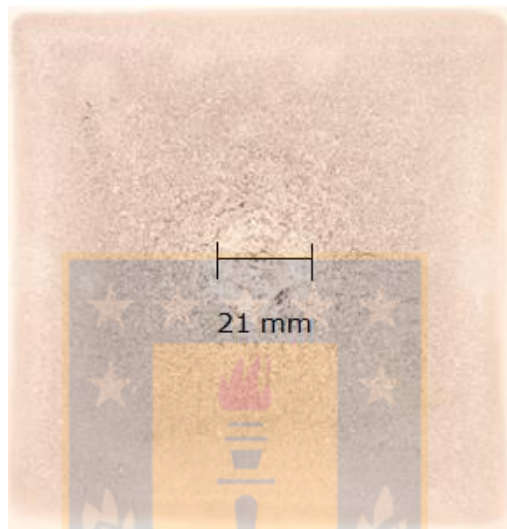


Figura 34. Impresiones de Baumman en secciones transversales de acero alto carbono procesado a velocidad de colada normal.



Figura 35. Impresiones de Baumman en secciones transversales de acero alto carbono procesado a elevadas velocidades de colada continua.

Las impresiones de Baumman, al igual que las macro impresiones con ácido clorhídrico, no presentaron el fenómeno banda blanca, aun cuando se tuvieron condiciones operacionales que favorecían su aparición.

Las impresiones de Baumman, a diferencia de las macro impresiones con ácido clorhídrico, revelaron la presencia de tenues bandeados sub superficiales observados en Figura 36 ,estos corresponden a la acción del agitador situado en el molde, este bandeo delimita el espesor de la piel solidificada generado desde el sistema de enfriamiento primario.

Para todas las muestras no hay presencia de estructuras columnares aun para altos sobre calentamientos.

Se muestra los resultados para las muestras 6 y 7 de Tabla 5:

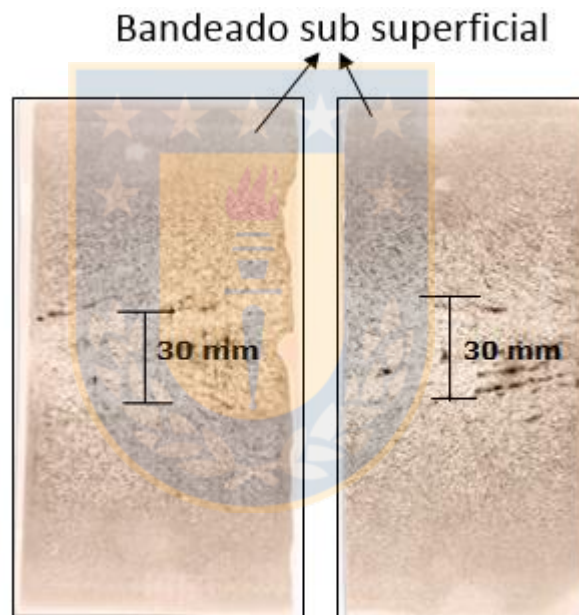


Figura 36. Impresiones de Baumman en secciones longitudinales de acero alto carbono procesado a elevadas velocidades de colada continua.

Las impresiones de Baumman en la sección longitudinal de la palanquilla para aceros alto carbono colado a grandes velocidades, no mostraron líneas longitudinales asociadas a la agitación electromagnética de hebra, las cuales fueron observadas en las impresiones de Baumman de aceros medio carbono.

Para efectos prácticos se consideraron los pozos de las impresiones de Baumman de Figura 35 y Figura 37 para calcular constantes de solidificación, esto debido a que ambos poseen condiciones operacionales similares a excepción de la velocidad de colada. Los cálculos dieron como resultados

constantes de solidificación de 37,41 [mm min^{-0.5}] y 37,53 [mm min^{-0.5}], respectivamente. Se asume una constante de solidificación promedio de 37,47 [mm min^{-0.5}] para los aceros alto carbono.

4.2 Perfil de concentración de piezas coladas

Los resultados de esta sección fueron normalizados mediante el uso del índice de segregación.

El índice de segregación se define como el cociente entre la composición de la medición efectuada C_i y la composición nominal del acero al momento de ser colado C_0 .

$$i_s = \frac{C_i}{C_0}$$

Cuando $i_s < 1$, hay segregación negativa y significa que el punto se encuentra empobrecido de soluto.

Cuando $i_s > 1$, hay segregación positiva y significa que el punto medido se encuentra enriquecido de soluto.

4.2.1 Acero medio carbono con y sin agitación electromagnética de hebra

En Figura 37 y Figura 38 se presentan los resultados de los análisis de composición efectuados en la sección colada según esquema de Figura 18 (de página 33)

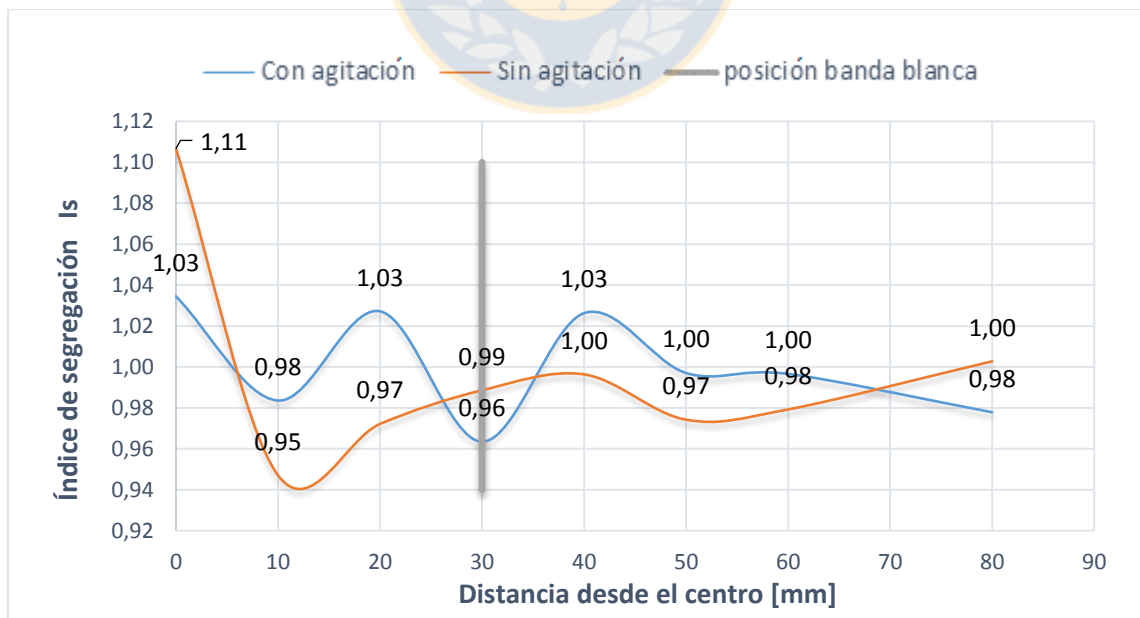


Figura 37. Perfil de concentración de carbono en secciones transversales de acero medio carbono

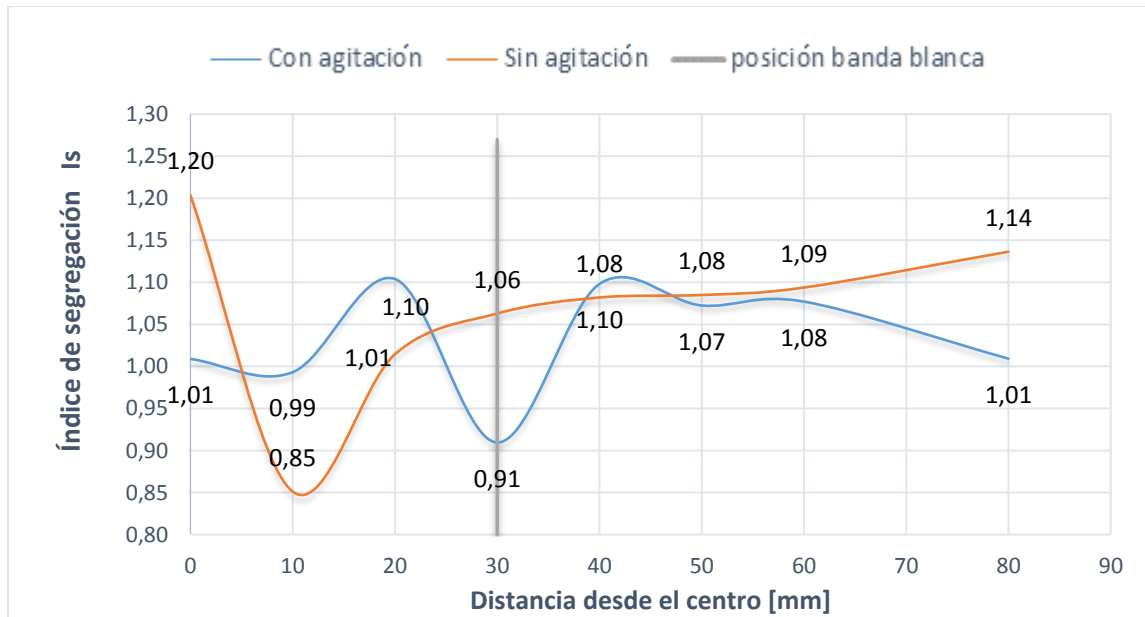


Figura 38. Perfil de concentración de azufre en secciones transversales de acero alto carbono

Los datos utilizados para la elaboración de Figura 37 y Figura 38 se encuentran en anexo C adjunto.

El perfil de composición en la sección transversal de palanquillas de acero medio carbono, reveló la naturaleza del defecto banda blanca, el cual corresponde a una zona donde se interrumpe el fenómeno natural de segregación, generándose así, una zona de empobrecimiento de soluto.

La disminución del índice de segregación de esta zona con respecto a los puntos contiguos, es de 7 puntos para carbono y 19 puntos para azufre, este empobrecimiento es generado probablemente por el lavado interdendrítico y causado por la acción del agitador electromagnético de hebra durante el proceso de colada continua.

Esta zona de empobrecimientos de solutos debiese existir, siempre y cuando se utilice la agitación electromagnética de hebra y exista la suficiente cantidad de acero en estado líquido dentro de la sección colada para producir el efecto de lavado interdendrítico.

4.4.2 Acero alto carbono con agitación electromagnética de molde y de hebra

Se presentan los perfiles de composición para carbono y azufre, realizado según esquema de Figura 19 (en página 34).

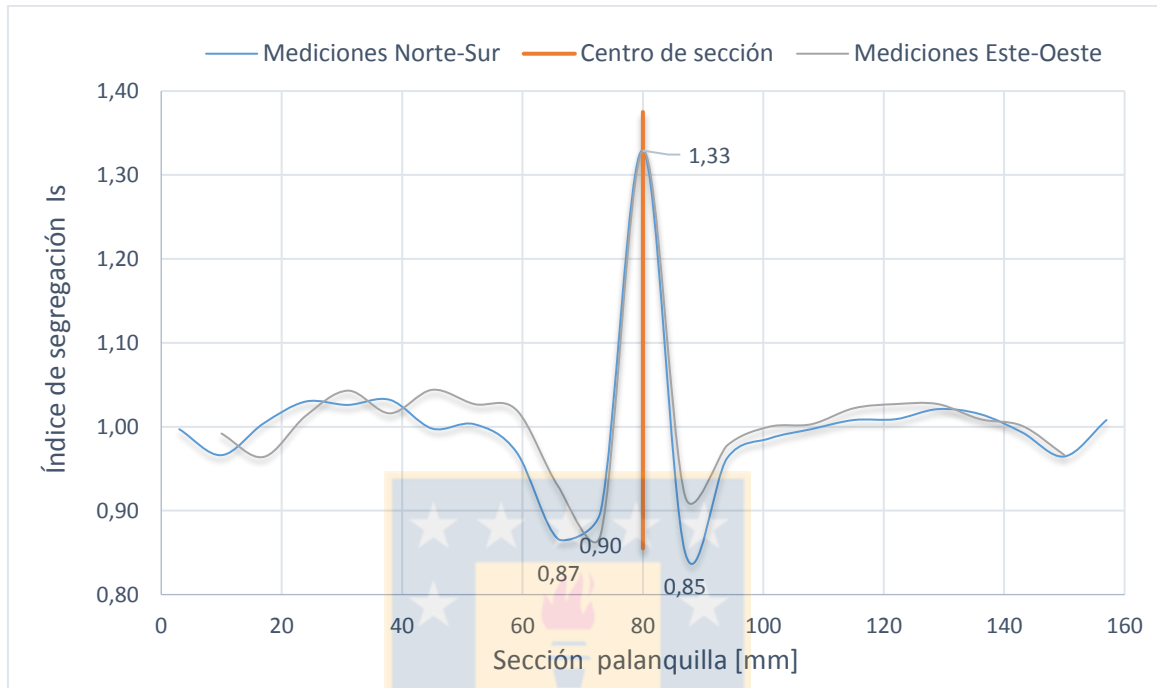


Figura 39. Perfil de concentración de carbono para sección transversal de acero alto carbono

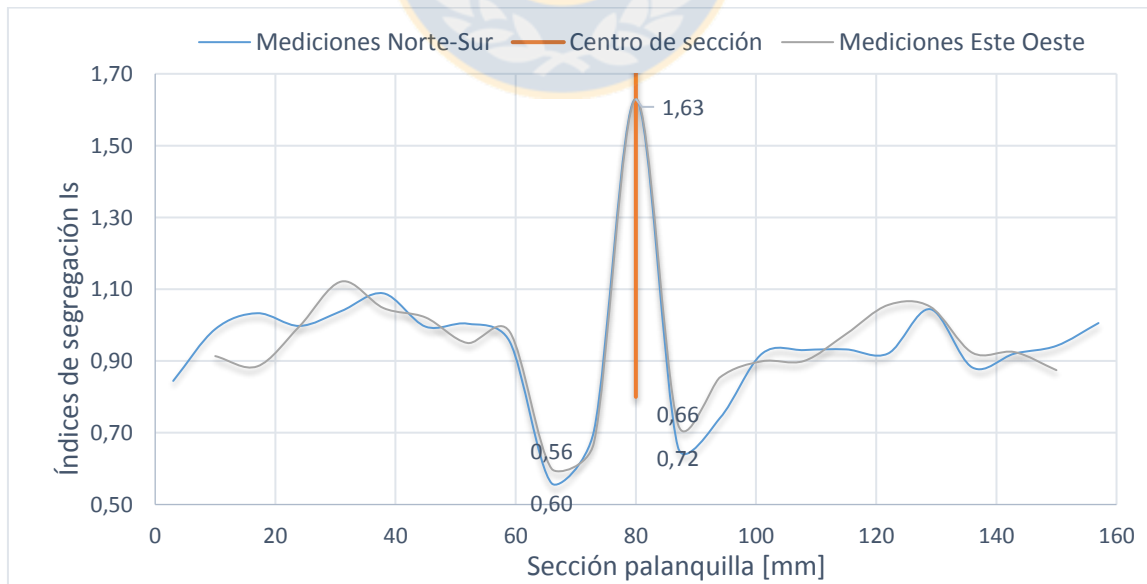


Figura 40. Perfil de concentración de azufre para sección transversal de acero alto carbono

Los datos utilizados para la elaboración de Figura 39 y Figura 40 se encuentran en anexo D adjunto.

Este análisis se realizó con el objetivo de encontrar las zonas de máximo empobrecimiento de soluto, atribuibles al efecto generado por el agitador electromagnético de hebra. Los análisis de carbono muestran una distancia aproximada de 17.5 mm mientras que el análisis de azufre muestra una distancia aproximada de 21 mm, entre los puntos de mínimo índice de segregación. De esta forma es posible tener un estimativo del pozo líquido aún remanente en la palanquilla al momento de someterse al campo electromagnético.

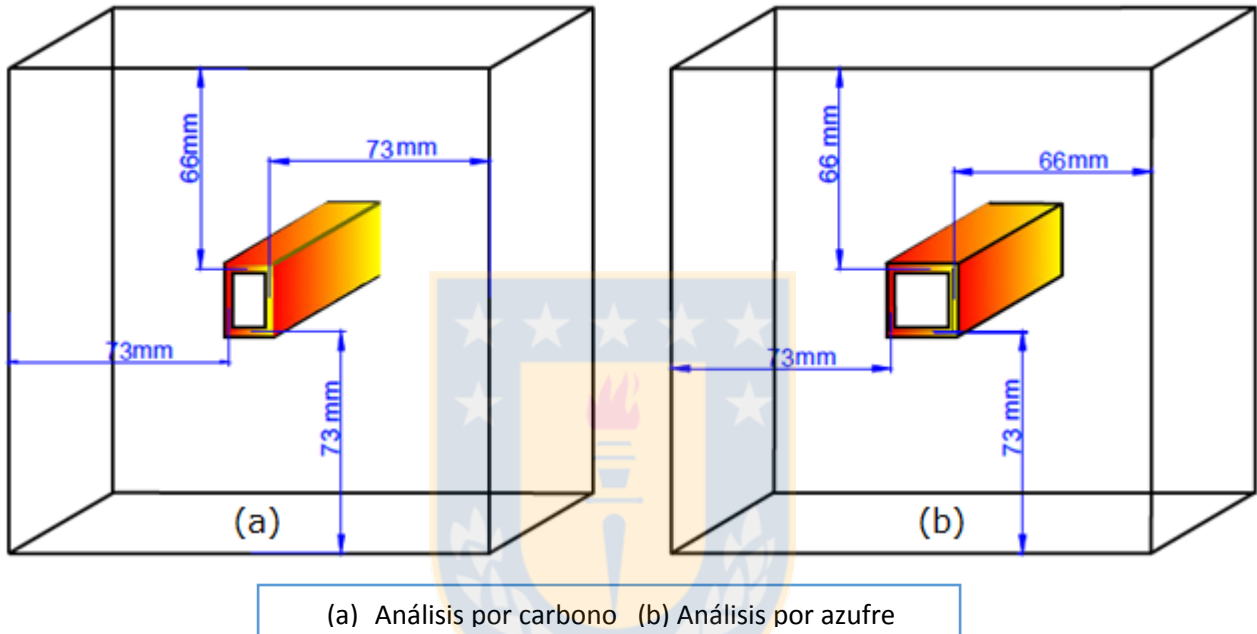


Figura 41. Esquema de pozos líquidos estimados por perfil de composición en secciones transversales de acero alto carbono.

El perfil de composición de azufre dio resultados similares al obtenido mediante las impresiones de Bauman realizados en acero alto carbono colado bajo velocidades de colada normales (Figura 35), en ambos casos, el pozo estimado es de 21 mm, lo cual es una condición lejana de la ideal recomendada.

Con respecto a la velocidad de solidificación para aceros de distintas composiciones, S.N Singh y K.E Blazek ^[16] realizaron estudios sobre la temperatura que registraron termocuplas instaladas en moldes de cobre del sistema de enfriamiento primario de un proceso de colada continua a medida que se procesaban aceros de diferentes contenidos de carbono. Los resultados obtenidos indican que existe una gran oscilación en la medición de temperatura del molde para aceros de bajo carbono mientras que para aceros de alto carbono la oscilación de la medición de temperatura se estabiliza tal como se muestra en Figura 42 y Figura 43.

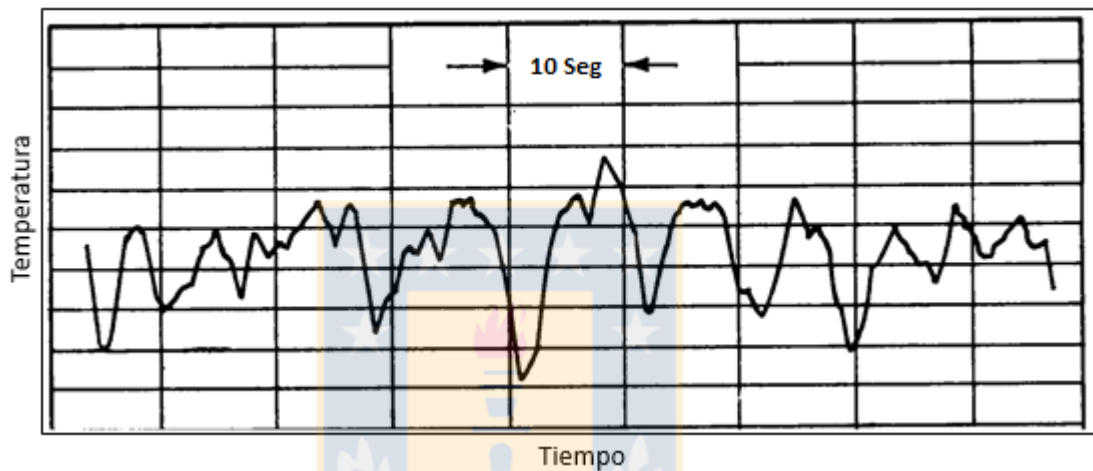


Figura 42. Medición de temperatura en zona central de molde para colada de acero 0.25% carbono (bajo carbono). ^[16]

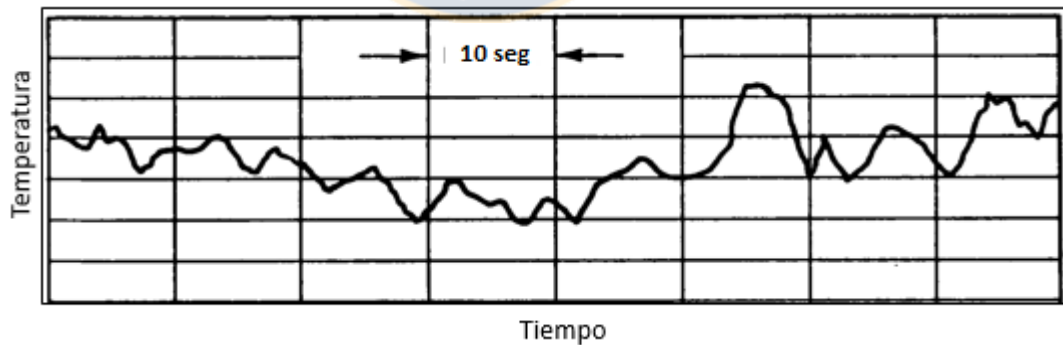


Figura 43. Medición de temperatura en zona central de molde para colada de acero 0.7% carbono (alto carbono). ^[16]

La rápida oscilación de la temperatura se debe a la falta de contacto entre el acero solidificado y las paredes del molde. Los resultados indican que a medida que aumenta el contenido de carbono del acero colado el contacto entre molde y acero solidificado se vuelve más constante por lo tanto aumenta la extracción de calor.

Del mismo estudio se produjeron Breakouts⁴ controlados durante la colada de aceros de distinto contenido de carbono para evaluar el aspecto de la piel interna solidificada de las palanquillas, tal como se muestra en Figura 44.

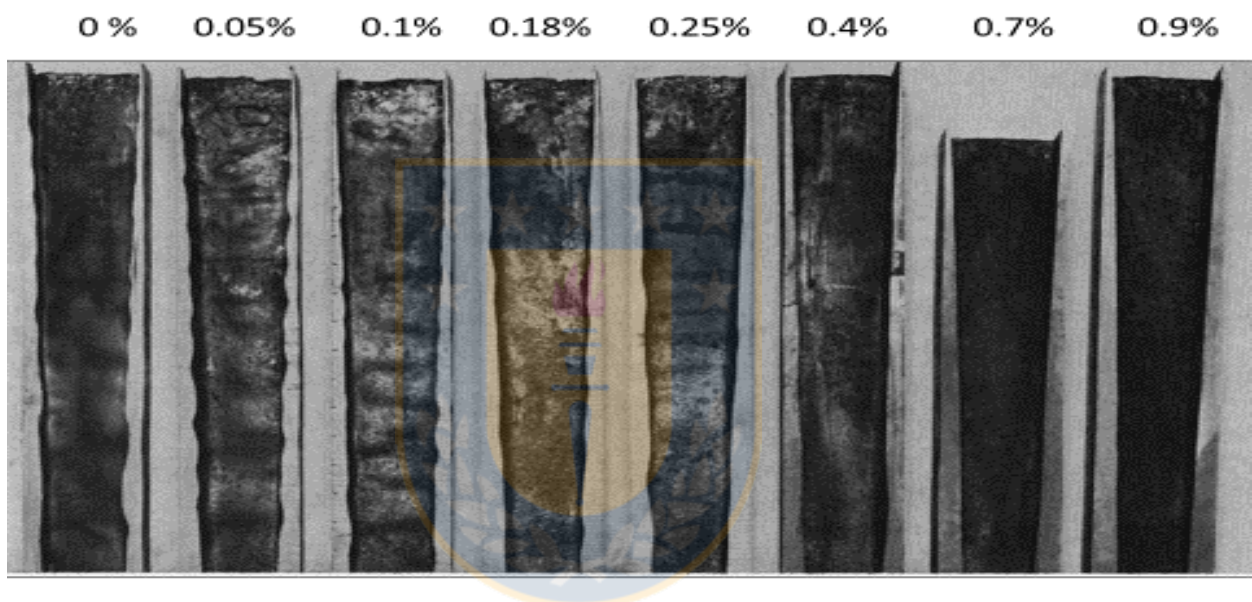


Figura 44. Vista interna de breakouts en palanquillas para diferentes contenidos de carbono.
[16]

Los breakouts revelan la existencia de ondulaciones de la piel interna solidificada para aceros de menor contenido de carbono, la presencia de estas ondulaciones disminuye a medida que se incrementa el contenido de carbono. Respecto al espesor de la piel solidificada para diferentes composiciones se puede apreciar que este se vuelve mayor y más uniforme con el incremento del contenido de carbono, tal como se muestra en Figura 45 donde se aprecia las mediciones de espesor de la piel interna de las palanquillas a medida que tuvo avance por el molde para composiciones de 0.05% y 0.9% de carbono.

⁴ Breakout: Rompimiento de la piel solidificada en la palanquilla lo que conlleva un escape del acero líquido aun remanente en el centro de esta.

Para el crecimiento de la piel solidificada del acero 0.9% carbono, este presenta una relación parabólica con respecto a la distancia recorrida bajo el menisco de acero líquido.

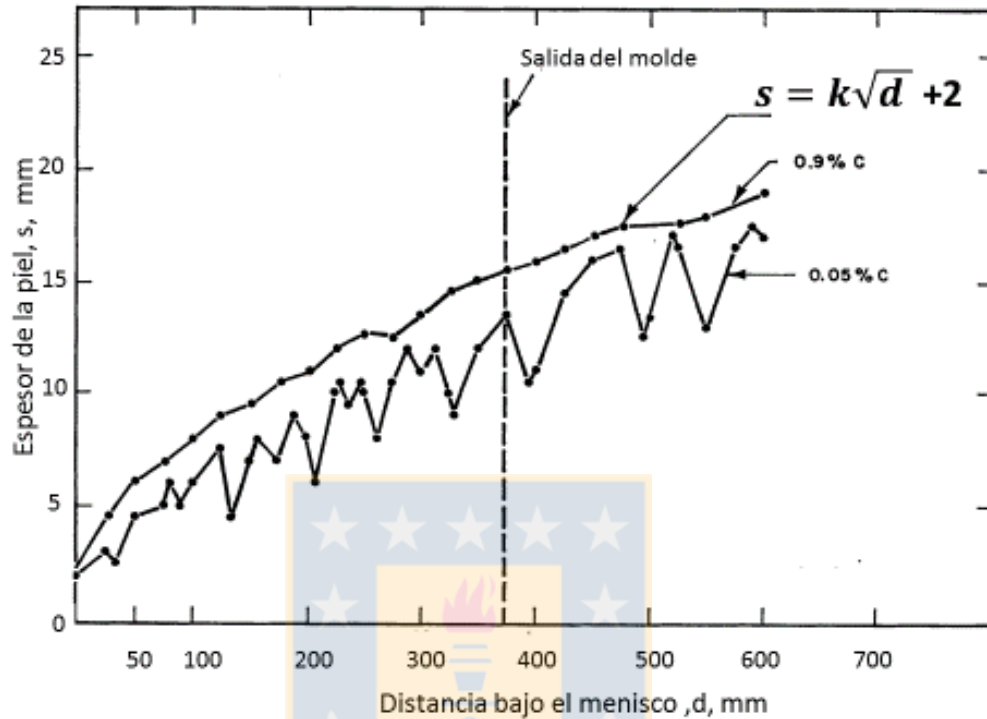


Figura 45. Mediciones de espesor de piel interna a partir de breakouts para palanquilla para aceros de composición 0.05% y 0.9% de carbono. ^[16]

La oscilación en el espesor interno de la piel solidificada está directamente relacionado con la forma en que se extrajo calor durante la solidificación del molde, la falta de contacto entre la pared del molde y el acero solidificado disminuirá la extracción de calor generando así zonas donde la solidificación tuvo discontinuidad. La presencia de la oscilación en el espesor de la piel solidificada para aceros de bajo y medio carbono está relacionado con la transformación de fase que tuvo lugar durante la solidificación de ambos tipos de acero. De acuerdo al fragmento del diagrama de fases Hierro Carbono de Figura 46, tanto los aceros de bajo carbono como los de medio carbono están

sujetos a la transformación alotrópica de $\text{Fe}-\delta^5$ a $\text{Fe}-\gamma^6$, esta transformación conlleva una contracción a medida que solidifica el acero.

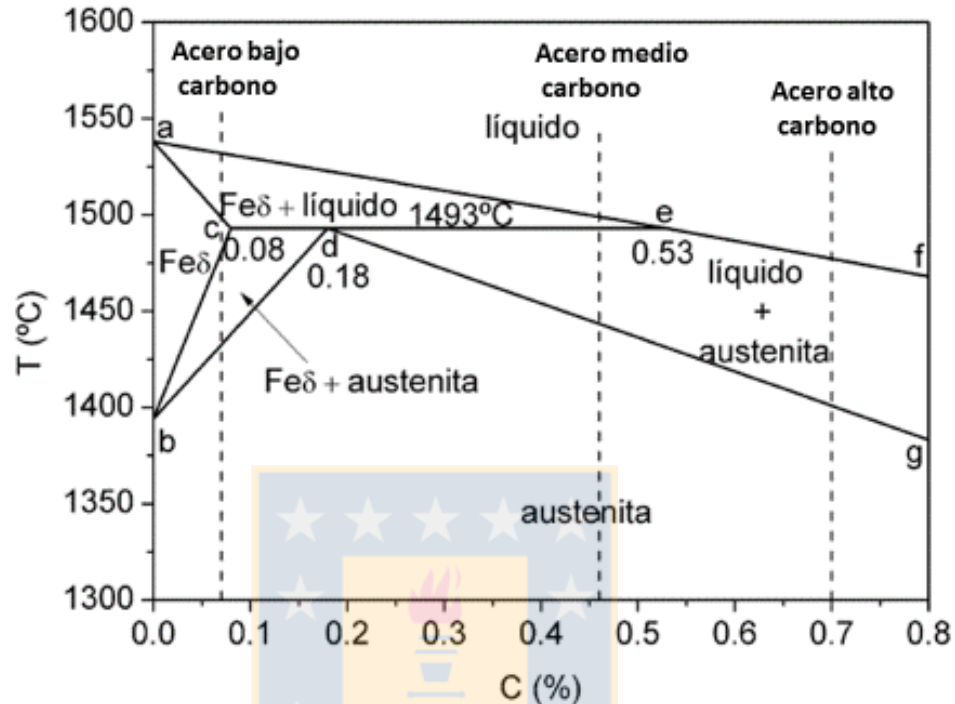


Figura 46. Fragmento de diagrama binario Hierro-Carbono [4].

Esta transformación alotrópica acompañado de la contracción disminuirá el contacto entre el acero solidificado y las paredes del molde interrumpiendo así el fenómeno de transferencia de calor durante el sistema de enfriamiento primario. Por esta razón la interfase sólido-líquido de las palanquillas tiene un menor avance para aceros de bajo y medio carbono con respecto al alto carbono durante el sistema de enfriamiento primario.

⁵ $\text{Fe}-\delta$ Forma alotrópica del hierro, el cual presenta una estructura BCC con un factor de empaquetamiento de 0.68.

⁶ $\text{Fe}-\gamma$: Forma alotrópica del hierro, el cual presenta una estructura FCC con factor de empaquetamiento de 0.74.

4.3 Efecto de eliminación de agitadores electromagnéticos de hebra durante la colada continua de aceros alto carbono

4.3.1 Índice de segregación central para palanquillas y barras

A continuación en Tabla 9 se presentan los resultados de índices de segregación central calculados para palanquillas y barras procesadas sin agitador electromagnético de hebra durante la colada continua.

El detalle de procedimiento para cálculo de índice de segregación central se encuentra en anexo E adjunto.

Tabla 9. Índices de segregación central para palanquillas y barras procesadas sin agitación electromagnética de hebra durante la colada continua.

Hornada	Línea	Muestra	Is	σ^7	Hornada	Línea	Muestra	Is	σ
1	2	Palanquilla	1.04	0.073	1	2	Barra	1.05	0.043
1	4	Palanquilla	0.99	0.032	1	4	Barra	0.95	0.0185
1	5	Palanquilla	0.97	0.039	1	5	Barra	1.06	0.034
		Promedio	1.00	0.048			Promedio	1.02	0.032
2	2	Palanquilla	1.01	0.067	2	2	Barra	1.04	0.018
2	4	Palanquilla	0.96	0.028	2	4	Barra	1.12	0.036
2	5	Palanquilla	0.97	0.026	2	5	Barra	1.09	0.062
		Promedio	0.98	0.0121			Promedio	1.08	0.039

Se presentan en Tabla 10 los índices de segregación para palanquillas de acero alto carbono, procesados bajo el uso de agitadores electromagnéticos de molde y de hebra recopilados de información histórica de CAP Acero S.A, además estas presentaron condiciones operacionales de colada continua casi idénticas a las dos hornadas en estudio.

⁷ σ : Desviación estándar: Es una medida del grado de dispersión de los datos con respecto al valor promedio.

Tabla 10. Índice de segregación central para palanquillas de CAP Acero S.A de alto carbono con agitación electromagnética de hebra.

Hornada	Vc	SH	Intensidad	Is
1°	A	Medio	Baja	1.00
2°	A	Medio	Baja	1.04
3°	A	Medio	Baja	0.99
4°	A	Medio	Baja	1.02
5°	A	Medio	Baja	1.00
Promedio				1.01

Considerando que el índice de segregación promedio para la primera hornada en estudio es de 1.00, mientras que para la segunda es de 0.98. Al comparar ambos resultados con los índices de segregación históricos de CAP Acero S.A se apreció que no hubo una severa segregación de carbono al centro de la palanquilla como consecuencia de la falta de agitación electromagnética de hebra durante la colada.

A continuación en Tabla 11 se adjuntan índices de segregación históricos de CAP Acero S.A para barras de acero alto carbono procesados bajo el uso de agitadores electromagnéticos de molde y de hebra procesado en condiciones operacionales similares a las dos hornadas en estudio.

Tabla 11. Índice de segregación de barras alto carbono CAP

Hornada	Vc	SH	Intensidad	IS	Hornada	Vc	SH	Is
1	A	Medio	Media	1.01	6	A	Medio	1.01
2	A	Medio	Media	0.94	7	A	Medio	1.03
3	A	Medio	Media	1.00	8	A	Medio	1.04
4	A	Medio	Media	1.01	9	A	Medio	0.99
5	A	Medio	Media	1.13	10	A	Medio	1.01

Promedio total	1.02
----------------	------

El índice de segregación promedio para las barras provenientes de la primera hornada sin agitación electromagnética es de 1.02, mientras que el índice de segregación para las barras provenientes de la segunda hornada fue de 1.08. Al comparar ambos resultados con el índice de segregación histórico se apreció que las barras provenientes de la primera hornada no presentaron

una severa formación de segregación central sin embargo el Índice de segregación central de las barras de la segunda hornada es elevado, pero no es coherente con el índice de segregación obtenido para las palanquillas de la misma hornada, por lo que es posible que exista error experimental.

4.3.2 Método estándar de macro evaluación de palanquillas

En Tabla 12 se presentan las evaluaciones macroscópicas de palanquillas en estudio bajo la norma ASTM-E381.

Las imágenes de las macro impresiones se encuentran en anexo F adjunto.

Tabla 12. Resultados de evaluación macroscópica de palanquillas coladas sin agitador de hebra bajo norma ASTM-E381

Hornada	Línea	Segregación central	Hornada	Línea	Segregación central
1	2	X	2	2	X
1	4	X	2	4	XX
1	5	X	2	5	X
	Promedio	1		Promedio	1.33

A modo de comparación, se realizó la compilación de evaluaciones macroscópicas realizadas en palanquillas de acero alto carbono durante el periodo de enero a agosto del año 2017, reuniendo así un total de 563 hornadas evaluados bajo la norma ASTM-E381. Cabe destacar que estas hornadas presentaban condiciones de colada similares a las 2 hornadas en estudio.

Al ser el sobrecalentamiento uno de los factores más determinantes en la formación de segregación, se agruparon las evaluaciones por el nivel de sobrecalentamiento que presentaron durante la colada continua, tal como se muestra en Figura 48:

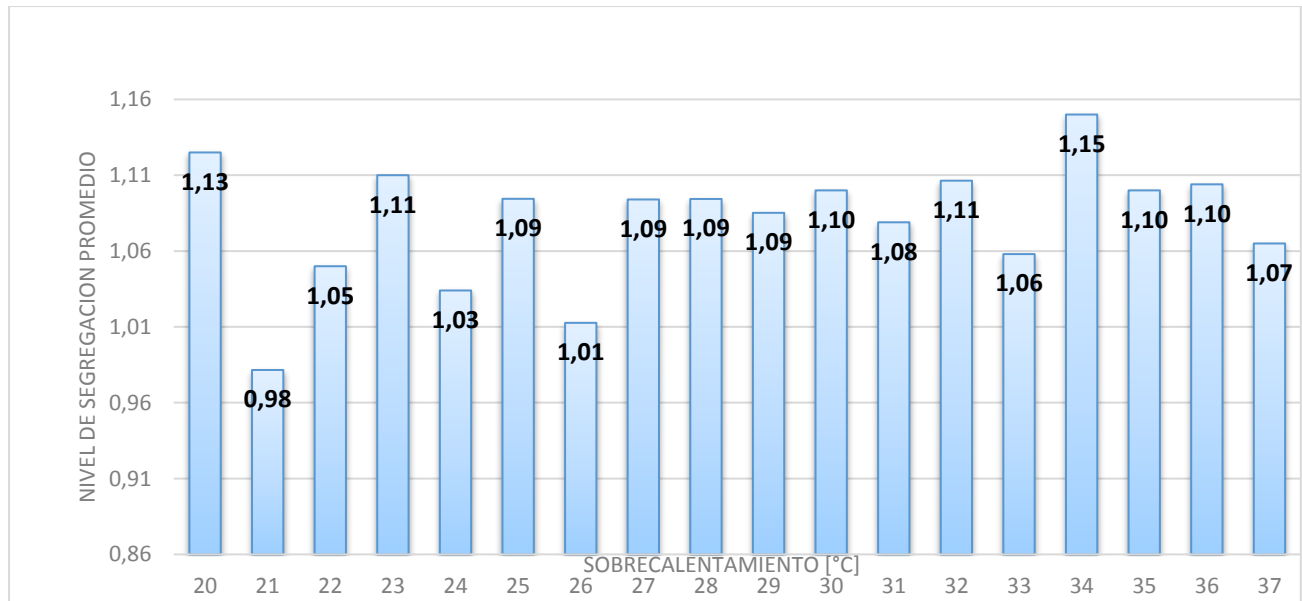


Figura 47. Evaluación de segregación central para palanquillas de aceros alto carbono durante enero y agosto del 2017 agrupado por sobrecalentamiento.

De la recopilación, no se aprecia una relación de proporcionalidad inversa entre el nivel de segregación central evaluado por esta norma y el sobrecalentamiento que presentaba el acero al momento de ser colado.

Como resultado se obtuvo una evaluación promedio de 1,08 para el rango de sobrecalentamiento medio, bajo el cual fueron procesadas las dos hornadas en estudio, las cuales tuvieron un promedio de 1,18, bastante cercano al promedio de las hornadas procesadas.

4.3.3 Análisis de composición central de barras laminadas

En Tabla 13 se adjuntan los índices de segregación central de elementos segregables para las barras en estudio:

Tabla 13. Índice de segregación para elementos segregables en barras asociadas a hornadas sin uso de agitación electromagnética de hebra durante colada continua.

Hornada	Línea	Carbono	Fosforo	Azufre	Titanio
1	2	0,95	1.01	0.83	1.01
1	4	0.98	0.95	0.95	0.95
1	5	0.98	0.93	0.95	0.972
2	2	0.98	1.01	1.06	1.00
2	4	0.98	0.93	0.972	1.032
2	5	1.01	0.97	0.90	1.02

No se observó una severa segregación central de elementos segregables y causada por la ausencia de agitación electromagnética de hebra durante colada continua.

De los resultados obtenidos para analizar el efecto en la ausencia de agitadores de hebra para aceros alto carbono, no se observó una significativa segregación central, esto podría estar asociado a los resultados obtenidos en las secciones 4.1 y 4.2, donde la cantidad de acero líquido que se encuentra presente al momento de llegar al agitador no es suficiente para optimizar su funcionamiento, por esta razón, la ausencia de agitación electromagnética de hebra no tiene efectos críticos en la formación de segregación central para aceros alto carbono.

Capítulo 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

1. En el proceso de solidificación de acero líquido, que fue llevado a cabo en la máquina de colada continua de palanquillas de CAP Acero S.A, el acero tuvo una mayor velocidad de solidificación a medida que se incrementó la composición de carbono del acero colado. Esto se reflejó en las constantes de solidificación obtenidas para los tres tipos de acero estudiados.

2. La ausencia de agitación electromagnética de hebra durante el proceso de colada continua de palanquillas no tuvo como efecto la formación de segregación severa en la zona central de la sección colada, por lo tanto resulta factible la eliminación del uso de agitadores electromagnéticos de hebra durante la solidificación de aceros de alto carbono.

3. Las impresiones de Baumman son una herramienta de utilidad al momento de estudiar el fenómeno de segregación composicional durante la solidificación de aceros. El uso de estas impresiones permite la determinación de la fracción aún no solidificada de acero durante la colada continua al momento de ser sometido a campos magnéticos.

4. La aplicación de agitación electromagnética de hebra durante la colada continua de aceros bajo carbono y medio carbono, producen la aparición del fenómeno denominado banda blanca, en la sección transversal del producto colado. Los resultados permiten concluir que este fenómeno corresponde efectivamente a una zona de segregación negativa para carbono y azufre. Probablemente, los elementos segregables presentarán similar comportamiento en esta zona.

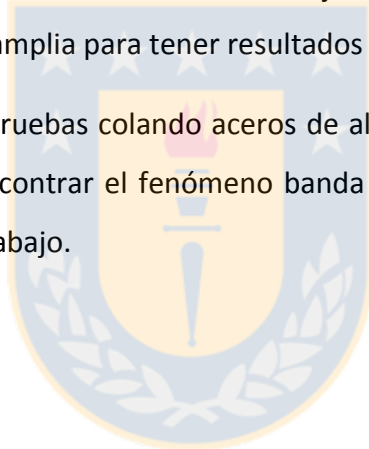
5. Los aceros alto carbono no presentan estructuras columnares en la sección colada, aun cuando se procesan con muy altos sobrecalentamientos durante la colada continua de palanquillas.

5.2 Recomendaciones

1. Se recomienda la implementación de agitadores electromagnéticos de hebra móviles, cuya posición debería adaptarse de acuerdo a las condiciones operativas de colada continua, esto con el fin de optimizar su rendimiento. En el caso de que este sistema móvil sea demasiado costoso, puede evaluarse la implementación de 2 agitadores de hebra en cada línea de colada, uno con una posición diseñada para aceros de medio carbono y el otro con una posición diseñada para aceros de alto carbono.

2. Con el objetivo de reducir el consumo energético en el proceso de colada continua, se recomienda la disminución paulatina de las corrientes utilizadas en los agitadores de hebra, acompañado de un seguimiento del índice de segregación central en palanquillas y barras asociadas a estas pruebas. Si bien las pruebas realizadas en este trabajo dieron buenos resultados, es necesario tener una gama de pruebas más amplia para tener resultados concluyentes.

3. Se recomienda realizar pruebas colando aceros de alto carbono a velocidad de colada de $3.0 \text{ [m s}^{-1}\text{]}$, esto con el fin de encontrar el fenómeno banda blanca y corroborar la constante de solidificación calculada en este trabajo.



6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Belisario, J. "Efectos de un campo electromagnético y vibracional sobre las propiedades y solidificación de algunas aleaciones fundidas". Universidad de industrial de Santander, Departamento de ingeniería Metalúrgica, Bucaramanga. (1968).
- [2].Flemings, M.C., Koseki,T. *Solidification of Steel*. Pittsburgh: The AISE Steel Foundation. (2003).
- [3]. Cicutti, C. Transferencia de calor en la colada de aceros. *Revista metal Madrid*, 33,(pp 333-344). (1997).
- [4]. Acevedo, J. *Predicción macroestructural de palanquillas de acero al carbono obtenidas por colada continua empleando una aproximación macro-micro* (Tesis de doctorado). Universidad politécnica de Cataluña. Barcelona. España. (2012).
- [5] Moore, J. *Review of axial segregation in continuously cast Steel*. Continuous casting. Iron & Steel Society.3. (pp11–20). (1984).
- [6] Ghosh, A. *Segregation in cast products*. SADHANA.26. (pp 5-24). (2001).
- [7] Flood, S. Hunt.J Columnar to equiaxed transition. *Casting Handbook*. (pp 283-298): ASM International.(1992).
- [8] CAP ACERO S.A. Quality Optimisation-Hight Carbón Billet for Grinding Media. (2009).
- [9] Bridge,M. Rogers,G. Structural Effects and Band Segregate Formation during the Electromagnetic Stirring of Strand-Cast Steel. *Metalurgical transactions B*. (pp 581-589).(1984).
- [10] Alvarez de Toledo,G. Campo,O. Lainez,E. Agitación electromagnética en la colada continua de acero. *Revista metal Madrid*.31 (pp 23-30). (1995)

[11] CAP Acero S.A. *Manual operativo y de seguridad para máquina de colada continua.* (2001)

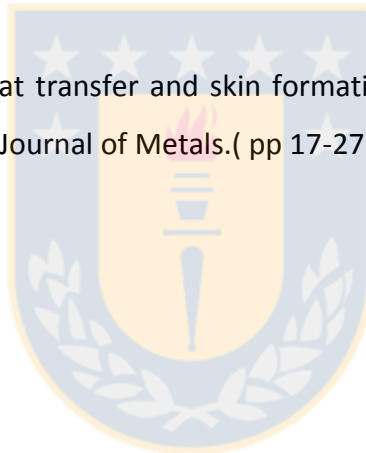
[12] Standar Method for Macroetching Metals and Alloys: *ASTM Standards.*(2000)

[13] Standar Practice for Preparing Sulfur Prints for Macrostructural Examination: *ASTM Standards.* (2003).

[14] Vander, G. Macrostructure. *Metallography Principles and practice.* (p 49). (1984)

[15] Standar Method of Macroetch Testing Steel, Billets, Blooms and Forgings: *ASTM Standards.* (2001)

[16] Slingh, S. Blazek K. Heat transfer and skin formation in a continuous- casting mols as a function of Steel carbón content. *Journal of Metals.*(pp 17-27). (1974).



7. ANEXOS

7.1 Anexo A: Diagrama de flujo del proceso productivo de CAP Acero S.A.

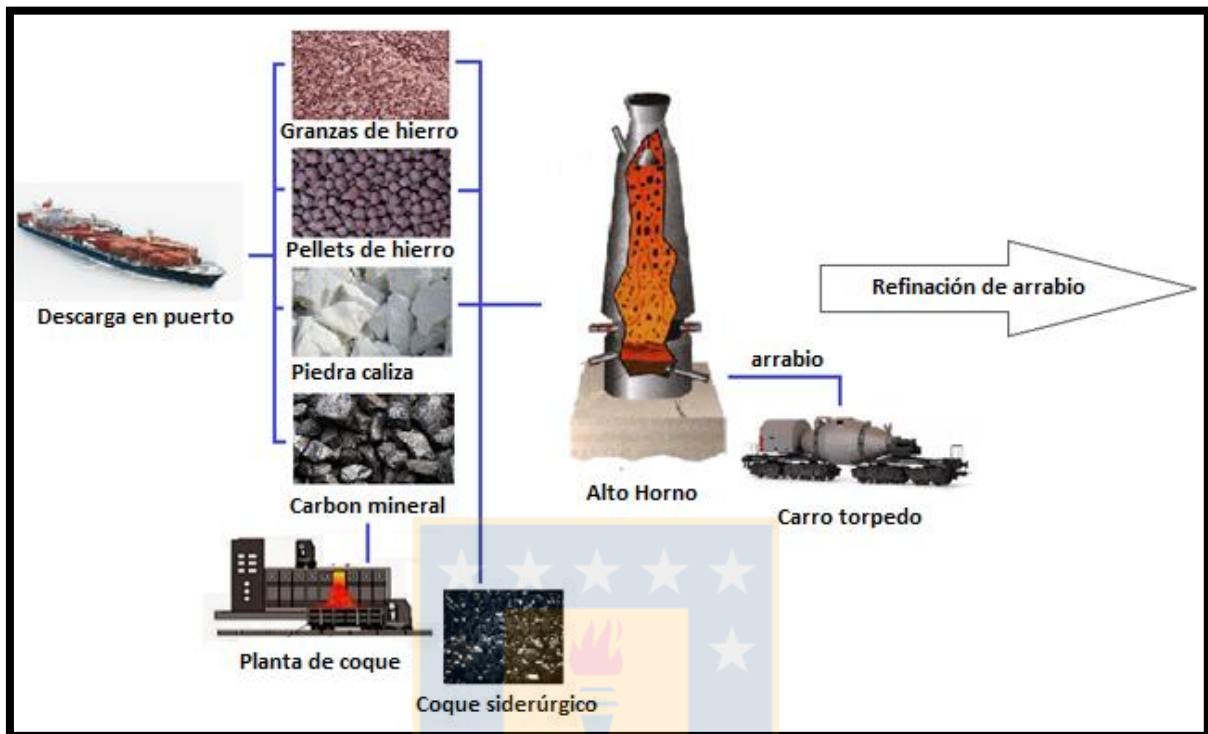


Figura 48. Proceso de reducción de mineral de hierro en Alto Horno para obtención de arrabio.

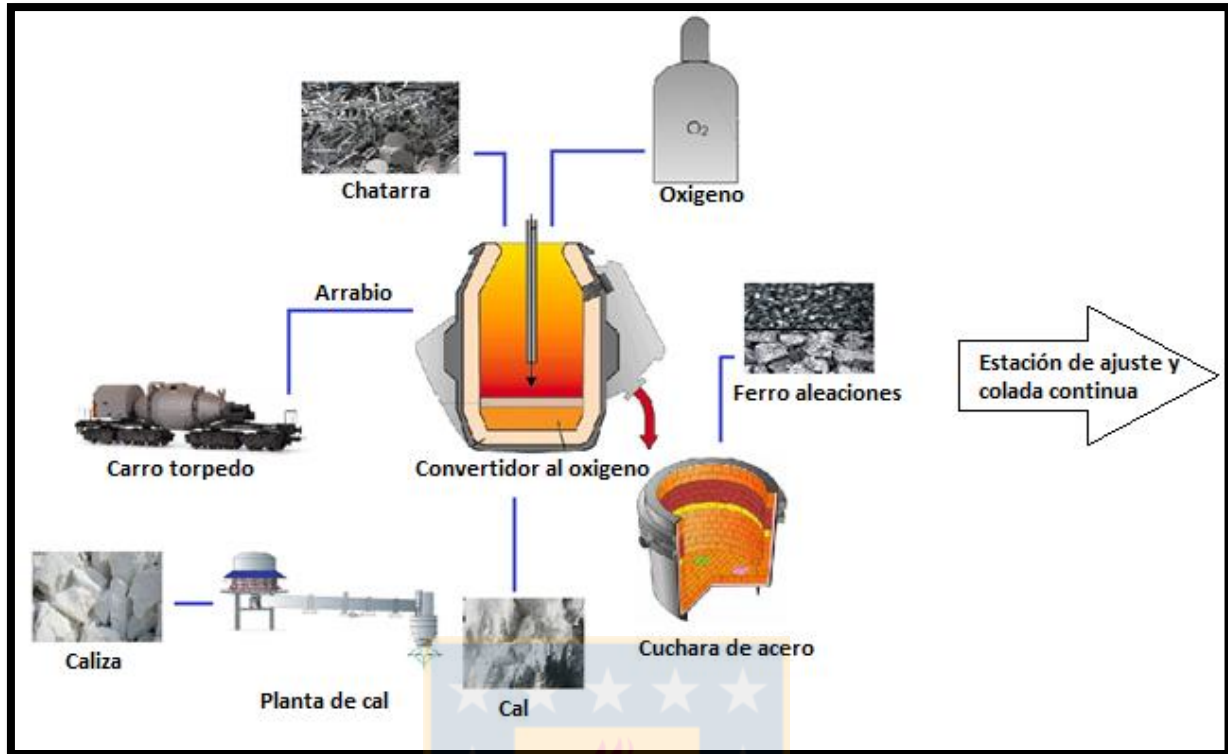


Figura 49. Conversión de arrabio en acero mediante convertidor al oxígeno.

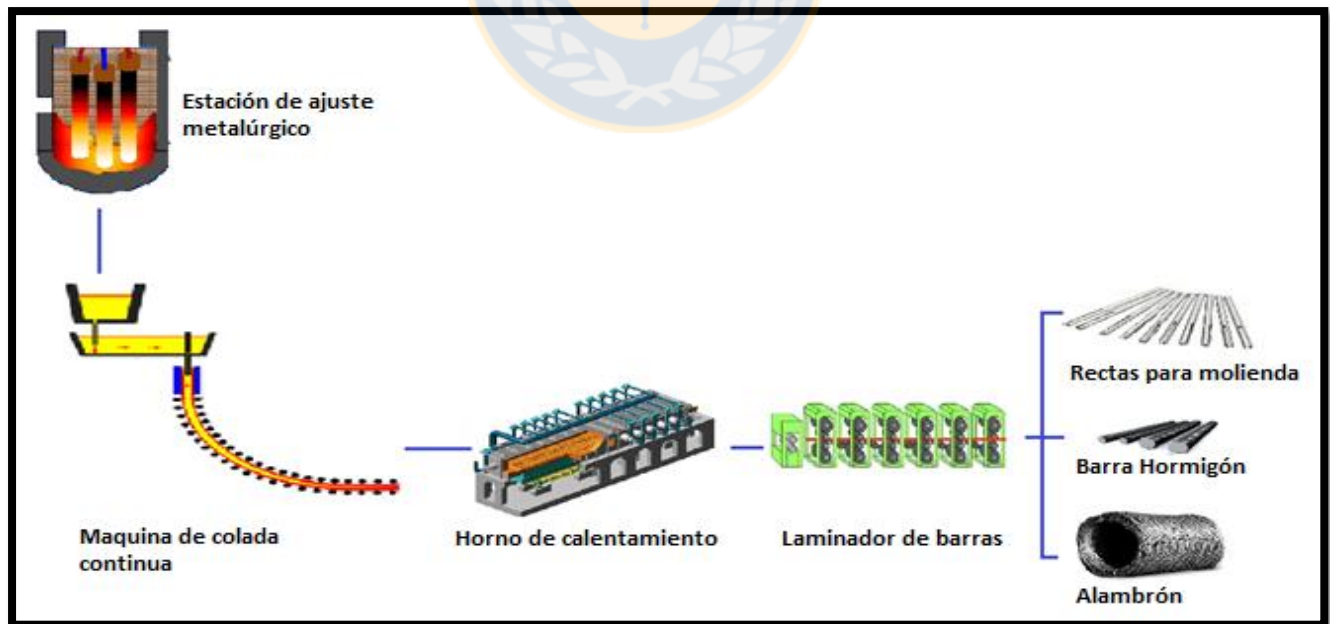


Figura 50. Proceso de afinado de acero y laminación

7.2 Anexo B: Calculo de la constante de solidificación

Mediante la relación de Field:

$$S = K \sqrt{t}$$

Se puede crear una planilla en Excel como la mostrada en la siguiente tabla:

Tabla 14. Planilla de largo metalúrgico

Espesor piel [mm]	Tiempo [min]	Largo metalúrgico[m]	%Volumen líquido
2	0,01	0,01	98%
3	0,01	0,03	96%
4	$= \left[\frac{S}{K} \right]^2$	$= t \times v$	$= \frac{160 - (S \times 2)}{160}$
5
.....

Donde:

s : espesor de la piel solidificada [mm]

k : constante de solidificación $\left[\frac{m}{min^2} \right]$

v : velocidad de colada $\left[\frac{m}{min} \right]$

t : tiempo



Podemos encontrar 4 columnas principales, de las cuales se definen un espesor de piel creciente hasta completar los 80 mm correspondientes a la mitad de la sección de la palanquilla y se define la segunda columna como función de la primera y sucesivamente como se muestra en la tabla 14. Para los cálculos es necesario asignar la velocidad de colada a la cual fue obtenida la banda blanca y una constante de solidificación aleatoria.

Para determinar la constante de solidificación teniendo el espesor de la piel solidificada y demarcada por el fenómeno Banda blanca, se aplica la herramienta Solver, donde conociendo la posición de los agitadores de hebra, dentro de la columna de largo metalúrgico, es posible ajustar la constante de solidificación para un espesor solidificado determinado.

7.3 Anexo C: Índices de segregación para sección transversal de palanquillas medio carbono

Tabla 15. Índices de segregación obtenidos para perfil de composición aceros medio carbono con y sin agitación electromagnética de hebra

Distancia del centro[cm]	Análisis de carbón		Análisis de azufre	
	Normal	Fems	Normal	Fems
0	1,11	1,03	1,20	1,01
10	0,95	0,98	0,85	0,99
20	0,97	1,03	1,01	1,10
30	0,99	0,96	1,06	0,91
40	1,00	1,03	1,08	1,10
50	0,97	1,00	1,08	1,07
60	0,98	1,00	1,09	1,08
80	1,00	0,98	1,14	1,01
Desviación estándar	0,05	0,03	0,10	0,07

7.4 Anexo D: Índices de segregación para perfil de composición de acero alto carbono

Tabla 16. Índices de segregación obtenidos para perfil de composición aceros alto carbono con agitación electromagnética de molde y de hebra colado en condiciones normales.

Análisis de carbón				Análisis de azufre			
Puntos de norte a sur	IS	Puntos de Este a Oeste	IS	Puntos de norte a sur	IS	Puntos de este a oeste	IS
1	1,00	1	0,99	1	0,84	1	0,91
2	0,97	2	0,96	2	0,99	2	0,88
9	1,00	3	1,01	3	1,03	3	1,00
16	1,03	4	1,04	4	1,00	4	1,12
23	1,03	5	1,02	5	1,04	5	1,05
30	1,03	6	1,04	6	1,09	6	1,02
37	1,00	7	1,03	7	0,94	7	0,88
44	1,00	8	1,02	8	1,00	8	0,98
51	0,97	9	0,93	9	0,95	9	0,60
58	0,87	10	0,87	10	0,56	10	0,67
65	0,90	11	1,33	11	0,70	11	1,63
72	1,33	12	0,92	12	1,63	12	0,72
79	0,85	13	0,98	13	0,66	13	0,85
86	0,96	14	1,00	14	0,74	14	0,90
93	0,99	15	1,00	15	0,92	15	0,89
100	1,00	16	1,02	16	0,93	16	0,98
107	1,01	17	1,03	17	0,93	17	1,06
114	1,01	18	1,03	18	0,92	18	1,05
121	1,02	19	1,01	19	1,04	19	0,92
128	1,02	20	1,00	20	0,88	20	0,92
135	0,99	21	0,97	21	0,92	21	0,87
142	0,96			22	0,94		
149	1,01			23	1,01		

7.5 Anexo E: Metodología para cálculo de índice de segregación central para palanquillas

Tabla 17. Esquema de cálculo de índice de segregación central para palanquillas

	C1	C2	C3
Distancia[mm]	Sub superficial	Análisis centrales	IS CM
			(Valor columna C1) / (Valor columna C2)
10	Medición A	Medición 1	
40	Medición A	Medición 2	..
70	Medición A	Medición 3	..
100	Medición A	Medición 4	..
130	Medición A	Medición 5	..
160	Medición A	Medición 6	..
190	Medición A	Medición 7	..
210	Medición B	Medición 8	..
240	Medición B	Medición 9	..
270	Medición B	Medición 10	..
300	Medición B	Medición 11	..
330	Medición B	Medición 12	..
360	Medición B	Medición 13	..
390	Medición B	Medición 14	..
			Promedio valores columna C3

7.6 Anexo F: Macrográficas de palanquillas procesadas sin agitación electromagnética de hebra

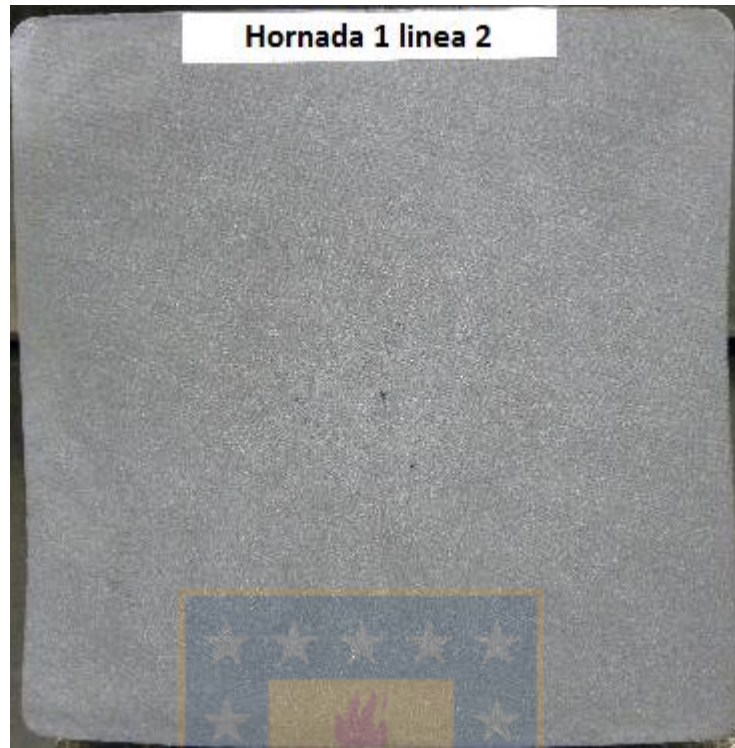


Figura 51. Macrografía palanquilla hornada 1 línea 2

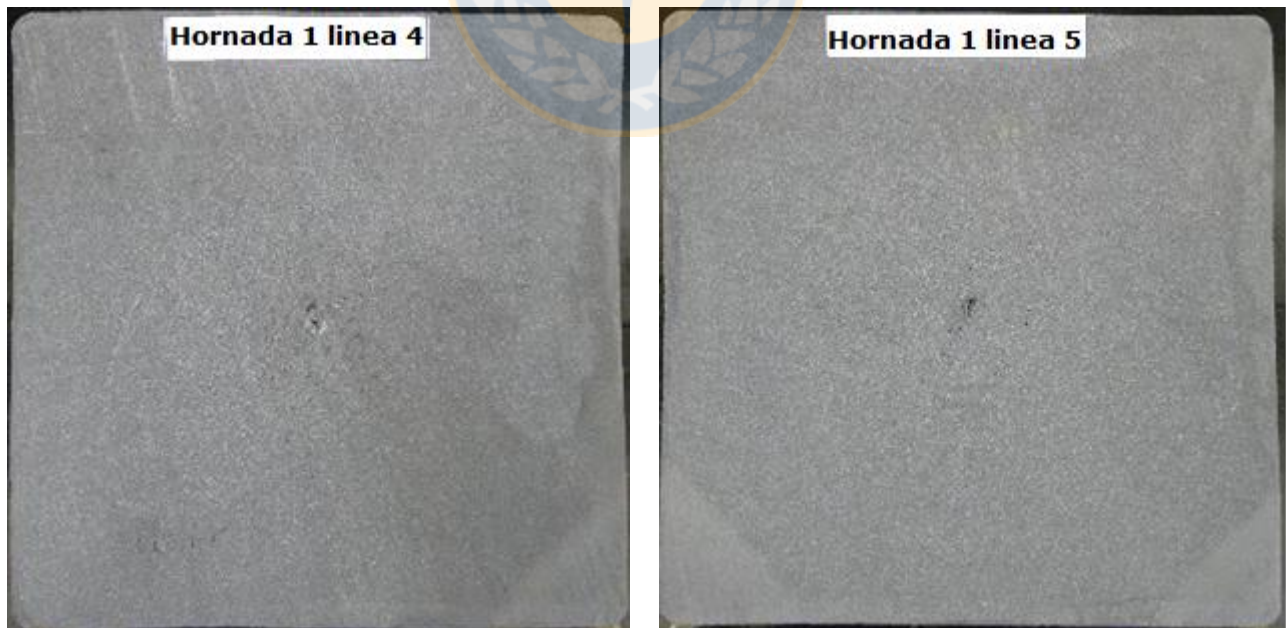


Figura 52. Macrografía palanquilla hornada 1 línea 4 y 5



Figura 53. Macrografía palanquilla hornada 2 línea 2

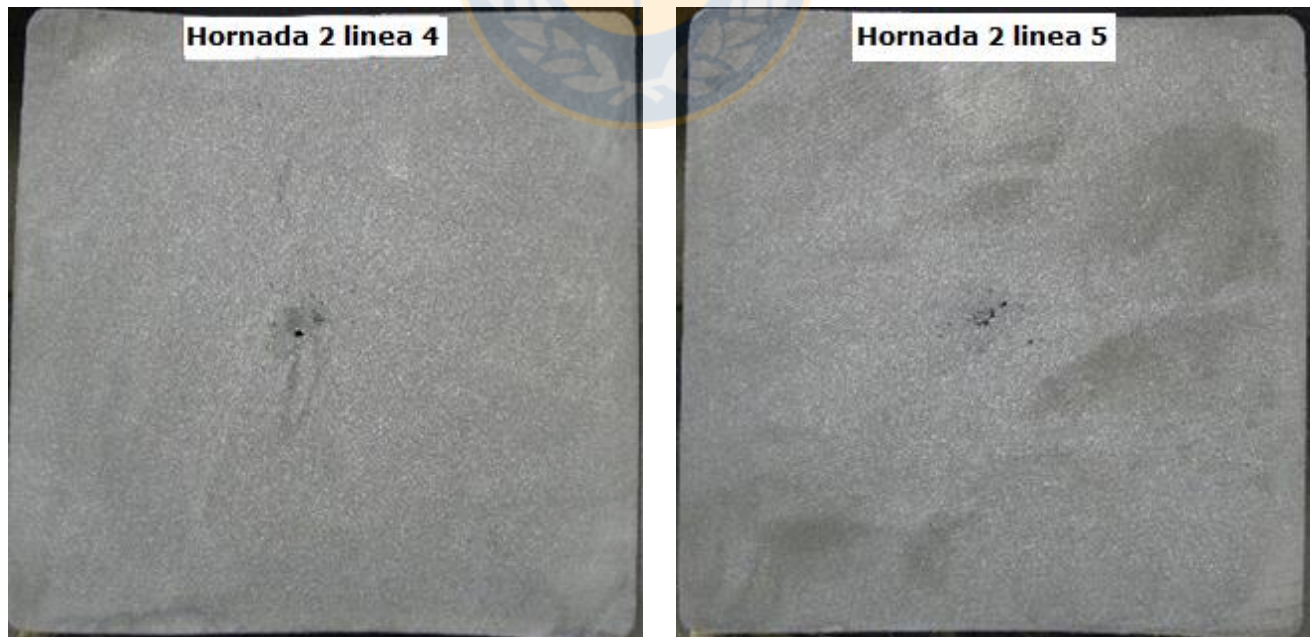


Figura 54. Macrografía palanquilla hornada 2 línea 4 y 5