

00522
10



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA



EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUÍMICA

“FORMACIÓN DE GRIETAS DURANTE EL PROCESO DE COLADA CONTINUA DEL ACERO”

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA

PRESENTA:
JULIETA ARLETTE LAZOS ESPAÑA

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recopilacional.

NOMBRE: Julieta Arlette Lazos España

FECHA: 27 de Marzo - 2005

MÉXICO, D.F. FIRMA: [Firma] 2003



A



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.


PAGINACION DISCONTINUA

Jurado asignado

Presidente
Vocal
Secretario
1er.suplente
2do.suplente

Prof. Hernández Morales J. Bernardo
Prof. Barrera Godínez J. Antonio
Prof. Ingalls Cruz Alberto
Prof. Arámburo Pérez Gerardo
Prof. García Galán Sergio

Sitio donde se desarrolló el tema:
Edificio D, Facultad de Química, UNAM.



M. en C. Alberto Ingalls Cruz
Asesor



Julieta Arlette Lazos España
Sustentante

INDICE

	Pag.
I. Resumen	1
I.1 Diagrama de flujo general	2
II. Objetivos	3
III. Antecedentes	
III.1 Colada Continua	4
III.1.1 Componentes de la Colada Continua	5
III.1.2 Enfriamiento secundario de la Colada Continua	8
III.1.3 Requisitos para un buen diseño del sistema de rociadores	10
III.2 Extracción de calor durante la Colada Continua	12
III.3 Contracción térmica del acero durante su solidificación	23
III.4 Generación de esfuerzos durante la solidificación del acero	24
III.5 Resumen de resultados	28
IV. Definición del problema	32
V. Solución del problema	32
VI. Conclusión	34
VII. Bibliografía	35
VIII. Figuras	38

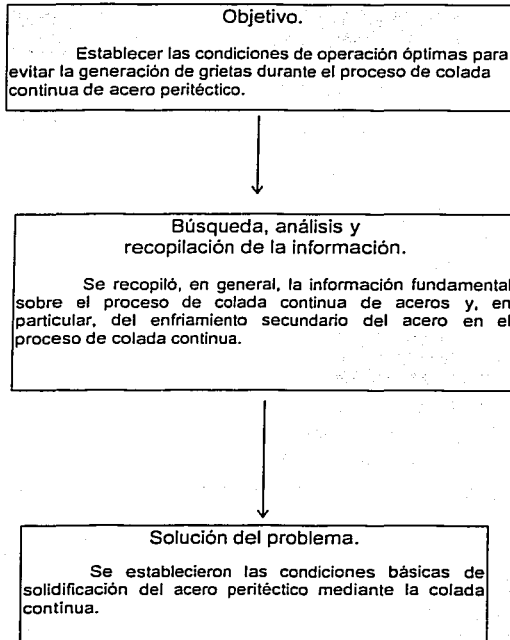
C

I. Resumen

Se llevó a cabo la búsqueda, recopilación y el análisis de la información publicada en la literatura para establecer las condiciones de operación del proceso de colada continua del acero, con el fin de evitar la formación de grietas en los componentes metálicos solidificados. El acero objeto de este estudio presenta, durante su solidificación, la transformación peritéctica descrita por el diagrama de equilibrio de fases Fe-C, entre 0.09 y 0.53% de carbono. En un principio se describe el proceso de solidificación del acero mediante la colada continua y se identifican los parámetros que promueven la formación de grietas tanto superficiales como internas en el producto solidificado. Posteriormente se revisan los tipos de grietas formadas durante el enfriamiento secundario. Finalmente, se definen las características térmicas que debe cumplir el sistema de enfriamiento secundario, para minimizar los efectos de la contracción térmica y de la transformación de fase sobre la formación de grietas en las piezas solidificadas. Adicionalmente, en el texto se establece la importancia de la composición química y de la limpieza del acero, ya que éstas influyen sobre la calidad de los productos fabricados por colada continua.

DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL

A continuación se presenta un diagrama de flujo con todas las actividades realizadas.



II. Objetivo:

En esta tesis, se estableció el siguiente objetivo:

- Proponer las condiciones óptimas de operación de colada continua del acero, para evitar agrietamientos.

Para alcanzar este objetivo se utilizó la metodología siguiente:

- La búsqueda, la recopilación y el análisis de la información que permita establecer las condiciones de operación del sistema de colada continua que promueven la formación de grietas en el acero solidificado.

III. Antecedentes

III.1 Colada continua

El proceso de producción de acero por medio de la colada continua ha adquirido gran importancia. Con este proceso se obtienen piezas semi-terminadas, con forma y dimensiones apropiadas para su posterior conformado termomecánico. Una componente importante del equipo de colada continua es el molde vertical de cobre, enfriado por agua y abierto por ambos extremos. El metal fundido se vacía por la parte superior y por su parte inferior se extrae la palanquilla o el planchón. Su sección transversal es variable, según el diseño. Este proceso de solidificación permite obtener costos más bajos y mejores propiedades de los metales, en comparación con los materiales procesados por la vía convencional; esto es, el vaciado del metal fundido en un molde permanente.

En el proceso de colada continua se controla tanto el flujo del fluido metálico como la transferencia de calor durante la solidificación. El primero juega un papel importante en la calidad del sólido, ya que se deben proveer las condiciones hidrodinámicas apropiadas para que las inclusiones exógenas en el acero líquido floten y se eliminen. Dicho control, se basa en minimizar las corrientes turbulentas tanto en el distribuidor como en el molde [1]. Por otra parte, cuando se tiene un buen control de la transferencia de calor, es posible evitar la formación de grietas en las piezas solidificadas. Se ha determinado, que las grietas se originan de los esfuerzos térmicos provocados por la contracción y la expansión del material durante la solidificación y

durante el enfriamiento del acero [1]. Además, en general, se acepta que los aceros de bajo carbono son los más susceptibles a la formación de grietas, ya que están sujetos a la transformación peritéctica. Finalmente, debe hacerse notar que, es importante el control de la temperatura de vaciado del acero; ya que, en la medida en que el grado de sobrecalentamiento sea mayor, más grande es la probabilidad de generar defectos durante la solidificación.

III.1.1 Componentes de la colada continua

Los principales componentes del equipo de colada continua, de acuerdo a lo que se muestra en la Figura 1 son:

- (1) Caldero o cuchara de colada (olla)
- (2) Distribuidor
- (3) Moide
- (4) Enfriamiento secundario (rociadores)

En el moide se lleva a cabo una primera parte de la solidificación. Ahí se forma una capa sólida exterior con el espesor suficiente para contener el metal líquido y prevenir que salga durante la operación siguiente, véase Figura 2. En la segunda etapa de este proceso se solidifica completamente el metal por medio de un enfriamiento por rocío de agua. Esta etapa es conocida como enfriamiento secundario. Es importante destacar que, la calidad del acero, que depende de la metodología de su refinación y de limpieza previa, establece en parte las características finales de los planchones.

solidificados. En general, su composición debe ser baja tanto en sus contenidos de azufre y fósforo como en su contenido de gases disueltos.

El primer componente del sistema de colada continua es el caldero (olla). Este es un recipiente móvil el cual puede contener desde 20 hasta 350 toneladas de acero. Se transporta desde el equipo con el que se realiza la refinación del acero hasta la máquina de colada. En la transportación se puede tener el problema de absorción de oxígeno de la atmósfera; sin embargo, esto se evita cubriendo la superficie del acero con escoria sintética, lo que también minimiza la pérdida de calor del metal líquido durante su transporte.

El segundo componente es el distribuidor, mediante el cual se descarga el acero líquido que proviene del caldero a través de una o varias boquillas, dependiendo del tipo de máquina de colada continua. En un distribuidor eficiente se controlan las turbulencias que hay en el interior del metal líquido.

El tercer componente del sistema de colada continua es el molde. En este lugar se lleva a cabo la extracción primaria de calor. Existen 3 tipos de moldes: moldes de tubo, moldes de bloque y el molde de plato (véase Figura 3). Como los moldes son de cobre, éstos se deben lubricar para prevenir que el acero se adhiera sobre la superficie de los mismos. Los lubricantes más empleados son aceites y polvos. Para el diseño del molde se deben tomar en cuenta diversos parámetros, como son: el radio de curvatura y la longitud del molde. La longitud del molde se relaciona directamente con la rapidez de la colada; con esto, se establece el tiempo requerido para solidificar la capa exterior

con el espesor necesario para contener al material líquido durante el resto de la operación. En el molde, la transferencia de calor de la superficie del acero está influenciada marcadamente por la formación de un espacio ("gap") entre la capa solidificada y la cara del molde. Si el espacio es muy pequeño, el calor puede fluir de la capa a la superficie del molde por conducción, si no es así la extracción de calor ocurre por radiación y convección, véase Figura 2.

El cuarto componente de la colada continua es el enfriamiento secundario, cuyo propósito es continuar la extracción de calor para completar la solidificación de la pieza de acero iniciada en el molde. Durante esta operación se espera que no se generen esfuerzos tensiles de gran magnitud, que a su vez causan las grietas internas y/o externas en el acero. La mayoría de las posibles grietas generadas durante el enfriamiento secundario no son observadas directamente; por lo que, al pasar al trabajado mecánico posterior para obtener la pieza final ésta puede sufrir rupturas. Por lo tanto, es importante evitar la formación de éstos defectos. Entre las grietas más comunes generadas durante el enfriamiento secundario se encuentran: las grietas a la mitad de las caras, las grietas diagonales, las grietas transversales en la superficie, las grietas longitudinales a la mitad de la cara, las grietas centrales, las grietas de triple punto y las grietas de segregación central, véase Figura 4.

III.1.2 Enfriamiento secundario de la colada continua

El enfriamiento secundario está conformado fundamentalmente por los rociadores de agua los cuales ejercen una gran influencia en la formación de grietas en las piezas [1].

Dependiendo del enfriamiento secundario, se generan esfuerzos tensiles en el interior del acero. Estos se generan debido a los gradientes térmicos, los cuales suelen ser de alrededor de 200°C por cada 4 cm de espesor de capa solidificada.

La intensidad del enfriamiento en la zona de los rociadores afecta la distribución de temperaturas locales a través de la capa sólida.

La temperatura de la capa sólida desciende conforme va pasando por los rociadores y esto puede provocar la precipitación de otra fase, como por ejemplo el nitruro de aluminio [2]. Esta fase puede reducir la ductilidad del acero y crear problemas de agrietamiento. Debido a que estos tipos de precipitados son muy duros, éstos pueden ser los sitios apropiados para la formación de alguna grieta.

La recalcancia del acero, posterior al enfriamiento secundario, es el resultado de un enfriamiento excesivo y de una insuficiencia en la longitud de la zona de rociadores, véase Figura 5. Esta figura, muestra el perfil de enfriamiento tradicional de la colada continua. En esta se observa que al final de la zona de rociadores se encuentra una recalcancia de aproximadamente 300°C. De aquí que, el metal al final

de la zona de rociado está sujeto a esfuerzos térmicos potencialmente generadores de grietas longitudinales a la mitad de la cara. Además, en la colada continua de planchones se pueden presentar grietas transversales y longitudinales debido al "pandeo" de la cara más ancha del lingote. Esto se debe a la influencia de la presión ferrostática ejercida por el metal líquido. Tales esfuerzos pueden ser tanto de tipo térmico, como mecánico.

Para el diseño del molde y de las diferentes secciones de rociadores se han establecido ciertos criterios. En el molde, es crítica la solidificación de una capa de espesor suficiente para sostener el material líquido durante las operaciones siguientes. Para el sistema de enfriamiento secundario son fundamentales la minimización de la recalcancia de la superficie y el mantenimiento de una alta, pero no obstante razonable, rapidez de solidificación. De aquí que los rociadores influyan fuertemente en la formación de defectos superficiales e internos; debido a la generación de esfuerzos. De acuerdo con los reportes encontrados en la literatura [3], para evitar la formación de grietas por la recalcancia del acero se establece el criterio de mantener la temperatura de la superficie del acero en la zona de rociadores entre 1000 y 1100 °C.

La recalcancia induce la expansión de la superficie del metal provocando esfuerzos internos en las regiones calientes de la capa sólida. Lo que a su vez genera una gran deformación, y por lo tanto el agrietamiento del metal. La recalcancia máxima de la superficie depende de varios factores, de los cuales dos son los más importantes: (1) la estructura del acero solidificado y (2) su composición.

Como se sabe, durante la solidificación se forman dos tipos de estructuras en el acero. La primera es columnar y se forma en la porción externas del planchón o palanquilla del acero. Esta zona columnar es muy susceptible a agrietarse con una recalentamiento menor a 150 °C. La segunda estructura que se forma es la equiaxial, la cual se ubica en el interior de la palanquilla o el planchón. Esta zona soporta una recalentamiento de hasta 200°C sin agrietamiento. Con respecto a la zona llamada "chilled", ésta es una estructura relativamente pequeña que se forma en la parte mas externa del planchón o palanquilla y su crecimiento e influencia sobre las características del sólido son mínimas.

En general, se puede establecer que, los defectos se desarrollan por un enfriamiento mal controlado. Esto se puede presentar debido a que los rociadores no logran distribuir el fluido de enfriamiento sobre todas las superficies con la misma intensidad; y por lo tanto, el enfriamiento no es homogéneo.

III.1.3 Requisitos para un buen diseño del sistema de rociadores.

El diseño de rociadores se basa en los siguientes aspectos: un entendimiento de la causa de los defectos del acero, el conocimiento de la extracción de calor vía los rociadores, como también mediante resultados que se obtengan de los modelos matemáticos que calculen los coeficientes de transferencia de calor en la zona de los rociadores. La intensidad del enfriamiento en la zona de los rociadores influye sobre la rapidez de solidificación y sobre el perfil térmico del metal que solidifica [2].

La metodología apropiada para lograr un enfriamiento homogéneo vía los rociadores consiste en seguir los pasos siguientes [2]:

1. La determinación de las condiciones térmicas óptimas. Es decir, la determinación de la distribución de temperaturas en la superficie del acero y la determinación de la rapidez de enfriamiento debida a los rociadores, con la cual se minimice la formación de grietas.

2. El cálculo de la distribución de los coeficientes de transferencia de calor, en la zona de rociadores. Para determinar las condiciones térmicas óptimas que establezca la extracción homogénea del calor mediante los rociadores. Esto se alcanza usualmente con la ayuda de un modelo computarizado de flujo de calor del proceso de la colada continua.

3. El uso de correlaciones empíricas entre el coeficiente de transferencia de calor y el flujo de agua de los rociadores. El cálculo del flujo de agua de las boquillas se debe controlar a través de toda la zona de enfriamiento secundario.

4. Finalmente, la determinación del tipo de boquillas, la presión del agua, la distancia entre boquillas, la distancia de la boquilla a la superficie del acero, y las correlaciones que relacionan estas variables y el flujo de agua del rociador, que tienen una gran influencia sobre los coeficientes de transferencia de calor.

En la práctica, para optimizar el funcionamiento de los rociadores se tienen dos parámetros de control: (1) la distribución del flujo de agua y (2) la longitud de la zona de rociado.

El sistema de rociado normalmente se divide en zonas, para que la rapidez del flujo de agua pueda ser variada independientemente. Para esto, comúnmente se emplean rociadores con agua al inicio del enfriamiento secundario, los cuales operan a partir de la atomización a presión; y rociadores con una mezcla de agua y aire en la porción final de este enfriamiento.

En resumen, se puede establecer que la segunda etapa de enfriamiento es una de las más importantes durante la operación de la colada continua, ya que en esta zona se completa la solidificación del acero y se establecen las condiciones térmicas que minimizan la formación de las grietas.

III.2. Extracción de calor durante la Colada Continua.

La rapidez con la cual se extrae el calor a la salida del molde, es un proceso crítico en la colada continua. Esto se debe a que un enfriamiento bajo puede resultar en un volumen de metal líquido excesivamente grande. De aquí que se pueda inducir un sobre-enfriamiento excesivo durante el enfriamiento por rociado y este pueda promover la formación de grietas. Este hecho es congruente con lo que anteriormente se estableció; esto es, que un recalentamiento excesivo es la causa primordial de la formación de grietas sobre la superficie a la mitad de las caras; véase Figura 5.

Es conocido que, la temperatura de la superficie y la densidad de flujo del calor se pueden combinar para calcular el coeficiente de transferencia de calor en la zona de los rociadores [2], mediante la ecuación de Newton para la transferencia de calor por

convección: $h = -q / \Delta T$. Este coeficiente, es el parámetro de diseño más crítico, con el cual se caracteriza la efectividad de extracción de calor en la zona de enfriamiento por rocío.

Los fenómenos asociados con el cambio de fase entre un líquido y un vapor son complicados y; por lo tanto, más difíciles de describir que los procesos de transferencia convectiva de calor sin cambio de fase en el fluido de enfriamiento. Esto se debe a que, durante la cuantificación debe tomarse en cuenta a la energía de tensión superficial, al calor latente de vaporización, las características de la superficie formada entre las fases líquida y vapor, y a otras propiedades de estos sistemas [2].

Por otro lado, se han definido dos clases básicas de ebullición: (1) ebullición de estanque y (2) ebullición de flujo. La primera de ellas es la que se presenta sobre una superficie caliente que se ha sumergido en un líquido sin agitación. La ebullición de flujo ocurre en una corriente de fluido y la superficie en ebullición puede ser una porción del paso del fluido.

Un alambre horizontal calentado eléctricamente y sumergido en un estanque con agua a su temperatura de saturación, es un sistema conveniente para explicar los regímenes de transferencia de calor por ebullición en el modo de estanque. Existen seis regímenes diferentes de ebullición asociados con este comportamiento, y se muestran en la Figura 6.

En el régimen I, la temperatura de la superficie del alambre es unos cuantos grados mayor que la del líquido saturado circundante. Las corrientes de convección natural circulan alrededor del líquido sobrecalentado y la evaporación se lleva a cabo en la superficie libre del líquido.

El aumento de la temperatura del alambre está acompañado de la formación de burbujas de vapor sobre la superficie del alambre. Estas burbujas se forman en lugares definidos de la superficie. Los núcleos de las burbujas de vapor se desprenden, alejándose de la superficie del alambre, se elevan y alcanza la superficie libre. Los regímenes II y III están asociados con esta ebullición nucleada.

Más allá del máximo de esta curva empieza el régimen de ebullición de transición. Esta es la región IV de la curva. En este régimen se forma una película de vapor alrededor del alambre y algunas porciones de esta película se desprenden y se elevan, exponiendo brevemente una parte de la superficie del alambre. Este rompimiento de la película así como su nueva formación y la naturaleza inestable de la misma es característica del régimen de transición. Cuando se encuentra presente, la película de vapor presenta una considerable resistencia a la transferencia de calor, por lo que el flujo de calor disminuye.

Cuando la temperatura de la superficie alcanza un valor de aproximadamente 400° F por encima de la del líquido saturado, la película de vapor que circunda al alambre se estabiliza. Este es el régimen V, el régimen de ebullición de película estable.

En temperaturas superficiales de 1000° F o mucho más altas que la del líquido saturado, la transferencia de energía radiante entra en juego y la curva de flujo calorífico se eleva una vez más. A esta región se le designa con el número VI en la Figura 6.

Sin embargo, si se usará calentamiento por medio de electricidad, probablemente no se obtendrá el régimen IV debido a que se quemará el alambre. Al aumentar el flujo de energía, ΔT aumenta en las regiones I, II y III. Cuando se sobrepasa ligeramente el valor máximo de q/A , la cantidad requerida de energía no se puede transferir por ebullición. El resultado es un aumento en ΔT acompañado de una disminución en el valor posible de q/A . Esta condición continúa hasta que se alcanza el punto c. Como ΔT es extremadamente grande en el punto c, el alambre habrá alcanzado mucho antes su punto de fusión. A menudo se hace referencia al punto a de la curva como el "punto de fusión" debido a estas razones.

Como el mecanismo de transferencia de energía está íntimamente ligado a las corrientes convectivas generadas, la magnitud de la intensidad de estas corrientes modificará, tanto el mecanismo como la magnitud de la transferencia de calor por ebullición.

Nótese el comportamiento anormal que muestra el flujo de calor asociado con la ebullición. Comúnmente se considera que un flujo es proporcional a la fuerza impulsora; por lo tanto puede esperarse que el flujo de calor aumente en forma continua al aumentar la diferencia de temperatura entre la superficie calentada y el líquido

saturado. Desde luego; ésto no es lo que ocurre; los flujos grandes de calor, asociados con las diferencias moderadas de temperatura, en el régimen de ebullición nucleada son mucho mayores que los flujos de calor que resultan de diferencias de temperatura mucho mayores en el régimen de ebullición de película. La razón de ésto es la presencia de la película de vapor que cubre y aísla la superficie de calentamiento en el segundo caso. Este fenómeno es conocido como fenómeno de Leidenfrost [4].

Para el caso de colada continua sólo aplican dos de los regímenes antes mencionados el III y IV, donde se tiene la formación de burbujas en la superficie de la placa; sin embargo esta capa es inestable ya que constantemente se esta removiendo mecánicamente, mediante el flujo de agua que sale de las boquillas en el enfriamiento.

Los coeficientes de transferencia de calor en la zona de rociadores dependen de un gran numero de variables, tales como el tipo de boquilla, la distancia de la boquilla a la superficie del acero, la presión de agua, la temperatura del agua, la temperatura de la superficie del acero, etc. Estas variables pueden ser divididas en 2 categorías, dependiendo de si afectan o no al flux de agua en el rociador. Las variables como el tipo de boquilla, presión de agua y la distancia de boquilla a la superficie del acero tienen un efecto sobre el flux de agua y las variables como la temperatura de agua y la temperatura del acero afectan directamente la transferencia de calor. Bajo condiciones normales de colada continua, en donde el rango de temperatura de la superficie está entre 1200 y 700 °C, se tiene solo un pequeño efecto sobre el coeficiente de transferencia de calor [1].

La relación entre la rapidez de extracción de calor por rociadores de agua y las variables de los rociadores, las cuales tienen una influencia en la formación de defectos, ha sido establecida en un número de estudios experimentales; los cuales son recopilados en la Tabla 1.

Es así que, la temperatura de la superficie y la rapidez de extracción de calor se combinan para calcular el coeficiente de transferencia de calor, de la siguiente manera:

$$h = q / A (T_s - T_w)$$

donde q es el flujo de calor, A es el área de la superficie enfriada, T_s es la temperatura de la superficie del acero y T_w es la temperatura del agua.

Una relación importante que se ha establecido es la que existe entre el flux local de agua y el coeficiente de transferencia de calor en el rociador [1]. Como se aprecia en la Figura 7, la relación que existe entre estos dos parámetros es prácticamente proporcional, es decir conforme aumenta el flux de agua entre 0 y 20 L/m²s el coeficiente de transferencia de calor también se incrementa en un intervalo de 0 a 2 kW/m²°C. En estos rangos se observa un comportamiento casi lineal.

La temperatura de agua del rociador no tiene una gran influencia sobre el coeficiente de transferencia de calor. Sin embargo, el cambio de rapidez de las gotas del rociador y la presión del mismo se ha encontrado que afectan significativamente al coeficiente de transferencia de calor. Cuando se aumenta la velocidad de salida del agua o la presión del rociado se incrementa este coeficiente. Los coeficientes de transferencia de calor aumentan en la parte superior del sistema de rociadores, porque

a una temperatura superficial dada, la conducción del calor hacia la superficie decrece cuando se incrementa el espesor de la capa solidificada.

El ajuste de los rociadores se establece mediante la relación entre el enfriamiento y el tiempo de residencia; por lo que, se requiere de la siguiente información:

1. El tiempo de residencia del acero en el enfriamiento secundario.
2. La variación del coeficiente de transferencia de calor con respecto a la temperatura.
3. La relación entre el coeficiente de transferencia de calor y el flux de agua.

La influencia de la distancia del rociado, a una presión constante, sobre el enfriamiento secundario, es tal que al incrementar la distancia de los rociadores se decrece el flux de agua en el centro, de ahí que se busque promover un rociado uniforme. Por el contrario, si tenemos una distancia de rociado constante y aumentamos la presión el efecto del flux del agua en el centro será pequeño. Sin embargo, el efecto del flux en las orillas será pronunciado. De aquí que se espere una dependencia del flux de agua como se ha establecido previamente con respecto tanto de la distancia de rociado como de la presión de agua. Sin embargo, debe recordarse que, los defectos se desarrollan por un enfriamiento del acero que no es uniforme. Debido a esto, se ha desarrollado un nuevo método [5] el cual permite rociar todas las caras de la superficie del acero en cuestión. Esto se ha hecho usando una mezcla de agua y aire. Se utiliza

una boquilla donde se tienen salidas para agua y aire simultáneamente. Estas boquillas permiten un rociado intenso o medio. El aire es muy efectivo para estabilizar la calidad del rociado sobre la superficie evitándose la formación de una película de vapor y lográndose un enfriamiento más uniforme y constante. Véanse Figuras 8,9 y 10.

Como se observa en la Figura 8, para una boquilla tipo $\frac{1}{4}$ GG 10 y una presión de agua constante de 40 psig, cuando se varía la distancia de rociado se modifica el flux del rociado sobre la superficie del acero. Es decir, para una distancia de rociado de 4 pulgadas, se observa que el flux de rociado es mayor en el centro de la superficie. Conforme se aumenta la distancia a 8 pulgadas, se disminuye el flux en el centro, promoviéndose un rociado de menor intensidad aunque un tanto más uniforme. Sin embargo, para una distancia de rociado de 12 pulgadas, el flux de agua sería insuficiente para el enfriamiento, no obstante que el flux se distribuya sobre una mayor superficie.

Con respecto a la Figura 9, se puede establecer que cuando se mantiene constante la distancia del rociado a 4 pulgadas usando la boquilla tipo $\frac{1}{4}$ GG 10, se observa el efecto de la presión del agua sobre el flux del rociado en la superficie del acero. En esa figura se aprecian los siguientes eventos [5]:

1. A una presión de agua de 10 psig el flux de rociado se concentra en el centro del radio y solo se expande alrededor de 2 pulgadas a partir del centro.

2. A presiones de rociado de 40 y 70 psig, el rociado es más homogéneo ya que no se concentra sólo en el centro, sino que abarca alrededor de 4 pulgadas de radio de la superficie .

3. A una presión de 90 psig, el flux de rociado es grande, sin embargo el área de contacto de la superficie se disminuye.

Por otro lado, en la Figura 10 se observan las características de un rociado más uniforme y constante, cuando se usa una mezcla de agua y aire.

Tabla 1. Estudios de la extracción de calor en los rociadores [2].

ESTUDIO POR:	METODO USADO PARA OBTENER h	CORRELACION	COMENTARIOS
Mitsutsuka	Placa plana horizontal, de acero al carbón enfriada por los rociadores en ambos lados. Temp. inicial del plato 900°C, Tw=38°C. Experimento en estado inestable.	$h = W^n (1-bT_w)$ $0.65 < n < 0.75$ para $W > 0.08 \text{ l/m}^2\text{s}$ $0.005 < b < 0.008$ $W = 10 \text{ a } 10.3 \text{ l/m}^2\text{s}$	h decrece conforme incrementa Ts. Para grandes valores de W, la temperatura critica es de 500°C.
Shimada y Mitsutsuka	Como lo anterior.	$h = 1.57W^{0.55}(1-0.0075T_w)$	
Mizikar	Placa vertical simple (304), rociado por un solo lado. T inicial de la placa es igual a 1090°C. Rociadores de cono, presión=69-620 KPa, distancia del rociado es de 102 a 305mm. Experimento en estado inestable.	$h = 0.076W$ (a 276 KPa) $h = 0.1W$ (a 620 KPa) $0 < W < 20.3 \text{ l/m}^2\text{s}$	Excluida la radiación con h en ambas ecuaciones. h decrece ligeramente cuando incrementa Ts. La temperatura critica es 550°C

TESTEADO
FALLA DE ORIGEN

ESTUDIO POR:	METODO USADO PARA OBTENER h	CORRELACION	COMENTARIOS
Muller y Jeschar	Calentado eléctricamente, placa vertical de acero, enfriada por ambos lados. Rociadores fuertes de conos y boquillas de abanico. Experimentos en estado estable. Presiones arriba de 1100 kPa, distancia de rociado de 100 a 200 mm, velocidad de rociado calculada de 10 a 35 m/s. Temperatura de la placa de 700 a 1200°C, diametro de la boquilla de 0.8 a 3.3 mm.	$h = 0.01u + (0.107 + 0.00068u)W$ $0.3 \leq W \leq 9.0 \text{ l/m}^2\text{s}$ $11 \leq u \leq 32 \text{ m/s}$	Excluida la radiación h no depende del tipo de boquilla ni de la distancia de boquilla, pero es afectada debilmente por T_s .
Alberli	Temperatura superficial uniforme en la máquina de operación de colada centrifuga.		Con altos valores de W , h se hace prácticamente constante.
Ishiguro et al.	Usaron la ecuación de Mitsutsuka.	$h = 0.581 W^{0.451} (1 - 0.0075Tw)$	
Nozaki et al.	Usaron la ecuación de Shimada y Mitsutsuka con un ajuste empírico, α , basado en la planta (industria). Un arreglo en la medición de temperaturas.	$h = 1.57 W^{0.55} (1 - 0.0075Tw) / \alpha$ $\alpha = 4$	

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

ESTUDIO POR:	METODO USADO PARA OBTENER h	CORRELACION	COMENTARIOS
Bolle y Moureau	Placa horizontal de acero inoxidable (309 s), calentada eléctricamente, enfriada por rociador en un lado desde la parte superior hasta la parte inferior. Ts de 600 a 1100°C. Rociadores de abanico. Experimentos en estado estable.	$h=0.423W^{0.556}$ $1<W<7 \text{ l/m}^2\text{s}$ $627<T_s<927^\circ\text{C}$ $h = 0.360 W^{0.556}$ $0.8<W<2.5 \text{ l/m}^2\text{s}$ $727<T_s<1027^\circ\text{C}$	La orientación de los rociadores es descendente. La radiación es excluida. Orientación de los rociadores ascendente. La radiación es excluida.
Sasaki et al.	Placa vertical de acero inox. enfriada por ambos lados. Boquillas fijas y abundante agua. Experimentos en estado inestable. Temp. inicial de 700 a 1200°C. Presión de 196 a 490 kPa, flujo de agua de 1.67 a 41.67 l/m ² s, distancia de boquilla de 100 a 500 mm.	$h=708W^{0.75} T_s^{-1.2} + 0.116$ $700<T_s<1200^\circ\text{C}$ $1.67<W<41.7 \text{ l/m}^2\text{s}$	h decrece ligeramente cuando incrementa Tw. Efecto de la presión de agua, tipo de boquilla y posición de boquilla despreciables.

Nota: Ts= Temperatura de la superficie del acero (°C)

T_w = Temperatura del agua de los rociadores (°C)

W= Flux del agua del rociador (l/m²s)

h= Coeficiente de transferencia de calor del rociador (KW/m²C)

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

III.3 Contracción térmica del acero durante su solidificación.

El material comercial más importante que solidifica (con una reacción peritética) es el acero al carbono. La transformación peritética, se define como la transformación de una fase líquida más una fase sólida produciéndose otra fase sólida completamente diferente a la fase sólida inicial, es decir:

Sólido 1 (ferrita delta) + Líquido → Sólido 2 (austenita)

Durante la solidificación a través de la colada continua, el acero sufre una contracción térmica la cual se define como el cambio de volumen debido a la diferencia de temperatura. El cambio de volumen usualmente se expresa en términos de volumen por unidad de masa y es conocido como volumen específico. Dicho cambio se incrementa conforme se adiciona carbón al hierro y con respecto al aumento de la temperatura del acero.

La contracción total de un acero colado es la suma de tres etapas: (1) la contracción de líquido, (2) la contracción durante la solidificación y (3) la contracción del sólido. La contracción líquida para un acero al carbono oscila entre 1.5 a 1.7 % de su volumen, mientras que la contracción que ocurre durante la solidificación, presenta un cambio aproximado del 1.5% del volumen. La contracción del sólido sólo varía entre 6.9 y 7.4% en volumen. Aunque, esta última contracción decrece conforme se incrementa el contenido de carbono en el acero [1].

III.4 Generación de esfuerzos durante la solidificación del acero

Los gradientes de temperatura y los cambios de fase (incluyendo a la solidificación y a la transformación en estado sólido) provocan gradientes de cambio de volumen y por lo tanto esfuerzos térmicos. Estos esfuerzos pueden ser calculados en cada parte del sistema mediante la determinación de la distribución de temperaturas y mediante la expansión térmica lineal del material.

Por otra parte, una de las consecuencias macroscópicas del flujo de calor que necesariamente ocurre durante la solidificación es la existencia de gradientes de temperatura en el metal que está solidificando. Estos gradientes críticos de temperatura, combinados con la contracción del metal sólido, aumentan la intensidad de esfuerzos dentro del mismo. Además, se ha encontrado que las transformaciones de fase que sufre el acero generan esfuerzos adicionales. Estos esfuerzos térmicos generados por los gradientes de temperatura no uniformes existentes en el sólido provienen del mismo proceso, ya que durante la solidificación se generan cambios de temperatura en la dirección longitudinal del sistema debido a la heterogeneidad en la rapidez de extracción de calor a lo largo de esta dirección.

Para Grill y sus colaboradores [6], los esfuerzos internos son provocados por cambios repentinos en los gradientes de temperatura y a su vez por los esfuerzos externos impuestos por los rodillos del sistema de enfriamiento secundario. Esto lo

concluyen estos investigadores al analizar el sistema en dos etapas. La primera fue un análisis térmico relacionado al flujo de calor y la segunda se refiere al estudio de la relación esfuerzo-resistencia del molde.

Para estimar los esfuerzos, el acero sólido fué tratado como un cuerpo elástico-plástico y la deformación fue calculada como: $\epsilon = \alpha \Delta T$, donde α es el coeficiente de expansión térmica lineal. Para la parte plástica de la deformación, se usaron las relaciones de plasticidad de Prandtl-Reuss. Con ello, fué posible correlacionar las grietas encontradas con las condiciones de colada.

Otros estudios fueron los realizados por Boby y Weiner [2] en donde se considera que los esfuerzos térmicos son producidos por los gradientes de temperatura. En este modelo se consideró que el metal es perfectamente elástico y que en el punto de fusión del metal se tiene cero esfuerzos; estos esfuerzos se incrementan linealmente conforme decrece la temperatura. Además, si por otra parte se considera que el metal es perfectamente plástico, entonces conforme se va deformando se produce trabajo de endurecimiento. De tal trabajo se encontró que en el enfriamiento se pueden incrementar los esfuerzos debido a la aparición de puntos calientes; es decir, si el material no es enfriado homogéneamente habrá partes en donde se genere un recalentamiento y por ende se propician los esfuerzos.

Sin embargo, para investigadores como Kinoshita et al. [7] la generación de esfuerzos se inicia en el molde, es decir, en la capa solidificada ya que hacen mención de que tal capa "no es lo suficientemente fuerte ni tiene el espesor idóneo". Además de que ésta está influida fuertemente tanto por la estructura dendrítica, como por la redistribución y precipitación de los solutos.

Ellos encontraron que las grietas internas se propagan a lo largo de la región interdendrítica en la capa, y así mismo demostraron [7] que ciertos especímenes, al recalentarse, cambian su estructura completamente respecto del espécimen originalmente solidificado.

Por otra parte, la transformación cristalina del hierro, de BCC a FCC, durante la reacción peritéctica se ha asociado con grandes cambios de volumen por contracción. Esto puede ser esencial para la evaluación de la susceptibilidad del acero a la formación de las grietas longitudinales durante la colada continua.

Para calcular la contracción ó expansión térmica en esta región de dos fases, en el acero, se requiere de conocer la densidad de cada una de las fases (ferrita- δ y austenita) como función de la temperatura y de la composición. Cuando se conocen estos valores se puede calcular la contracción en el acero mediante la ecuación siguiente [8]:

$$\rho = \frac{1}{\frac{A}{\rho_s} + \frac{(1-A)}{\rho_r}}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

donde A es la fracción volumínica de la fase delta, y ρ_δ y ρ_γ son la densidad de la ferrita delta y de la austenita, respectivamente. Para calcular la fracción volumínica de la fase delta se utiliza la regla de palanca sobre el diagrama de equilibrio de fases Fe-C. Usando esta ecuación Chandra et al. encontró un acero con un contenido de carbono de 0.15%, que transforma peritécticamente, presenta una contracción volumínica debido a la contracción térmica y a la transformación de fase, y esta última es de 3 a 4 veces mayor que la provocada por la temperatura. Por lo que, en general se puede considerar que en los aceros hipoperitéticos la contracción en los primeros estados de enfriamiento se debe a la transformación de fase

III.5 Resumen de resultados

La siguiente tabla muestra los diferentes tipos de grietas, las causas que las generan, los factores que influyen y la acción correctiva que se debe emplear.

Tabla 2. Información sobre grietas superficiales [1].

TIPO DE GRIETAS	CAUSA	FACTORES QUE INFLUYEN	ACCION CORRECTIVA
Longitudinal, grietas longitudinales a mitad de la cara.	Esfuerzos tensiles generados en el molde y en la parte superior de la zona de rociado.	<p>La frecuencia de la grieta incrementa por:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Nivel de carbono de 0.12% -Incremento de S y decremento de la relación de Mn/S -Variación o incremento de la rapidez de colada -Colada de planchones anchos -Condiciones del molde - enfriamiento inadecuado, oscilaciones irregulares en el molde, uso de polvos inadecuados en el molde, moldes gastados, romboides de los mismos. -Sobre-enfriamiento en la parte superior de la zona de rociado -Insuficiente soporte debajo del molde -Deficiente alineamiento entre el molde y el submolde en el sistema de soporte 	<p>Ajuste en las condiciones del molde asegurando un enfriamiento uniforme. Reducir enfriamiento en la zona superior del rociado y verificar el sistema de soporte del submolde</p>

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

TIPO DE GRIETAS	CAUSA	FACTORES QUE INFLUYEN	ACCION CORRECTIVA
Longitudinal, grietas en las esquinas	Enfriamiento no uniforme en la región de la esquina	Agrietamiento asociado con: -La distorsión como el uso del molde -Largos espacios en las esquinas en los moldes de plato -Altas temperaturas en el distribuidor -Alta rapidez de colada -Incorrecto montaje de la base del rodillo -Contenido del acero 0.17-0.25% de C, S>0.035%, P>0.035%	Paredes del molde de placa con cromo. Verificar el alineamiento y lubricación que sean uniformes
	En la esquina de los planchones grietas son causadas por pandeo de la cara angosta en el molde	Moldes largos y acero con 0.15 a 0.23% C empeorando las grietas	Verificar las condiciones de soporte del molde
Transversal, a mitad de la cara y grietas en las esquinas	Grandes gradientes de temperatura (200°C por cada 4 cm de espesor de la capa solidificada) en la superficie en la zona de rociado y esfuerzos con un desfavorable rango de temperatura, entre 900 y 700°C	Fuerte influencia por la composición del acero Al, V, Nb, Mn>1% siendo los elementos más importantes	Reducir el enfriamiento del rociado y haciéndolo tan uniforme como sea posible y minimizar los ciclos de enfriamiento/recalentamiento y mantener la temperatura superficial alrededor de 900°C
Grietas de estrella	Raspadura de cobre en el molde	Enfriamiento secundario	Paredes del molde de placa con cromo. Ajustar el alineamiento de la máquina

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

La Tabla 3 muestra las condiciones críticas que conducen a la formación de defectos.

Tabla 3. Condiciones críticas y defectos [2].

CONDICIONES CRITICAS	FORMACION DE DEFECTOS
Alrededor de 1340°C	Segregación de fósforo asociado con grietas internas. Película líquida en el proceso de solidificación. Baja ductilidad y resistencia.
Entre 900 y 700°C	Presencia de aluminio, niobio y vanadio. Baja ductilidad, precipitación de AlN
Presencia de películas líquidas	Baja resistencia y ductilidad, contenido de niveles altos de sulfuro, fósforo.
Conc. de fósforo de 0.039%	Reducción de resistencia y ductilidad. Con 0.017% no hay problema.
Incremento del azufre(S) de 0.025 a 0.035%	Reducción de hasta la mitad en las propiedades mecánicas
Temperatura de solidificación (1480°C), 0.2% de carbono en acero	Existencia de sulfuros en el líquido interdendrítico
Decremento de la ductilidad	Conforme decrece la rapidez de enfriamiento
Temperatura. de 1200 a 800°C	Zona de baja ductilidad, cuando Mn/S es pequeño.
Altos esfuerzos, deformaciones tensiles en la cara sólida, en la zona alta de temperatura	Formación de grietas
Enfriamiento secundario excesivo, alta temperatura de colada	Formación de grietas a mitad de la cara.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

CONDICIONES CRITICAS	FORMACION DE DEFECTOS
Intensidad del flux de agua en los rociadores, alineamiento de los rodillos debajo del acero y velocidad de colada	Formación de grietas centrales
Enfriamiento heterogéneo	Formación de grietas diagonales
Enfriamiento homogéneo	Minimización de la formación de grietas diagonales
Combinación de esfuerzos tensiles y deformaciones con: Enfriamiento de lo ancho de la cara . Presión ferrostática en lo angosto de la cara. Transformación de fase peritética. Fuerzas de fricción actuando en el plano transversal	Aumento de la formación de grietas en la superficie en puntos calientes
Aceros de 0.17 a 0.20% de carbono	Minimizar los esfuerzos, deformaciones a fracturas
Incremento de sobrecalentamiento. Contenido de P>0.030%,S>0.025% y 0.17%>C>0.24% ó C>0.60%	Incremento de grietas – romboides
Temperatura. 1200 a 800°C	Precipitación de gotas líquidas de FeS por lo que se debe introducir Mn para obtener un fase estable de MnS por lo que la relación de Mn/S debe ser grande.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

IV. Definición del problema:

Establecer las condiciones de operación óptimas para evitar la generación de grietas durante el proceso de colada continua del acero peritético.

V. Solución del problema:

Como se ha descrito previamente existen varios factores que promueven directamente la formación de grietas; uno de ellos es la composición del acero. Sin embargo, se ha encontrado un rango de composición que es muy favorable donde el acero debe contener de 0.17 a 0.20% de carbono (ver Figura 11), un porcentaje menor a 0.030% de fósforo y con respecto a azufre, éste debe permanecer abajo de 0.025%.

Los porcentajes tanto de azufre como de fósforo deben permanecer bajos para poder evitar la formación de sulfuros como así también la fragilidad del material. Una precaución que se debe tener en cuenta es que el acero debe estar limpio de toda impureza, ya que ésta puede ser el punto de iniciación de alguna grieta.

El problema de la formación de grietas radica principalmente en el sistema de enfriamiento secundario, ya que es aquí donde se generan los mayores gradientes

térmicos, la recalescencia, que es el resultado de un enfriamiento excesivo y una insuficiencia en la longitud del rociado y, por lo tanto, la generación de los mayores esfuerzos internos. Sin embargo, esto se puede evitar al lograr un enfriamiento homogéneo; esto, es que el rociado abarque todas las caras de la superficie del acero y se mantenga con una presión de rociado idónea. Para lograr un enfriamiento uniforme y constante, se debe procurar mantener la temperatura de la superficie del acero entre 1000 y 1100°C, en la zona de rociadores. Con lo anterior se puede obtener un perfil de enfriamiento ideal, en el cual la recalescencia al final de la zona de rociado tiene un intervalo máximo de 100°C (véase Figura 12). De esta forma se evita la formación de grietas. Sin embargo, las condiciones serán dependientes del sistema y del tipo de acero. Por otra parte, se establece que una mezcla de aire y agua en las boquillas sería muy benéfico; ya que se evitaría esa resistencia a la extracción de calor que provoca la película de vapor sobre la superficie que está solidificando.

Con respecto a los esfuerzos generados se sabe que estos son inducidos principalmente por los gradientes de temperatura y la transformación de fase; por lo que, se debe mantener primordialmente un buen control sobre el sistema de enfriamiento secundario; para así evitar los gradientes de temperatura severos. Es decir, se debe establecer una rapidez de enfriamiento lo más homogénea posible, para evitar los cambios súbitos de volumen en el interior del acero.

VI. Conclusión:

Se establecieron las condiciones críticas que generan las grietas durante la colada continua del acero. Destacándose el control que debe darse a los gradientes de temperatura y a las transformaciones de fase.

Esto es:

1. El intervalo de composición favorable para el acero se encuentra entre 0.17 y 0.20% de carbono, ya que con ésto se asegura la minimización de los esfuerzos y las posibles deformaciones hasta fractura.
2. El acero debe estar limpio de toda impureza.
3. Con un enfriamiento homogéneo durante el enfriamiento secundario se evitan gradientes térmicos elevados, la recalescencia y, por lo tanto, la generación de esfuerzos internos.
4. Una mezcla de aire y agua en las boquillas sería muy benéfica ya que se evitaría la resistencia a la extracción de calor que provoca la película de vapor formada sobre la superficie que se está solidificando.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Brimacombe J.K. and Samarasekera I.V. Fluid Flow and Heat Transfer in Steel Continuous-Casting Systems. *Advances in Transport Processes in Metallurgical Systems*. Elsevier Science Publishers, USA, pp 327-385, 1992.
- [2]. Brimacombe J.K., Agarwal P.K. Hibbins S., Prabhaker B. and Baptista L.A. Spray Cooling in the Continuous Casting of Steel. *Continuous Casting*. Iron and Steel Society of AIME, Vol. 2, pp 109-123, 1983.
- [3]. Brimacombe J.K. Design of Continuous Casting Machines Based on a Heat-Flow Analysis: State-of-the-Art Review. *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 15, No. 2, pp 163-175, 1976.
- [4]. Walker J. Boiling and the Leidenfrost Effect. <http://www.wiley.com/college/hrw> The Web Site for *Fundamentals of Physics* by Halliday, Resnick and Walker. 6th ed, Wiley Higher Education, 2001.
- [5]. Mizikar E.A. Spray Cooling Investigation for Continuous Casting of Billets and Blooms. *Continuous Casting*. Iron and Steel Society of AIME, Vol. 2, pp 125-132, 1983.
- [6]. Grill A., Sorimachi K. and Brimacombe J.K. *Metallurgical Transactions B*. Vol. 7B, pp 177-189, 1976.
- [7]. Junpei Konishi. *Modelling of the Formation of Longitudinal Facial Cracks in the Continuous Casting of Steel Slabs*. Thesis for the Master Degree. The University of British Columbia, Canada, 1996.

- [8]. Matsumiya T., Saeki T., Tanaka J. and Ariyoshi T. Mathematical Model Analysis on the Formation Mechanism of Longitudinal, Surface Cracks in Continuously Cast Slabs. Journal of Iron and Steel Institute. No. 68, Japan, pp 1782-1791, 1982.
- [9]. Welty J.R., Wicks Ch.E. y Wilson R.E. *Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa*. Editorial Limusa, México, 1982.
- [10]. Merton C. Flemings. *Solidification Processing*. Mc Graw-Hill, USA, 1974.
- [11]. Kohno T., Shima T., Kuwabara T., Yamamoto T., Wake M. and Tsuneoka A. Improvement of Surface Cracks by Air-Water Mist Cooling in Strand Casting. Continuous Casting. Iron and Steel Society of AIME, Vol. 2, pp 133-137, 1983.
- [12]. Brimacombe J.K. Crack Formation in the Continuous Casting of Steel. Continuous Casting. Iron and Steel Society of AIME, Vol. 2, pp 199-214, 1983.
- [13]. Brimacombe J.K. Formation of Longitudinal, Midface Cracks in Continuous-Cast Slabs. Continuous Casting. Iron and Steel Society of AIME, Vol. 2, pp 215-227, 1983.
- [14]. Brimacombe J.K., Hawbolt E.B. and Weinberg F. Formation of Off-Corner Internal Cracks in Continuous-Cast Billets. Continuous Casting. Iron and Steel Society of AIME, Vol. 2, pp 229-238, 1983.
- [15]. Kato T., Yamanaka A. and Watanabe T. Prevention of Transverse Cracking in Microalloyed Continuously Cast Slabs by Microstructure Control. Steelmaking Conference Proceedings, pp 345-349, 1997.

- [16]. El-Bealy M. Monotonic and Fluctuated Cooling Approaches in Secondary Cooling Zones During Continuous Casting. Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 36, No. 1, pp 49-56, 1997.

VIII. Figuras

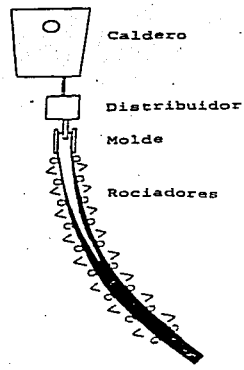


Figura 1. Esquema de una máquina de colada continua [1].

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

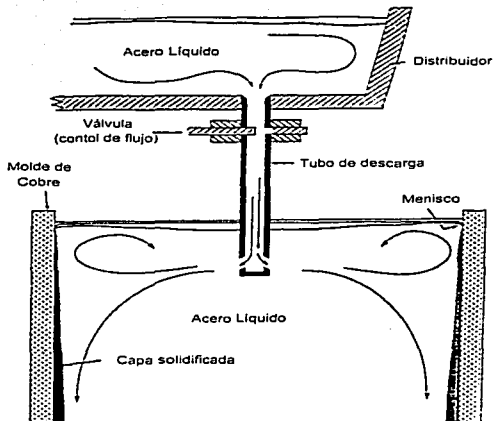


Figura 2. Representación de la capa solidificada en el molde [1].

FALLA DE ORIGEN

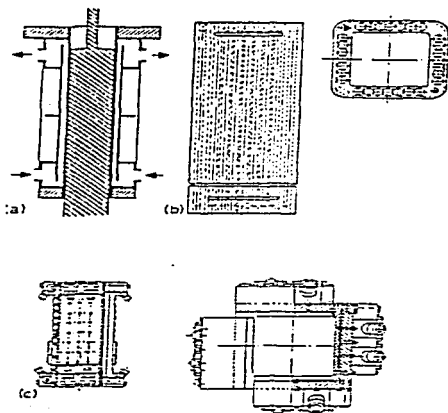
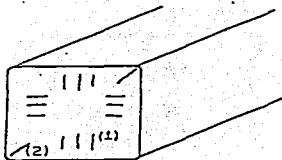


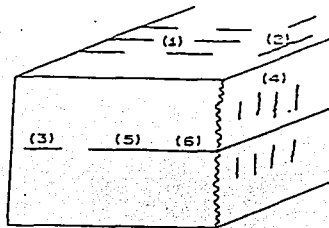
Figura 3. Tres tipos de moldes de la colada continua.
a)molde de tubo,b)molde de bloque,c)molde de plato [1].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Palanquilla

- 1) Grietas a mitad de la cara
- 2) Grietas romboide/diagonal



Plancha

- 1) Grietas superficiales en la sección transversal
- 2) Longitudinalmente, grietas a mitad de cara
- 3) Grietas de triple punto
- 4) Grietas a mitad de la cara
- 5) Grietas en línea central
- 6) Segregación central

Figura 4. Defectos encontrados en palanquillas y planchas relacionados con el sistema de enfriamiento secundario [2].

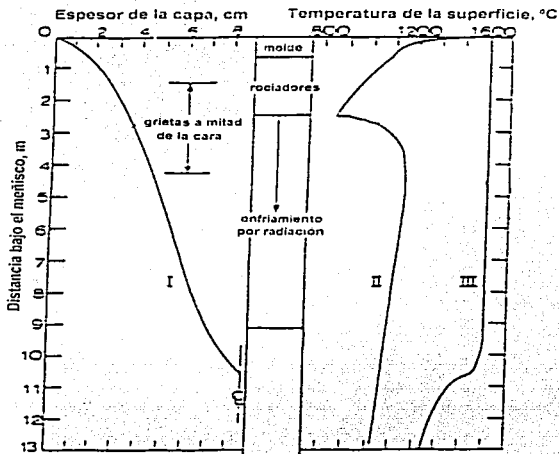


Figura 5. Perfil de enfriamiento. (I) temperatura a mitad de la cara (II) temperatura en la línea central (III) para una palanquilla de 172mm² colada a 22mm/s. Pronunciada recalcancia de la superficie bajo la zona de rociadores [2].

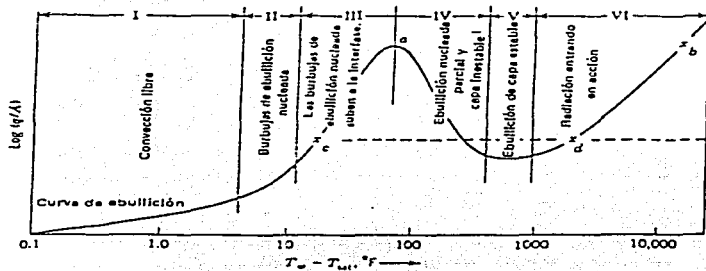


Figura 6. Ebullición de estanque de un alambre horizontal a presión atmosférica [9].

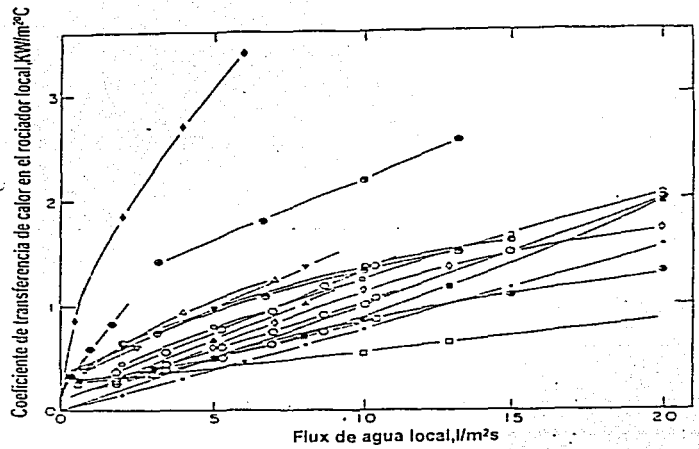


Figura 7. Influencia del flux de agua local sobre el coeficiente de transferencia de calor del rociado local [1].

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

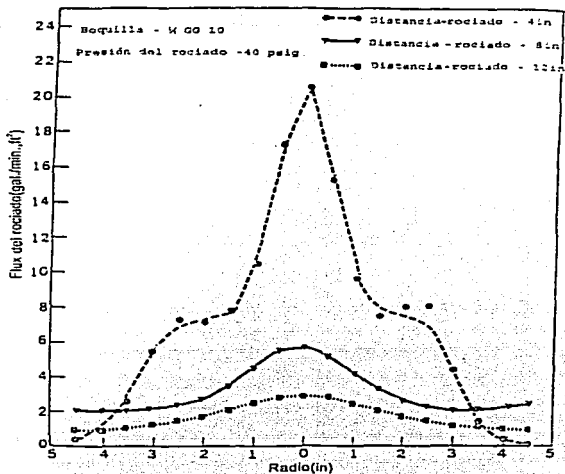


Figura 8. Efecto de la distancia de rociado sobre el perfil de rociado [5].

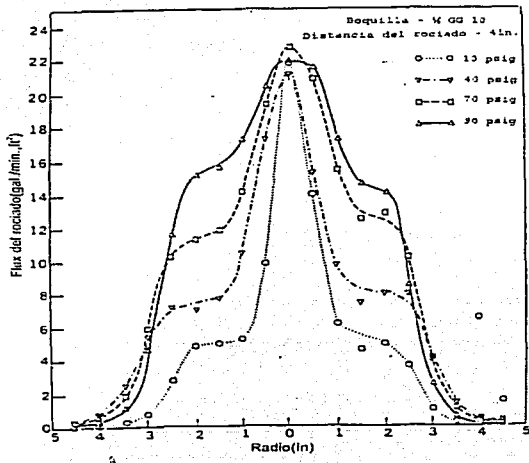


Figura 9. Efecto de la presión del agua sobre el perfil de rociado [5].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

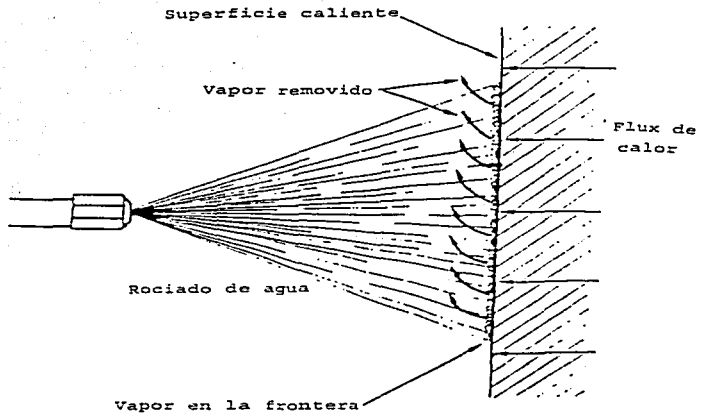


Figura 10. Representación del enfriamiento ideal por medio de una mezcla de agua y aire [5].

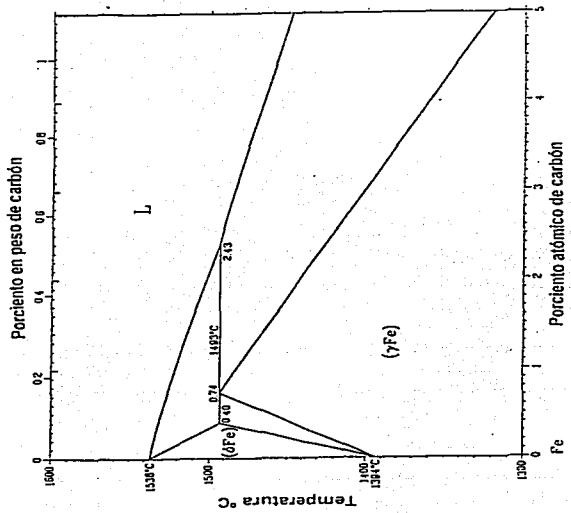


Figura.11. Diagrama de fases del hierro-carbono [7]

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

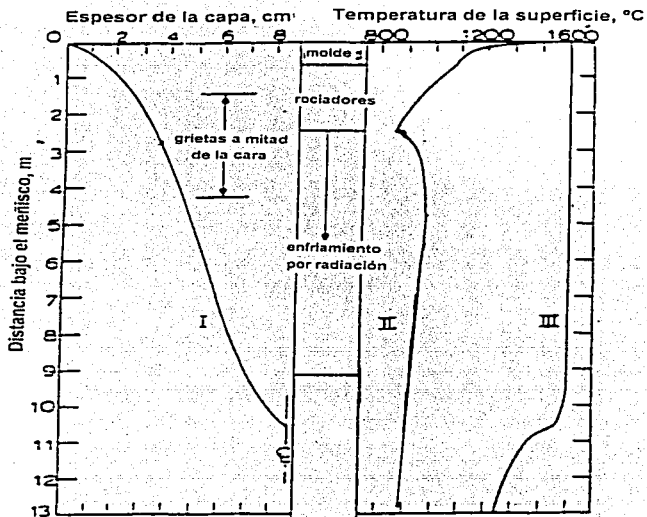


Figura.12 Perfil de enfriamiento. (I) temperatura a mitad de la cara (II) temperatura en la línea central (III) para una palanquilla de 172 mm² colada a 22 mm/s. No hay una pronunciada recalentamiento de la superficie bajo la zona de rociadores [2].