



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

CARACTERIZACION DE LA EXTRACION DE CALOR EN
PLACAS DE ACERO CON BOQUILLAS DE AGUA Y NIEBLA
PARA COLADA CONTINUA.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A N :

ALLAN RAINIER ARENAS SERRANO

JOSE GUADALUPE CARRANZA VEGA



MEXICO, D. F.



2005

EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUIMICA

m344198



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Jurado asignado:

Presidente	Prof. José Bernardo Hernández Morales
Vocal	Prof. José Antonio Barrera Godínez
Secretario	Prof. Gerardo Aramburo Pérez
1er. Suplente	Prof. Elisa Fabila Montoya
2o. Suplente	Prof. Héctor Javier Vergara Hernández

Sitio donde se desarrolló el tema:

LABORATORIO 008 "TRATAMIENTOS TÉRMICOS", EDIFICIO "D",
FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM.

Asesor del tema:



DR. JOSÉ BERNARDO HERNÁNDEZ MORALES

Sustentantes:



ALLAN RAINIER ARENAS SERRANO

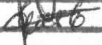


JOSÉ GUADALUPE CARRANZA VEGA

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

NOMBRE: José Guadalupe Carranza Vega

FECHA: 19 Mayo - 2005

FIRMA: 

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

NOMBRE: Allan Rainier Arenas Serrano

FECHA: 14 Mayo 2005

FIRMA: 

Dedicatorias:

Dedicamos este trabajo de tesis a nuestros padres, hermanos y familia por su apoyo incondicional a lo largo de estos años, gracias a su comprensión y ayuda están ustedes leyendo estas líneas.

Agradecimientos:

Agradecemos a todos los profesores, amigos y compañeros que colaboraron directa o indirectamente en la realización de este trabajo de tesis. Sus comentarios, sugerencias y ayuda fueron determinantes para la conclusión de esta etapa en nuestras vidas.

Gracias Pueblo de México!

Índice

Lista de Figuras	III
Lista de Tablas	V
Resumen	1
Objetivos	3
Capítulo1 Introducción	4
1.1 Colada Continua.....	4
1.2 Sistema secundario de enfriamiento en Colada Continua.....	4
Capítulo2 Antecedentes	8
2.1. Modelo matemático del IHCP.....	10
2.2 Modelo matemático del DHCP.....	12
Capítulo 3. Desarrollo experimental	14
3.1 Equipo.....	14
3.2 Condiciones experimentales.....	15
3.3 Experimentos en frío.....	17
3.4 Experimentos en caliente.....	20
3.4.1 Instrumentación del sistema.....	20
3.4.2 Obtención de las historias térmicas.....	22
3.4.3 Procesamiento de Datos.....	23
Capítulo 4. Resultados y discusión	26
4.1 Caracterización de las boquillas.....	26
4.2 Distribución de densidad de impacto.....	26
4.3 Caracterización de la extracción de Calor.....	30

4.4 Respuesta del equipo de adquisición.....	30
4.5 Respuesta pérmica procesada.....	31
4.6 Resultados del problema IHCP.....	34
4.7 Resultados del problema directo.....	46
Capitulo 5 Conclusiones.....	55
Apéndice IHCP.....	57
Glosario.....	61
Bibliografía.....	63

Lista de Figuras

Figura 1.1 Esquema de una planta de laminación de acero.....	4
Figura 1.2 Diferentes tipos de disposición de las espreas.....	6
Figura 2.1 Esquema representativo del DHCP para el sistema bajo estudio	12
Figura 3.1 Boquillas de niebla 6.5-90 y 8-90.....	17
Figura 3.2 Boquillas de aire 632.882.16CC y 460.884.	17
Figura 3.3 Esquema del equipo empleado	19
Figura 3.4 Distribución cartesiana de la rejilla 1.....	20
Figura 3.5 Distribución cartesiana de la rejilla 2	20
Figura 3.6 Disposición geométrica de los termopares.....	21
Figura 3.7 Instrumentación de la placa de acero. Dimensiones de las entradas de los tornillos de sujeción para termopares.....	22
Figura 3.9 Tratamiento de los datos obtenidos en calientes.....	24
Figura 4.1 Distribución de Volumen de agua para la boquilla 6.5-90.....	27
Figura 4.2 Distribución de densidad de impacto para la boquilla 6.5-90	27
Figura 4.3 Volumen para la boquilla 460.884.....	28
Figura 4.4 Densidad de impacto para la boquilla 460.884.....	28
Figura 4.5 Historial térmico original y filtrado+interpolado en la prueba TRAN 12-CH1.....	30
Figura 4.6 Comparación de las respuestas térmicas para los termopares CH1 y CH4 utilizando la boquilla 632.882.16CC	31
Figura 4.7 Comparación de las historias térmicas de enfriamientos con las boquillas 632.882.16CC TRAN 12 y 460.884 TRAN 16	32
Figura 4.8 Historias térmicas obtenidas por el IHCP en la superficie y en el interior de la placa en TRAN 13 CH1 Boquilla 632.882.16CC.....	35
Figura 4.9 Historias térmicas superficiales e interiores producido por la boquilla 6.5-90. Experimento TRAN 1.....	36
Figura 4.10 Efecto de la variación de r en la respuesta térmica experimento TRAN 13-CH1	37

Figura 4.11 Densidad de flujo de calor como función de temperatura de la superficie en la prueba TRAN13-CH1 variando r	38
Figura 4.12 Mapa de densidad de impacto de agua (L/m^2s) para la prueba de enfriamiento TRAN 13. Boquilla Lechler 632.882.16CC.....	39
Figura 4.13 Flujo de calor como función de la temperatura de la superficie en la prueba TRAN 13 (CH1, CH3 y CH4), variando r	39
Figura 4.14 Mapa de densidad de impacto en el experimento TRAN5 boquilla 6.5-90.....	41
Figura 4.15 Videoimagen para TRAN 5 a dos segundos de iniciado el enfriamiento por esreado.....	41
Figura 4.16 Densidad de flujo de calor vs. Temperatura de superficie en el experimento TRAN 5. Boquilla 6.5-90.....	42
Figura 4.17 Mapa de densidad de impacto de agua utilizado en la prueba TRAN 17. Boquilla 460.884.....	44
Figura 4.18 Videoimagen para TRAN 17. Transcurridos 2 segundos después del enfriamiento por esreado.....	44
Figura 4.19 Densidad de flujo de calor como función de la temperatura de la superficie. En la prueba TRAN 17. CH1, CH2 y CH4. variando r	45
Figura 4.20 Comparación de las historias térmicas experimentales, calculadas con el DHCP e IHCP. Prueba TRAN 17 CH1- CH2. Boquilla 460.884.....	47
Figura 4.21 Comparativo entre las respuestas térmicas para CH1 y CH3 para TRAN1. Boquilla 6.5-90.....	48
Figura 4.22 % de error en función del tiempo para los datos calculados por el programa CONTA.....	49
Figura 4.23 Polinomios de ajuste en 4° y 6° orden para CH1 de TRAN 1.....	51
Figura 4.24 Segmento de la curva de flux de calor de TRAN 1 CH1 en el rango de temperaturas de trabajo en la zona secundaria de enfriamiento.....	53
Figura A.1 Representación esquemática del problema inverso de conducción De calor en un sistema de flujo de calor 1D, compuesto.....	57
Figura A.2 Temperaturas experimentales medidas para puntos x_j y tiempos t_j	58

Lista de tablas

Tabla 3.1 Condiciones de operación de las boquillas durante los experimentos en el laboratorio.....	15
Tabla 4.1 Densidades de impacto máximas y mínimas de cada boquilla.....	29
Tabla 4.2 Densidad de flujo de calor (flux) máximos y mínimos en todas las boquillas a una temperatura de 800°C.....	50
Tabla 4.3 Polinomios que caracterizan las curvas de densidad de flujo de calor en la posición de máxima densidad de impacto.....	52

Resumen

La colada continua es un proceso intermedio en la manufactura de piezas de acero, cobre y otros metales y aleaciones. El proceso involucra varios pasos, como son la solidificación del metal en el molde, su enfriamiento en la zona de enfriamiento secundario, el paso del metal por una serie de rodillos que le darán su forma definitiva, etc.

El enfriamiento secundario en la colada continua utiliza una serie de espreas dispuestas en diversas zonas. Cada una de estas espreas tiene características distintas y es una parte esencial dentro del proceso, pues la fase final de la solidificación se lleva a cabo durante esta etapa del proceso. Una esprea es en esencia una boquilla que produce un rocío por medio de la alimentación de un fluido, en este caso de agua o agua-aire. Las variables que se emplean en la operación de dichas boquillas son la presión y caudal del fluido, además de la distancia entre la boquilla y la superficie del planchón.

El objetivo de este trabajo es caracterizar la extracción de calor producida por boquillas dispersoras de agua y de niebla (agua-aire). La caracterización de estas espreas ayudará a evaluar las condiciones de enfriamiento de los planchones, para obtener beneficios en el proceso tales como el aumento de la velocidad de colada, o el control de la capa de óxido que se forma en la superficie de los planchones.

La metodología empleada se basa en una serie de experimentos que tienen como finalidad la determinación de densidad de impacto para estimar la capacidad de extracción de calor de las boquillas caracterizadas.

Los resultados obtenidos muestran que existe una zona de alta densidad de impacto en la cual se obtiene la máxima extracción de calor. Esta zona está localizada justo al centro de la huella capturada. El resto de la huella está

compuesta por zonas donde la incidencia de agua es menor. La forma de las huellas consta de semicírculos concéntricos en el caso de la boquilla 460.884 y elípticas para el resto de las boquillas empleadas.

Las curvas de flux de calor contra tiempo se obtuvieron por medio del programa CONT1 basado en el IHCP. Para validar los resultados obtenidos por este programa se utilizó el código CONTA basado en el DHCP. Este tiene como finalidad aplicar la condición de frontera obtenida por el IHCP en la solución convencional de la ecuación de calor.

Ajustes polinomiales de distintos ordenes fueron aplicados a las curvas de flux de calor. Los ajustes fueron realizados con el fin de encontrar una ecuación que representara el fenómeno estudiado. Se determino que el ajuste es aplicable únicamente a condiciones específicas de operación y a un valor particular de densidad de impacto.

Objetivos

- Caracterizar la extracción de calor de una placa de acero enfriada por esparado.
- Evaluar la distribución de volumen y densidad de impacto de las boquillas empleadas, sujetas a distintas condiciones de operación.
- Conocer el efecto de la distribución de densidad de impacto sobre la extracción de calor en la placa de acero.
- Determinar las condiciones experimentales bajo las cuales se logra una extracción de calor mas efectiva.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Colada Continua

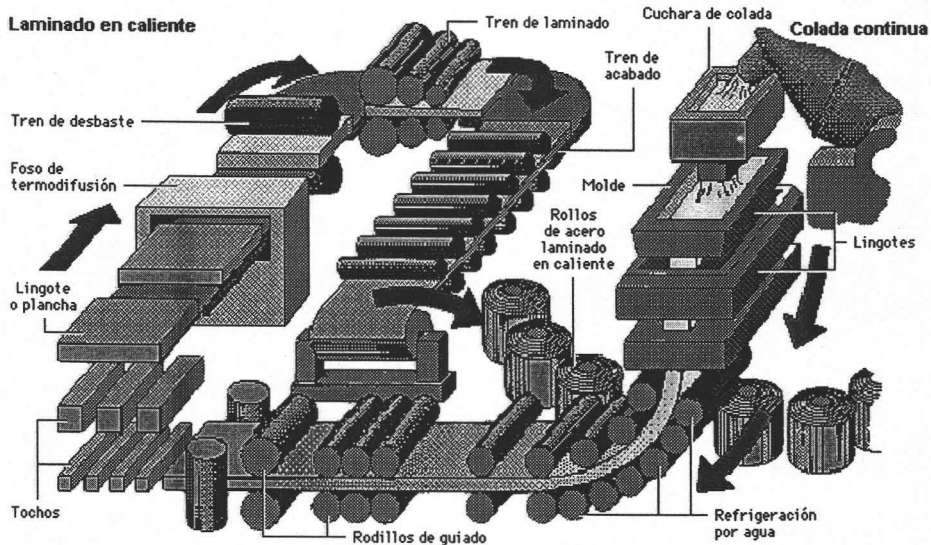


Figura 1.1 Esquema de una planta de laminación de acero [1].

En la Figura 1.1 se observa un esquema del proceso de colada continua, el cual permite fabricar productos semi-terminados tales como tochos, lingotes o planchas. El metal líquido se vierte en moldes abiertos, en los que ocurre la solidificación del metal. A la salida del molde, el metal se guía mediante rodillos refrigerados por agua. Entre cada rodillo se localizan las zonas de esperado. Esto constituye el sistema de enfriamiento secundario. En seguida, una serie de rodillos de guiado va conduciendo y dando la forma a la pieza acero, la cual puede ser lamina, planchón o varilla.

1.2 Sistema secundario de enfriamiento en Colada Continua

El propósito del sistema secundario de enfriamiento es mantener la extracción de calor y la solidificación iniciada en el molde mediante cambios controlados en la temperatura de superficie, con el fin de evitar la generación de tensión superficial

capaz de causar fracturas. Alrededor del 50 al 60 por ciento del total del calor contenido es extraído por el sistema secundario de enfriamiento [2].

El sistema secundario de enfriamiento se encuentra formado por una serie de boquillas a las que se alimenta el medio de enfriamiento. Las boquillas son generalmente metálicas con apariencia diversa. Las espreas forman una cortina de agua o bien de una mezcla agua-aire sobre la palanquilla, la cual concluye su solidificación durante el sistema secundario de enfriamiento [1].

Las espreas están agrupadas en zonas, de 3 hasta 6, que se subdividen en subzonas [2]; por lo general cada zona está controlada de manera independiente en cuanto a las condiciones de flujo de agua, presión de aire o ángulo de salida. Este ángulo de salida puede tener diversas formas: la típica de abanico (con diversas aperturas), de cono e incluso algunas prácticamente amorfas [5]. Típicamente, la zona de espreas es de alrededor de seis metros para el caso de palanquillas. En el pasado los volúmenes de agua que manejaban las espreas eran por encima de 2 litros por cada kg de acero [1], especialmente cuando el producto de la colada eran placas. En el momento en que se lograron observar las ventajas que en cuestión de acabado superficial podía ofrecer un buen sistema secundario de extracción de calor se comenzó a emplear en otros productos de colada. La segregación que se llegaba a presentar en las placas durante su solidificación fue parcialmente controlada por medio del rociado [1].

La primera colada continua de cabeza baja o SLH por sus siglas en inglés comenzó a operar en forma de planta piloto en 1964 en el Mannesmannrohren-Werke en Duisburg-Huckingen. A escala industrial la primera máquina de colada continua entró en operación en 1967. Estas fueron diseñadas con espreas a base de agua con volúmenes de 0.5 a 0.8 litros por kg. de acero, lo cual en ese momento era considerado como un consumo bajo [1].

En las primeras SLH, los circuitos de enfriamiento poseían un arreglo en el cual las espreas se encontraban separadas, y los requerimientos de consumo se encontraban determinados por la velocidad del tren y el tipo de acero.

La forma en que se desarrolla el enfriamiento secundario puede ser denotada por el número de zonas de espreas y por el tipo de espreas que en esas zonas existen. En algunos casos se tienen múltiples espreas con ángulos de abertura del abanico muy cerrados, o una o un par de espreas con un abanico muy abierto. El número de espreas y la apertura del abanico de las mismas por lo general corresponderá a una zona determinada durante el proceso de enfriamiento, siendo las de ángulos cerrados utilizadas al principio y las de ángulo más abierto las que se encontrarán en las últimas zonas del sistema de enfriamiento secundario (Figura 1.2).

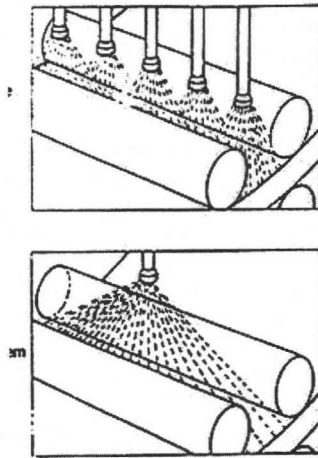


Figura 1.2 Diferentes tipos de disposición de las espreas [5].

Dependiendo de la intensidad del sistema secundario de enfriamiento, se puede llegar a estados de subenfriamiento y recalentamiento, los cuales son un factor en las marcas de la coraza o exterior de la palanquilla. El gradiente de temperatura entre cada una de las zonas de espreas puede llegar a ser tan grande como unos

200°C o más, dependiendo de los volúmenes de agua que se introduzcan al sistema [2].

Cuando se desarrolló el sistema secundario de enfriamiento, este consistía únicamente de agua. Al comienzo de 1974, el sistema de enfriamiento aire-agua fue desarrollado por Mannesmann [1]. El principio del sistema de enfriamiento aire-agua consiste en alimentar las boquillas por dos tomas distintas; una para el agua y una para el aire, con la finalidad de que se mezclen prácticamente a la salida de la boquilla. Todas las boquillas de rociado tienen grandes longitudes, en lo que se le podría denominar el cañón de la esprea. La relación de presión de aire con respecto al gasto de agua es variable.

El rango de evaporación del agua es dependiente de variables tales como la distancia que existe entre la boquilla y el metal, la presión con la cual sale la mezcla de fluidos, la apertura del ángulo de la boquilla, etc [2].

Capítulo 2. Antecedentes

En los procesos metalúrgicos donde existe transferencia de calor se pueden encontrar diversos mecanismos de transporte. En el caso de la extracción de calor en el sistema secundario de enfriamiento en colada continua el enfriamiento se lleva a cabo rociando el medio enfriamiento sobre la pieza de trabajo, obteniéndose una alta rapidez de enfriamiento. Esta rapidez de enfriamiento se debe al impacto de las gotas formadas en la boquilla; estas gotas se renuevan constantemente, por lo que generan una extracción de calor eficiente [3,7].

Cuando un metal caliente es enfriado por un líquido vaporizable, la extracción de calor varía conforme la temperatura de la superficie de la pieza disminuye [3].

Los mecanismos que ocurren durante el enfriamiento de la superficie de un planchón durante el sistema secundario de enfriamiento son [7]:

- 1 Contacto de las primeras gotas subenfriadas con la superficie caliente. Si la temperatura de la superficie se encuentra por arriba de la temperatura de ebullición del fluido entonces se formará una película de vapor sobre la superficie.
- 2 Si la energía cinética de las gotas no es lo suficientemente elevada, la película de vapor hará las funciones de una barrera que impedirá que las gotas sigan impactando la superficie. En ese momento la extracción de calor se realizará a través de la película de vapor.
- 3 Con la disminución de la temperatura de superficie, el espesor de la película de vapor disminuirá a tal grado que la energía cinética de las gotas podrá ser suficiente para penetrar la película de vapor. La temperatura a la que ocurre este cambio depende de las condiciones de rociado y se le denomina como el punto de *Leidenfrost*.

- 4 A temperaturas inferiores al punto de *Leidenfrost* la cantidad de gotas en contacto con la superficie será mayor con lo que generará una mayor extracción de energía y por tanto una mayor rapidez de enfriamiento.
- 5 El incremento en la rapidez de enfriamiento se mantiene hasta el régimen de vaporización.
- 6 Con la disminución de la temperatura de superficie, la evaporación del fluido de enfriamiento termina, y el mecanismo de extracción de calor es la convección con el medio de enfriamiento.

La energía cinética y el tamaño de las gotas dependen principalmente de la boquilla y las condiciones de operación de la misma. En general gotas pequeñas tienen poca energía cinética (poca masa). Las gotas grandes tienen elevada energía cinética, sin embargo, su relación superficie-volumen es pequeña por lo que el área del medio de temple en contacto con la superficie será baja y habrá una extracción de calor deficiente. Las densidades de flujo de calor mas grandes se obtienen con gotas que poseen la energía cinética mínima para cruzar la película de vapor y una relación área-volumen lo suficientemente grande como para que el área del medio de enfriamiento en contacto con la superficie caliente sea lo mayor posible.

En el caso de las boquillas de niebla se busca obtener gotas pequeñas con suficiente energía cinética para cruzar la película de vapor. El efecto del aire durante el esparido es el de generar gotas muy finas, y al mismo tiempo, este mismo aire ayudará a romper la película de vapor y proyectar las finas gotas de agua contra la superficie caliente [15].

La densidad de flujo de calor o el coeficiente de transferencia de calor son una medida de la intensidad de extracción de calor a través de la superficie de la pieza de trabajo. Los principales factores que afectan o modifican la extracción de calor son:

- 1) El tipo y número de las boquillas
- 2) La posición de las boquillas con respecto a la pieza de trabajo
- 3) La presión, el flujo y la velocidad del medio de enfriamiento
- 4) Las dimensiones de la zona a enfriar
- 6) La densidad de impacto del medio de enfriamiento

Para caracterizar la extracción de calor producida por las boquillas se ha elegido hacer uso del modelo matemático del problema inverso de conducción de calor o IHCP por sus siglas en inglés y apoyarse en el problema directo de conducción de calor DHCP para validar la condición de frontera térmica.

2.1. Modelo matemático del IHCP

El problema directo de conducción de calor (DHCP) en sólidos contempla la resolución de la ecuación general de energía para obtener historiales de temperatura en cualquier punto del sólido en función del tiempo y la posición. Para ello se debe contar con la información del sistema: geometría, propiedades termofísicas, ecuación que representa al fenómeno, la condición inicial y de frontera, así como los términos de generación de calor.

El IHCP es el cálculo del flux de calor y de la temperatura en la superficie de un sólido, utilizando únicamente la medición de temperaturas en el interior de la pieza, considerando además que las propiedades termofísicas del cuerpo en cuestión son variables con la temperatura. Téngase en cuenta que en el DHCP, el flux de calor en la superficie del sólido representa a la condición de frontera necesaria para obtener el perfil de temperatura en un punto cualquiera; en el

problema inverso se parte precisamente de un perfil de temperatura experimental para determinar la condición de frontera del sistema (flux de calor). Debido al carácter no lineal del IHCP, la solución del problema inverso de conducción de calor se realiza numéricamente (ver Apéndice: solución del IHCP).

El sistema presenta transferencia de calor en tres dimensiones, pues el enfriamiento a lo largo y ancho de la placa no es homogéneo, generando gradientes de temperatura. No obstante, en este trabajo se considera que la placa se puede subdividir en pequeñas regiones con flujo unidimensional.

El sistema a modelar se muestra en la figura 2.1. Este sistema es unidimensional, pues se considera que la placa está aislada por todas las caras excepto la cara por la cual se lleva a cabo el enfriamiento por esparado y que las propiedades termofísicas del material son función de la temperatura. De esta manera, la ecuación representativa del sistema es:

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2.1)$$

Las condiciones de frontera a las que esta sujeto el sistema bajo estudio son:

C.F.1. En el extremo aislado de la placa ($x = 0$):

$$-k \left. \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (2.2)$$

C.F. 2. En el extremo expuesto al impacto de agua $x = E$

$$-k \left. \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right|_{x=E} = q_0(x,t) = ? \quad (2.3)$$

C.I. En la posición $x = x_i$, al tiempo $t = 0$, la temperatura es la temperatura inicial T_0 .

$$T(x,0) = T_0 \quad (2.4)$$

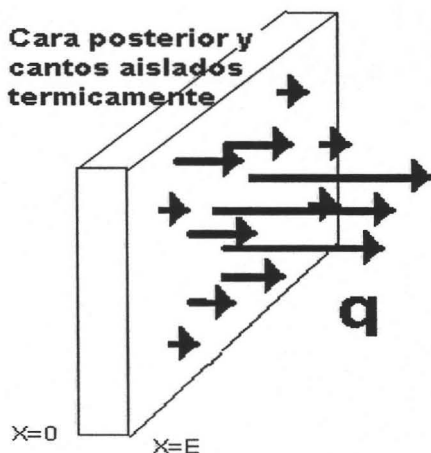


Figura 2.1 Esquema representativo del sistema bajo estudio.

Debido a que se consideran propiedades termofísicas en función de la temperatura y a que el problema inverso IHCP es un problema mal planteado ya que no existe unicidad en su solución, este problema requiere de una solución numérica.

2.2 Modelo matemático del DHCP

Para el caso del enfriamiento por esparado durante la colada continua el modelo matemático representativo es la ecuación general de energía Ec.2.5 :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.5)$$

Si se considera que: 1) en el sistema no existe trabajo mecánico que genere calor, 2) el material no presenta transformación de fase (se empleó acero AISI 304), 3) propiedades termofísicas isotrópicas pero dependientes de la temperatura, 4) flujo de calor unidimensional; la ecuación representativa del sistema en coordenadas rectangulares es:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2.6)$$

En la condición inicial, la placa se encuentra a una temperatura homogénea T_0 :

$$\text{CI: a } t = 0 \quad T(x, 0) = T_0 \quad (2.7)$$

Las condiciones de frontera del sistema son:

$$\text{C.F.1.} \quad -k \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad (2.8)$$

$$\text{C.F.2.} \quad -k \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=E} = f(T \text{ sup}) \quad (2.9)$$

Capítulo 3. Desarrollo experimental

En este capítulo se detalla la metodología de trabajo experimental que se utilizó para la caracterización de las espumas agua – niebla y el tratamiento de los datos experimentales.

Los objetivos del desarrollo experimental son la obtención de volúmenes, densidades de impacto e historias térmicas para cada boquilla empleada para determinar la extracción de calor en las placas de acero, además de la implementación de una metodología que proporcione reproducibilidad y confiabilidad en los resultados obtenidos en la experimentación.

3.1 Equipo

Experimentos en frío:

- Boquillas de niebla: *Master-Cooler*, 6.5-90 y 8-90 marca *CasterJet*.
- Boquillas de agua Lechler 632.884.16CC y 460.884
- Bomba de agua (sumergible) modelo E460ME1000-500
- Bomba de agua marca Kellog's de 1Hp
- Compresora de aire de 500 L, marca EVANS de 10 Hp
- Sistema de contenedores de PVC de 14" de diámetro
- Contenedor de 1000 L
- Rejillas de acrílico instrumentadas con mangueras y contenedores de 0.5 L
- Manómetro analógico
- Flujómetro digital
- Tubería de acero galvanizado de 1" y 1.5"

Experimentos en caliente:

- Placa de acero AISI 304 de 10 x 17 cm
- Termopares tipo *K* de punta descubierta
- Cable de extensión enchaquetado de acero AISI 304
- Horno de resistencias, Linderberg 56963 Crucible Furnace de 6.800 Kw
- Adquisidor de datos marca IOTECH mod. Temp. Scan/1100
- Software Chart View

3.2 Condiciones experimentales

Las boquillas fueron caracterizadas en base a condiciones de operación similares a las empleadas industrialmente. Las condiciones específicas empleadas para la caracterización de cada una de las boquillas aparecen en la tabla siguiente.

Tabla 3.1 Condiciones de operación de las boquillas durante los experimentos en el laboratorio.

Boquilla 6.5-90			
Prueba 5 (impacto)		TRAN 5 (enfriamiento)	
$P_a = 2.5 \text{ kg/cm}^2$	$P_w = 9 \text{ kg/cm}^2$	$P_a = 2.3 \text{ kg/cm}^2$	$P_w = 9.5 \text{ kg/cm}^2$
$Q_a = 500 \text{ g/min}$	$Q_w = 8.1 \text{ gpm}$	$Q_a = 500 \text{ g/min}$	$Q_w = 8.1 \text{ gpm}$
Prueba 6 (impacto)		TRAN 6 (enfriamiento)	
$P_a = 3.5 \text{ kg/cm}^2$	$P_w = 9 \text{ kg/cm}^2$	$P_a = 3.5 \text{ kg/cm}^2$	$P_w = 9.3 \text{ kg/cm}^2$
$Q_a = 870 \text{ g/min}$	$Q_w = 7.59 \text{ gpm}$	$Q_a = 870 \text{ g/min}$	$Q_w = 7.59 \text{ gpm}$

Boquilla 8-90			
Prueba 1(impacto)		TRAN 1(enfriamiento)	
$P_a = 2.7 \text{ kg/cm}^2$	$P_w = 11.5 \text{ kg/cm}^2$	$P_a = 2.5 \text{ kg/cm}^2$	$P_w = 11.3 \text{ kg/cm}^2$
$Q_a = 302 \text{ g/min}$	$Q_w = 10.2 \text{ gpm}$	$Q_a = 290 \text{ g/min}$	$Q_w = 10.2 \text{ gpm}$
Prueba 4(impacto)		TRAN 4(enfriamiento)	
$P_a = 4 \text{ kg/cm}^2$	$P_w = 10.4 \text{ kg/cm}^2$	$P_a = 4 \text{ kg/cm}^2$	$P_w = 10.2 \text{ kg/cm}^2$
$Q_a = 820 \text{ g/min}$	$Q_w = 9 \text{ gpm}$	$Q_a = 790 \text{ g/min}$	$Q_w = 9 \text{ gpm}$

Boquilla Master-Cooler			
Prueba 14(impacto)		TRAN 14(enfriamiento)	
$P_a = 2.5 \text{ kg/cm}^2$	$P_w = 5.5 \text{ kg/cm}^2$	$P_a = 2.5 \text{ kg/cm}^2$	$P_w = 11.3 \text{ kg/cm}^2$
$Q_a = 650 \text{ g/min}$	$Q_w = 9.48 \text{ gpm}$	$Q_a = 290 \text{ g/min}$	$Q_w = 10.2 \text{ gpm}$
Prueba 15(impacto)		TRAN 15(enfriamiento)	
$P_a = 3 \text{ kg/cm}^2$	$P_w = 5.5 \text{ kg/cm}^2$	$P_a = 3 \text{ kg/cm}^2$	$P_w = 5.7 \text{ kg/cm}^2$
$Q_a = 900 \text{ g/min}$	$Q_w = 9 \text{ gpm}$	$Q_a = 890 \text{ g/min}$	$Q_w = 9.53 \text{ gpm}$

Boquilla 632.882.16CC			
Prueba 12(impacto)		TRAN 12(enfriamiento)	
$P_w = 9 \text{ kg/cm}^2$		$P_w = 9 \text{ kg/cm}^2$	
$Q_w = 7.64 \text{ gpm}$		$Q_w = 7.64 \text{ gpm}$	
Prueba 13(impacto)		TRAN 13(enfriamiento)	
$P_w = 11.0 \text{ kg/cm}^2$		$P_w = 11.0 \text{ kg/cm}^2$	
$Q_w = 9.0 \text{ gpm}$	$t = 15 \text{ s}$	$Q_w = 9.0 \text{ gpm}$	

Boquilla 460.884	
Prueba 16(impacto) $P_w = 5.1 \text{ kg/cm}^2$ $Q_w = 6.1 \text{ gpm}$	TRAN 16(enfriamiento) $P_w = 5.1 \text{ kg/cm}^2$ $Q_w = 6.1 \text{ gpm}$
Prueba 17(impacto) $P_w = 8.2 \text{ kg/cm}^2$ $Q_w = 7.4 \text{ gpm}$ $t = 15\text{s}$	TRAN 17(enfriamiento) $P_w = 8.2 \text{ kg/cm}^2$ $Q_w = 7.4 \text{ gpm}$

3.3 Experimentos en frío

Para la caracterización de la extracción de calor fue necesario conocer los patrones de flujo de las espreas de enfriamiento, esto es, saber las características del flujo, la forma y ancho de la huella y, el parámetro más importante, la densidad de impacto de agua, que es el volumen de agua capturado en un intervalo conocido de tiempo.



Figura 3.1 Boquillas de niebla 6.5-90 y 89-0.



Figura 3.2 Boquillas de aire 632.882.16CC y 460.884.

Las boquillas utilizadas para la realización de este trabajo fueron las boquillas de niebla Master-Cooler, Casterjet 6.5-90 y 8-90 (Figura 3.1) y las boquillas de agua 632.882.16CC y 460.884 (Figura 3.2) con patrones de flujo en forma de abanico a diversos ángulos para las espreas de niebla y la boquilla de agua 632.882.16CC, y en forma cónica para la boquilla 460.884. Las condiciones bajo las que fueron caracterizadas son similares a las utilizadas industrialmente en HYLSA S.A. (incluyendo condiciones con las que se cree que pueda obtenerse una mayor extracción de calor que en las condiciones actuales).

La caracterización de las boquillas se hizo empleando 2 rejillas para la captura de agua. Las rejillas consistían de un marco de acrílico el cual tenía celdas en forma cuadrada o circular, dependiendo de la rejilla. La rejilla 1 tenía las mismas dimensiones que la placa de acero a emplear, mientras que la rejilla 2 era más grande en dimensiones, pero sus celdas eran más pequeñas. Cada celda se conectaba de forma independiente a mangueras que a su vez conducían el agua captada por cada una de las celdas a contenedores transparentes de plástico.

Para el espreado de agua se utilizó una bomba vertical sumergible colocada verticalmente en contenedores de PVC, los cuales eran alimentados de agua por medio de una bomba conectada a un contenedor de 1000 L, el cual servía para llenar los contenedores de PVC y recircular el agua de la tubería durante la operación. El agua era conducida por tubería de acero galvanizado hasta el flujómetro digital, de ahí continuaba la tubería donde se dispuso el manómetro y posteriormente la boquilla. El flujo y presión de agua se controlaba por medio de un par de llaves de paso dispuestas en la tubería; una llave correspondía al flujo de agua y la otra al recirculado de la misma (Figura 3.3).

Para el aire se utilizó una compresora conectada directamente al flujómetro de aire digital, de ahí se conectaba al manómetro y por último a la boquilla. El aire se controlaba por medio de una llave de paso dispuesta en el sistema (Figura 3.3).

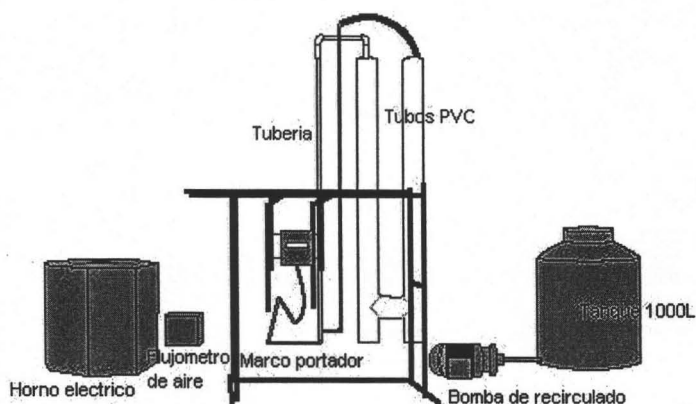


Figura 3.3 Esquema del equipo empleado

Para llevar a cabo los experimentos en frío, la boquilla en cuestión se disponía de manera perpendicular a la rejilla de captura de agua. Se ajustaba la distancia de la rejilla según el tipo de boquilla y se fijaba el centro de impacto al hacer coincidir el centro de la boquilla en la celda deseada. El siguiente paso era fijar las variables de cada esprea: presión de agua (kg/cm^2), flujo de agua (gal/min), presión de aire (kg/cm^2) y flujo de aire (g/min); antes del inicio de la corrida experimental la rejilla para la caracterización de la boquilla se cubría con una cortina impermeable para evitar el paso del fluido. Una vez fijadas las condiciones de operación y estabilizadas éstas, se removía la cortina para permitir que el fluido impactara sobre la rejilla de captura durante un intervalo de tiempo seleccionado; una vez transcurrido el tiempo fijado, la rejilla era cubierta nuevamente con la cortina impermeable para impedir el paso del fluido. Posteriormente se procedía a la medición de los volúmenes capturados.

Los volúmenes capturados fueron medidos con probetas graduadas de 10, 100, 200 y 500 ml. Para el tratamiento de los datos obtenidos fue necesario relacionar cada uno de los valores de volumen obtenidos a una coordenada (x,y) en los ejes

de la rejilla cuyo centro era el centro geométrico de la rejilla misma; de esta manera cada celda en la rejilla correspondía a una coordenada (Figuras 3.4 y 3.5). Estas coordenadas fueron insertadas, junto con el volumen de agua medido experimentalmente a una hoja de cálculo de *Sigma Plot* v.8.0 donde se obtuvieron las huellas de densidad de impacto de agua correspondiente a cada corrida experimental.

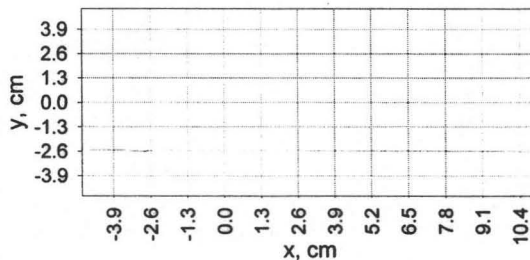


Figura 3.4 Distribución cartesiana de la rejilla 1.

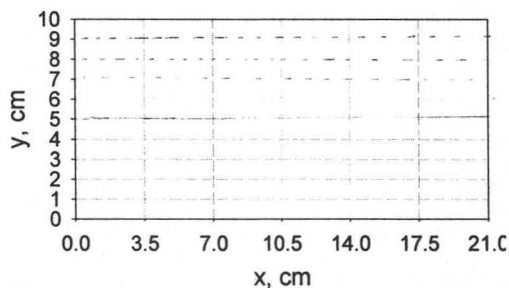


Figura 3.5 Distribución cartesiana de la rejilla 2.

3.4 Experimentos en caliente

3.4.1 Instrumentación del sistema

La siguiente etapa consistió en realizar pruebas de enfriamiento para la caracterización de la extracción de calor durante el enfriamiento de la placa. Para ello se utilizaron placas de acero AISI 304. Este acero no transforma durante el

enfriamiento, con lo que se simplifica la solución del IHCP. Las dimensiones de las placas utilizadas eran 10 x 17 x 1cm. Para asegurar las condiciones unidireccionales de transferencia de calor tal y como se estableció en el modelo matemático las placas fueron aisladas térmicamente con lana mineral colocada en los cantos y en la cara opuesta a la del enfriamiento.

La placa de acero (Figuras 3.6 y 3.7) fue instrumentada con 4 termopares tipo K de punta descubierta. Para fijar los termopares a la placa fue necesario asegurarlos por medio de tornillos de sujeción de acero inoxidable. Estos tornillos contaban con un perno que aseguraba el contacto permanente entre la placa y los termopares, así como la inmovilidad de estos. Los tornillos mantenían la punta del termopar a 3 mm de la superficie a enfriar. La disposición de los termopares *vista desde la cara a enfriar* se muestra a continuación Figura 3.6.

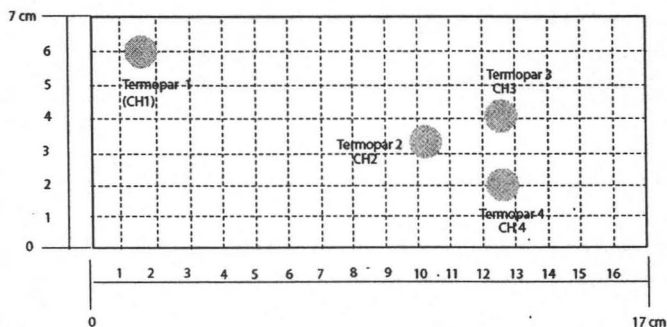


Figura 3.6 Disposición geométrica de los termopares.

Antes de cada prueba se utilizaba un multímetro digital para probar la continuidad eléctrica haciendo contacto con el termopar ya instalado y con cualquier punto de la placa.

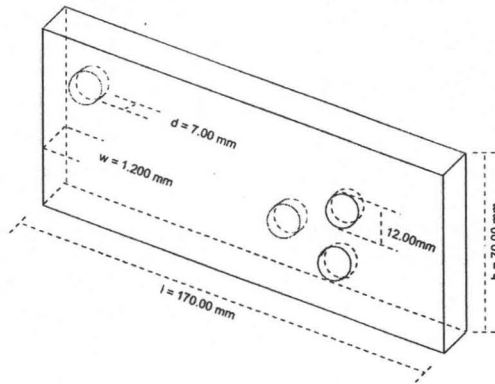


Figura 3.7 Instrumentación de la placa de acero. Dimensiones de las entradas de los tornillos de sujeción para los termopares.

3.4.2 Obtención de las historias térmicas

Para calentar las placas se utilizó un horno cilíndrico de resistencias; una vez que el horno alcanzaba una temperatura cercana a $1280 \text{ }^{\circ}\text{C}$ la placa de acero era introducida el tiempo suficiente hasta que ésta alcanzara la temperatura de trabajo ($1230\text{-}1240^{\circ}\text{C}$). Cuando la placa lograba la temperatura de trabajo se sacaba del horno y posteriormente era transportada hasta un marco portador justo frente a la boquilla de esreado la cual había sido ajustada a las condiciones de operación requeridas antes de ser retirada del horno.

El enfriamiento comenzaba desde el instante en que la placa era sacada del horno, es por ello que se calentaba un poco por encima de la temperatura de trabajo. Es importante hacer notar que la operación de sacar la placa del horno y colocarla en el marco debía ser lo más rápida y precisa posible. Una vez colocada y sujeta la placa en el marco de acero se retiraba la cortina impermeable para dar paso al agua y así comenzar propiamente el enfriamiento por esreado.

Los cambios de temperatura fueron registrados por medio de una tarjeta de adquisición de datos con ayuda del Software Chart-View instalado en una computadora portátil. Los datos se adquirieron a una frecuencia de 10 Hz. Los cambios cualitativos durante el enfriamiento fueron filmados con una cámara de video manual para su análisis posterior.

Los datos de temperatura se introdujeron a hojas de cálculo de *Sigmaplot* v.8.0 y *Excel* para filtrarlas e interpolarlas para aplicaciones y análisis posteriores.

El desarrollo experimental, tanto para las pruebas en frío como en caliente, requirió de la repetición programada de la metodología descrita, pues fue necesario no solo probar diversas condiciones de operación para cada una de las espreas, sino también garantizar la reproducibilidad de dichas condiciones. En el caso específico de las pruebas en caliente se procuró realizarlas una vez que las pruebas en frío habían sido ya realizadas y analizadas, pues por las condiciones mismas de los experimentos en caliente era no solo difícil sino también costoso repetirlos constantemente.

3.4.3 Procesamiento de Datos

El siguiente esquema ilustra todo el proceso del tratamiento de los datos obtenidos en el enfriamiento, desde su adquisición hasta su empleo en los códigos de programación IHCP y DHCP.

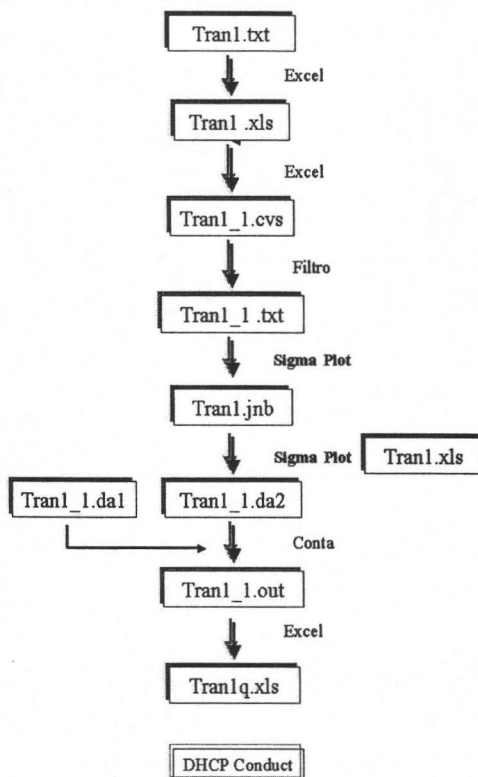


Figura 3.9 Tratamiento de los datos obtenidos en los experimentos en caliente

En la Figura 3.9, el archivo txt contiene las historias térmicas medidas experimentalmente, que son posteriormente introducidas a una hoja de cálculo de Excel para su graficación y se interpolan con un código de programación en FORTRAN. Los archivos con extensión csv corresponden a las historias térmicas filtradas e interpoladas. Este último archivo fue introducido a una hoja de cálculo SigmaPlot v.8.0 (extensión jnb) donde se reporta el enfriamiento para cada termopar.

Los archivos con extensiones da1 y da2 corresponden a los parámetros de operación y a la historia térmica (filtrada e interpolada) como entradas para el

código IHCP, respectivamente; el archivo de extensión out (archivo de texto) contiene los resultados del programa, es decir, reporta la temperatura medida y calculada en la posición del termopar y en la superficie así como el flux de calor estimado ($W/m^2 K$).

El archivo de extensión xls contiene cada una de las salidas del programa IHCP la cual es directamente introducida al código del programa directo DHCP para la aplicación de la condición de frontera.

Capítulo 4. Resultados y discusión

En este capítulo se reportan las huellas de densidad de impacto, las historias térmicas experimentales y tratadas bajo el esquema de la Figura 3.9, así como las estimaciones de la distribución de flux de calor en todas las posiciones de los termopares instalados en la placa de acero, la elección de los parámetros de cálculo correspondientes en los códigos inverso y directo, así como la interpretación de los resultados.

4.1 Caracterización de las boquillas

Las boquillas fueron caracterizadas en base a condiciones de operación similares a las empleadas industrialmente en HYLSA S.A. [10]. Las condiciones específicas empleadas para la caracterización de cada una de las boquillas aparecen en la Tabla 2.1.

4.2 Distribución de densidad de impacto

Los resultados de los experimentos en frío son huellas (gráficas en dos dimensiones) que representan a la distribución de agua que impactaría a la placa de acero inoxidable, ya sea en términos del volumen (mL) o de la densidad de impacto (L/m^2s). Esta información es clave para ligar a los parámetros de operación de la esprea con la extracción de calor. Sin embargo, y debido a las condiciones y dimensiones de las rejillas de captura, solo fue posible obtener aproximadamente la mitad de la huella total. Se considera que es posible aplicar un criterio de simetría a la forma de las huellas.

A continuación se muestra la forma de las huellas tanto de volumen como de densidad de impacto que se obtuvieron para una boquilla y condición en particular

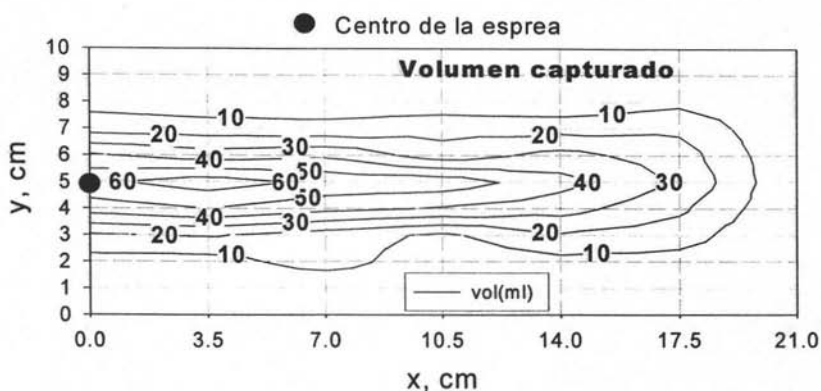


Figura 4.1 Distribución de Volumen de agua capturado para la boquilla 6.5-90 (prueba 5).

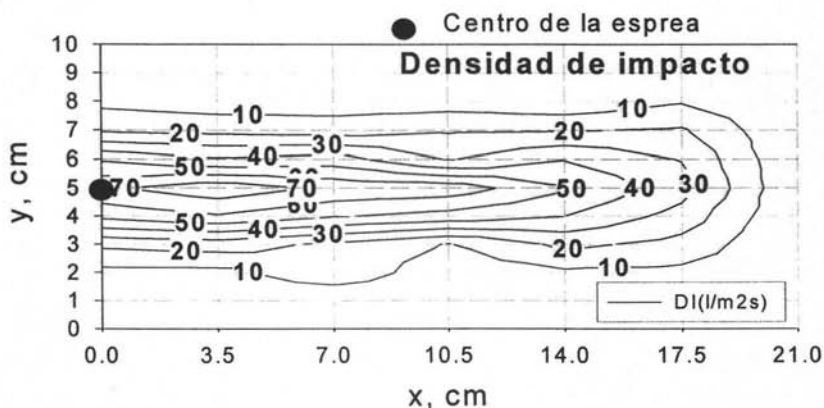


Figura 4.2 Distribución de densidad de impacto (DI) para la boquilla 6.5-90 (prueba 5).

En las Figuras 4.1 y 4.2 se muestran mapas de distribución de volumen y de densidad de impacto, respectivamente, para la boquilla Casterjet 6.5-90; esta boquilla es de niebla y ángulo de abanico. La forma es caracterizada por semi-óvalos concéntricos que disminuyen su volumen o densidad de impacto conforme se alejan del centro geométrico de la boquilla. La forma de la huella es similar para

el resto de las boquillas de abanico, tanto para las de niebla como para la boquilla 6232.882.16CC de agua.

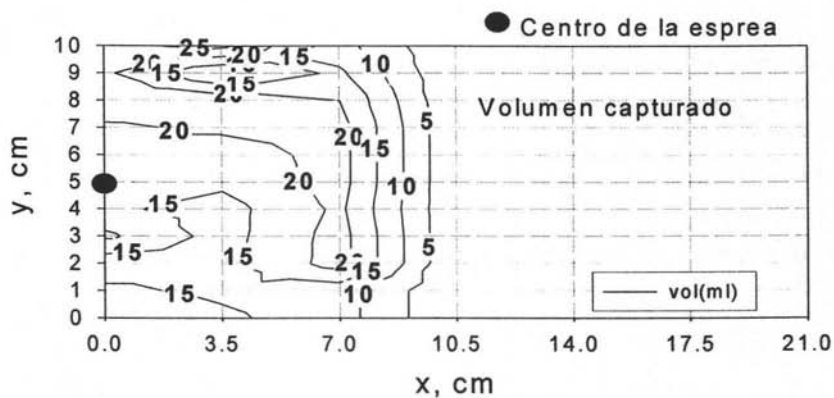


Figura 4.3 Distribución de volumen para la boquilla 460.884. (prueba 17).

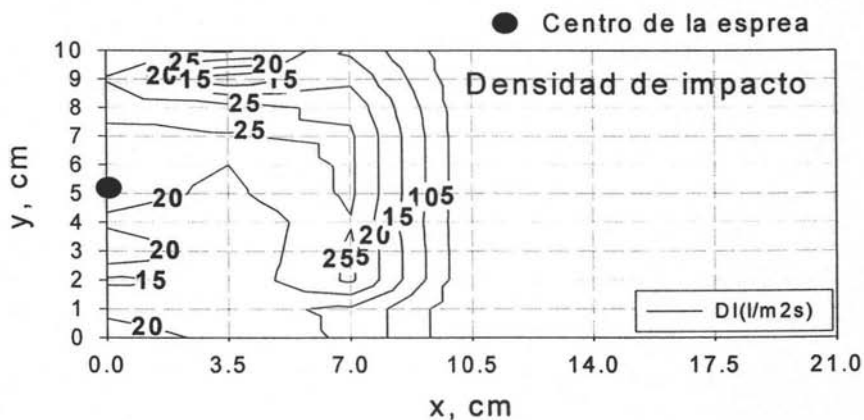


Figura 4.4 Distribución de densidad de impacto (L/m²s) para la boquilla 460.884. (prueba 17).

Las Figuras 4.3 y 4.4 muestran el mapa de distribución de volumen y de densidad de impacto para la boquilla 460.884. Esta boquilla de agua tiene salida de cono, por lo que presenta un patrón de densidad de impacto significativamente distinto a las boquillas de salida de abanico. La forma de las huellas del agua capturada consta de semi-círculos concéntricos, como se observa en esas figuras.

En ambos gráficos puede notarse que las zonas de mayor captura de volumen, y por ende las de mayor densidad de impacto (L/m^2s), son las zonas centrales mientras que las zonas periféricas apenas proyectan una quinta parte del volumen respecto a la zona central. Esto aplica para todas las boquillas y condiciones de operación. En función de estos resultados se esperaría que la zona central proporcionaría una extracción de calor más efectiva.

En la Tabla 4.1 se presentan los resultados de las densidades de impacto máximas y mínimas para cada boquilla. Se observa que la boquilla 632.882.16CC tiene la mayor densidad de impacto; los mínimos de todas las boquillas oscilan entre 10 y 5 L/m^2s . Las boquillas de niebla presentan valores máximos y mínimos cercanos entre si, siendo la boquilla 8-90 en la que se aprecia un valor mayor.

Tabla 4.1 Densidades de impacto máximas y mínimas de cada boquilla.

Boquilla	DI máxima	DI mínima
6.5-90	70 (L/m^2s)	5 (L/m^2s)
8-90	85 (L/m^2s)	10 (L/m^2s)
Master Cooler	70 (L/m^2s)	10 (L/m^2s)
460.884	30 (L/m^2s)	5 (L/m^2s)
632.882.16CC	125 (L/m^2s)	5 (L/m^2s)

4.3 Caracterización de la extracción de Calor

Las condiciones de operación bajo las cuales se obtuvieron las diversas curvas son las reportadas en la Tabla 3.1 bajo la nomenclatura **TRAN**. La nomenclatura **CH** corresponde a los termopares empleados; esto se muestra en la Figura 3.6.

4.4 Respuesta térmica adquirida

El equipo de adquisición de datos utilizado en la captura del historial térmico de la placa enfriada presentó alteraciones en los valores de temperatura debidos al ruido experimental (ver Figura 4.5), por lo que para evitar incongruencias en los resultados en etapas posteriores, los datos obtenidos fueron filtrados e interpolados con ayuda de hojas de cálculo de *Excel* y de *Sigmaplot* v.8.0, ver diagrama del procesado de datos en la sección anterior (Figura 3.9).

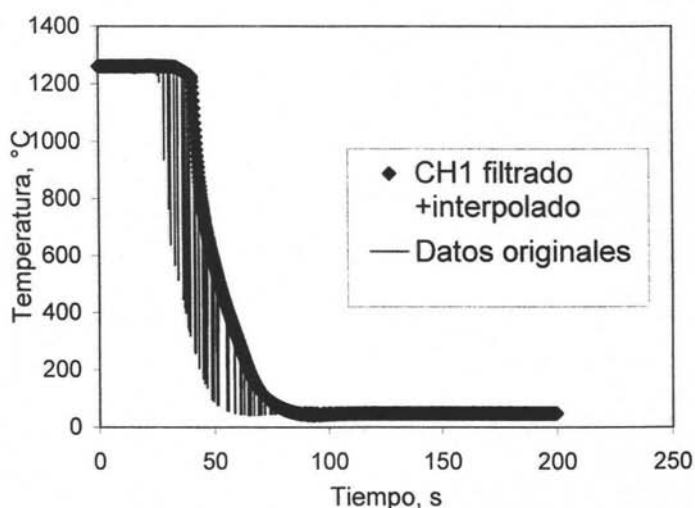


Figura 4.5 Historial térmico original (línea) y filtrado+interpolado (símbolos) en la prueba TRAN 12-CH1.

De utilizarse los datos originales (adquiridos en el experimento) las pruebas de simulación mediante los códigos IHPC y DHCP serían poco confiables puesto que dichos códigos requieren de parámetros constantes como el tiempo de adquisición, que en los datos originales fluctúa en toda la corrida experimental; por ello la importancia de procesar los datos adquiridos con el fin de proporcionar datos "reales y confiables" que puedan ser utilizados en los códigos citados.

4.5 Respuesta térmica procesada

La Figura 4.6 muestra dos historias térmicas procesadas de acuerdo al diagrama de flujo del capítulo anterior, que corresponden al experimento TRAN 12 con la boquilla 632.882.16CC. Es clara la ausencia del ruido experimental ocasionado durante la adquisición; estas historias térmicas son las utilizadas por los códigos ICHP y DHCP. La línea vertical muestra el inicio de esparado.

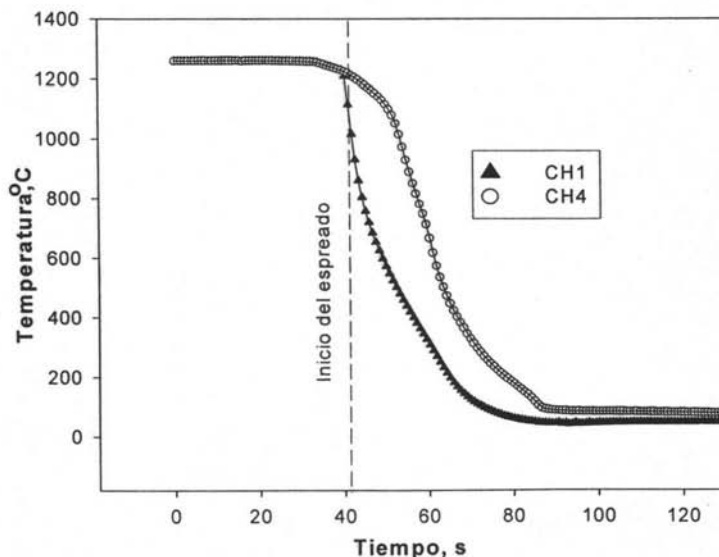


Figura 4.6 Comparación de las respuestas térmicas para los termopares CH1 y CH4 utilizando la boquilla 632.882.16CC (Experimento TRAN 12).

Para el caso del experimento TRAN 12, es importante señalar que el avance del frente de enfriamiento es en dirección del eje y ; el comienzo del enfriamiento por rociado de agua comienza a $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 40 segundos después de que la placa fue retirada del horno eléctrico (línea vertical). El enfriamiento de la placa desde esta temperatura de operación hasta la temperatura del medio de enfriamiento toma aproximadamente 40 segundos en el caso del termopar CH1 y cerca de un minuto en el caso del termopar CH4.

Esto se debe a que el termopar CH1 fue colocado justo frente a la salida de la boquilla (ver Figura 3.6) por lo que al existir mayor densidad de impacto la cantidad de calor extraída es mayor. En la Figura 4.7 nótese que para que el termopar CH4 alcance la temperatura de $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ se requieren de casi 15 segundos más de tiempo que para el termopar CH1.

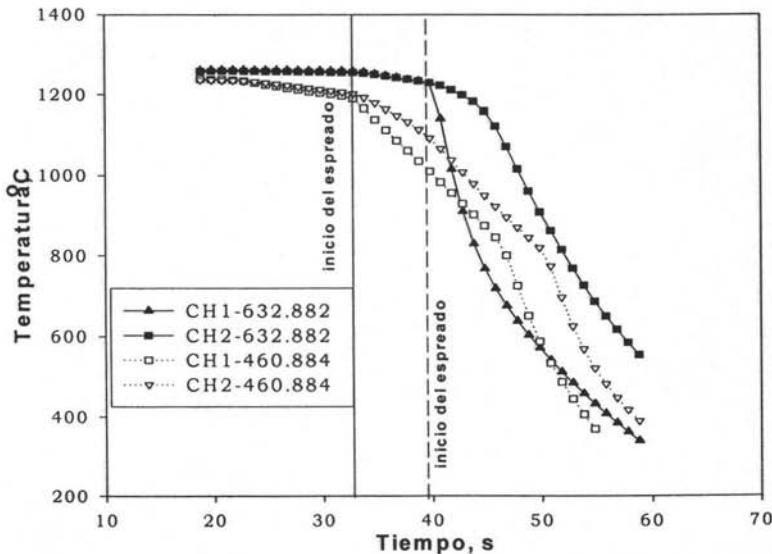


Figura 4.7 Comparación de las historias térmicas de enfriamientos con las boquillas 632.882.16CC TRAN 12 (símbolos sólidos) y 460.884 TRAN 16 (símbolos transparentes).

Antes de hacer un análisis de los resultados obtenidos, es necesario señalar que las temperaturas de inicio de cada experimento (TRAN) son diferentes, esto se debe al sobrecalentamiento necesario para trabajar en el rango de temperatura óptimo sin que esto repercuta directamente en las condiciones de enfriamiento.

En la Figura 4.7 puede observarse que las historias térmicas a partir del inicio del enfriamiento por esparado (aproximadamente 1200 °C) los valores son cercanos en las posiciones de los termopares CH1 para ambas boquillas de agua, a pesar de que los parámetros de operación de los experimentos son distintos: $P_w = 9 \text{ kg/cm}^2$ $Q_w = 7.64 \text{ gpm}$ para TRAN 12 y $P_w = 5.1 \text{ kg/cm}^2$ $Q_w = 6.1 \text{ gpm}$ para TRAN 16.

La similitud de las historias térmicas en la posición del termopar CH1 puede adjudicarse a la forma de distribución de agua pues se recordará que para la boquilla 460.884., el avance del frente de enfriamiento es en dirección del eje x, y tiene una forma de distribución cónica, donde la máxima incidencia de agua abarca casi 4 cm de radio, longitud suficiente para que la cantidad de agua proyectada por la boquilla enfríe una mayor área de la placa de acero compensando el enfriamiento causado por tener una densidad de impacto 5 veces menor que en la boquilla 632.882.16CC.

En contraste, las historias térmicas en el caso de los termopares CH2 presentan diferencias notables. Para la boquilla 632.882.16CC, puede observarse que el enfriamiento por esparado se hace presente a los 50 segundos, 10 segundos más con respecto al termopar CH1 con la misma boquilla. El enfriamiento para este termopar desde la temperatura inicial hasta la temperatura del medio de enfriamiento toma aproximadamente 80 segundos mientras que los termopares CH1 y CH2 para la boquilla 460.884 llegan a la temperatura del medio de enfriamiento pasados 80 segundos después del inicio del enfriamiento.

4.6 Resultados del IHCP

La caracterización de la extracción de calor consiste en cuantificar la cantidad de calor extraído durante el enfriamiento de la placa de acero desde la temperatura de operación (1250 °C) hasta la temperatura del medio de enfriamiento (agua o agua-aire 25 – 30 °C). Sin embargo, la zona de enfriamiento secundario de una máquina de colada continua trabaja con temperaturas de la superficie del planchón que van de 700 a 1100 °C [10], por lo que en varios experimentos el enfriamiento se interrumpió antes de que la placa alcanzara la temperatura del medio de enfriamiento y, consecuentemente, las curvas de ebullición solo se calcularon para ese rango de temperaturas.

Ya se cuenta con los modelos de solución y validación, IHCP y DHCP respectivamente, pero la solución del IHCP requiere del establecimiento de parámetros tales como el número de tiempos futuros r , así como un valor de espaciamiento de tiempo Δt entre cada registro de temperatura durante el experimento.

El efecto de la variación del espaciamiento de tiempo Δt ha sido reportado para experimentos de enfriamiento de placas con espreas [7], se encontró que un valor $\Delta t = 0.2$ arrojará estimaciones confiables, por lo que en este trabajo únicamente se estudiará el efecto de la variación del parámetro r .

La metodología para establecer la cantidad de pasos de tiempo futuros r , consiste en calcular historias térmicas, y aquella con mas parecido a la historia térmica experimental y que no presente un comportamiento anómalo es la que corresponderá a la condición de frontera idónea para simular el enfriamiento y obtener la condición de frontera, ya sea en términos de la densidad de flujo de calor o bien del coeficiente de transferencia de calor, h .

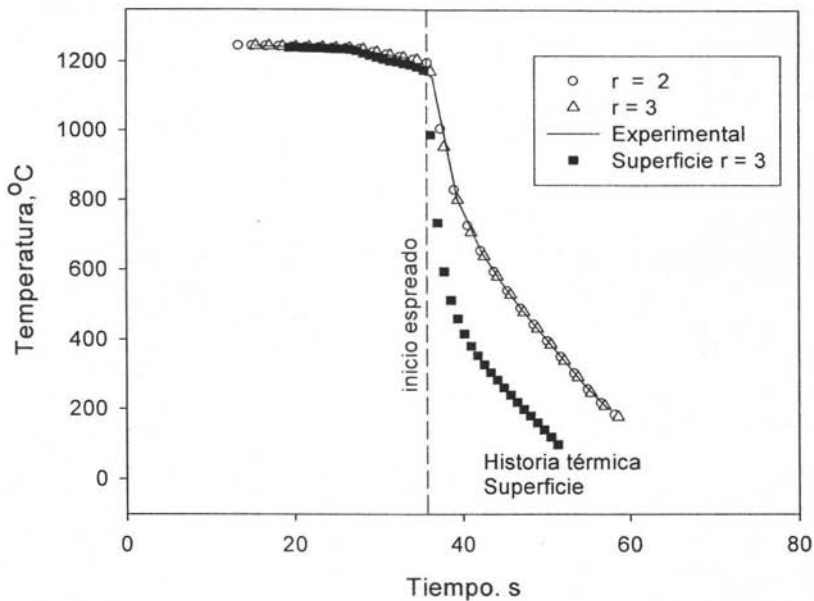


Figura 4.8 Historias térmicas obtenidas por el IHCP en la superficie y en el interior de la placa en la prueba TRAN 13 CH1 Boquilla de agua 632.882.16CC

En la Figura 4.8 se reportan las historias térmicas calculadas por el programa de solución del IHCP en la superficie de la placa (símbolo sólido) y en la posición del termopar CH1 (símbolos blancos).

La línea vertical señala el inicio del esparado a los 35 segundos. Después de este lapso de tiempo, la caída de temperatura es abrupta debido al impacto de agua. La historia térmica en la superficie es la calculada por el IHCP.

Se observa un buen ajuste entre las historias térmicas calculadas mediante el IHCP y la experimental en la posición del termopar.

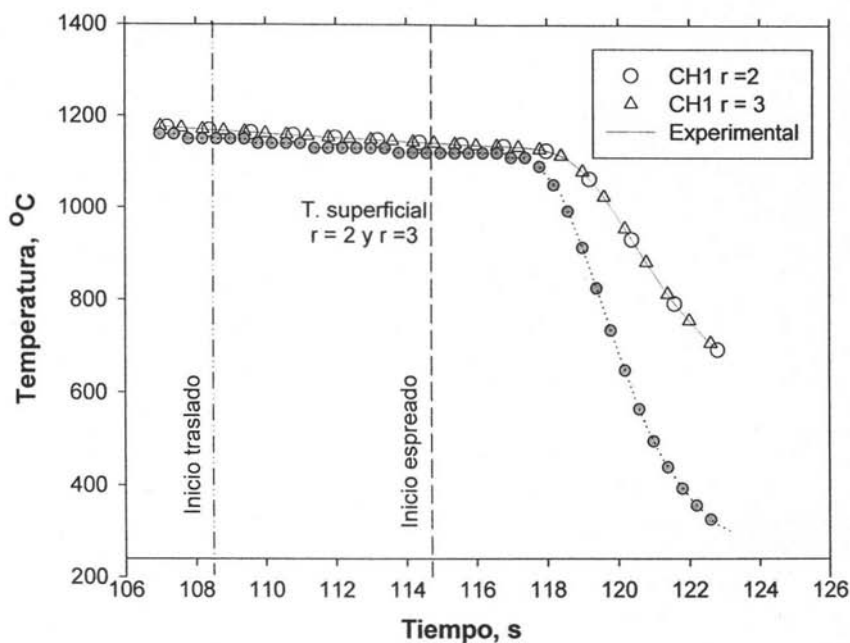


Figura 4.9 Historias térmicas superficiales (símbolo sólido) e interiores (símbolos blancos) producido por la boquilla de niebla 6.5-90. Experimento TRAN 1.

En la Figura 4.9, el medio de enfriamiento en estas historias térmicas es niebla; las estimaciones hechas a través del problema inverso ajustan muy bien a las historias térmicas experimentales en el interior de la placa,

A altas temperaturas utilizando agua así como niebla los resultados de enfriamiento son similares, una vez iniciado el enfriamiento por esreado, las diferencias se hacen más notables, (ver Figura 4.10).

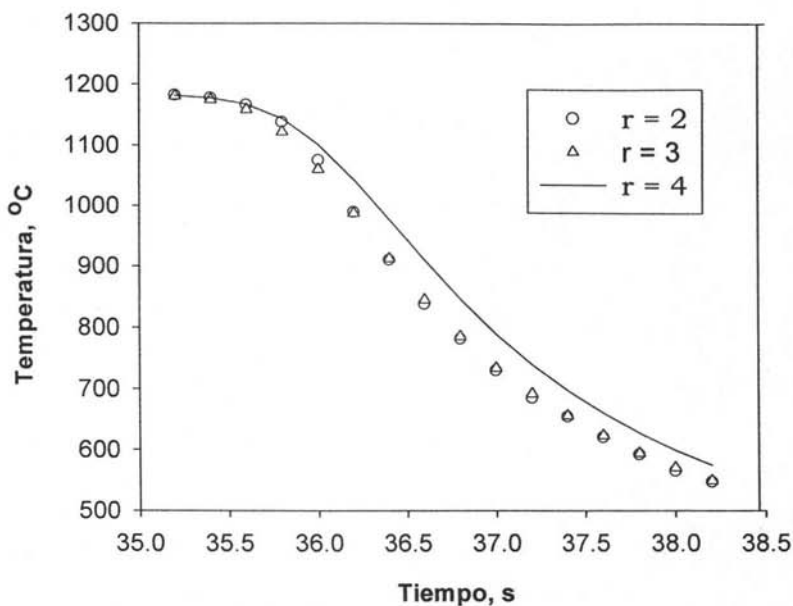


Figura 4.10 Efecto de la variación de r en la respuesta térmica. experimento TRAN 13-CH1 (segmento Figura 10.4)

En la Figura 4.10 se observan las diferencias de temperatura obtenidas como resultado de la variación del número de tiempos futuros r . La diferencia entre $r = 2$ y $r = 3$ es imperceptible pero al graficar la historia térmica con $r = 4$ la diferencia es mas notoria teniendo diferencias de temperatura de hasta $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ y suavizando la respuesta térmica. Esta gráfica es un segmento de la Figura 4.9, el comportamiento es similar tanto en las historias térmicas en la superficie como en el interior de la placa sin importar el medio de enfriamiento utilizado.

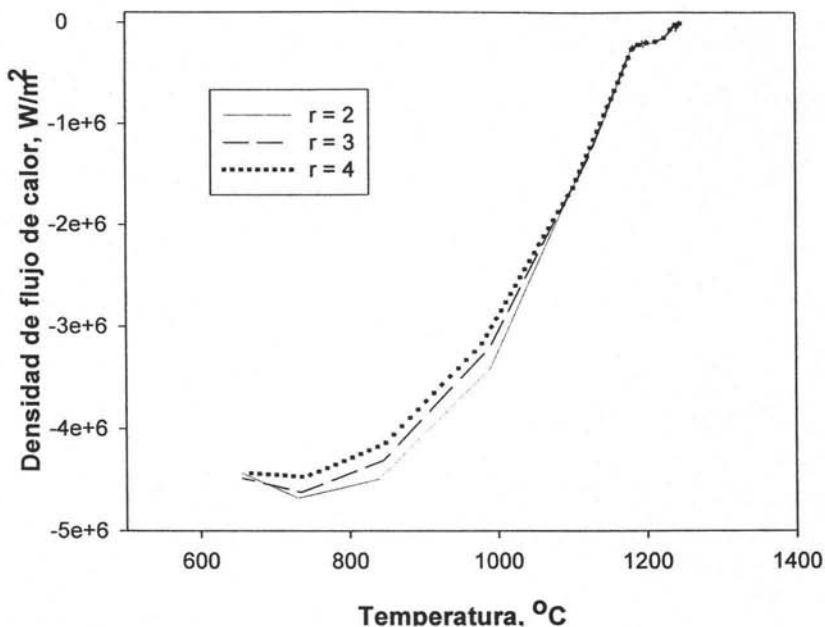


Figura 4.11 Densidad de flujo de calor como función de temperatura de la superficie en la prueba TRAN13-CH1 a distintos valores de tiempos futuros, r .

La Figura 4.11 presenta a la densidad de flujo de calor en función de la temperatura de la superficie de la placa para distintos valores de tiempos futuros r . Al inicio de la prueba, la extracción de calor es pequeña dado que únicamente se cuenta con enfriamiento en aire quieto. Al transcurrir 35 segundos, a una temperatura cercana a 800°C la extracción de calor se acelera como consecuencia del esparado, llegando a una máxima extracción de calor de $-4.75E6 \text{ W/m}^2$. Este máximo corresponde al valor de $r=2$; a medida que esta valor aumenta, hasta $r=4$, la densidad de flujo disminuye.

A mayores valores de tiempos futuros, r , la curva de densidad de flujo de calor se suaviza disminuyendo de esta manera los valores obtenidos mediante el programa inverso.

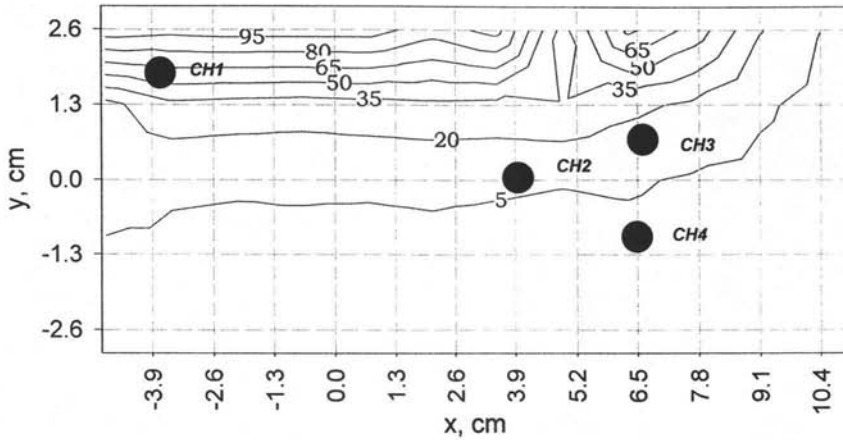


Figura 4.12 Mapa de densidad de impacto de agua (L/m^2s) para la prueba de enfriamiento TRAN 13. Boquilla Lechler 632.882.16CC

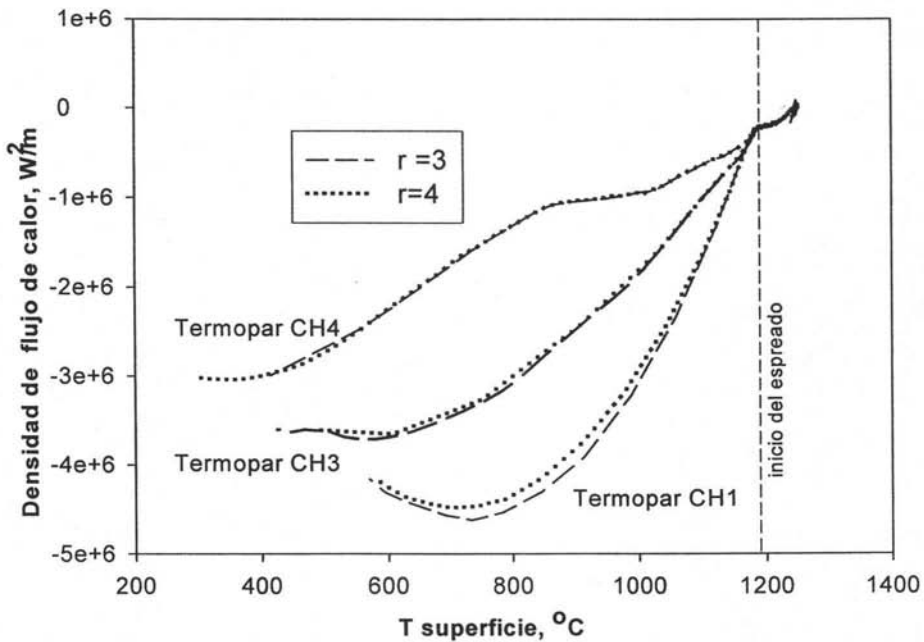


Figura 4.13 Flujo de calor como función de la temperatura de la superficie en la prueba TRAN 13 (CH1, CH3 y CH4), con distintos valores de r .

En la Figura 4.12 se muestra la huella de agua utilizada en el enfriamiento de la prueba TRAN 13; la máxima incidencia de agua la recibe el termopar CH1 colocado frente a la salida de la boquilla, los termopares CH2 y CH3 son enfriados por la misma cantidad de agua ($5 \text{ L/m}^2\text{s}$), mientras que el termopar CH4 colocado fuera de la zona de incidencia es enfriado únicamente por el agua que rebota o resbala de la placa de acero.

La Figura 4.13 presenta al flujo de calor como función de las condiciones de rocío de agua. El termopar 4, el más distante del centro de salida de la boquilla, presenta con respecto al termopar CH3 una evolución térmica más lenta y por ende la extracción de calor es menos severa, aproximadamente 25 % menor que el termopar CH3 cuya posición dentro del área de impacto favorece la extracción de calor. El máximo valor de la densidad de flujo de calor se presenta aproximadamente a los $580 \text{ }^\circ\text{C}$ para CH3 y cerca de 400°C en el caso del termopar CH4 y $800 \text{ }^\circ\text{C}$ en el caso del termopar CH1.

Para el termopar CH4 la velocidad de enfriamiento así como la densidad de flujo de calor es menos efectiva ya que presenta una zona de enfriamiento en presencia de una película de vapor entre 800 y 1100°C .

En las curvas de la figura 4.13, el efecto de la variación de los tiempos futuros no es muy importante pues el valor máximo de extracción de calor no presenta variaciones significativas a excepción del termopar CH1 donde se aprecian diferencias notables en cuanto a los máximos de flujo de calor.

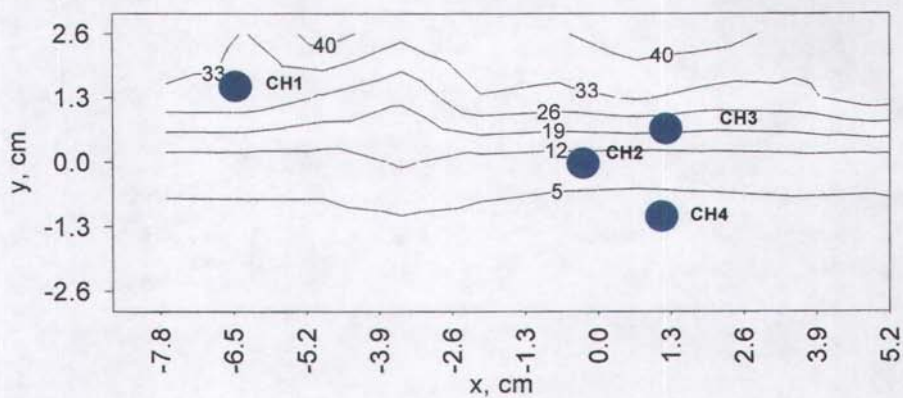


Figura 4.14 Mapa de densidad de impacto en el experimento TRAN5 , boquilla de niebla 6.5-90

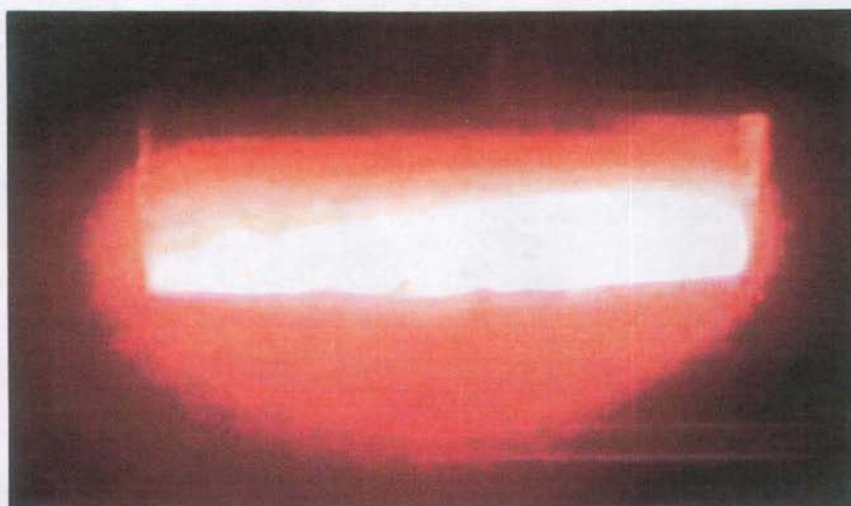


Figura 4.15 Videoimagen para TRAN 5 a dos segundos de iniciado el enfriamiento.

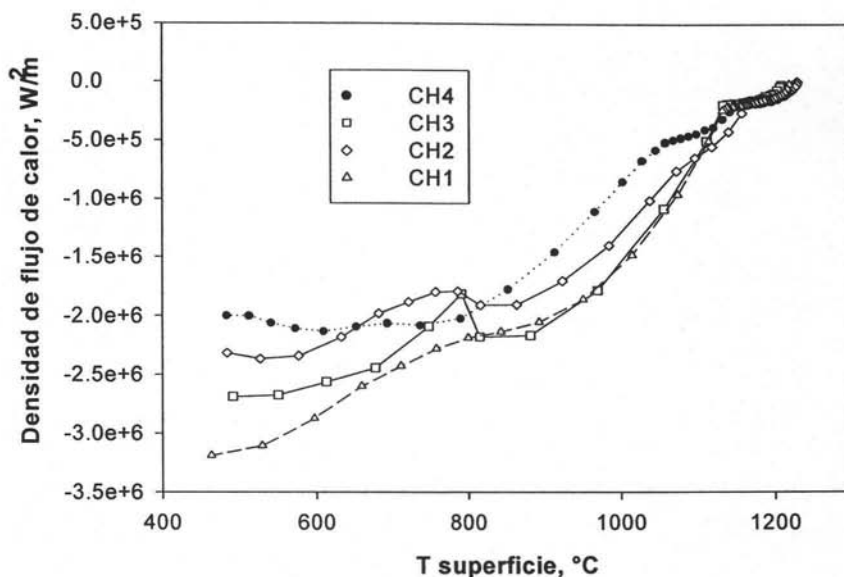


Figura 4.16 Densidad de flujo de calor vs. Temperatura de superficie para TRAN 5. Boquilla de niebla 6.5-90

En las figuras 4.14 y 4.15 se muestra de manera visual, como el frente de enfriamiento está directamente relacionado con la densidad de impacto. Las zonas rojas en la Figura 4.15 son las zonas con un enfriamiento más lento. Comparando esta imagen con la Figura 4.14, es evidente que en las zonas de menor densidad de impacto el enfriamiento avanza más lentamente que en las zonas donde la incidencia de agua es mayor. En el lado izquierdo de la videoimagen se observa que el avance del frente de enfriamiento comienza en ese sitio y presenta una mayor velocidad de enfriamiento, debido a que la densidad de impacto es mayor con respecto al otro extremo de la placa. Comparando las figuras 4.14 y 4.15 se puede establecer la similitud entre la huella de densidad de impacto y la videoimagen.

En la Figura 4.16 se muestra la curva de ebullición correspondiente al experimento TRAN 5 para la boquilla de niebla 6.5-90 cuando se utiliza un valor de $r = 3$. Se aprecia la diferencia que existe entre los valores máximos de flux de calor entre cada uno de los termopares. Por ejemplo el valor máximo es para el termopar CH1 a una temperatura de 500°C, mientras que, a esa misma temperatura el termopar CH4 presenta un flujo significativamente menor.

A diferencia de las boquillas de agua, los valores de flux de calor en los termopares son más cercanos entre sí. Esto se debe a que la distribución del flujo de agua en las boquillas es más uniforme en toda la huella y en segundo lugar, este comportamiento obedece a que los termopares están dentro de la zona de esparado.

Las Figuras 4.17 y 4.18 corresponden a las condiciones de rocío de agua durante el enfriamiento y a la densidad de flujo de calor en función de la temperatura superficial (Figura 4.19) en la prueba TRAN 17.

En la Figura 4.18 se observa el avance del frente de enfriamiento y su correlación con la distribución de flujo de agua. Al tratarse de la boquilla cónica 460.884 se observa que el patrón de frente de enfriamiento es distinto al de las boquillas de salida en forma de abanico. Del mismo modo que en las figuras 4.14 y 4.15, la relación entre la huella de densidad de impacto y la videoimagen es evidente. Las zonas periféricas de impacto de agua (zonas rojas) se encuentran a mayor temperatura con respecto a la zona central, de igual manera, la velocidad de enfriamiento es menor.

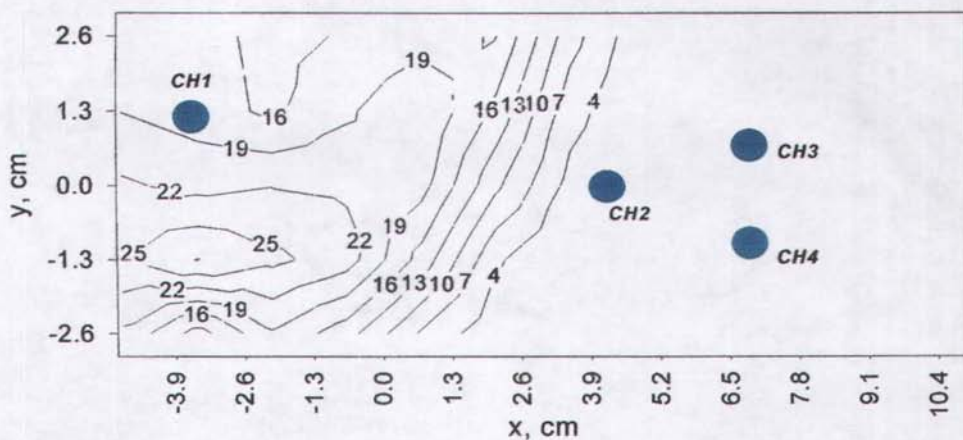


Figura 4.17 Mapa de densidad de impacto de agua (L/m²s) utilizado en la prueba TRAN 17. Boquilla Lechler 460.884

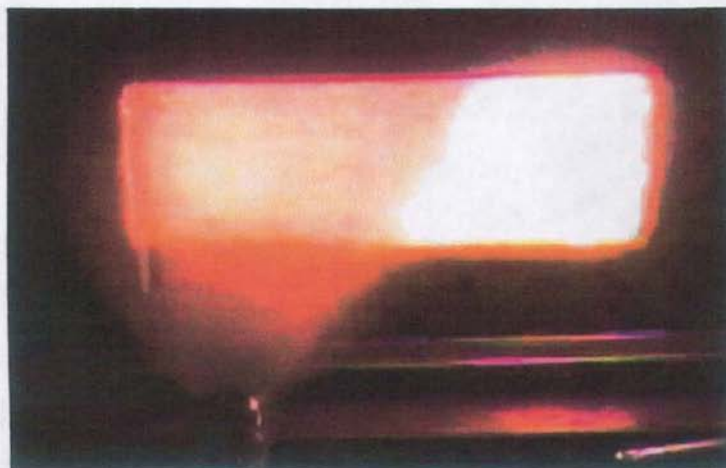


Figura 4.18 Videoimagen para TRAN 17, transcurridos 2 segundos después del impacto del agua.

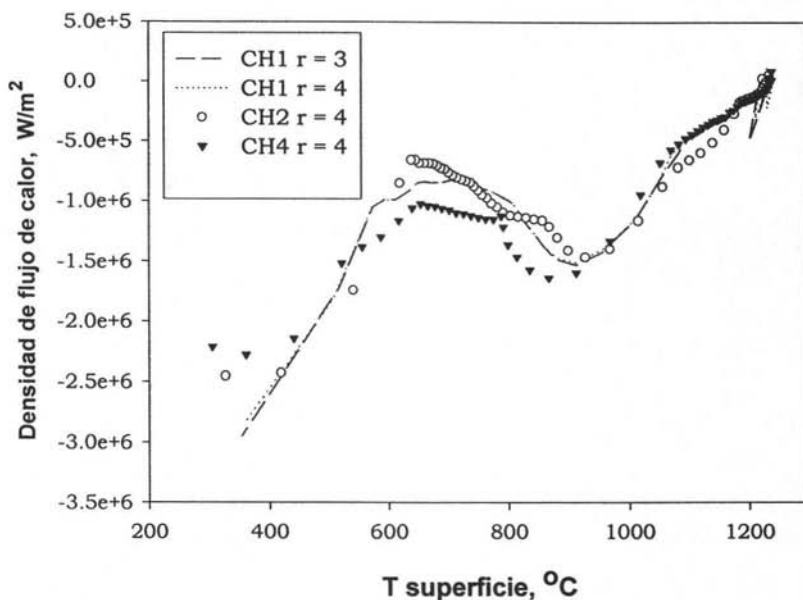


Figura 4.19 Densidad de flujo de calor como función de la temperatura de la superficie. Para la prueba TRAN 17 (CH1, CH2 y CH4), con distintos valores de r .

En la figura 4.17 se observa que, a excepción del termopar CH1, el resto de los termopares están situados fuera de la zona de mojado; no obstante, todos los termopares presenta un régimen de transición.

La variación de los tiempos futuros, no tiene un efecto significativo en la pendiente de la curva, ni sobre el valor máximo de densidad de flujo de calor, las curvas se suavizan cuanto mayor es el valor del parámetro r (CH1 $r = 3$ y $r = 4$).

Se puede apreciar que el termopar CH1 (colocado en la zona de mojado) se caracteriza por tener una extracción de calor más severa y por ende una velocidad de enfriamiento mayor; la densidad de impacto de agua en esta zona es cercana a los (20 L/m²s). Los termopares CH2 y CH4 (colocados fuera de la zona de

mojado y con una densidad de impacto de agua menor) presentan una extracción de calor menos severa así como un menor valor de densidad de flujo de calor.

El régimen de transición desde la temperatura de Liedenfrost hasta un régimen de ebullición nucleada ocurre con mayor facilidad en los experimentos de la boquilla cónica. Las curvas de densidad de flujo de calor como función de la temperatura de la superficie del experimento TRAN 17 presentan una disminución en la energía extraída en el rango de 1000 a 600°C, que puede explicarse considerando un retardo en la evolución térmica de la placa ocasionada por algún aislante, en este caso, una película de vapor superficial.

Debido a que la evolución térmica de las piezas es muy rápida y la extracción de calor es muy severa en las zonas de impacto de agua, la utilización de valores pequeños de tiempos futuros r ocasiona inestabilidad en la solución del problema inverso y desajustes con respecto a las temperaturas calculadas por el programa.

Aún cuando la variación del valor de r no produjo cambios notables en las historias térmicas así como en las curvas de densidad de flujo de calor vs. temperatura de la superficie, la utilización de un valor de $r = 3$ proporcionaría resultados más confiables dado que las curvas se ajustan mejor y las sobreestimaciones del flujo de calor son menos severas, de tal modo que $r = 3$ y $\Delta t = 0.2$ s son parámetros adecuados para la solución del problema inverso.

4.7 Verificación del flux de calor estimado

Las curvas de densidad de flujo de calor así como las historias térmicas obtenidas por el IHCP se verificaron introduciendo la condición de frontera estimada en un algoritmo de programación que resuelve el problema directo de conducción de calor. [6,7].

Para la verificación de los resultados obtenidos por el IHCP (CONTA) se utilizó el código abierto CONDUCT para aplicar las condiciones de frontera en la solución del DHCP (ver Capítulo 2).

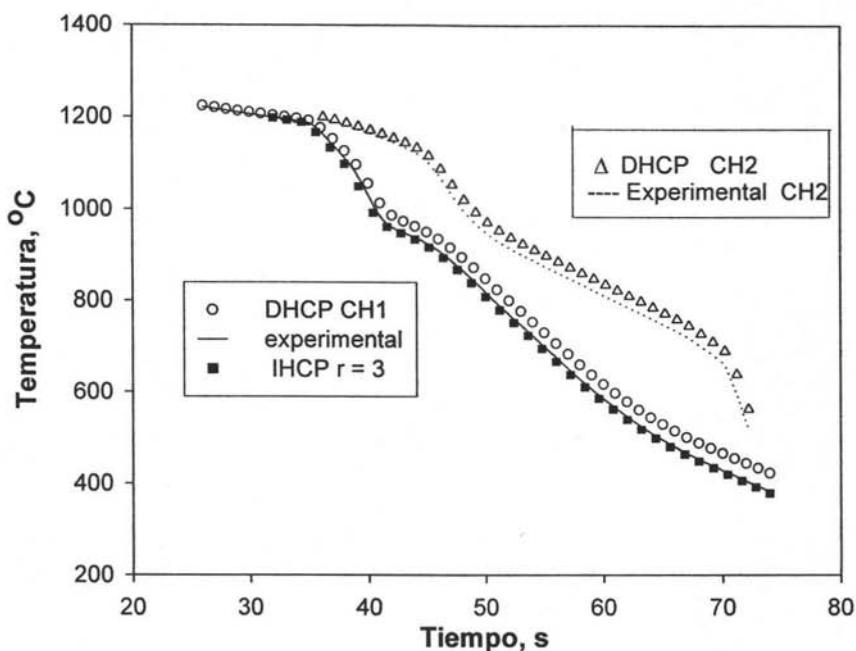


Figura 4.20 Comparación de las historias térmicas experimentales (líneas), calculadas con el DHCP (símbolos blancos) y calculadas al resolver el IHCP (símbolo sólido). Prueba TRAN 17 CH1- CH2. Boquilla 460.884

Las historias térmicas arrojadas por el DHCP se asemejan a las curvas experimentales y a las obtenidas a través del IHCP.

En el caso del termopar CH2 el cambio de pendiente próximo a los 1000 °C puede ser consecuencia del régimen de transición propuesto con anterioridad, este provoca una ligera disminución en la velocidad de enfriamiento que a su vez se traduce en una disminución de la energía extraída. (Figura 4.20).

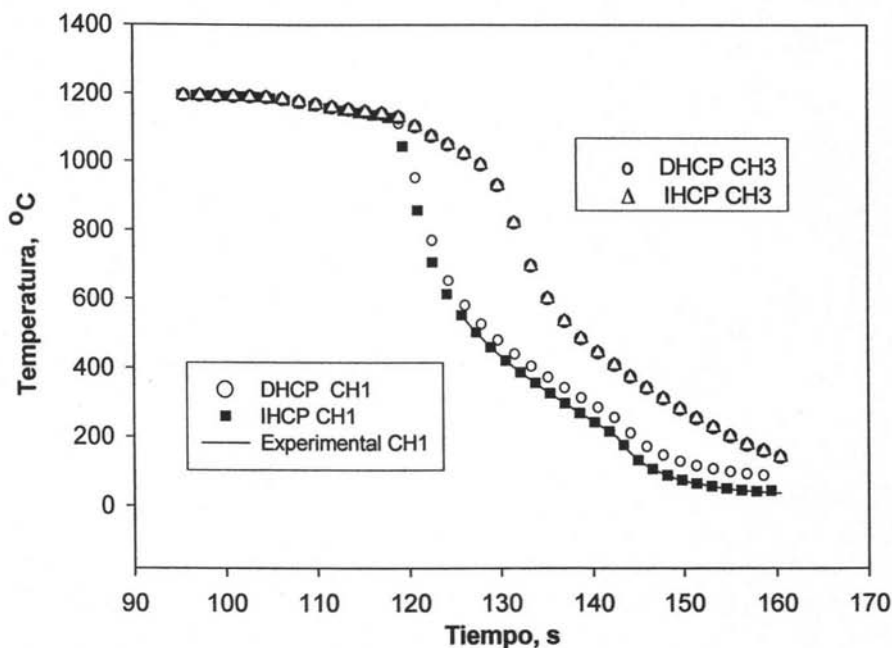


Figura 4.21 Comparación entre las respuestas térmicas para CH1 y CH3 para TRAN1. Boquilla 6.5-90

En la Figura 4.21 se aprecia la comparación entre los resultados obtenidos con el método directo y con el método inverso para TRAN1 correspondiente a una boquilla de niebla. Se observa que las curvas se asemejan a la experimental; se reitera que $r = 3$ es el parámetro óptimo para el tratamiento de los resultados. De igual manera se aprecia la diferencia entre los termopares CH1 y CH3, denotando así que la velocidad de enfriamiento es función de la densidad de impacto.

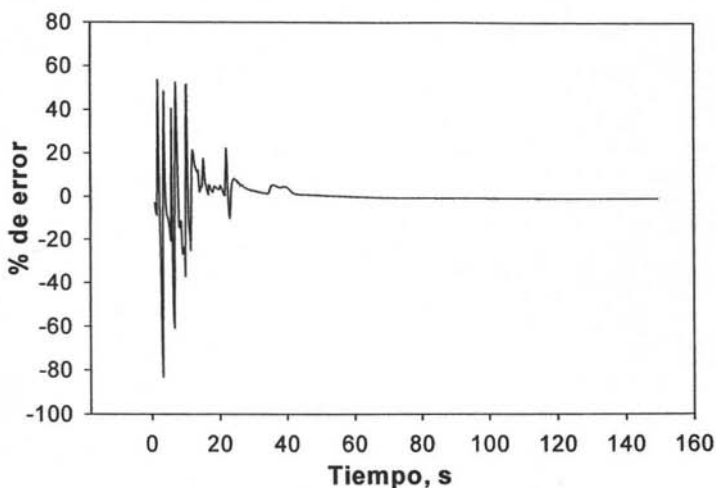


Figura 4.22 % de error en función del tiempo para los datos calculados por el programa CONTA para TRAN 3.

La Figura 4.22 muestra el % de error en el cálculo de la energía extraída con respecto al valor "teórico" dado por la pérdida de calor sensible ($mCp\Delta T$). El % de error se calcula de la manera siguiente:

Energía extraída:

$$\Sigma qA_i \Delta t$$

Energía perdida:

$$\Sigma mCp\Delta T$$

$$\% \text{error} = \frac{|qA\Delta t_i - mCp\Delta T|}{qA\Delta t} \times 100$$

De la Figura 4.22 se observa que los valores mas grandes de error aparecen en la etapa en la cual la placa permanece aún en el interior del horno y durante su traslado al marco portador. Al interior del horno no existe enfriamiento pero sí oscilaciones de temperatura; en la ecuación de cálculo del % de error esto

produce resultados negativos de gran magnitud, arrojando los valores porcentuales mas grandes.

Una vez transcurridos 40 segundos el error es prácticamente cero ya que la diferencia entre la energía perdida y extraída es mínima. Estos valores se observan a partir de la etapa de enfriamiento por espreado y hasta llegar a la temperatura ambiente.

Tabla 4.2 Densidad de flujo de calor (flux) máximos en todas las boquillas a una temperatura de 800°C

Boquilla	Flux máximo W/m ²
6.5-90	-3 E6
8-90	-3.2 E6
Master-Cooler	-3.7 E6
486.884	-1.3 E6
632.882.16CC	-4.7 E6

En la Tabla 4.2 se reportan los valores de flux de calor a una temperatura específica (800°C). La máxima extracción de calor corresponde a la posición CH1. A esta temperatura el máximo es producido por la boquilla de agua 632.882.16CC seguida de la boquilla de niebla Master-Cooler con $-4.7E6$ y $-3.7E6$ W/m² respectivamente. Es importante notar que los valores máximos de extracción de calor corresponden a las zonas donde podemos encontrar los máximos valores de densidad de impacto.

Estos valores fueron obtenidos a una temperatura de 800°C debido a que esta temperatura se encuentra en el rango de operación de las boquillas. Es importante notar que estos valores no corresponden al valor del máximo absoluto de extracción de calor en estos experimentos. Los valores máximos se dan a

temperaturas que van desde los 400 a 600°C, en cambio en estas temperaturas ya no opera el sistema secundario de enfriamiento.

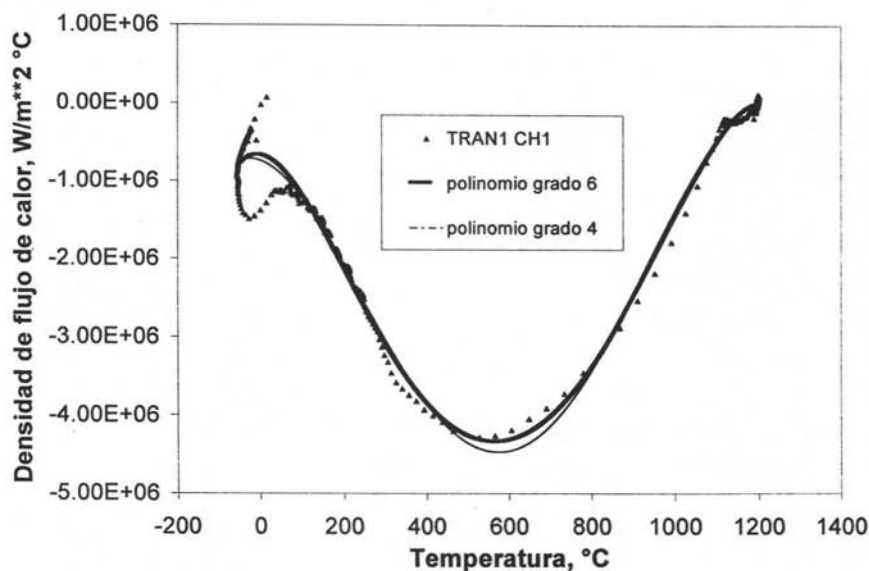


Figura 4.23 Polinomios de ajuste en 4° y 6° orden para CH1 del experimento TRAN1

En la Figura 4.23 se muestra la curva de densidad de flujo de calor comparada con ajuste polinomiales de 4° y 6° orden. Al crecer el orden del polinomio el ajuste es cada vez mas cercano a la curva experimental. La ecuación polinomial obtenida es aplicable únicamente a condiciones específicas, esto es, la misma densidad de impacto para una boquilla con las mismas características físicas. Para el caso particular de este experimento el polinomio que mejor ajusta es:

$$y = -3E-11x^6 + 1E-07x^5 - 0.0002x^4 + 0.1527x^3 - 57.18x^2 - 829.57x - 663859.$$

$$R^2 = 0.9764$$

Donde y= flux de calor en W/m² y x= Temperatura de la superficie en °C.

Se realiza el ajuste polinomial porque se apega mejor a la respuesta experimental del sistema que otro tipo de ajustes como son logarítmico o exponencial. Se observa que un orden mayor en el polinomio presenta mejor ajuste, la elección de un polinomio de orden 6 es debido a que su solución no es compleja, a diferencia de polinomios de mayor orden.

Tabla 4.3 Polinomios que caracterizan las curvas de densidad de flujo de calor en la posición de máxima densidad de impacto.

Boquilla	Polinomio
6.5-90	$Y = -2E-10x^6 + 6E-07x^5 - 0.0008x^4 + 0.506x^3 - 122.78x^2 - 807.26x - 176844$ $R^2 = 0.9785$
8-90	$Y = -3E-11x^6 + 1E-07x^5 - 0.0002x^4 + 0.1527x^3 - 57.18x^2 - 829.57x - 663859.$ $R^2 = 0.9764$
Master-Cooler	$Y = -2E-10x^6 + 7E-07x^5 - 0.001x^4 + 0.5643x^3 - 134.54x^2 + 1387.3x - 439693$ $R^2 = 0.98023$
460.884	$y = -3E-10x^6 + 1E-06x^5 - 0.0014x^4 + 0.8715x^3 - 202.64x^2 + 2546.8x - 229028$ $r^2 = 0.97843$
632.882.16CC	$Y = -2E-10x^6 + 8E-07x^5 - 0.0011x^4 + 0.7067x^3 - 193.61x^2 + 10180x - 237908$ $R^2 = 0.98132$

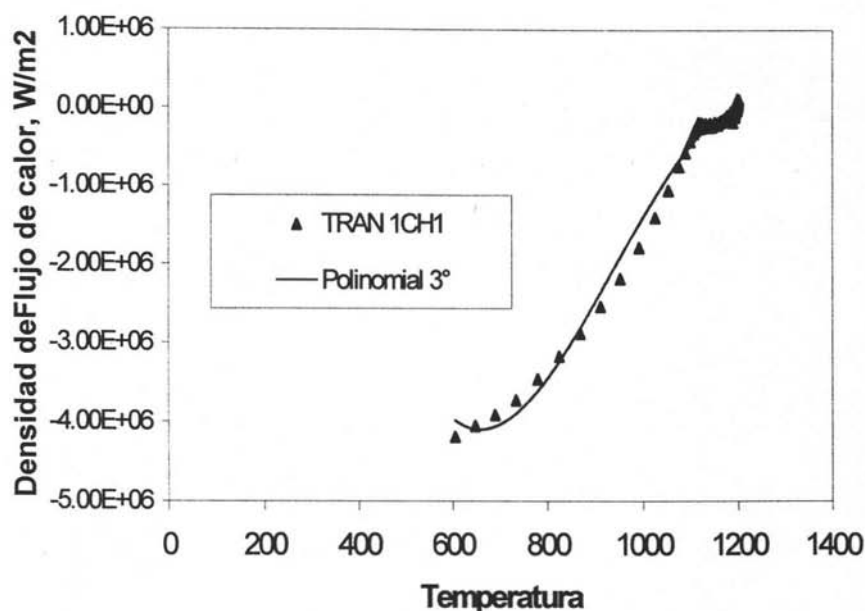


Figura 4.24 Segmento de la curva de flux de calor de TRAN 1 CH1 en el rango de temperaturas de trabajo en la zona secundaria de enfriamiento.

En la Tabla 4.3 se presentan los polinomios que caracterizan a las curvas de distribución de flujo de calor como función de la temperatura; estos polinomios son reportados en orden 6 ya que este orden es el que presenta el mejor ajuste. La desviación (R^2) que presentan los polinomios es de alrededor de 0.97, presentando en algunos casos una desviación de 0.98, lo cual indica que se encuentra un ajuste aceptable.

Los polinomios reportados son aplicables bajo las mismas condiciones de operación, posición de la huella de agua e intransferibles a una boquilla distinta.

En la Figura 4.24 se muestra un segmento de la curva de flux de calor de la Figura 4.23. El segmento presentado corresponde a las temperaturas de trabajo propias del sistema secundario de enfriamiento. Para este rango de temperaturas se presenta un buen ajuste con un polinomio de tercer grado el cual es:

$$y = -0.0454x^3 + 128.17x^2 - 109712x + 3E+07$$
$$R^2 = 0.98626$$

A pesar de que un valor determinado de densidad de impacto pueda repetirse en mas de una boquilla, las características propias de cada boquilla hacen imposible la aplicación de la correlación en distintas espreas. Las correlaciones poseen un carácter local, lo que no las hace validas bajo otras condiciones.

Capítulo 5. Conclusiones

- El dispositivo, así como la metodología experimental resultaron apropiados, pues fue posible la reproducibilidad, tanto en frío como en caliente, de los experimentos realizados. Además, los resultados son consistentes con investigaciones anteriores y reportes en la literatura.
- La forma de las huellas proyectadas dependen directamente de las características físicas de la boquilla.
- Los valores máximos de densidad de impacto son producidos por la boquilla de agua Lechler 632.882.16CC. La boquilla Master-Cooler presenta una distribución de densidad de impacto agua más homogénea. En el resto de las boquillas de niebla se encontraron valores intermedios. La boquilla 460.884 presenta la huella más pequeña en dimensiones, aunque el área de su máxima densidad de impacto es cuatro veces mayor que la de las otras boquillas caracterizadas.
- En el caso de los experimentos en frío se observa que las zonas de mayor densidad de impacto (L/m^2s) se localizan en el centro geométrico de la espesa, mientras que en la periferia se encuentra la menor incidencia de agua.
- En los experimentos en caliente, las curvas de enfriamiento muestran que la extracción de calor más severa ocurre en la zona en la que la densidad de impacto es mayor; por otro lado, en las zonas con menor densidad de impacto la evolución térmica de la placa es más lenta.

- Para evaluar la densidad de flujo de calor en el código que resuelve el IHCP se utilizó un valor $r = 3$. Con valores menores las curvas de enfriamiento y de densidad de flux de calor son sobrestimadas y/o inestables numéricamente.
- Los curvas de enfriamiento presentan una etapa de transición en el rango de temperatura de 800 a 1100 °C. El efecto Liedenfrost es más susceptible de presentarse en zonas en las que la incidencia de agua es muy poca (áreas de salpicado de agua).
- El máximo valor de extracción de calor es producido por la boquilla de agua 632.882.16CC, debido a que esta boquilla es la que registra la máxima densidad de impacto local.
- Cualquier ajuste polinomial a partir de orden 4, aplicado a las curvas de flux de calor da como resultado una buena aproximación. Entre mayor sea el orden del polinomio el ajuste es mas cercano, sin embargo la correlación obtenida es aplicable únicamente bajo los mismos parámetros de operación de la boquilla, así como características físicas similares. El ajuste es de carácter local, no puede extrapolarse a otras boquillas ni condiciones de operación.
- La caracterización de la extracción de calor por medio de boquillas de agua y niebla es útil para manipular la disposición y las condiciones de las boquillas en la zona secundaria de enfriamiento y por ende controlar y optimizar el enfriamiento, dando por resultado enfriamientos mas homogéneos que no afecten ni las propiedades mecánicas ni la geometría del producto de colada.

Apéndice: Solución del IHCP.

Dentro de las soluciones numéricas del IHCP existen dos grandes variantes: las soluciones de dominio de tiempo completo, en el que a partir de la historia térmica completa medida en un punto del material se estima la curva de densidad de flujo de calor para todo el tiempo de proceso en un solo paso, y las de método secuencial, en las que se resuelve el IHCP para cada paso de tiempo [8].

Beck *et al.* [9] proponen un método secuencial para la resolución del problema inverso de conducción de calor con propiedades físicas dependientes de la temperatura y flujo de calor en una sola dirección. En éste, la temperatura es medida experimentalmente como función del tiempo en uno o más puntos dentro de un cuerpo, en el cual el flujo de calor es unidireccional, como se muestra en la Figura A.1.

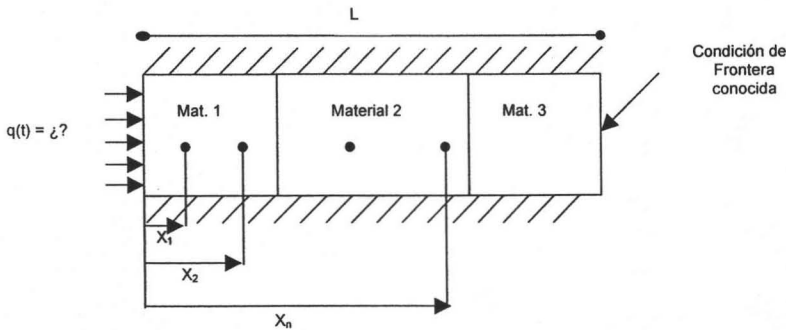


Figura A.1. Representación esquemática del problema inverso de conducción de calor en un sistema de flujo de calor 1D, compuesto por tres materiales.

La solución de éste IHCP consiste en obtener la densidad de flujo de calor a partir de la respuesta térmica experimental (Y_{ij}) como función del tiempo (subíndice i) y

de la posición en el interior del cuerpo (subíndice j). Esta respuesta se muestra esquemáticamente en la Figura A.2

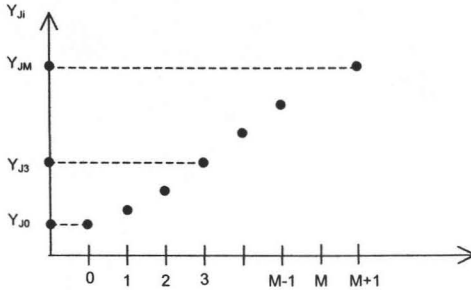


Figura A.2 Temperaturas experimentales medidas para puntos x_j y tiempos t_i .

Si solo se cuenta con un sensor de temperatura o termopar en el interior del cuerpo, entonces $j = 1$. Se supone que los intervalos entre mediciones de temperaturas son constantes y tienen un valor Δt , así que:

$$t_i = t_{i-1} + \Delta t \quad (\text{A.1})$$

El modelo general para flujo de calor en estado inestable, unidimensional, en un cuerpo es [9]:

$$\frac{1}{x^p} \frac{\partial}{\partial x} \left(kx^p \frac{\partial T}{\partial x} \right) + g' - \frac{2h}{\delta} (T - T_{\infty}) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{A.2})$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q(t) \quad (\text{A.3})$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = h_L [T(L, t) - T_{\infty_L}] + q_L(t) \quad (\text{A.4})$$

$$T(x,0) = f(x) \tag{A.5}$$

En donde g' representa la generación de calor por unidad de volumen, δ es el espesor de una "aleta", T_{∞} y $T_{\infty L}$ son temperaturas ambiente en las fronteras del cuerpo, respectivamente. La función $f(x)$ puede ser tanto la distribución inicial de temperaturas o la distribución de temperaturas en el tiempo t_{M-1} , cuando se busca el valor q_M . El exponente P en la ecuación 2 es $P = 0$ por tratarse de un sistema con coordenadas rectangulares. El flujo de calor en $x = L$, $q_L(t)$ es una función conocida del tiempo.

Los valores h , g' , T_{∞} y ρ son funciones conocidas de x , o de T . Los valores de k y C_p pueden ser funciones de x o de T .

Aunque la densidad de flujo de calor en la superficie depende del tiempo, es posible suponer que es constante en pequeños pasos de Δt , o que varía linealmente con el tiempo. En el primer caso, se tiene entonces que:

$$q_{M+1} = q_{M+2} = \dots = q_{M+r-1} = q_M$$

Consecuentemente las mediciones a r tiempos futuros se usan para encontrar q_M .

En la resolución del IHCP los pasos pequeños de tiempo para los elementos de flux de calor causan inestabilidad en la solución; sin embargo, si se usan las temperaturas futuras en conjunto con el criterio de los mínimos cuadrados (Ec. A.6) y se minimizan se puede reducir este efecto.

$$S = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^n (Y_{j,M+i-1} - T_{j,M+i-1})^2 \tag{A.6}$$

Si se usa solo un tiempo futuro ($r = 1$), y un único termopar ($n = 1$), entonces minimizar la ecuación A.6 equivaldrá a encontrar el valor q_M que provoca que T_{jM} sea lo más cercano a Y_{jM} .

La función S se minimiza cuando $\frac{\partial S}{\partial q_M}$ es igual a cero:

$$2 \sum \sum (Y_{j,M+i-1} - T_{j,M+i-1}) \left(-\frac{\partial T_{j,M+i-1}}{\partial q_M} \right) = 0 \quad (\text{A.7})$$

La temperatura T es función de q_M y para pequeños cambios en q_k desde un tiempo al siguiente, la serie de Taylor truncada alrededor de q_{M-1} es:

$$T_{j,M+i-1} = T_{j,M+i-1}^* + (q_M - q_{M-1}) T_{j,M+i-1;q}^* \quad (\text{A.8})$$

La notación $T_{j,M+i-1}^*$ significa que T es evaluada usando las propiedades termofísicas y el flux de calor (q_{M-1}) en el tiempo t_{M-1} .

El coeficiente de sensibilidad además se define como:

$$\dot{T}_{j,M+i-1;q}^* = \frac{\partial T_{j,M+i-1}}{\partial q_M} \quad (\text{A.9})$$

Combinando la Ecuación A.8 con la Ecuación A.9 y resolviendo para q_M se tiene:

$$q_M = q_{M-1} + \frac{1}{\Delta_M} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^n (Y_{j,M+i-1} - T_{j,M+i-1}^*) T_{j,M+i-1;q}^* \quad (\text{A.10})$$

$$\Delta_M = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^n (T_{j,M+i-1;q}^*)^2 \quad (\text{A.11})$$

Para evitar la dependencia con las propiedades termofísicas, el coeficiente de sensibilidad también es calculado considerando que las propiedades térmicas no cambian considerablemente de un paso a otro.

GLOSARIO

Boquilla o Esprea: Pieza hueca de metal, en general cónica o cilíndrica, que se adapta a un tubo por el cual circula un fluido , dándole forma a la salida del fluido (abanico, cono, haz) y alterando la velocidad y presión con la que éste sale.

CH: Nomenclatura con la cual se designa a los termopares instrumentados en la placa de acero. El número que le sigue corresponde al número del termopar.

Colada continua: Proceso metalúrgico por el cual se producen laminas o varillas de acero u otros metales; consiste en pasar del metal líquido directamente a los rodillos de laminación evitando el consumo de energía necesario para recalentar al metal.

CONDUCT: : Nombre del programa de cómputo (escrito en FORTRAN) empleado para resolver el DHCP.

CONTA: Nombre del programa de cómputo (escrito en FORTRAN) empleado para resolver el IHCP.

Densidad de impacto: Cantidad de agua capturada (medida en unidades de volumen) en un área determinada por unidad de tiempo.

DHCP: Siglas de **D**irect **H**eat **C**onduction **P**roblem (problema directo de conducción de calor).

Experimento en caliente: Experimentos que se realizan a la temperatura promedio de operación de la colada continua. En estos experimentos se registran los historiales térmicos durante la pérdida de energía de las placas de acero.

Espreado: Acción de rociar una superficie por medio de un fluido o medio de enfriamiento utilizando espumas.

Experimento en frío: Experimento que se realiza a temperatura ambiente. No involucra enfriamiento. En estos experimentos se registran las distribuciones de flujo, la forma de la huella, etc.

Flux: Flujo de calor por unidad de área.

Huella: Imagen grafica consecuencia del impacto del fluido de enfriamiento sobre una superficie.

IHCP: Siglas del Inverse Heat Conduction Problem (problema inverso de conducción de calor).

Niebla: Mezcla de agua y aire, en la cual, las partículas de agua se encuentran suspendidas en el aire.

Prueba: Nomenclatura con la cual se designa a los experimentos en frío; el número que le sigue corresponde al número de experimento en particular.

r: Parámetro (número de tiempos futuros) empleado en la solución del IHCP.

TRAN: Nomenclatura con la cual se designa a las pruebas en caliente; el número que le sigue corresponde al número de experimento en particular.

Bibliografía

1. C. Luege Camargo, "Mejoras en la colada continua". Tesis de Licenciatura, Facultad de Química UNAM, 1986.
2. J. Segupta, B.G. Thomas y M.A. Wells, "The Use Of Water Cooling during the Continuous Casting of Steel and Aluminum", Metallurgical and Materials Transactions, Enero 2005 p: 187-204 .
3. G. E. Totten, C.E. Bates y N. A. Clinton, "Handbook of Quenchants and Quenching Technology", ASM International, Materials Information Society, Ohio 1993, p: 239-285.
4. F.R. Camisani-Calzolari, I.K. C.Pistorius, "Speed Disturbance Compensation in the Secondary Cooling Zone in Continuous Casting", ISIJ, 2000 p: 49-56.
5. F. P. Pleschlutschnigg, W. Rahmfeld; "Secondary Cooling System for Slab Casters: for air mist to dry casting", Iron and Steel Engineer, p: 51-55.
6. J. Szekely y N. J. Themelis, "Rate Phenomena in Process Metallurgy", Ed. Wiley – Interscience, 1971, p: 639 – 683.
7. E.B. Montufar Jiménez , "Caracterización de la Extracción de Calor en una Placa de Acero Templado por Rociado de Agua", Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM, 2003.
8. J. V. Beck y B. Litkouhi, "Efficient Sequential Solution of the Non linear Inverse Heat Conduction Problem", Numerical Heat Transfer, Vol. 5, p: 275 – 286, 1982.

9. J. V. Beck y B. Blackwell, "Inverse Heat Conduction", Wiley Interscience, 1985.
10. J.E Camporredondo, F.A. Acosta, A.H Castillejos, "Analysis of Thin- Slab Casting by the Compact-Strip Process" part 2, Metallurgical and Materials Transactions Vol. 35B n3. Junio 2004 p: 561-573.
11. B. Hernández Morales, J. S. Téllez Martínez, J.A. Barrera Godínez y A. Ingalls Cruz, "Cooling Curve Analysis Using an Interstitial-Free Steel", 19th ASM Heat Treating Conference, ASM International, Cincinnati, Ohio 1999, p: 284-291.
12. B. Hernandez – Morales, J. K. Brimacombe, E. B. Hawbolt y S. M. Gupta, "Determination of Quench Heat – Transfer Coefficients Using Inverse Techniques", Proceedings of the First International Conference on Quenching and Control of Distortion, Chicago Illinois, Septiembre 1992, p: 155 – 164.
13. J. Clegg, "Precision Casting Processes", Pergamon Press, 1991, p: 73 – 75.
14. H. W. Diter, "Foundry Core Practice", American Foundrymen's Society, Third Edition, 1966, p: 207 – 219.
15. M. El-Bealy, "Monotonic and Fluctuated Cooling Approaches in Secondary Cooling Zones During Continuous Casting", Pergamon Press, 1997 p: 49-56.
16. F. Hitoshi, N. Hatta, H. Asakawa, T. Hashimoto, "Predictable Modelling of Heat transfer Coefficient between Spraying Water and a Hot Surface above the Leidenfrost Temperature". ISIJ Enero 1997. P: 492-497.
17. L. Beding, "Spray parameters and Heat Transfer Coefficients of Spray Nozzles For Continuous Casting", Steel Making Conference Proceedings. 1995, p: 391-398.