



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

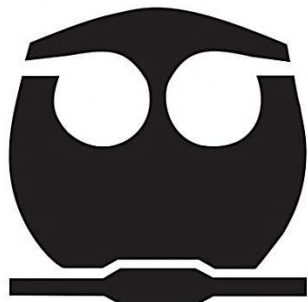
**EFFECTO DE LA TEMPERATURA INICIAL SOBRE
EL COMPORTAMIENTO DEL FRENTE DE
MOJADO EN TEMPLE CON CONVECCIÓN
FORZADA DE ACERO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**PRESENTA:
APOLO CABELLO GONZÁLEZ**

2014





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. SERGIO GARCÍA GALÁN

Suplente 1: Prof. ARTURO ALEJANDRO SÁNCHEZ SANTIAGO

Suplente 2: Prof. BALBINA OJEDA RAMÍREZ

Sitio donde se desarrolló el tema:

Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Facultad de Química, U.N.A.M., Edificio D, Laboratorio 005.

Asesor del tema:

Dr. José Bernardo Hernández Morales.

Sustentante:

Apolo Cabello González

Contenido

Resumen.....	1
1 Introducción.....	2
1.1 Marco conceptual.....	2
1.2 Justificación.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.4 Hipótesis.....	5
1.5 Metas.....	5
2 Antecedentes.....	6
2.1 Temple.....	6
2.2 Medios de enfriamiento para temple.....	8
2.2.1 Frente de mojado y temperatura de Leidenfrost.....	10
2.3 Análisis de curvas de enfriamiento.....	11
2.3.1 Probetas.....	12
2.3.2 Interpretación de curvas de enfriamiento.....	14
2.4 Temperatura de austenización.....	16
3 Equipo y procedimiento experimental.....	18
3.1 Probeta.....	18
3.2 Desplazamiento de la probeta.....	19
3.3 Horno tipo libro.....	20
3.4 Sistema de enfriamiento.....	21
3.5 Adquisición de datos y video.....	22
3.6 Condiciones experimentales.....	23
3.7 Procedimiento.....	24
4 Resultados.....	26
4.1 Repetitividad del sistema.....	26
4.2 Curvas de enfriamiento.....	27
4.3 Imágenes de frente de mojado.....	30
5 Análisis de Resultados.....	35

5.1	Historia de rapidez de enfriamiento.....	35
5.2	Velocidad del frente de mojado.....	42
5.3	<i>Flux</i> de calor en la superficie.....	46
5.4	Temperatura de Leidenfrost	53
6	Conclusiones y recomendaciones	57
7	Referencias bibliográficas	58

Índice de figuras

<i>Figura 2.1. Esquema general de las etapas en el tratamiento térmico de temple.</i>	6
<i>Figura 2.2. Diagrama CCT (con la rapidez de enfriamiento a 750 °C en el eje de las abscisas) para un acero AISI 4140 [6].</i>	8
<i>Figura 2.3. Comportamiento del frente de mojado a lo largo de la superficie de una probeta cilíndrica de base plana [3].</i>	11
<i>Figura 2.4. Representación esquemática de una curva de enfriamiento en un medio vaporizable: Etapa A - Capa de vapor, etapa B - Formación de burbujas, etapa C - Convección pura [12].</i>	12
<i>Figura 2.5. Rapidez de enfriamiento como función de: (a) tiempo y (b) temperatura local [12].</i>	14
<i>Figura 2.6. Rangos de temperatura para tratamientos térmicos en aceros con contenido máximo de 1.6 %C [18].</i>	17
<i>Figura 3.1. Esquema de la probeta cilíndrica con punta cónica (a) vista superior, (b) vista longitudinal, (c) vista general.</i>	19
<i>Figura 3.2. Fotografía del sistema para sostener y desplazar la probeta.</i>	20
<i>Figura 3.3. Horno de resistencia eléctrica, con diseño tipo libro.</i>	21
<i>Figura 3.4. Esquema general del sistema de enfriamiento utilizado: a) contenedor primario, b) bomba de ¼ Hp, c) flujómetro, d) tubo de acrílico, e) contenedor de vidrio, f) probeta, g) contenedor secundario [3].</i>	22
<i>Figura 4.1. Curvas de enfriamiento para tres diferentes termopares (T/C1 (25 mm), T/C2 (35 mm), y T/C3 (45 mm)) en dos pruebas independientes (P1 y P2), con temperatura inicial de 920 °C.</i>	27
<i>Figura 4.2. Curvas de enfriamiento en las posiciones de los tres termopares, para un experimento con temperatura inicial de 920 °C. La escala de tiempo es con respecto al inicio de la adquisición de datos.</i>	28
<i>Figura 4.3. Efecto de la temperatura inicial en las respuestas térmicas correspondientes a los tres termopares: (a) T/C3 (45 mm), (b) T/C2 (35 mm) y (c) T/C1 (25 mm). Para tres experimentos con temperaturas iniciales de 800, 860 y 920 °C.</i>	29
<i>Figura 4.4. Procedimiento para indicar la posición de cada termopar en las imágenes, para un experimento aleatorio.</i>	31

<i>Figura 4.5. Imágenes de la superficie de la probeta ilustrando las distintas etapas del seguimiento del frente de mojado, para un experimento con temperatura inicial de 920 °C. (a) 142.56 s, (b) 142.85 s, (c) 149.63 s, (d) 152.79 s, (e) 155.25 s y (f) 157.75 s. Los tiempos son con respecto al inicio de la adquisición de datos.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4.6. Imágenes de la superficie de la probeta en el instante en el que ha llegado a la posición final: (a) $T_0 = 800\text{ °C}$, (b) $T_0 = 860\text{ °C}$, (c) $T_0 = 920\text{ °C}$.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 5.1. Historias de rapidez de enfriamiento para un experimento con temperatura inicial de 920 °C.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 5.2. Historias de rapidez de enfriamiento para tres termopares, en un experimento con temperatura inicial de 920 °C. (a) Curvas completas, (b) ampliación de las curvas en la zona cercana a la rapidez de enfriamiento máxima.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 5.3. Efecto de la temperatura inicial de la probeta en la rapidez de enfriamiento máxima, para los tres termopares.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 5.4. Historias térmicas medidas (\mathcal{H}) y rapidezces de enfriamiento calculadas (\mathcal{R}), como función de la temperatura local, para el termopar T/C2 (35 mm), de experimentos con diferente temperatura inicial. Las flechas indican los ejes correspondientes a cada tipo de curva.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 5.5. Posición del frente de mojado como función del tiempo, para un experimento con temperatura inicial de 920 °C (símbolos) y regresión lineal (línea sólida).</i>	<i>43</i>
<i>Figura 5.6. Velocidad del frente de mojado como función de la temperatura inicial. Las barras verticales representan a la desviación estándar.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 5.7. Imágenes de la superficie de la probeta en el instante en el que el frente de mojado llega a la base del cono invertido: (a) $T_0 = 800\text{ °C}$ ($t = 2\text{ s}$), (b) $T_0 = 860\text{ °C}$ ($t = 2.3\text{ s}$) y (c) $T_0 = 920\text{ °C}$ ($t = 2.3\text{ s}$). Los tiempos están referidos al rompimiento de la capa de vapor en la punta de la probeta.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 5.8. Flux de calor en la superficie como función de la temperatura de superficie, estimado con diferentes valores del número de tiempos futuros (r), para el termopar T/C1 (25 mm) en un experimento seleccionado aleatoriamente.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 5.9. Flux de calor en la superficie como función del tiempo, con superposición de imágenes, para un experimento con temperatura</i>	

<i>inicial de 800 °C. Los tiempos se refieren al inicio de la adquisición de datos.</i>	50
<i>Figura 5.10. Flux de calor de la superficie como función de la temperatura de la superficie, para el termopar T/C2 (35 mm), en un experimento seleccionado aleatoriamente.</i>	51
<i>Figura 5.11. Efecto de la temperatura inicial de la probeta sobre el flux de calor de la superficie para el termopar T/C2 (35 mm). (a) Curvas completas, (b) ampliación de las curvas en la región de capa de vapor. .</i>	52
<i>Figura 5.12. Determinación del flux de calor de la superficie correspondiente al rompimiento de la capa de vapor, para cada termopar, en un experimento con temperatura inicial de 920 °C. Las líneas verticales corresponden a los valores de tiempo para el rompimiento de la capa de vapor.</i>	54
<i>Figura 5.13. Determinación de la temperatura de Leidenfrost, para cada termopar, en un experimento con temperatura inicial 920 °C.</i>	54
<i>Figura 5.14. Temperatura de Leidenfrost como función de la temperatura inicial de la probeta y de la posición del termopar para todos los experimentos.</i>	56

Índice de tablas

<i>Tabla 2.1. Severidad de diferentes medios de temple [2].</i>	9
<i>Tabla 3.1. Composición química (nominal) de acero inoxidable AISI 304 [19].</i>	18
<i>Tabla 3.2. Condiciones experimentales.</i>	23
<i>Tabla 5.1. Tiempo requerido para que el frente de mojado llegue a los puntos de referencia, para un experimento con temperatura inicial de 920 °C. El tiempo está referido al inicio de la adquisición de datos.</i>	42

Resumen

Las propiedades mecánicas de los aceros dependen de su microestructura y ésta, a su vez, es función de la composición química fijada durante la fabricación del acero y de la modificación que se le dé por medio de tratamientos térmicos. El tratamiento térmico de *temple* consiste en calentar a un componente de acero hasta transformar la microestructura inicial a austenita, mantenerlo a esta temperatura durante un cierto tiempo, para después enfriarlo bruscamente, con lo que se produce el microconstituyente martensita, brindando así la mayor dureza posible al acero.

Durante el temple en medios vaporizables, el enfriamiento se lleva a cabo a través de etapas bien definidas: ebullición en presencia de capa de vapor, ebullición en presencia de burbujas de vapor y convección pura. Para determinar el efecto de la temperatura inicial sobre las etapas que ocurren durante el enfriamiento, en este trabajo, se realizaron ensayos de temple de probetas de acero inoxidable AISI 304 de geometría cilíndrica con punta cónica, instrumentadas con termopares tipo K ubicados cerca de la superficie lateral. Como variables independientes se consideraron tres valores de temperatura inicial (800, 860 y 920 °C) y un valor de flujo de agua (20 LPM). Además de adquirir las curvas de enfriamiento, se videograbaron los eventos sobre la superficie de la probeta. Con esta información y utilizando los paquetes de cómputo *ModelaUNAM* y *WinProbe* se estimó el *flux* de calor en la superficie de la probeta como una función de la temperatura superficial (también estimada), para determinar la temperatura de Leidenfrost, que marca el límite entre las dos primeras etapas de enfriamiento.

Se encontró que la temperatura de Leidenfrost varía con respecto a la posición en que se mide la respuesta térmica. Así mismo, al variar la temperatura inicial de 800 a 860 °C la temperatura de Leidenfrost aumenta, mientras que varía muy poco al aumentar la temperatura inicial de 860 a 920 °C.

1 Introducción

En este primer capítulo se muestra, primero, el marco conceptual que brinda la información necesaria para conocer los fundamentos de este trabajo, seguido de la justificación, la hipótesis, los objetivos y las metas de este proyecto.

1.1 Marco conceptual

Las propiedades mecánicas son importantes en el diseño de componentes ingenieriles, porque el funcionamiento y desempeño de los productos dependen comúnmente de su capacidad para resistir deformaciones bajo esfuerzos que enfrentan en el servicio [1]. Estas propiedades incluyen el módulo de elasticidad, ductilidad, dureza y varias medidas de resistencia mecánica. Las propiedades mecánicas de los materiales dependen de la composición química y la microestructura y, por ende, hay dos maneras de conseguir que la propiedad mecánica del material sea la deseada; una es por medio del diseño del porcentaje de sus componentes al momento de su fabricación (composición química), y la segunda es por medio de la modificación de la microestructura original del material terminado, a través de, por ejemplo, tratamientos térmicos.

Un tratamiento térmico se puede definir como la operación de calentamiento y enfriamiento aplicada a metales o aleaciones en estado sólido, con la finalidad de obtener propiedades mecánicas deseadas. Este objetivo se logra a través de calentar el componente a una temperatura específica predeterminada, mantener al material a esa temperatura durante un tiempo requerido, y finalmente enfriarlo desde esa temperatura [2]. Dentro de los tratamientos térmicos, se reconocen: temple, revenido, recocido y normalizado, como los principales.

Para el caso específico del tratamiento térmico de temple de aceros, a la temperatura a la que se lleva el componente durante el calentamiento se le

conoce como *temperatura de austenización*. Llevar a la aleación a esta temperatura tiene como finalidad el formar estructuras cristalinas de austenita de manera homogénea en todo el componente, por lo que esta temperatura de austenización depende de la composición química de la aleación.

En general, la temperatura de austenización se encuentra dentro del rango de temperaturas de 800 a 1000 °C, a menos que se trate de aceros de herramienta, en cuyo caso resulta es mayor. Posterior al calentamiento de la aleación y la homogenización de su microestructura, el material se enfría de manera brusca en algún medio a menor temperatura. Cuando el temple se realiza en medios vaporizables (como lo es el agua), se presentan tres etapas de enfriamiento: *ebullición en presencia de capa de vapor*, *ebullición con formación de burbujas* y *convección pura*; dado que la rapidez de extracción de calor del medio no es necesariamente constante en toda la superficie de una pieza, es común que estas tres etapas coexistan.

A la frontera entre la zona de presencia de capa de vapor y el área de formación de burbujas, se le llama *frente de mojado* y a la temperatura a la que esto ocurre, *temperatura de Leidenfrost*. El avance del frente de mojado es de suma importancia ya que define la respuesta térmica dentro del material; ésta, a su vez, define la variación en la microestructura y esta última, finalmente, definirá las propiedades mecánicas del material.

1.2 Justificación

Se sabe que durante un tratamiento térmico de temple, la cantidad de energía con la que una pieza inicia el enfriamiento depende de la temperatura de austenización a la que se somete y de su masa. Debido a que las propiedades mecánicas dependen de la microestructura obtenida durante el enfriamiento, y que este enfriamiento a su vez depende de la cantidad de energía inicial en la

pieza, resulta de interés estudiar el efecto de la temperatura inicial en el proceso de temple.

Trabajos recientes [3] han mostrado las ventajas de utilizar probetas cilíndricas de punta cónica para caracterizar a la extracción de calor y a la cinética del frente de mojado para diversos medios de temple. Debido a que este tipo de probeta es de reciente uso, es importante generar información de experimentos de temple para probetas con punta cónica, ya que existen muy pocos datos para esta geometría. En particular, es importante conocer el efecto de la temperatura inicial sobre los fenómenos que ocurren en la superficie de la probeta durante un ensayo de temple.

1.3 Objetivos

Objetivo primario

Caracterizar el efecto de la temperatura inicial sobre la temperatura de Leidenfrost y el comportamiento del frente de mojado de una probeta cilíndrica con punta cónica de acero inoxidable AISI 304, templada en agua a 60 °C fluyendo en paralelo a la probeta.

Objetivos secundarios

- a. Caracterizar al medio de temple mediante el análisis de curvas de enfriamiento.
- b. Determinar la velocidad del frente de mojado.
- c. Caracterizar la extracción de calor hacia el medio de temple.
- d. Determinar la temperatura de Leidenfrost.

1.4 Hipótesis

Al disminuir la temperatura inicial en la superficie de la probeta existirá menor cantidad de energía disponible en ésta para mantener estable a la capa de vapor, provocando que la velocidad del frente de mojado aumente.

Al aumentar la temperatura inicial en la superficie de la probeta aumentará la cantidad de energía acumulada y se obtendrá una mayor temperatura de Leidenfrost. En el caso de un frente de mojado que avanza a velocidad finita, como es el caso de temple en agua, la temperatura de Leidenfrost será distinta para diferentes posiciones a lo largo de la probeta.

1.5 Metas

- i. Templar probetas cilíndricas de punta cónica (acero inoxidable AISI 304), en agua.
- ii. Registrar historias térmicas durante el temple.
- iii. Realizar videograbaciones durante el temple.
- iv. Calcular la historia de rapidez de enfriamiento.
- v. Estimar la historia del *flux* de calor de la superficie.

2 Antecedentes

En este capítulo se revisarán los fundamentos del proceso de temple, el análisis e interpretación de las curvas de enfriamiento y algunos aspectos relacionados con la probeta de acero, con el fin de ayudar a una mejor comprensión del tema desarrollado en este trabajo.

2.1 Temple

Una ventaja de los aceros es que al ser sometidos a un tratamiento térmico se pueden modificar notablemente sus propiedades mecánicas. Cuando un acero se calienta hasta una temperatura por encima de la temperatura de austenización (A_3 para aceros hipoeutectoides), se mantiene a esta temperatura durante un cierto rango de tiempo y después se enfría bruscamente en algún medio a menor temperatura, se le conoce como *temple*. En la Figura 2.1 se muestra el esquema general de las etapas de este tratamiento térmico.

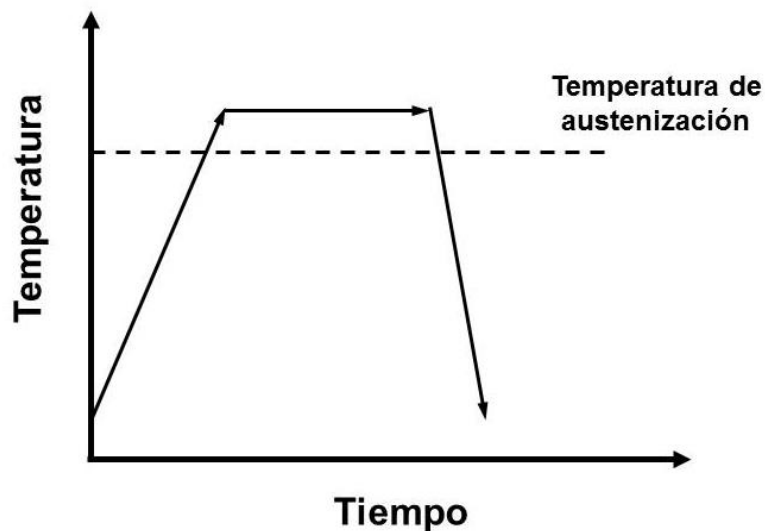


Figura 2.1. Esquema general de las etapas en el tratamiento térmico de temple.

Conocer y comprender las variables que controlan al proceso de temple es de gran importancia, ya que a través del control del proceso se puede controlar la microestructura del material y, por tanto, sus propiedades mecánicas finales. También es deseable controlar (o al menos estimar) la distorsión producida por el enfriamiento brusco [4].

Una de las variables más importantes del tratamiento térmico de temple es la rapidez de enfriamiento; si ésta es demasiado lenta, el temple podría no llegar a ocurrir y, si la rapidez de enfriamiento es muy alta, podrían provocarse microfisuras en el material o en el peor de los casos, el agrietamiento de éste.

Dado que industrialmente la mayor parte de los productos de acero que son sometidos a un tratamiento térmico son enfriados de manera continua, resulta de gran importancia seguir la evolución de las transformaciones de fase que se suscitan en estos aceros durante su enfriamiento. Generalmente, este seguimiento se lleva a cabo a través de los llamados *diagramas CCT* (*Continuous Cooling Transformation*). En estos diagramas se presentan las transformaciones de fase que sufre el material a una rapidez de enfriamiento dada. Una rapidez de enfriamiento elevada en el tratamiento de temple es del orden de 100 °C/s (6000 °C/min), como puede observarse en la Figura 2.2.

Con estos valores de rapidez de enfriamiento en un acero, se provoca una transformación del tipo adifusional, ya que no se permite que el carbono difunda a zonas de menor concentración, originando el microconstituyente *martensita*. En otro tipo de tratamientos térmicos (como el recocido y el normalizado), se permite la difusión del carbono a estas zonas de menor concentración, produciendo microconstituyentes como la perlita, la bainita y la ferrita [5].

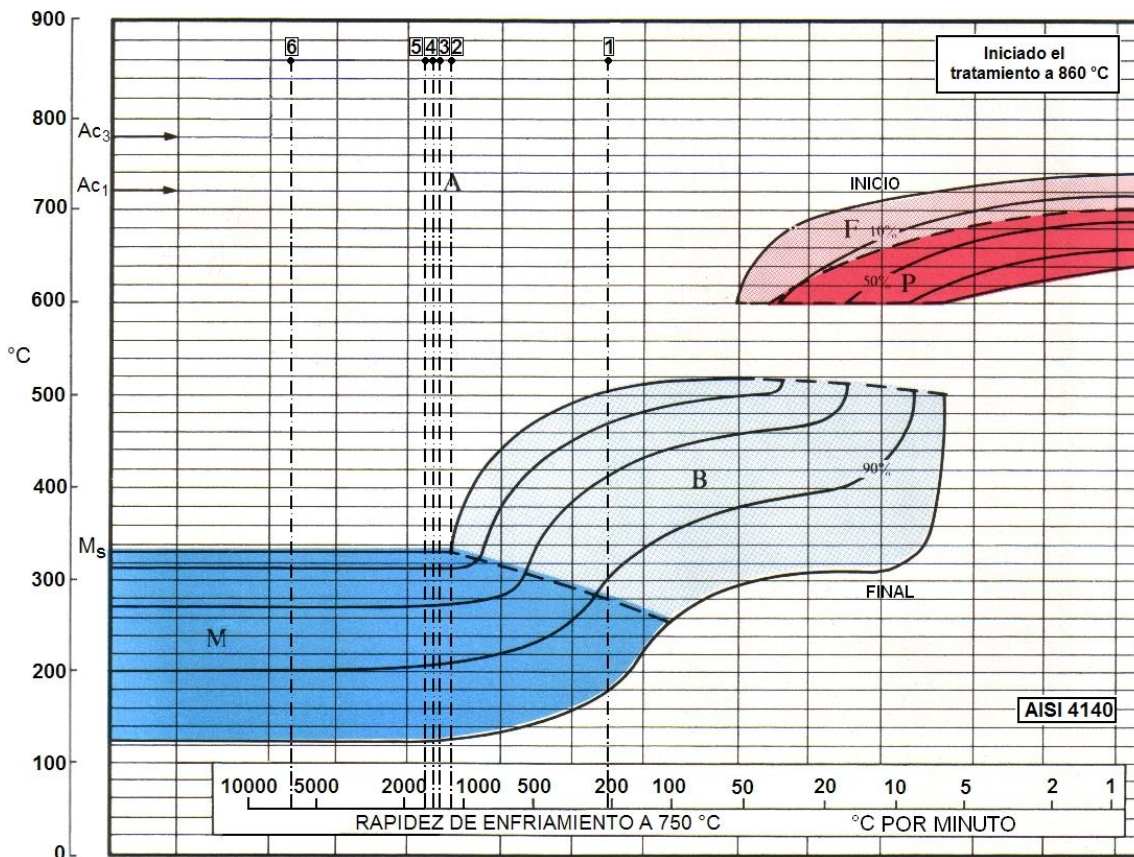


Figura 2.2. Diagrama CCT (con la rapidez de enfriamiento a 750 °C en el eje de las abscisas) para un acero AISI 4140 [6].

2.2 Medios de enfriamiento para temple

El tratamiento térmico de temple se puede llevar a cabo en diferentes medios, tales como: agua, aceite, aire, salmuera y sales fundidas. También se ha realizado en soluciones acuosas de polímeros, gases y soluciones cáusticas. La rapidez de enfriamiento provocada por el medio de temple depende principalmente de: la temperatura del medio, la agitación, la relación área superficial – espesor de la pieza, la naturaleza del medio y su composición (en caso de soluciones) [7]. Los tres medios de temple más utilizados son: agua, aire y aceite. Entre más rápido sea el enfriamiento durante el temple, se dice

que el medio resulta más severo; de los tres medios de temple más utilizados, el agua es el que produce un temple más severo, seguido por el aceite y por último, el aire [8].

La severidad de un medio de temple puede ser determinada a partir de un equivalente de transferencia térmica (H), el cual está dado por el cociente entre el coeficiente de transferencia de energía entre el medio y el material, y la conductividad térmica del material. Bajo este concepto, el medio de enfriamiento ideal sería aquel que disipa la energía de la superficie del material tan pronto como ésta llega desde el interior ($H = \infty$). A pesar de que dicho medio no existe en la práctica, se utiliza como una comparación para los diferentes medios de temple, como se muestra en la Tabla 2.1 [2]. Una limitación de este parámetro es que supone que tanto la conductividad térmica del sólido como el coeficiente de transferencia de calor entre la superficie del sólido y el fluido son constantes.

Tabla 2.1. Severidad de diferentes medios de temple [2].

Valor de H	Medio de temple	Condición del medio
0.02	aire	quieto
0.04	aire	agitado
0.20	enfriamiento malo en aceite	sin agitar
0.35	enfriamiento bueno en aceite	agitación moderada
0.50	enfriamiento muy bueno en aceite	agitación buena
0.70	enfriamiento agresivo en aceite	agitación violenta
1.00	enfriamiento pobre en agua	sin agitación
1.50	enfriamiento muy bueno en agua	agitación fuerte
2.00	enfriamiento en salmuera	sin agitación
5.00	enfriamiento en salmuera	agitación violenta
∞	enfriamiento ideal	-

2.2.1 Frente de mojado y temperatura de Leidenfrost

En medios de temple vaporizables, como lo es el agua, se presentan tres etapas de enfriamiento: conducción y radiación a través de una película de vapor estable (etapa 1, también llamada *capa de vapor o de ebullición en presencia de capa de vapor*); eliminación de energía térmica como calor latente de vaporización (etapa 2, conocida como *formación de burbujas o de ebullición con formación de burbujas*); convección a través del líquido cuando ya no es posible vaporizar al líquido (etapa 3, conocida como *convección pura*) [9]. Dado que la rapidez de extracción de calor del medio no es necesariamente constante en toda la superficie de una pieza, es común que estas tres etapas coexistan, generando zonas claramente distinguibles, como se muestra en la Figura 2.3.

La existencia de las primeras dos etapas anteriormente descritas (capa de vapor y formación de burbujas), es posible cuando se pone en contacto a un líquido con la superficie de un sólido a alta temperatura (que exceda por mucho a la temperatura de ebullición del líquido). La capa de vapor funciona tanto como un aislante térmico (que mantiene al líquido a una temperatura por debajo de su temperatura de ebullición), como una barrera física (que impide al sólido y el líquido entrar en contacto). Cuando la temperatura en la superficie del sólido desciende lo suficiente, la capa de vapor se desestabiliza y rompe permitiendo el contacto entre el sólido y el líquido, elevándose entonces la temperatura de éste hasta su ebullición [10].

A la frontera entre la zona de capa de vapor y el área de formación de burbujas, se le llama *frente de mojado* y a la temperatura a la que esto ocurre, *temperatura de Leidenfrost*. El avance del frente de mojado es de suma importancia ya que éste define la respuesta térmica dentro del material o pieza que se esté templando, lo que a su vez define la variación en la microestructura del material, y en consecuencia, sus propiedades mecánicas [3].

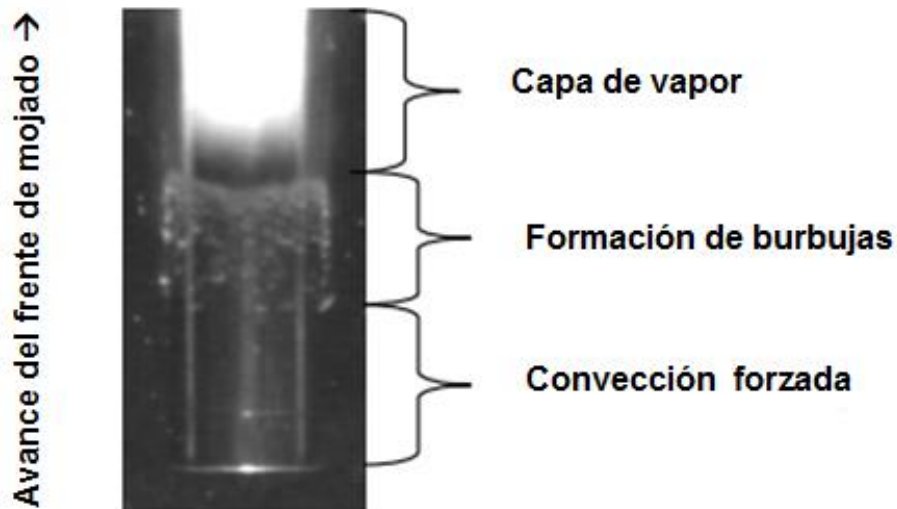


Figura 2.3. Comportamiento del frente de mojado a lo largo de la superficie de una probeta cilíndrica de base plana [3].

2.3 Análisis de curvas de enfriamiento

Una curva de enfriamiento es la historia térmica local de un material que, después de haber sido calentado, es enfriado hasta una cierta temperatura. Estas curvas son fáciles de obtener; basta con una probeta instrumentada con uno o más termopares, un adquisidor de datos y un computador para recopilar a éstos. La información obtenida es la temperatura del material como función del tiempo y, a través de este gráfico, se pueden observar los diferentes fenómenos y mecanismos que ocurren durante el enfriamiento. Es común utilizar curvas de enfriamiento para llevar a cabo la caracterización de las etapas que ocurren durante el proceso de temple (*ver Figura 2.4*), ya que es una metodología sencilla que genera bastante información del proceso, por lo que es de las más utilizadas a escala laboratorio [11].

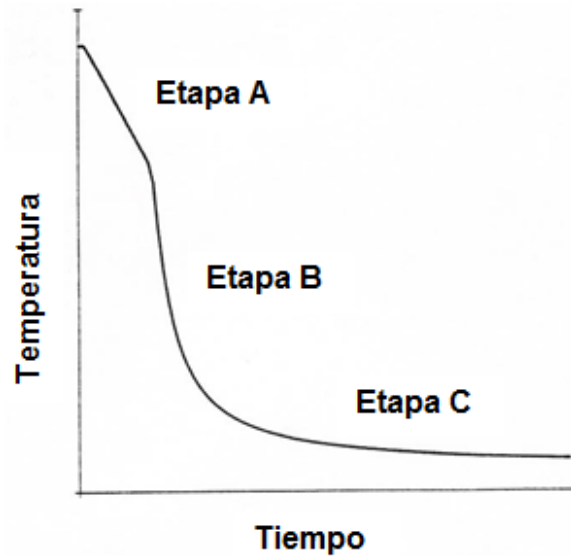


Figura 2.4. Representación esquemática de una curva de enfriamiento en un medio vaporizable: Etapa A - Capa de vapor, etapa B - Formación de burbujas, etapa C - Convección pura [12].

2.3.1 Probetas

Las probetas para la obtención de curvas de enfriamiento se han producido desde hace ya más de 70 años; han tenido una amplia variedad de formas y se han construido en diversos materiales. Entre las formas en que se pueden encontrar, están: cilindros, esferas, barras cuadradas, placas, anillos, espirales y discos, construidas de: aceros inoxidables, plata, níquel, cobre, oro, aluminio y diversas aleaciones.

Totten et al. [13] revisaron investigaciones de análisis de curva de enfriamiento y encontraron que se ha trabajado con probetas esféricas (debido a que facilitaban los cálculos de transferencia de energía) o cilíndricas con punta plana, ambas construidas a partir de plata o cobre, ya que estos materiales tienen una alta conductividad térmica con lo que se minimizan los gradientes térmicos. Sin embargo, conforme se realizaron más investigaciones, se encontraron limitaciones al utilizar estas geometrías. Por ejemplo: para el caso

de la probeta con geometría esférica, es difícil instrumentarla con termopares que estén ubicados en el centro geométrico de la probeta; mientras que la probeta cilíndrica con punta plana presenta problemas de transferencia de energía debido a las aristas. Además, la relativamente alta conductividad térmica de estos materiales no permite una aproximación realista al comportamiento de los aceros. Las limitaciones anteriormente mencionadas llevaron al desarrollo de probetas de acero inoxidable y aleaciones de níquel (Inconel).

Actualmente, se ha llegado a estandarizar probetas para realizar ensayos de evaluación de medios de enfriamiento. Estas probetas están fabricadas de aleaciones base níquel y pueden presentar las siguientes geometrías: esférica, de una placa o cilíndrica con punta plana. La más común es la probeta cilíndrica con punta plana, y debe cumplir con la relación de una longitud de al menos cuatro veces el valor del diámetro, para minimizar los efectos de enfriamiento en las aristas. Están instrumentadas con un termopar justo al centro de la probeta [14]. A pesar de que la probeta estándar de Inconel ha eliminado los problemas debidos a la generación de energía por la transformación que sufren los aceros durante el calentamiento o el enfriamiento (transformaciones de fase), y las aproxima al comportamiento de los aceros (conductividad térmica), aún existe en ellas el problema de las aristas debido a su geometría. Otra alternativa es la de colocar un termopar justo en la superficie de la probeta, como en el caso de la probeta Liscic-NANMAC [13].

Recientemente se han presentado resultados que demuestran la eficacia de una probeta cilíndrica con punta cónica [3]. La geometría de esta probeta reduce considerablemente la formación de áreas con gradientes de presión (como sucede en las aristas de la probeta cilíndrica con punta plana), favoreciendo así la formación de un frente de mojado más estable y simétrico, incluso para altas velocidades de flujo, por lo que resulta en una extracción de calor más homogénea a través de la superficie de la probeta, en comparación con los resultados en probetas cilíndricas con punta plana.

2.3.2 Interpretación de curvas de enfriamiento

Las curvas de enfriamiento resultan de gran ayuda porque a partir de ellas se pueden obtener otras curvas y parámetros que ayuden a su interpretación e incluso brinden mayor información. Las curvas generadas a partir de las curvas de enfriamiento pueden ser: curvas de rapidez de enfriamiento y curvas de *flux* de calor.

Las curvas de rapidez de enfriamiento (primera derivada con respecto al tiempo) para un medio se pueden presentar ya sea como función del tiempo o de la temperatura, como se muestra en la Figura 2.5.

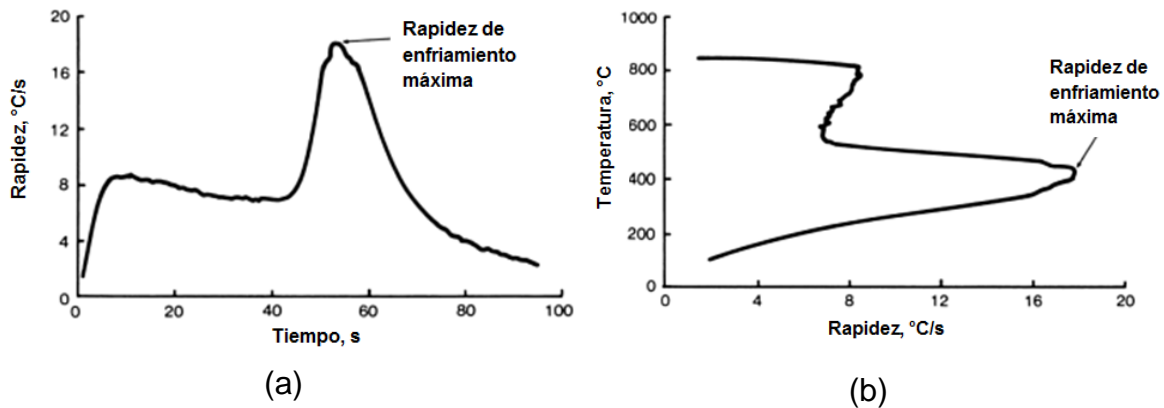


Figura 2.5. Rapidez de enfriamiento como función de: (a) tiempo y (b) temperatura local [12].

La importancia de conocer el comportamiento de una curva de rapidez de enfriamiento es que, por medio de ellas se pueden caracterizar algunos fenómenos. Por ejemplo: la duración de la capa de vapor (etapa A), la rapidez de enfriamiento asociada con la zona de formación de burbujas (etapa B); en particular, esta etapa es la de mayor interés ya que es en ella donde se obtiene la rapidez de enfriamiento máxima. Con base en la rapidez de enfriamiento en la zona de convección pura (etapa C) es posible caracterizar la habilidad del medio para reducir la tendencia de agrietamiento.

Por otra parte, la estimación de la condición de frontera térmica en la superficie de una probeta durante un ensayo de temple implica, usualmente, la solución al problema inverso de conducción de calor (*IHCP*, por sus siglas en inglés), por lo que para realizar la caracterización de la frontera térmica como una curva de *flux* de calor en la superficie como función de la temperatura de superficie de la probeta a través del uso del programa computacional **WinProbe** [15], se implementa el algoritmo secuencial de especificación de la función propuesto por Beck *et al.* [16], modificado en el Depto. de Ingeniería Metalúrgica para resolver el problema inverso de conducción de calor para flujo de calor unidireccional en dirección r , y sin “generación” de energía térmica, correspondiente al uso de probetas de acero inoxidable austenítico. Tomando en cuenta que el cálculo de *flux* de calor se realiza en la frontera sólido-líquido (superficie de la probeta), se puede utilizar este cálculo para la determinación del coeficiente de transferencia de calor combinado por convección y radiación (h).

Recordando que la rapidez de transferencia de energía por convección (*flux de calor convectivo*) desde la superficie de un cuerpo hacia el fluido que lo rodea, se define como se muestra en la siguiente ecuación [17]:

$$Q = qA = -\bar{h}A(T_{\infty} - T_s) \quad \dots (2.1)$$

Donde:

Q = Flujo de calor en la superficie.

T_s = Temperatura en la superficie del cuerpo.

T_{∞} = Temperatura en el fluido.

A = Área superficial del cuerpo.

\bar{h} = Coeficiente de transferencia de energía por convección.

Se puede despejar el coeficiente de transferencia de energía de la ecuación (2.1), y calcular el valor de éste en cualquier instante del proceso de temple, gracias a que se conoce la temperatura en la superficie de la probeta, el área superficial de ésta, la temperatura del medio y el valor del *flux* de calor calculado a través del programa computacional **WinProbe**.

Dentro de los parámetros que se utilizan para la interpretación de curvas de enfriamiento, están: la rapidez de enfriamiento a 705 °C (RE705) y 300 °C (RE300), la rapidez de enfriamiento máxima (RE_{max}) y el tiempo para enfriar desde 705 °C hasta 260 °C. Por lo general, se desea que RE_{max} ocurra a altas temperaturas (>705 °C) y que el tiempo para enfriar el material desde 705 °C hasta los 260 °C se reduzca, para evitar la región de transformación ferrítica y perlítica, y así poder obtener la máxima dureza en el material. De manera contraria, se suele reducir la rapidez de enfriamiento a bajas temperaturas (300 °C), ya que es la región donde comienza a formarse martensita a partir de austenita para la mayoría de los aceros, y así reducir el potencial de fractura y distorsión del material [14].

2.4 Temperatura de austenización

La temperatura por encima de la cual se calienta una pieza de acero con la finalidad de transformar su microestructura a la fase austenita (hierro γ), se le llama temperatura de austenización y se representa como “A_v” para facilitar su localización en los diagramas de fase de los aceros. La temperatura de austenización varía con respecto al contenido de carbono en el acero; al aumentar el contenido de carbono, la temperatura de austenización disminuye hasta llegar a la temperatura eutectoide (A₁). Existe un rango de temperaturas dentro del cual se debe calentar un acero dependiendo del tratamiento térmico que se llevará a cabo. En la Figura 2.6 se muestran los rangos de temperatura como función del contenido de carbono en el acero, para tratamientos térmicos

como: normalizado, recocido, temple, y esferoidización. En esta figura, se puede observar que para realizar el tratamiento de temple para estos aceros, el rango de temperaturas de austenización va desde 1350 °F (732 °C) hasta 1700 °F (927 °C) [18].

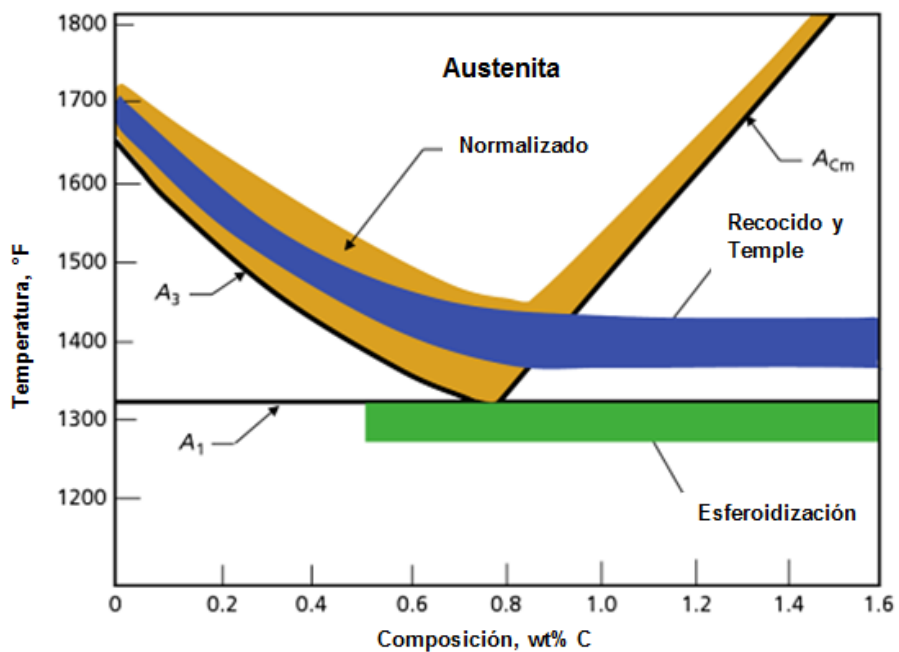


Figura 2.6. Rangos de temperatura para tratamientos térmicos en aceros con contenido máximo de 1.6 %C [18].

3 Equipo y procedimiento experimental

En este capítulo se presenta el equipo experimental, que comprende: la probeta, el sistema de desplazamiento de la probeta, el horno y el sistema de enfriamiento. También se describen el procedimiento de adquisición de datos, las condiciones experimentales y el desarrollo que se siguió para la realización de los experimentos.

3.1 Probeta

La probeta con punta cónica se fabricó con acero inoxidable austenítico AISI 304, cuya composición química (nominal) se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Composición química (nominal) de acero inoxidable AISI 304 [19].

Elemento	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S
%	< 0.08	2	< 1	18-20	8-12	0.045	0.03

Se denomina austenítico debido a la estabilidad de la fase gamma (austenita), de estructura FCC, favorecida por la cantidad del elemento gammágeno níquel.

Las principales características de los aceros inoxidables austeníticos son: buena ductilidad, conformabilidad, tenacidad y excelente resistencia al impacto, siendo materiales que se pueden endurecer por trabajo en frío, pero no por tratamiento térmico [18].

La probeta se instrumentó con tres termopares situados dentro de ésta, mediante barrenos verticales maquinados cerca de la superficie lateral. En la Figura 3.1 se presentan las medidas de la probeta, así como la configuración y la profundidad de cada uno de los termopares dentro de la misma. Para evitar dañar los termopares y que el agua pudiera entrar por huecos entre el termopar y el barreno, se colocó un cemento especial resistente a altas temperaturas y no soluble en agua (*High Temperature Chemical Cement*)

marca Omega, modelo OMEGABOND 600. La protección del cemento fue renovada cada dos a tres experimentos.

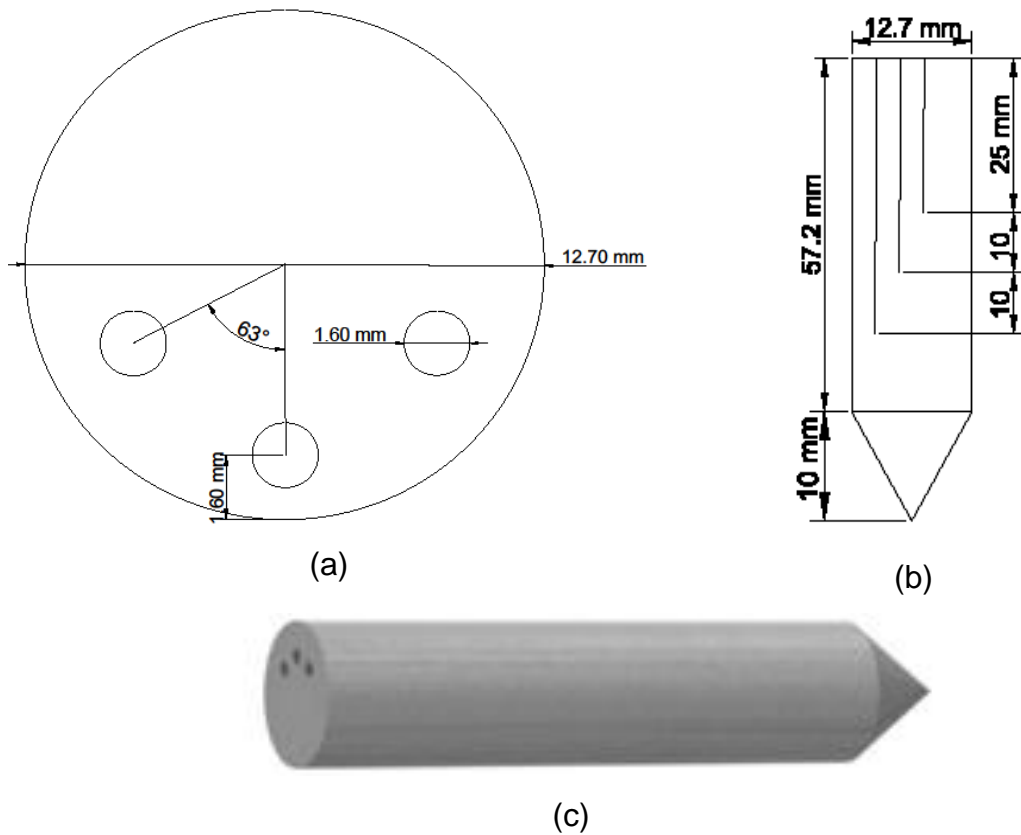


Figura 3.1. Esquema de la probeta cilíndrica con punta cónica (a) vista superior, (b) vista longitudinal, (c) vista general.

3.2 Desplazamiento de la probeta

Para sostener y desplazar verticalmente a la probeta, ésta se sujeta por medio de un cople (de 13 mm de diámetro interno) a una lanza, que a su vez está unida a dos barras paralelas posicionadas de manera perpendicular a dos rieles verticales. El movimiento de la lanza es de manera manual con la finalidad de evitar un descenso violento que pueda modificar la estabilidad de los fenómenos de ebullición. La Figura 3.2 muestra de manera general el sistema para sostener y desplazar verticalmente la probeta.

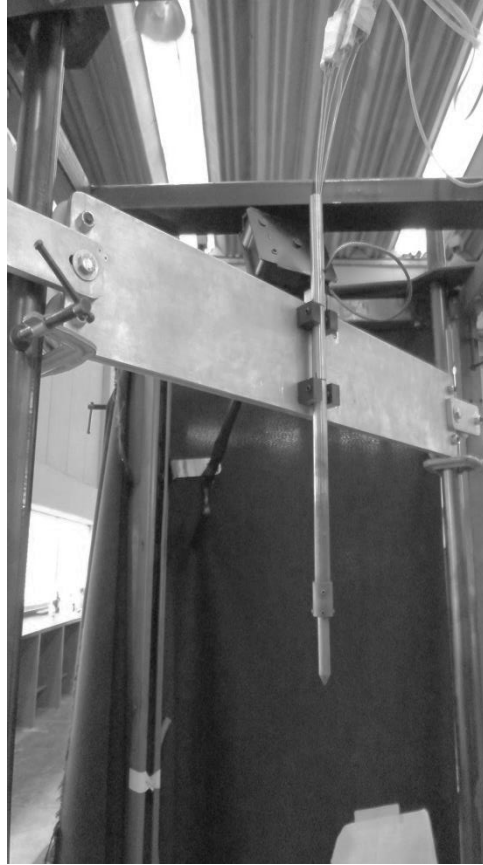


Figura 3.2. Fotografía del sistema para sostener y desplazar la probeta.

3.3 Horno tipo libro

La probeta se calienta con ayuda de un horno de resistencia eléctrica con diseño tipo libro que facilita la colocación de ésta dentro del mismo, así como la liberación de la misma para su traslado hacia el sistema de temple.

La temperatura del horno puede variar desde la temperatura ambiente hasta los 1100 °C. El horno está situado a una altura de aproximadamente 2.5 m. En la Figura 3.3 se muestra una fotografía del horno utilizado.

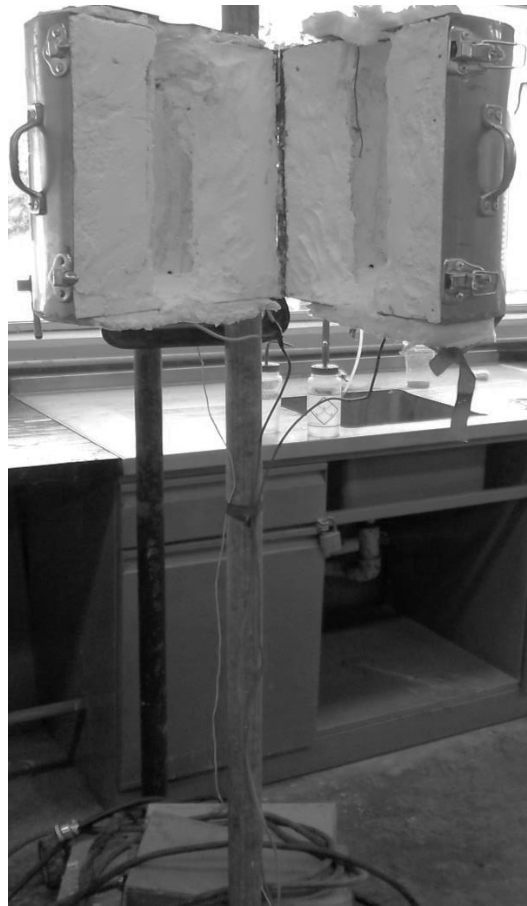


Figura 3.3. Horno de resistencia eléctrica, con diseño tipo libro.

3.4 Sistema de enfriamiento

Vergara-Hernández y Hernández-Morales [20] desarrollaron un equipo experimental que permite la formación de un frente de mojado estable. Se utilizó este equipo para medir la respuesta térmica en tres posiciones al interior de la probeta y videografar los eventos que ocurren en la superficie de la misma. El sistema consiste de un tubo de acrílico de 1.85 m de longitud y 44 mm de diámetro interno (que funciona como canal de flujo en donde la probeta es enfriada), situado dentro de un contenedor de vidrio con la geometría de un prisma rectangular. Este contenedor de vidrio permite la videograbación de los fenómenos que ocurren en la superficie de la probeta, ayudando a eliminar la

distorsión en éstas. Una bomba de $\frac{1}{4}$ Hp de potencia recoge el agua de un contenedor primario (donde ésta se calienta hasta la temperatura deseada por medio de calentadores de resistencia eléctrica) y la bombea a un rotámetro que fija el flujo de agua requerido, para posteriormente llevarla a través de una red de tubos de PVC hasta el tubo de acrílico. El agua que abandona el contenedor de vidrio se recolecta en un contenedor secundario y se envía de regreso al contenedor primario para reutilizarse. La Figura 3.4 muestra un esquema general del sistema anteriormente descrito.

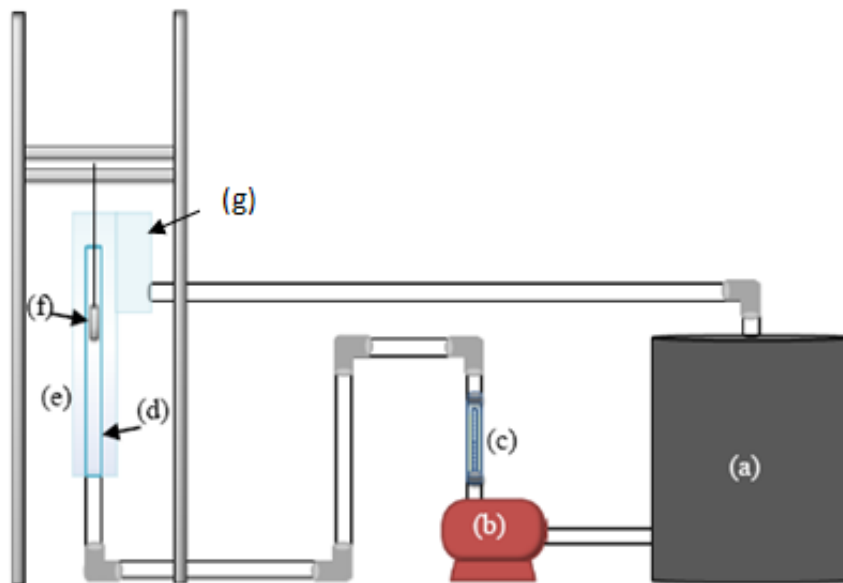


Figura 3.4. Esquema general del sistema de enfriamiento utilizado: a) contenedor primario, b) bomba de $\frac{1}{4}$ Hp, c) flujómetro, d) tubo de acrílico, e) contenedor de vidrio, f) probeta, g) contenedor secundario [3].

3.5 Adquisición de datos y video

Para la adquisición de las curvas de enfriamiento se utilizaron termopares tipo K, conectados por medio de extensiones a un sistema de adquisición de datos marca IOtech, modelo *TempScan 1100* [21]. Este sistema de adquisición está conectado a una computadora portátil por medio de puerto RS-232. La

frecuencia de adquisición de datos y el tiempo máximo de adquisición pueden ser fijados a través del *software* ChartView v. 1.02. Para todos los experimentos realizados, se llevó a cabo la adquisición de datos cada 0.1 segundos y un tiempo adquisición de 10 minutos.

Para la videograbación de los experimentos, se utilizó una videocámara (30 cuadros por segundos), colocada de manera perpendicular a la posición final de la probeta dentro del sistema de enfriamiento. Con ayuda de un tripié (marcando la posición de éste en el suelo) se fijó la altura y la posición de la cámara, para asegurarse que ésta permaneciera estática durante cada experimento.

3.6 Condiciones experimentales

La variable independiente para este trabajo es la temperatura inicial de la probeta. Para caracterizar el efecto de esta variable sobre el fenómeno de frente de mojado, se realizaron pruebas experimentales con tres temperaturas iniciales diferentes. En la Tabla 3.2 se muestran las condiciones experimentales para este trabajo.

Tabla 3.2. Condiciones experimentales.

Flujo de agua, LPM	Temperatura inicial de la probeta, °C
20	800
	860
	920

3.7 Procedimiento

A continuación se describe el procedimiento que se llevó a cabo para la realización de los experimentos:

- a. Preparación de la probeta.- Antes de comenzar cada prueba, se limpió la probeta con ayuda de una lija para metal de 240 granos/cm². Este procedimiento se llevó a cabo para la eliminación de óxidos y suciedad que pudieran provocar que el enfriamiento en la superficie de la probeta fuese disparejo y por ende, la alteración en la respuesta del frente de mojado. Se colocaron los termopares dentro de sus respectivos barrenos y se aseguró, por medio de marcas, que llegaran hasta la profundidad debida; posteriormente se selló la superficie superior con cemento refractario (el cemento requiere un tiempo de fraguado de al menos 24 horas, por lo que se realizaba su colocación al menos un día anterior al día de realización de la prueba).
- b. Ajuste de condiciones experimentales.- Una vez asegurados los termopares en su lugar y verificado su buen funcionamiento, se procedió a la colocación de la videocámara, así como el encendido de la bomba para fijar el flujo de agua con el que se trabajaría. Con ayuda de un termopar conectado a un multímetro, se corroboró que la temperatura del agua fuera cercana a 60°C. Se calentó el horno hasta 50 °C por encima de la temperatura de trabajo y se fijó la probeta en su sitio correcto, tratando de que estuviese bien alineada con el sistema y que el sistema de rieles con el que se bajaría la probeta al medio de enfriamiento corriera libremente.
- c. Enfriamiento de la probeta y obtención de datos y video.- Una vez que el horno hubo alcanzado la temperatura deseada, se procedió a la colocación de la probeta a la altura adecuada para que ésta quedara al centro del horno tipo libro y se pudiera obtener lo más cercano a un calentamiento homogéneo de toda la probeta. Después de colocar la

probeta dentro del horno, se esperó el tiempo necesario para que ésta alcanzara una temperatura de aproximadamente 15 °C por encima de la temperatura de trabajo y, algunos instantes previos a lograr esta condición, se dio inicio a la adquisición de datos y la videograbación. En el momento en que la temperatura de la probeta era de 13 °C por encima de la temperatura de interés, se extrajo la probeta del horno lo más rápidamente posible, y se llevó hasta la posición final dentro del sistema de enfriamiento.

Nota: Los experimentos se realizaron por triplicado para cada condición experimental y, al finalizar cada serie de dos pruebas, se realizaba la verificación del cemento refractario por si debía ser remplazado.

4 Resultados

En este capítulo se muestran los resultados de las mediciones obtenidas en el laboratorio.

La variable independiente estudiada en este trabajo fue la temperatura inicial de la probeta. Para ayudar a estabilizar la capa de vapor, la temperatura del agua fue siempre de 60°C. El flujo del medio de temple se mantuvo constante a 20 LPM

La nomenclatura utilizada para cada termopar mostrado en la Figura 3.1 es: T/C1 es el termopar localizado a 25 mm de profundidad, T/C2 es el termopar localizado a 35 mm de profundidad y, T/C3 es el termopar localizado a 45 mm de profundidad.

Como resultados experimentales se obtuvieron:

- Respuestas térmicas (curvas de enfriamiento) registradas con los termopares con los que se instrumentó la probeta.
- Videograbaciones de los eventos que se llevaban a cabo en la superficie de la probeta durante la experimentación.

4.1 Repetitividad del sistema

Dado que se generaron curvas de enfriamiento (gráficos temperatura vs. tiempo) a partir de la medición de temperatura, es importante determinar la repetitividad en la respuesta del sistema, para garantizar la confiabilidad en los resultados.

La Figura 4.1 muestra las curvas de enfriamiento obtenidas a partir de la lectura de los tres termopares, para dos experimentos independientes con condiciones de temperatura inicial de 920 °C.

Se observa que los resultados obtenidos en ambas pruebas son muy similares entre sí; esto brinda confianza en cuanto a la repetitividad de los experimentos.

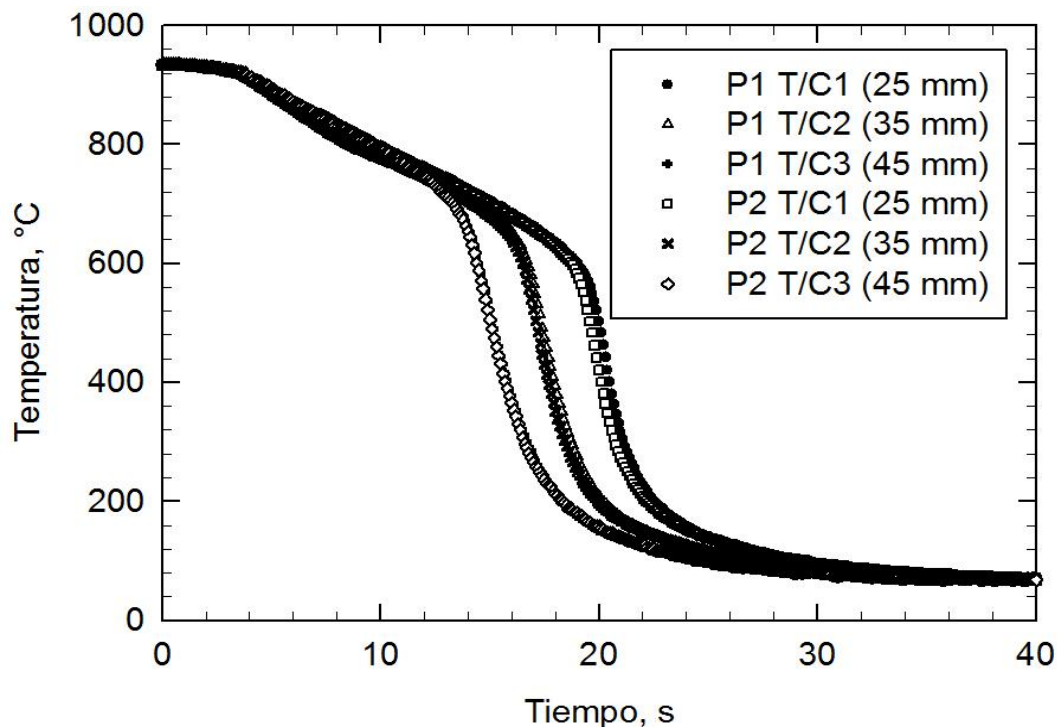


Figura 4.1. Curvas de enfriamiento para tres diferentes termopares (T/C1 (25 mm), T/C2 (35 mm), y T/C3 (45 mm)) en dos pruebas independientes (P1 y P2), con temperatura inicial de 920 °C.

4.2 Curvas de enfriamiento

En la Figura 4.2 se muestran las respuestas térmicas medidas en las posiciones de los tres termopares, para un experimento con temperatura inicial de 920 °C.

Para los tres termopares, se observa que después de un tiempo en el que la temperatura se mantiene constante (con la probeta estando aún dentro del horno), se obtiene una suave disminución en la temperatura (asociada con la presencia de capa de vapor), seguida de una caída brusca (debido a la

formación de burbujas), para terminar con un enfriamiento con tendencia asintótica al eje del tiempo (convección pura). De igual manera, se observa un desfase en el tiempo entre las tres respuestas térmicas, debido a la diferencia de profundidades que existe entre los termopares y a que el frente de mojado avanza de manera vertical y ascendente.

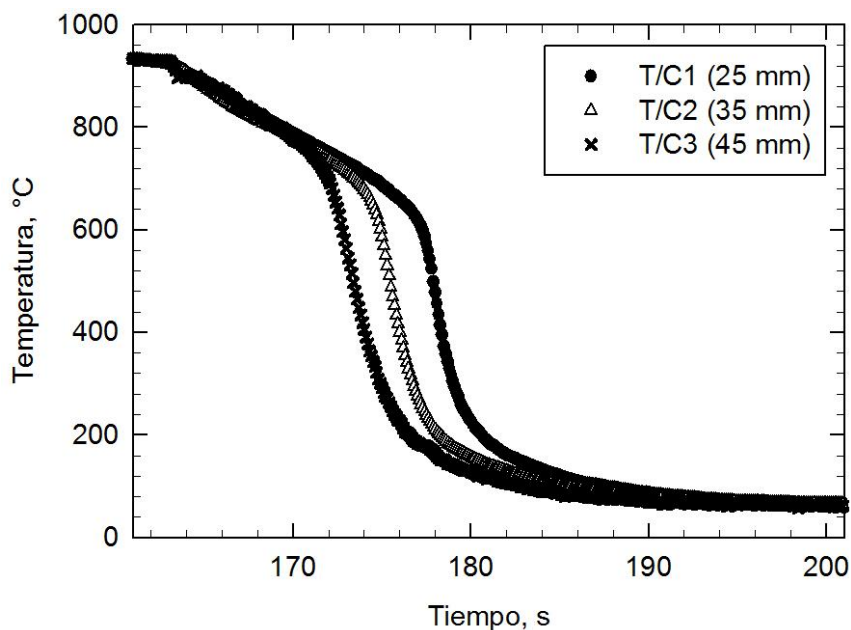


Figura 4.2. Curvas de enfriamiento en las posiciones de los tres termopares, para un experimento con temperatura inicial de 920 °C. La escala de tiempo es con respecto al inicio de la adquisición de datos.

La respuesta térmica correspondiente al termopar T/C3 (45 mm) es la primera en registrar un decremento en la temperatura, ya que es el termopar que está situado a mayor profundidad dentro de la probeta, seguida por la respuesta del termopar T/C2 (35 mm) y finalmente la del T/C1 (25 mm). Por este mismo motivo, la duración de la capa de vapor sobre la superficie de la probeta se ve afectada, observándose que ésta aumenta conforme la profundidad a lo largo de la probeta disminuye, es decir, la mayor duración de la capa de vapor se obtuvo en la posición del termopar T/C1 (siendo de aproximadamente 13 s), seguida por el termopar T/C2 (duración aproximada de 10 s) y finalmente el termopar T/C3 (8 s aproximadamente).

Para mostrar el efecto de la temperatura inicial sobre las curvas de enfriamiento, se generaron gráficos obtenidos para una misma posición de termopar.

La Figura 4.3 muestra las respuestas térmicas correspondientes a cada uno de los tres termopares, por separado: T/C3 (45 mm) en la Figura 4.3(a), T/C2 (35 mm) en la Figura 4.3(b) y T/C1 (25 mm) en la Figura 4.3(c), para tres experimentos independientes, con diferente temperatura inicial.

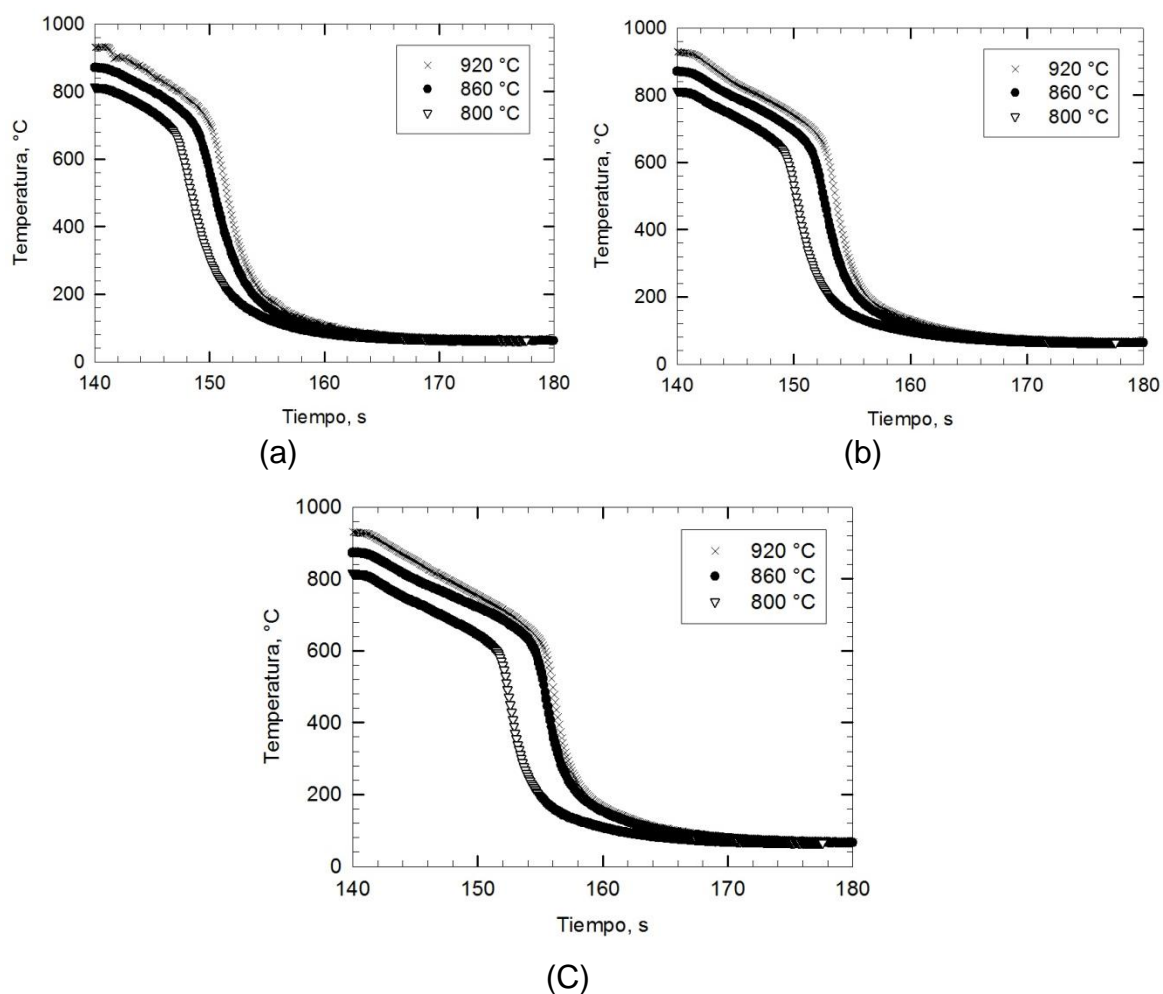


Figura 4.3. Efecto de la temperatura inicial en las respuestas térmicas correspondientes a los tres termopares: (a) T/C3 (45 mm), (b) T/C2 (35 mm) y (c) T/C1 (25 mm). Para tres experimentos con temperaturas iniciales de 800, 860 y 920 °C.

Como principal observación, se aprecia que al disminuir la profundidad de los termopares a lo largo de la probeta (desde T/C3 (45 mm) hacia T/C1 (25 mm)), la duración de la etapa de capa de vapor aumenta (etapa A). De igual manera, para esta etapa, se observa que al aumentar la temperatura inicial de la probeta, la duración de la capa de vapor también aumenta.

Es de importancia notar que las curvas de enfriamiento correspondientes a las temperaturas iniciales de 800 y 860 °C siempre mantienen una separación entre ellas. Esta separación aumenta ligeramente con respecto al tiempo y la posición, observando que para el caso de la curva a temperatura inicial de 860 °C en la posición del T/C3 (45 mm), la separación es prácticamente constante – Figura 4.3(a); mientras que para la curva a esta misma temperatura inicial pero en la posición del T/C1 (25 mm) la separación aumenta instantes antes de romperse la capa de vapor - Figura 4.3(c).

Para el caso de las curvas de enfriamiento correspondientes a las temperaturas iniciales de 860 y 920 °C existe esta misma separación, pero a diferencia de lo observado para las curvas de 800 y 860 °C, esta separación disminuye con respecto al tiempo y al disminuir la profundidad a lo largo de la probeta. Este último comportamiento lleva a pensar que para la temperatura inicial de 920 °C, la probeta está perdiendo más energía en comparación de las otras dos temperaturas iniciales, lo que provoca un mayor enfriamiento y la aproximación de la curva de enfriamiento de 920 °C a la de 860 °C. Este mismo comportamiento se hace más evidente conforme disminuye la profundidad en la probeta, gracias al aumento en la duración de la etapa de capa de vapor para las otras dos temperaturas.

4.3 Imágenes de frente de mojado

Como ya se indicó, el frente de mojado es la frontera entre la capa de vapor y la zona de ebullición con formación de burbujas. Para la obtención de las imágenes del avance del frente de mojado a lo largo de la superficie de la

probeta, a partir de las videograbaciones adquiridas, se siguió un método combinado en el que primero se determinaron las profundidades de los termopares en las reproducciones de las videograbaciones, se marcaron las profundidades de los termopares y se detuvo la reproducción de la grabación cuando el frente de mojado sucedía frente a esos puntos marcados, para tomar la imagen en ese momento como se muestra en la Figura 4.4. Luego de llevar a cabo la toma de las imágenes a las diferentes posiciones de los termopares, se anotó el tiempo correspondiente a esa imagen con ayuda del cronómetro presente en todas las videograbaciones.

A manera de comprobación en la determinación de la profundidad de los termopares dentro de las grabaciones, se indicaron los tiempos obtenidos a través de las imágenes para cada termopar y para cada experimento sobre las gráficas de las respuestas térmicas correspondientes, de tal manera que el tiempo en que se presenta el cambio de pendiente correspondiente a la transición de la zona de presencia de capa de vapor a la zona de formación de burbujas (rompimiento de capa de vapor) estuviera cercano al tiempo determinado a través de las imágenes. No se esperaba que el tiempo indicado en la respuesta térmica fuera el tiempo exacto en que sucediera el fenómeno, debido al desfase que existe entre el fenómeno superficial y la respuesta térmica medida (que corresponde a una posición interna).



Figura 4.4. Procedimiento para indicar la posición de cada termopar en las imágenes, para un experimento aleatorio.

En la Figura 4.5 se muestran los diferentes pasos en el seguimiento del avance del frente de mojado sobre la superficie de la probeta para un experimento con temperatura inicial de 920 °C. Los tiempos están referidos al inicio de la adquisición de datos.

Como primer paso -Figura 4.5 (a)-, se presenta la imagen de la probeta instantes después de haber entrado al baño de temple (142.56 s). Para esta etapa, la adquisición de datos ya había comenzado, registrando en las curvas de enfriamiento una suave variación en la pendiente debida a la transición de la probeta desde el centro del horno hasta entrar en contacto con el medio de temple. La siguiente etapa -Figura 4.5 (b)-, es el momento en que la probeta llega a la posición final dentro del sistema (142.85 s) y comienza el rompimiento de la capa de vapor cerca de la punta cónica de la probeta. Posteriormente -Figura 4.5 (c)-, se muestra la imagen del momento en el que se lleva a cabo el rompimiento de la capa de vapor sobre la superficie de la probeta a la altura de la base de la punta cónica (149.63 s). Seguida de la imagen -Figura 4.5 (d)- en la que el rompimiento de la capa de vapor llega a la altura del termopar T/C3 (45 mm) (152.79 s) y continúa hasta llegar a la altura del termopar T/C2 (35 mm) (155.25 s) -Figura 4.5 (e)-, para, finalmente, llegar a la altura del termopar T/C1 (25 mm) (157.75 s) -Figura 4.5 (f). El frente de mojado se origina en la punta de la probeta y, por tanto, avanza de abajo hacia arriba (con una forma simétrica en la dirección angular); además, no se observa la formación de un frente de mojado que inicie en la base del cople y avance hacia abajo. De la Figura 4.5 (c) es evidente que existe un gradiente térmico adelante del frente de mojado.

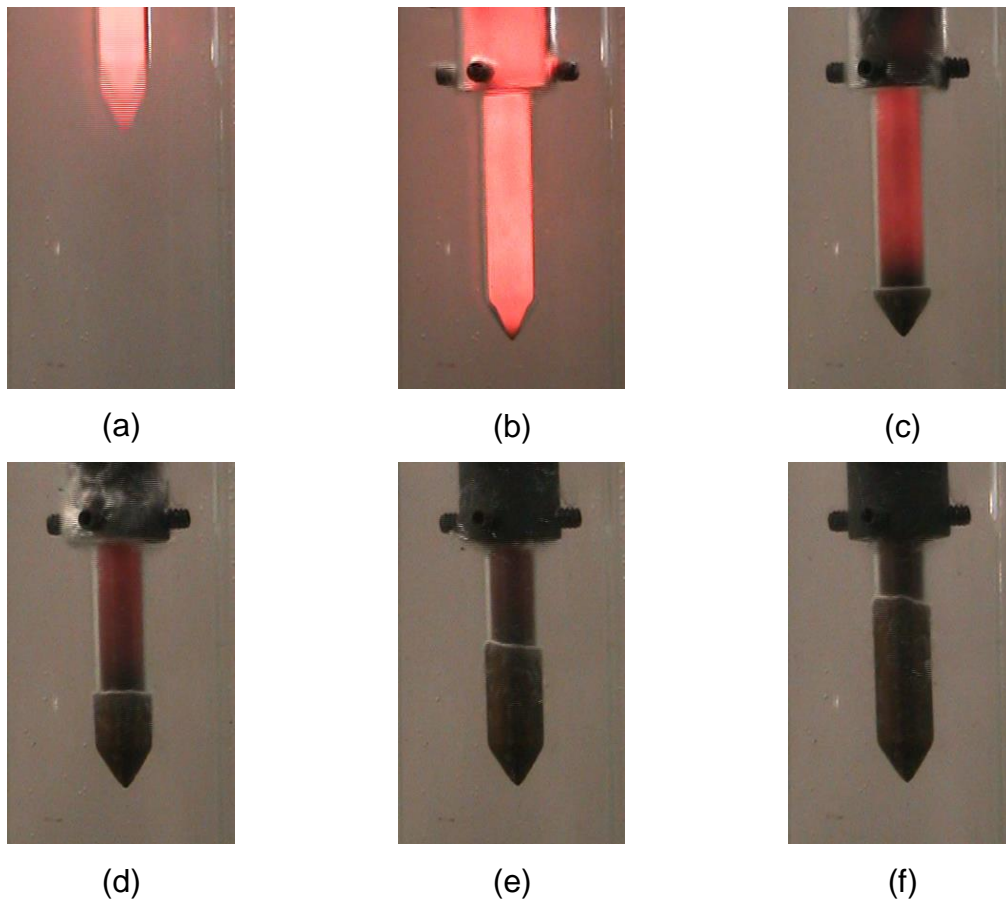


Figura 4.5. Imágenes de la superficie de la probeta ilustrando las distintas etapas del seguimiento del frente de mojado, para un experimento con temperatura inicial de 920 °C. (a) 142.56 s, (b) 142.85 s, (c) 149.63 s, (d) 152.79 s, (e) 155.25 s y (f) 157.75 s. Los tiempos son con respecto al inicio de la adquisición de datos.

En la Figura 4.6 se presentan imágenes en el instante en el que la probeta llega a la posición final para las tres temperaturas iniciales estudiadas. Para la probeta con temperatura inicial cercana a los 800 °C – Figura 4.6(a) – se aprecia una tonalidad de un color rojizo opaco, homogéneo en la mayor parte de la superficie de la misma (exceptuando la punta, que ha logrado enfriarse debido a la transferencia desde el interior del horno hasta la posición final dentro del sistema).

Por otro lado, se muestra – Figura 4.6(b) – la probeta con temperatura inicial aproximada a los 860 °C, en su posición final dentro del sistema. Se puede apreciar que, de igual manera a la descrita para la Figura 4.6(a), la punta ha sido enfriada debido a la transferencia desde el horno, pero la tonalidad en el resto de la superficie es más intensa que en el caso anterior. Por último, se presenta – Figura 4.6(c) – la probeta en la posición final dentro del sistema, a temperatura cercana a los 920 °C. A diferencia de las otras dos imágenes, para este caso se observa que la punta de la probeta no ha sufrido un gran enfriamiento en la transferencia del interior del horno hasta su posición final dentro del sistema y se aprecia que la tonalidad en la superficie de la probeta resulta más intensa (color rojo más brillante).

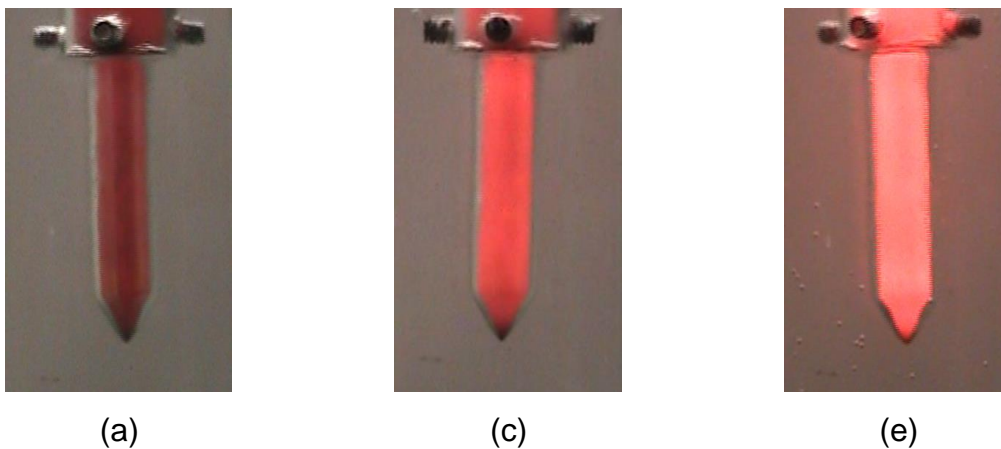


Figura 4.6. Imágenes de la superficie de la probeta en el instante en el que ha llegado a la posición final: (a) $T_0 = 800$ °C, (b) $T_0 = 860$ °C, (c) $T_0 = 920$ °C.

5 Análisis de Resultados

En este capítulo se realiza el análisis de los resultados obtenidos experimentalmente.

Se procesarán los resultados para obtener:

- Historia de rapidez de enfriamiento
- Velocidad del frente de mojado
- Estimación del *flux* de calor en la superficie
- Temperatura de Leidenfrost.

Con esta información se analizará el efecto de la variable independiente considerada en este trabajo sobre el fenómeno estudiado, que es el objetivo de la investigación.

5.1 Historia de rapidez de enfriamiento

A partir de cada respuesta térmica local se calculó la rapidez de enfriamiento local utilizando una aproximación de diferencias finitas hacia adelante, que produce un error de aproximación del $\mathcal{O}(\Delta t)$ [22].

En la Figura 5.1 se muestra la historia de rapidez de enfriamiento (curva rapidez de enfriamiento vs. tiempo) local para las posiciones de los tres termopares, en un experimento con temperatura inicial de 920 °C. Nótese que un valor más negativo indica una mayor rapidez de enfriamiento y que los tiempos están referidos al inicio de la adquisición de datos.

De izquierda a derecha, se observa que la rapidez de enfriamiento se mantiene constante durante un rango de tiempo (la probeta permanecía dentro del horno). Enseguida se presenta un aumento en la rapidez de enfriamiento para el caso de todos los termopares (a los 142.50 s aproximadamente), con

una ligera diferencia entre las pendientes de cada una de las curvas; este aumento se debe a la transferencia de la probeta desde el interior del horno hasta la posición final dentro del medio de temple. Después se observa una zona de rapidez de enfriamiento casi constante - característica de la zona de enfriamiento con presencia de capa de vapor - a partir del segundo 143.50 aproximadamente, cuya duración es distinta para cada uno de los canales. Posteriormente se registra un aumento brusco en la rapidez de enfriamiento (zona de formación de burbujas); primero para el caso del termopar T/C3 (45 mm) - 152.79 s -, seguido del termopar T/C2 (35 mm) - 155.25 s - y por último el termopar T/C1 (25 mm) - 157.75 s.

Las diferencias en el comportamiento de las curvas es resultado de la separación que hay entre cada termopar a lo largo de la probeta y es evidencia de que el frente de mojado avanza de manera ascendente y a una velocidad relativamente baja, como se mencionó en el Capítulo 4 de este trabajo. Se observa que se alcanza un valor máximo (en término absolutos) de rapidez de enfriamiento y que éste es diferente para cada uno de los termopares, así como también lo es el tiempo en el que se alcanza este valor. Nuevamente, el desfase entre los tiempos en que se registra el valor máximo de la rapidez de enfriamiento se debe a la diferencia de profundidades que existe entre los termopares, mientras que la diferencia entre los valores máximos se debe a la cantidad de energía remanente en la probeta en el instante en que pasa el frente de mojado por cada una de las posiciones verticales de los termopares.

Luego de alcanzar un valor máximo de la rapidez de enfriamiento, se observa que ésta disminuye teniendo un comportamiento asintótico con respecto al eje del tiempo, lo que es resultado de un enfriamiento mucho más suave en la probeta (convección pura) en comparación al obtenido en la zona de formación de burbujas.

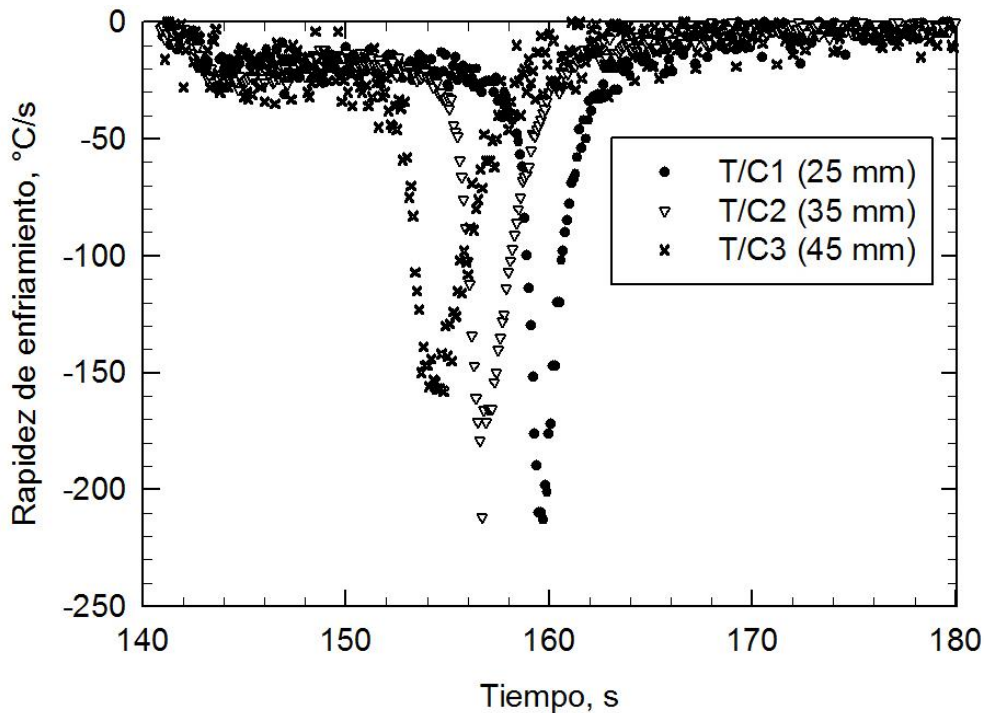
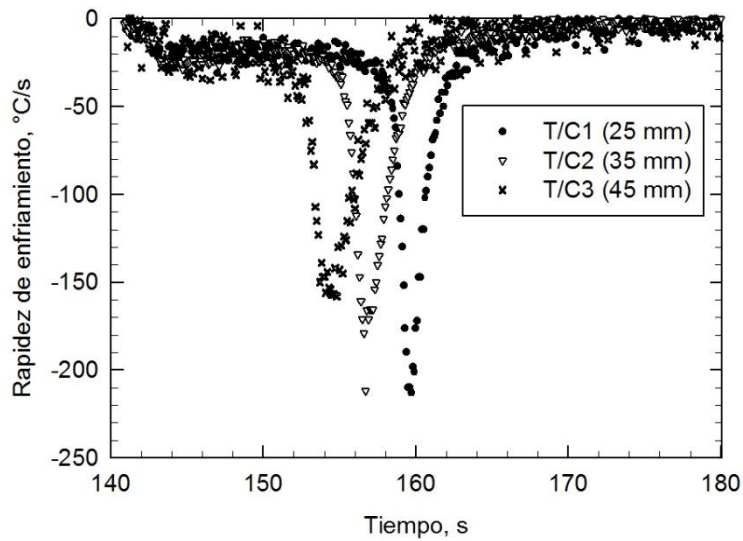
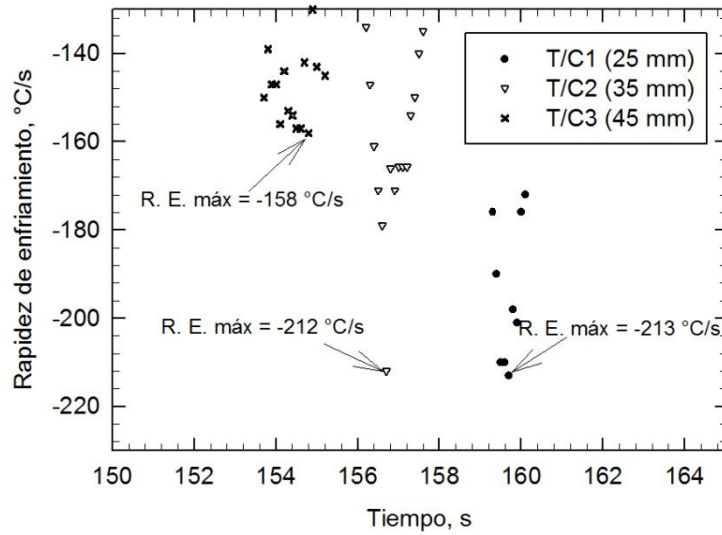


Figura 5.1. Historias de rapidez de enfriamiento para un experimento con temperatura inicial de 920 °C.

Para realizar el análisis de las curvas de rapidez de enfriamiento, se toman los valores máximos de la rapidez de enfriamiento obtenidos para cada experimento. La Figura 5.2 muestra las curvas de rapidez de enfriamiento para los tres canales en un experimento con temperatura inicial de 920 °C (a), y una ampliación (en la zona cercana a la rapidez de enfriamiento máxima) de esta curva, (b), con la finalidad de poder obtener con mayor precisión la lectura de los valores de rapidez de enfriamiento máximos para cada uno de los canales en esta prueba. De la figura se desprende que los valores máximos (en valor absoluto) de la rapidez de enfriamiento son de 158, 212 y 213 °C/s, para las posiciones de T/C3 (45 mm), T/C2 (35 mm) y T/C1 (25 mm), respectivamente, aunque el segundo valor podría estar sobre estimado (considerando la tendencia del resto de la curva). Esto podría ser el resultado de las oscilaciones que se producen cuando se calcula una derivada numérica a partir de datos experimentales – que siempre contienen “ruido” – aunque no es crítico para esta discusión.



(a)



(b)

Figura 5.2. Historias de rapidez de enfriamiento para tres termopares, en un experimento con temperatura inicial de 920 °C. (a) Curvas completas, (b) ampliación de las curvas en la zona cercana a la rapidez de enfriamiento máxima.

De manera análoga a la presentada para la Figura 5.2, se realizó el análisis de las curvas de historia de rapidez de enfriamiento para todas las condiciones experimentales y cada una de sus repeticiones, obteniéndose un valor promedio de rapidez de enfriamiento máxima para cada condición

experimental, con su desviación estándar asociada. En las Figuras 5.3 y 5.4 se muestra la relación de las rapidezces de enfriamiento máximas promedio con la variable estudiada en este trabajo.

La Figura 5.3 muestra la variación de la rapidez de enfriamiento máxima promedio con respecto a la temperatura inicial de la probeta y la posición dentro de ésta.

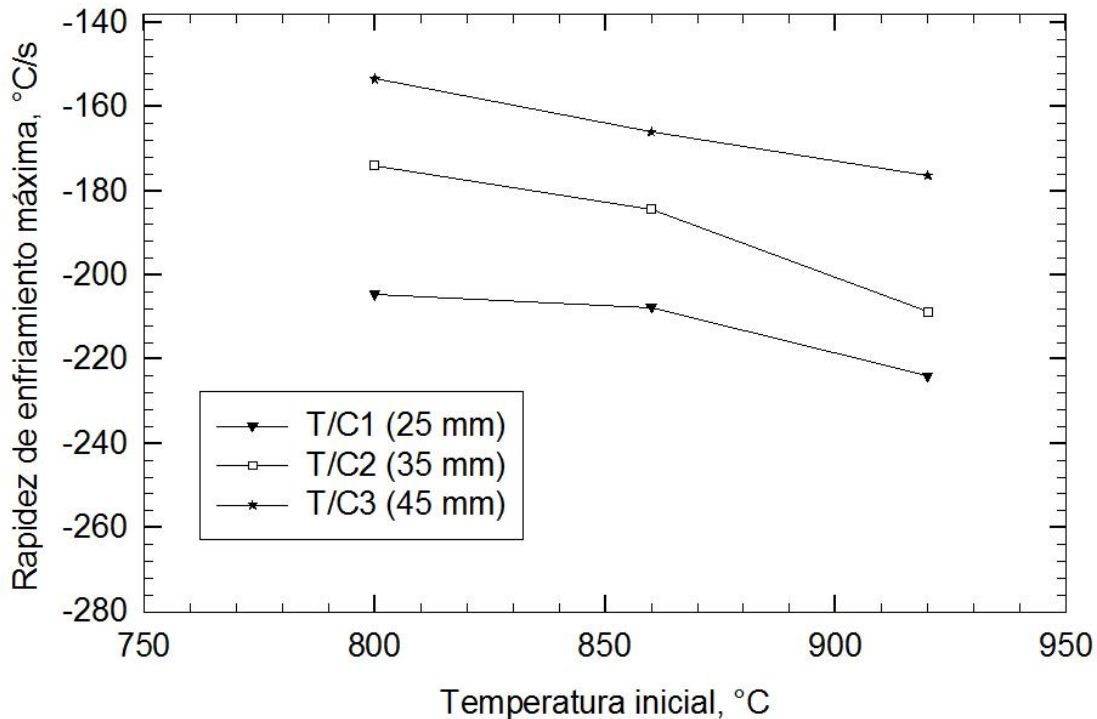


Figura 5.3. Efecto de la temperatura inicial de la probeta en la rapidez de enfriamiento máxima, para los tres termopares.

Se observa que al aumentar la temperatura inicial de la probeta y disminuir la profundidad del termopar dentro de ésta, la rapidez de enfriamiento máxima promedio aumenta. El primer resultado se debe al aumento en la cantidad de energía almacenada en la probeta cuando se aumenta la temperatura inicial. El comportamiento con respecto a la posición en la probeta obedece a las razones ya expuestas al describir la Figura 5.1.

La Figura 5.4 muestra las historias térmicas locales medidas (H) de tres experimentos distintos con sus respectivas curvas de rapidez de enfriamiento local calculadas (R) como función de la temperatura local, para la posición del termopar T/C2 (35 mm); cada uno de los experimentos se realizó con una condición de temperatura inicial diferente. La rapidez de enfriamiento se graficó como función de la temperatura local y debe leerse en la gráfica de acuerdo a como lo indican las flechas.

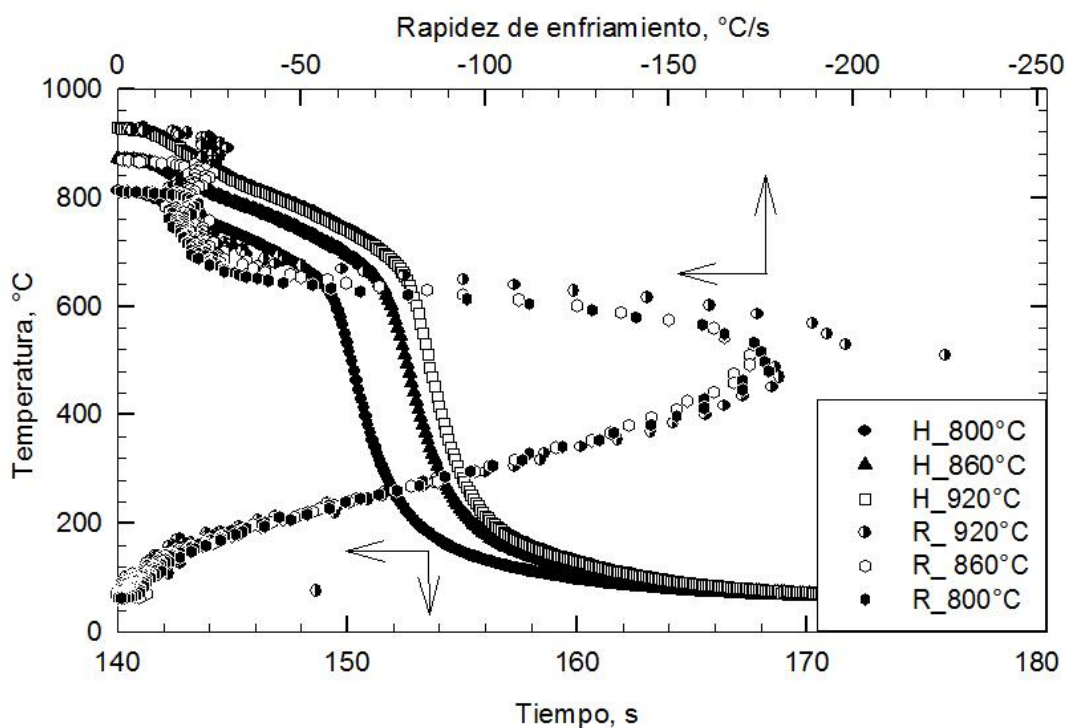


Figura 5.4. Historias térmicas medidas (H) y rapidez de enfriamiento calculadas (R), como función de la temperatura local, para el termopar T/C2 (35 mm), de experimentos con diferente temperatura inicial. Las flechas indican los ejes correspondientes a cada tipo de curva.

En esta figura se incluyen las historias térmicas de la Figura 4.3, para la cual ya se describió su comportamiento en detalle.

Inicialmente, se observa que existe una separación entre las curvas de historia de rapidez de enfriamiento local (asociada a la diferencia entre las temperaturas

iniciales), que se mantiene durante un rango de tiempo (mientras la probeta era trasladada desde el interior del horno hasta el sistema), seguida de un cambio en el comportamiento de las curvas (de un avance horizontal a uno vertical), justo a la temperatura en la que las historias térmicas presentan el primer cambio de pendiente, debido a la presencia de la capa de vapor.

Luego de que la temperatura desciende suavemente durante la etapa de extracción de calor por presencia de capa de vapor, se observa que el siguiente cambio de pendiente de la curva de historia de rapidez de enfriamiento de la probeta con temperatura inicial de 920 °C, ocurre a una temperatura de aproximadamente 720 °C (asociado al rompimiento de capa de vapor cercano a la posición del termopar T/C2), seguida del cambio de pendiente en la rapidez de enfriamiento con temperatura inicial de 860 °C (aproximadamente a 680 °C) y, por último, el cambio en la rapidez de enfriamiento con temperatura inicial de 800 °C (aproximadamente a 660 °C). Inmediato a esta variación, se observa un aumento significativo para cada una de las tres rapidezces de enfriamiento (correspondiente a la extracción de calor debida a la formación de burbujas), hasta llegar a un máximo.

Nuevamente, puede apreciarse que la primer curva en alcanzar el valor de rapidez de enfriamiento máxima es aquella con temperatura inicial de 920 °C, seguido por la curva de 860 °C y finalmente la curva de 800 °C; las rapidezces de enfriamiento máximas para estas curvas corresponden a las temperaturas locales de: 510 °C, 480 °C, 526 °C, respectivamente. Posterior a estos valores de rapidez de enfriamiento máxima, las curvas describen una disminución en la magnitud de la rapidez de enfriamiento, de una manera suave en comparación a la observada luego de romper la capa de vapor, hasta llegar a un ligero cambio de pendiente (inicio de extracción de calor por convección pura) y, finalmente, alcanzar la temperatura del medio. Es interesante notar que las curvas de rapidez de enfriamiento como función de la temperatura son muy similares entre sí en la región de convección pura.

5.2 Velocidad del frente de mojado

Para estimar la velocidad del frente de mojado, a partir de las imágenes extraídas de las videograbaciones, se llevó a cabo la determinación de los tiempos en los que la capa de vapor rompía frente a puntos de referencia como lo son: la posición de los tres termopares con los que se instrumentó la probeta y la base de la punta cónica de la misma.

Este procedimiento se realizó para cada uno de los experimentos y sus repeticiones.

De esta manera se generaron tablas con los puntos de referencia, el tiempo al cuál el frente de mojado pasa frente a cada uno de ellos y la distancia (desde la base de la punta cónica) de cada uno de ellos, como se muestra en la Tabla 5.1 para un experimento con temperatura inicial de 920°C. Con los datos determinados en esa tabla, para cada experimento, se generó un gráfico de posición de frente de mojado vs. tiempo y se realizó una regresión lineal a los datos para obtener la pendiente de la línea recta que representa a la velocidad del frente de mojado.

Tabla 5.1. Tiempo requerido para que el frente de mojado llegue a los puntos de referencia, para un experimento con temperatura inicial de 920 °C. El tiempo está referido al inicio de la adquisición de datos.

Punto de referencia	Distancia desde la base de la punta cónica (mm)	Tiempo (s)
Base de la punta cónica	0	149.63
T/C3 (inferior)	12.2	152.79
T/C2 (intermedio)	22.2	155.25
T/C1 (superior)	32.2	157.75

La Figura 5.5 muestra un gráfico de posición del frente de mojado vs. tiempo, para el experimento con temperatura inicial de 920 °C.

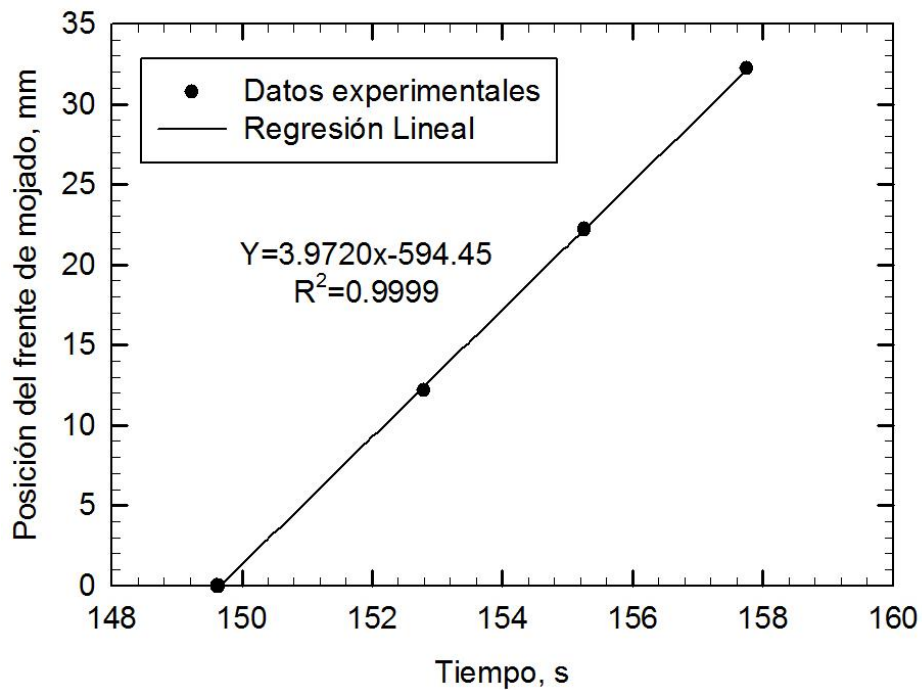


Figura 5.5. Posición del frente de mojado como función del tiempo, para un experimento con temperatura inicial de 920 °C (símbolos) y regresión lineal (línea sólida).

Se observa que los datos obtenidos experimentalmente a través de las imágenes tienen una tendencia lineal; con ayuda del factor de correlación se puede confirmar que la respuesta es prácticamente una respuesta lineal, lo que implica que la velocidad de avance del frente de mojado puede considerarse como constante. En este caso, la velocidad del frente de mojado es 3.972 mm/s (la pendiente de la recta de regresión).

Siguiendo este procedimiento se estimó la velocidad del frente de mojado para cada experimento realizado. En la Figura 5.6 se presenta el comportamiento de la velocidad del frente de mojado, al variar la temperatura inicial de la probeta. Dado que se tienen repeticiones de cada condición experimental, fue posible estimar la desviación estándar asociada con cada una de ellas.

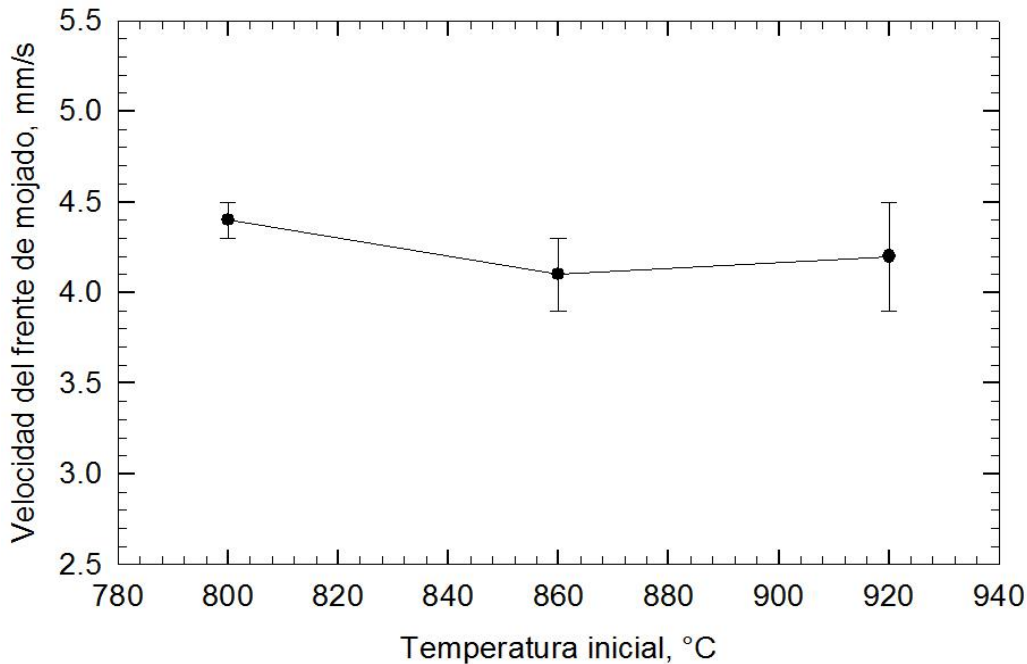


Figura 5.6. Velocidad del frente de mojado como función de la temperatura inicial. Las barras verticales representan a la desviación estándar.

Al analizar el efecto de la variación de la velocidad de frente de mojado con respecto a la temperatura inicial de la probeta, se observa que al aumentar la temperatura inicial de la probeta en un rango de temperatura de 800 °C a 860 °C, la velocidad del frente de mojado disminuye; mientras que al aumentar la temperatura inicial en un rango de 860 °C a 920 °C, se observa que la velocidad del frente de mojado aumenta nuevamente, aunque este aumento es poco considerable (aproximadamente 0.1 mm/s).

El comportamiento descrito para la velocidad del frente de mojado al aumentar la temperatura inicial de la probeta de 800 a 860 °C, es debido al incremento en la cantidad de energía inicial acumulada en la probeta que, en consecuencia, aumenta la cantidad de vapor de agua generado y favorece la estabilidad de la capa de vapor que se forma sobre la superficie de la probeta. Esto provoca que la velocidad del frente de mojado disminuya considerablemente, al existir una barrera significativa para la transferencia de calor.

En cuanto al comportamiento descrito para la velocidad del frente de mojado al aumentar la temperatura inicial de la probeta de 860 a 920 °C, éste se puede explicar basándose en que la energía inicial acumulada en la probeta cuya temperatura inicial fue de 920 °C es tan alta, que favorece la transferencia de energía por radiación a través de la capa de vapor y hace de éste, un mecanismo significativo de pérdida de energía en la probeta, en adición al mecanismo de transferencia por convección. Al ser mayor la transferencia de energía por medio del mecanismo de radiación, existe mayor pérdida de energía en la probeta y, por ende, la estabilidad de la capa de vapor se ve desfavorecida. Esto provoca que la velocidad del frente de mojado aumente de nuevo, aunque de una manera menos significativa comparada con la disminución que se observó al cambiar de una temperatura inicial de 800 °C a una de 860 °C.

Por otra parte, en la Figura 5.7 se muestran imágenes de la probeta en el instante en el que el frente de mojado ha llegado a la base del cono invertido. Nótese que los tiempos indicados en el pie de figura están referidos al instante en el que el frente de mojado inicia en la punta de la probeta.

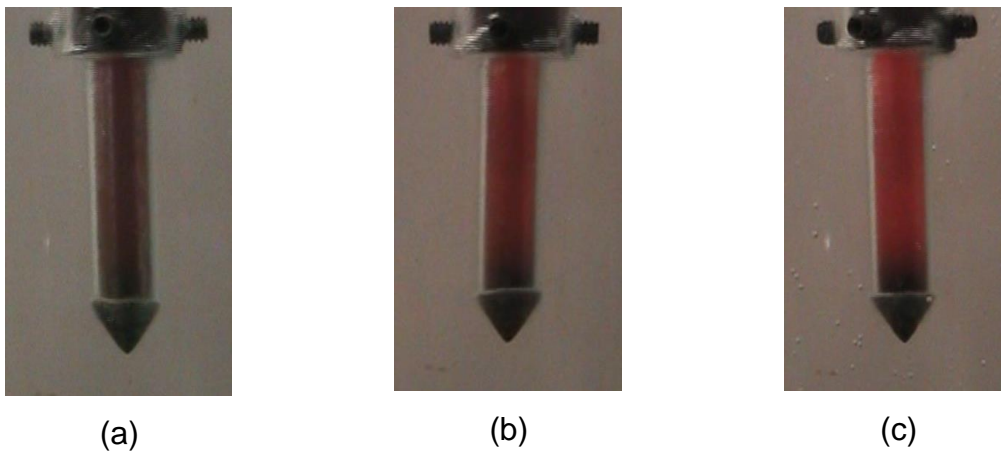


Figura 5.7. Imágenes de la superficie de la probeta en el instante en el que el frente de mojado llega a la base del cono invertido: (a) $T_0 = 800\text{ °C}$ ($t = 2\text{ s}$), (b) $T_0 = 860\text{ °C}$ ($t = 2.3\text{ s}$) y (c) $T_0 = 920\text{ °C}$ ($t = 2.3\text{ s}$). Los tiempos están referidos al rompimiento de la capa de vapor en la punta de la probeta.

Para la probeta enfriada desde 800 °C se observa – Figura 5.7(a) – que cuando el frente de mojado pasa sobre la base del cono invertido (luego de aproximadamente 2 s), la tonalidad de la superficie de la probeta ha disminuido hasta un color prácticamente metálico. Cuando se considera la temperatura inicial de 860 °C el tiempo correspondiente es de 2.3 s y se pueden apreciar diferentes tonalidades en la zona cercana a la punta cónica, lo que indica la presencia de un gradiente térmico. Finalmente (ver Figura 5.7(c)), en el caso de la temperatura inicial de 920 °C, han transcurrido 2.3 s y en la zona adelante del frente de mojado se presenta un gradiente térmico aún mayor. Si bien la probeta con temperatura inicial de 920 °C tiene mayor contenido inicial de energía térmica (y, por lo tanto, mayor fuerza motriz para la transferencia de calor), la similitud en los valores de la velocidad del frente de mojado entre las dos temperaturas iniciales mayores sugiere que el mecanismo de radiación juega un papel significativo para la probeta con temperatura inicial de 920 °C.

Al referir los eventos al tiempo en el que rompe la capa de vapor en la base de la punta cónica de la probeta, se obtienen observaciones consistentes para el comportamiento de la velocidad del frente de mojado (ver Figura 5.6).

5.3 *Flux* de calor en la superficie

Para la obtención de las curvas de estimación de *flux* de calor en la superficie de la probeta, las historias térmicas obtenidas experimentalmente se alimentaron al programa de cómputo **WinProbe** [14].

Además, se determinó con precisión la posición radial de cada uno de los termopares en la probeta, dado que es un dato crítico para el modelo inverso de conducción de calor en **WinProbe**. Esto se realizó utilizando un torno CNC, marca EMCO, modelo Compact 5, con el que se desbastó la probeta longitudinalmente, hasta descubrir cada uno de los barrenos en los que se introdujeron los termopares; posteriormente se determinaron las medidas

exactas, con ayuda de un vernier. Cabe mencionar que durante el desbaste de la probeta se pudo observar la existencia de distorsión a lo largo de la misma.

Una vez realizados los cálculos, para una serie de pruebas aleatorias, se determinó el número óptimo de tiempos futuros a utilizar en **WinProbe** y se estimó el *flux* de calor en la superficie como función de la temperatura en la superficie (también estimada) para cada uno de los experimentos.

En la Figura 5.8 se presentan las curvas de *flux* de calor en la superficie como función de la temperatura de superficie, calculados con diferentes valores de tiempos futuros (r), para el caso del termopar T/C1 (25 mm) en un experimento tomado aleatoriamente. Dado que el calor se extrae de la probeta, el *flux* tiene signo negativo.

Se puede observar que el aumento en el número de tiempos futuros suaviza la curva obtenida a través del programa de cómputo **WinProbe**, volviendo menos negativo el valor estimado del *flux* de calor de superficie y, por tanto, perdiendo información en la zona cercana al máximo. Por otra parte, la respuesta obtenida para $r = 2$, muestra variaciones que no pueden explicarse desde el punto de vista físico.

Es por esto, que se ha determinado utilizar el valor de tiempos futuros $r = 4$ para el cálculo de las respuestas de *flux* de calor en la superficie como función de la temperatura de superficie.

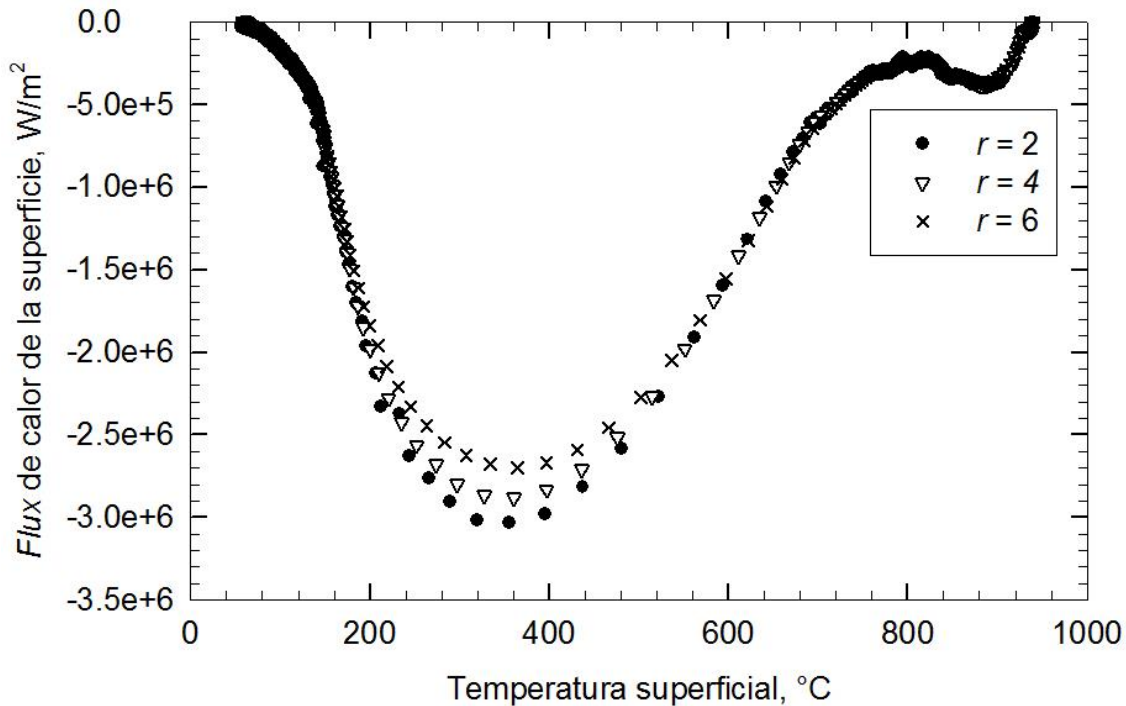


Figura 5.8. Flux de calor en la superficie como función de la temperatura de superficie, estimado con diferentes valores del número de tiempos futuros (r), para el termopar T/C1 (25 mm) en un experimento seleccionado aleatoriamente.

Se realizaron gráficos de flux de calor en la superficie como función del tiempo en la superficie, con la finalidad de dar seguimiento al enfriamiento de la probeta a través de la superposición de imágenes obtenidas a partir de las videograbaciones, sin el problema del desfase de tiempo asociado con la medición de las curvas de enfriamiento al interior de la probeta.

En la Figura 5.9 se muestra el seguimiento del enfriamiento de la probeta, durante el rango de tiempo en que ésta sale del horno y llega a su posición final dentro del sistema, a través de la superposición de imágenes sobre la curva de flux de calor en la superficie como función del tiempo en la superficie, para un experimento con temperatura inicial de 800 $^{\circ}C$.

De izquierda a derecha se indica (con ayuda de una flecha), el momento en que el horno se abre y la probeta entra en contacto con aire a temperatura ambiente. Este enfriamiento en aire es registrado y se observa como un

incremento en la magnitud del *flux* de calor en la superficie de la probeta. Inmediatamente después de que la probeta es sacada del horno, se lleva a través del sistema ($t_{aprox} = 83$ s), hasta su posición final dentro de éste ($t_{aprox} = 83.6$ s). Se aprecia que en este rango de tiempo, la magnitud del *flux* de calor en la superficie aumenta de manera más notable; esto es debido al enfriamiento que ocurre sobre la superficie de la probeta al entrar en contacto con el medio de temple. En este mismo instante se presenta la separación del termopar T/C3 (45 mm) de la tendencia que aún siguen los otros dos canales (T/C1 (25 mm) y T/C2 (35 mm)); esta diferencia en el comportamiento sugiere que la formación de la capa de vapor en la zona del termopar T/C3 (45 mm) es un fenómeno intermitente (debido a la extracción de calor por la punta de la probeta). Mientras el *flux* de calor en la superficie correspondiente al termopar T/C3 (45 mm) aumenta lentamente, el *flux* de calor correspondiente al termopar T/C2 (35 mm) alcanza un valor máximo ($t_{aprox} = 84.3$ s) y comienza a disminuir suavemente (a valores más positivos). El termopar T/C1 (25 mm) muestra un comportamiento similar al de T/C2 (35 mm); pero con una ligera oscilación para finalmente llegar a un valor máximo semejante al observado para T/C2 ($t_{aprox} = 85.4$ s).

Por último, la parte inferior de la probeta comienza a responder al avance del frente de mojado por lo que la extracción de calor comienza a aumentar significativamente ($t_{aprox} = 86$ s); en este punto, quizá por casualidad, las tres curvas se intersectan.

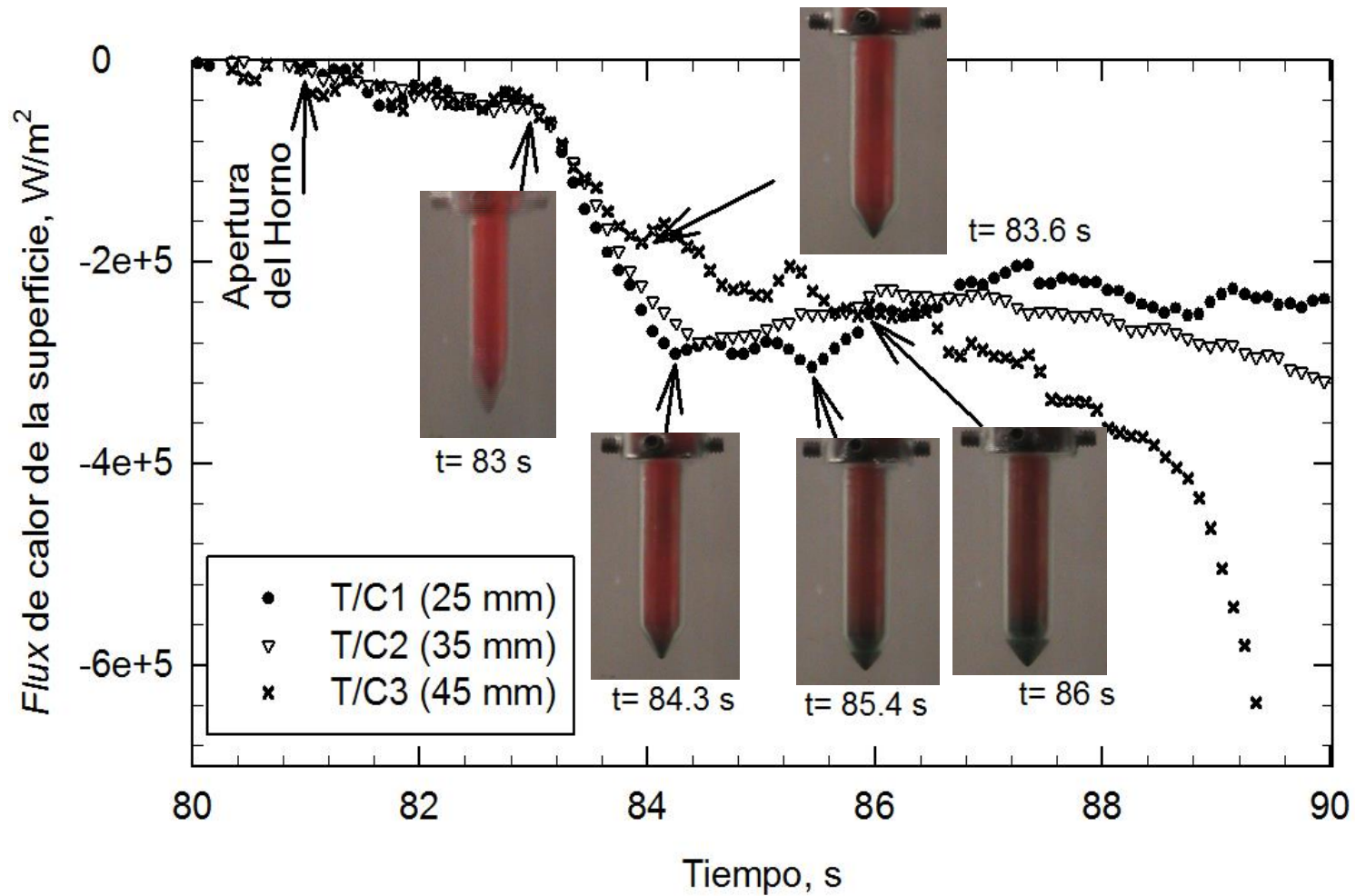


Figura 5.9. Flux de calor en la superficie como función del tiempo, con superposición de imágenes, para un experimento con temperatura inicial de 800 °C. Los tiempos se refieren al inicio de la adquisición de datos.

La Figura 5.10 muestra una curva de *flux* de calor de superficie vs. temperatura en la superficie, obtenida con ayuda del programa de cómputo **WinProbe**, para el caso del termopar T/C2 (35 mm), en un experimento seleccionado aleatoriamente.

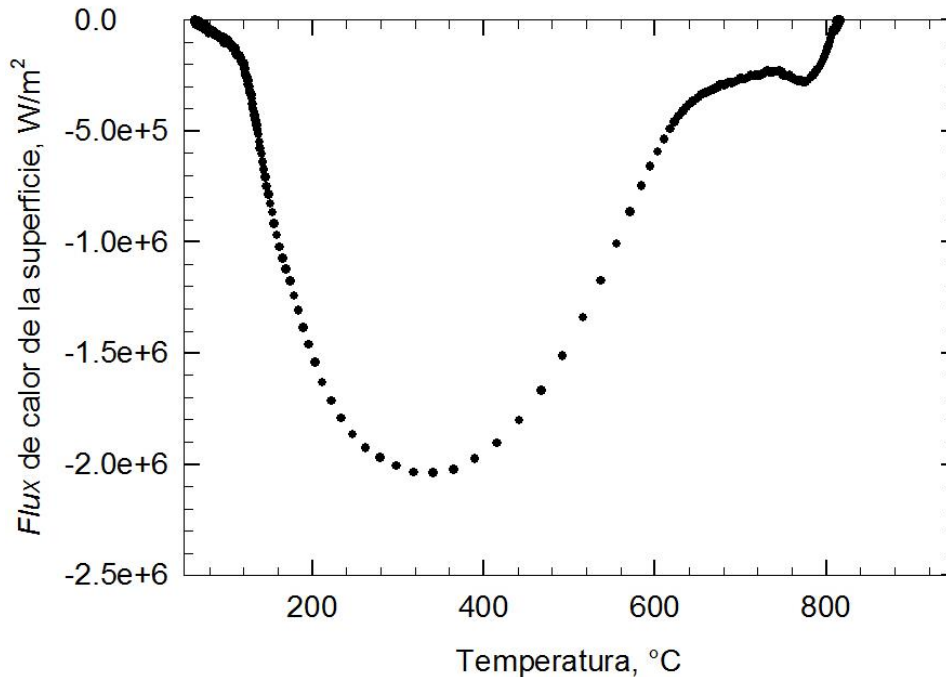
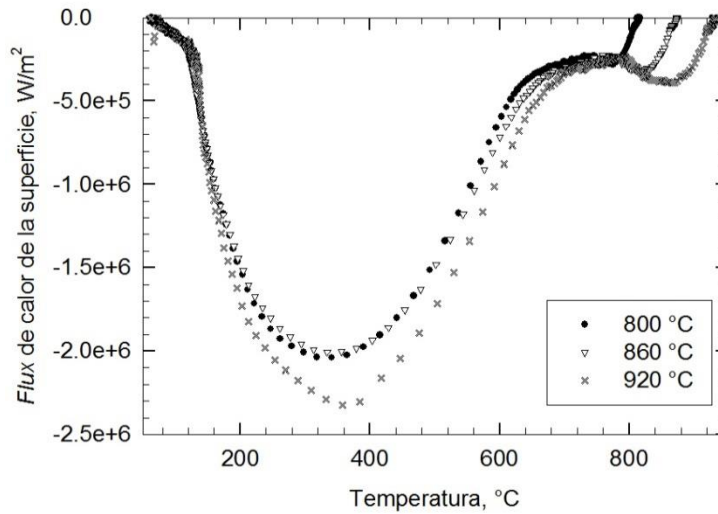


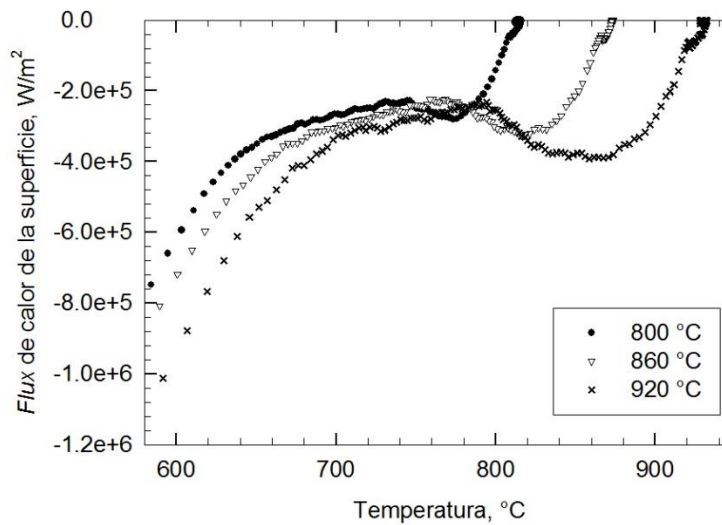
Figura 5.10. Flux de calor de la superficie como función de la temperatura de la superficie, para el termopar T/C2 (35 mm), en un experimento seleccionado aleatoriamente.

De derecha a izquierda, se observa un incremento en la magnitud del *flux* de calor en la superficie, hasta llegar a una meseta, seguido de un aumento ligero (transición de la probeta hasta la posición final dentro del sistema) y un nuevo aumento (estabilización de la capa de vapor en esta zona). Enseguida, se presenta un rango de temperaturas en el que el valor del *flux* de calor no varía mucho (capa de vapor estable); posteriormente se registra un aumento severo en la magnitud del *flux* de calor (etapa de formación de burbujas), hasta que alcanzar el valor máximo. Luego, la magnitud del *flux* de calor comienza a disminuir de manera suave, hasta observar de nuevo una variación en la que se presenta una menor extracción de calor (convección).

En la Figura 5.11 se muestra el efecto de la temperatura inicial de la probeta sobre las curvas de *flux* de calor de la superficie, para el termopar T/C2 (35 mm) - Figura 5.11 (a) - y una ampliación (en la zona cercana a la estabilidad de capa de vapor) de estas mismas curvas - Figura 5.11 (b).



(a)



(b)

Figura 5.11. Efecto de la temperatura inicial de la probeta sobre el *flux* de calor de la superficie para el termopar T/C2 (35 mm). (a) Curvas completas, (b) ampliación de las curvas en la región de capa de vapor.

Se observa –Figura 5.11(a)- que para las temperaturas iniciales de 800 °C y 860 °C, las respuestas de las curvas de *flux* de calor resultan muy similares, mientras que la respuesta para temperatura inicial de 920 °C muestra valores más grandes de *flux* de calor. Esta separación de la curva con temperatura inicial de 920 °C es debida a que existió mayor cantidad de energía extraída desde la probeta, lo que da soporte a la idea de una mayor extracción de calor por la suma de los mecanismos de radiación y convección, en comparación con los resultados para 860 y 800 °C (con menor pérdida de energía por radiación). En cuanto a la zona relacionada a la presencia de capa de vapor sobre la superficie de la probeta, se observa –Figura 5.11(b)- la presencia de la meseta relacionada con la estabilización de la capa de vapor, como se mencionó en la Figura 5.10. Se puede apreciar que conforme aumenta la temperatura inicial de la probeta, el *flux* de calor de la superficie es mayor durante la etapa de capa de vapor.

5.4 Temperatura de Leidenfrost

Como se mostró en la Figura 5.9, los resultados del programa de cómputo **WinProbe** permiten generar gráficos de la historia del *flux* de calor de la superficie (es decir, *flux* de calor de la superficie como función del tiempo); esta información se utilizó para determinar la temperatura de la superficie a la cual termina la duración de la capa de vapor y comienza la etapa de formación de burbujas.

Como se mencionó en el Capítulo 2 de este trabajo, a la temperatura a la que ocurre la transición “capa de vapor-formación de burbujas”, se le conoce como *temperatura de Leidenfrost*.

La forma en que se llevó a cabo la determinación de esta temperatura para cada termopar y experimento, se muestra en las Figuras 5.12 y 5.13.

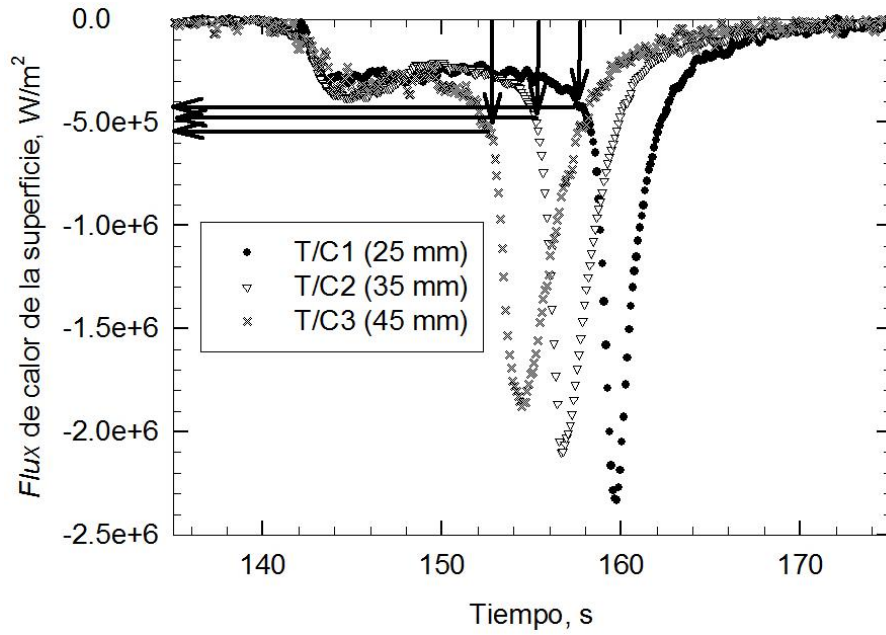


Figura 5.12. Determinación del *flux* de calor de la superficie correspondiente al rompimiento de la capa de vapor, para cada termopar, en un experimento con temperatura inicial de 920 °C. Las líneas verticales corresponden a los valores de tiempo para el rompimiento de la capa de vapor.

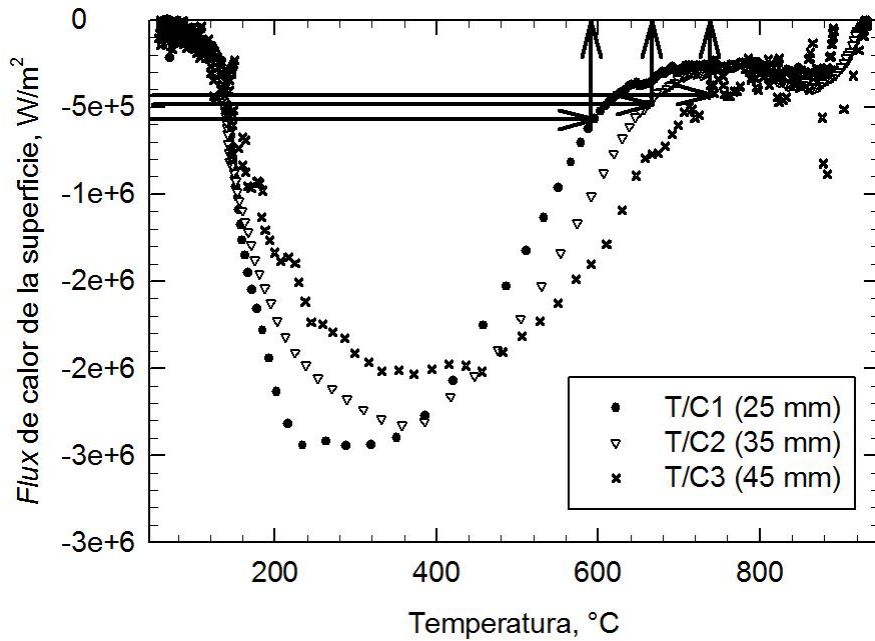


Figura 5.13. Determinación de la temperatura de Leidenfrost, para cada termopar, en un experimento con temperatura inicial 920 °C.

Como ejemplo, en la Figura 5.12 se agregaron las líneas utilizadas para marcar los tiempos de rompimiento de la capa de vapor (determinados a partir de las videograbaciones) sobre la gráfica de historias de *flux* de calor de la superficie, para un experimento con temperatura inicial de 920 °C.

Como segundo paso, en esta gráfica se lee el valor de *flux* de calor de la superficie correspondiente al punto en que el marcador (línea vertical) correspondiente toca a esa curva. A su vez, este valor de *flux* de calor de la superficie se traza como una línea horizontal en la gráfica de *flux* de calor de la superficie vs. temperatura de la superficie para determinar a la temperatura de Leidenfrost, como se muestra en la Figura 5.13.

Para este caso, los valores de la temperatura de Leidenfrost resultantes son: 587.5 °C, 667.0 °C y 736.2 °C, para los termopares T/C1 (25 mm), T/C2 (35 mm) y T/C3 (45 mm), respectivamente.

Este procedimiento se repitió para todos los experimentos realizados, lo que permitió estimar el valor promedio de la temperatura de Leidenfrost para cada condición estudiada así como la desviación estándar.

La Figura 5.14 muestra el efecto de la temperatura inicial de la probeta y de la posición del termopar, sobre la temperatura de Leidenfrost para todos los experimentos

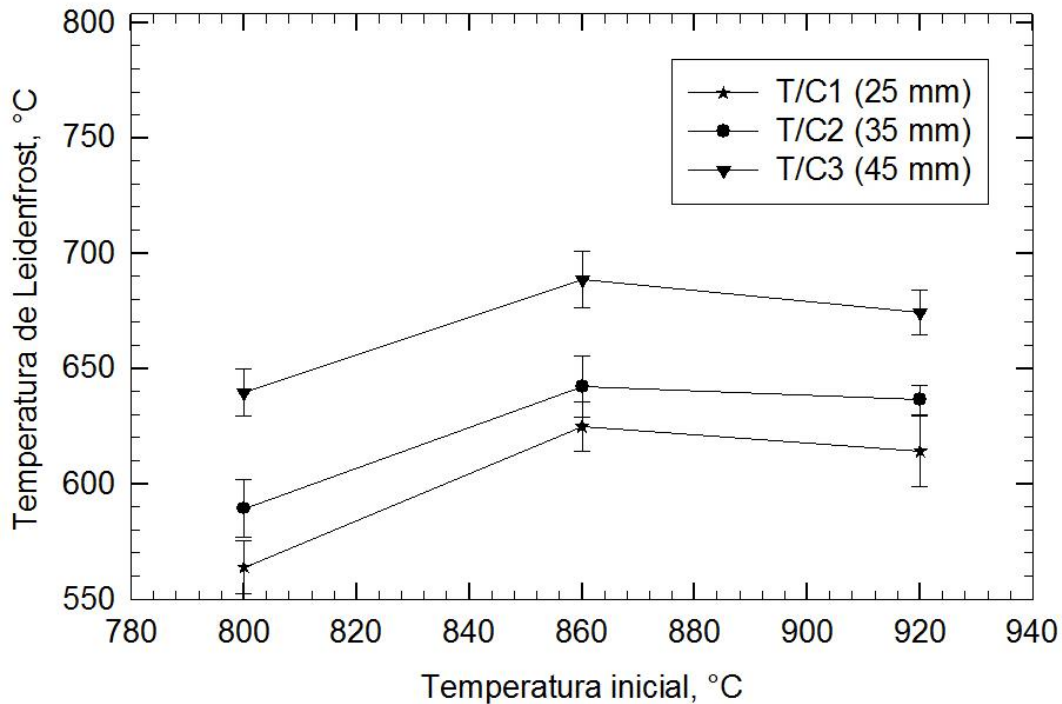


Figura 5.14. Temperatura de Leidenfrost como función de la temperatura inicial de la probeta y de la posición del termopar para todos los experimentos.

Se observa que al aumentar la temperatura inicial de la probeta de 800 a 860 °C, la temperatura de Leidenfrost aumenta; mientras que al aumentar la temperatura inicial de 860 a 920 °C, la temperatura de Leidenfrost es prácticamente la misma. Este comportamiento es consistente con las observaciones de las Figura 5.6 y 5.7.

Con respecto al efecto del punto en el que se determina la temperatura de Leidenfrost - a lo largo de la probeta -, se observa que al disminuir la profundidad del termopar, la temperatura de Leidenfrost también disminuye. Este comportamiento se debe a que durante el avance del frente de mojado se sigue extrayendo calor en toda la probeta a pesar de la presencia de la capa de vapor.

6 Conclusiones y recomendaciones

- Se observó que al aumentar la temperatura inicial de 800 a 860 °C, la velocidad del frente de mojado disminuye, mientras que al aumentar la temperatura inicial de 860 a 920 °C esta tendencia ya no se sigue sino que, por el contrario, la velocidad del frente de mojado aumenta ligeramente. La primera observación puede explicarse debido a que aumenta la cantidad de energía térmica para sustentar a la capa de vapor, mientras que la segunda sugiere la influencia del mecanismo de radiación.
- La temperatura de Leidenfrost varía con respecto a la temperatura inicial y con respecto a la posición en la probeta donde se lleve a cabo su determinación. Al aumentar la temperatura inicial de 800 a 860 °C la temperatura de Leidenfrost aumentó, mientras que al aumentar la temperatura inicial de 860 a 920 °C cambia muy poco. Estos resultados son consistentes con el comportamiento del frente de mojado y se explican de la misma manera.
- El efecto de la extracción de calor por el mecanismo de radiación adquiere importancia cuando la temperatura inicial es de 920 °C, por lo que la probeta se enfría más rápidamente en los primeros instantes, con respecto a las temperaturas iniciales inferiores.
- Sería de interés complementar este trabajo con al menos dos valores de flujo volumétrico de agua adicionales, para poder determinar tendencias o comportamientos asociados a esta variable, así como el aumento en el número de temperaturas iniciales cercanas a los 920 °C, para determinar la importancia del mecanismo de radiación.

7 Referencias bibliográficas

- [1] Groover M. Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas. Prentice-Hall Hispanoamericana S.A. Estado de México, 1997; pp. 43 – 44.
- [2] Rajan T.V, Sharma C.P. Heat treatment: Principles and techniques. Prentice-Hall. New Delhi, India. 2006; pp. 1-113.
- [3] Hernández Morales B., Cruces Reséndez R., Vergara Hernández H. J. y Solorio Díaz G. Hydrodynamic behavior of liquid quenchants in the vicinity of quench probe. Quenching Control and Distortion, September 9–13, 2012, Chicago, Illinois, USA
- [4] Pazos P. Tecnología de los metales y procesos de manufactura. Universidad Católica Andrés Bello. Caracas. 2006; pp. 158-161.
- [5] Verhoeven, J. D. Steel metallurgy for the non-metallurgist. ASM International. 2007; pp. 125 – 127.
- [6] Dueñas Pérez A. M., Análisis de la evolución microestructural de los aceros grado maquinaria (AISI 4140 y AISI 9840) durante el temple en un lecho fluidizado alúmina-aire”, Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, 2007.
- [7] Kalpakjian S. y Schmid S.R. Manufactura, Ingeniería y Tecnología. Pearson Educación. México. 2002; pp. 122 - 123.
- [8] Callister W.D., Jr. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Volumen 1. Reverté, S.A. Barcelona, España. 2007; pp. 346 – 347.
- [9] Angiolani A. Introducción a la química industrial: Fundamentos químicos y tecnológicos. Editorial Andrés Bello. Santiago de Chile. 1960; pp. 584 – 586.
- [10] Quéré D. ¿Qué es una gota de agua?. Akal S.A. Madrid, España. 2005; pp. 27- 28.
- [11] Lim, T.E. Optimizing Heat Treatment with Factorial Design. J. of Metals, 1989; 52-53.
- [12] Totten G.E. Cooling curve analysis of synthetic quenchants. Journal of Heat Treatment. Vol 6, No 2. 1988; pp 87-95.

- [13] Totten G.E., Bates C.E. y Clinton N.A. Handbook of quenchants and quenching technology. ASM International. Materials Park, OH. 1993; pp. 69 – 88. ISBN: 0-87170-X.
- [14] ASM Handbook. Vol 4. 10ª edición. ASM International. 1990; pp. 25 - 38.
- [15] Beck J, Litkouhi V. B. y St. Clair, Jr. C. R. Efficient sequential solution of the nonlinear inverse heat conduction problem. Numerical Heat Transfer. Vol. 5. March 1982; Pp. 275-286
- [16] López Sosa F. Caracterización de la extracción de calor durante la transformación de fase austenita-martensita. Reporte de Estancia Corta. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. 2012.
- [17] Rao Y.V.C. Heat Transfer. Universities Press. Himayatnagar, Hyderabad, India. 2001; pp. 293 – 294.
- [18] Campbell F.C. Manufacturing technology for aerospace structural materials. 1ª edición. Elsevier Ltd. Great Britain. 2006; pp. 176 – 195.
- [19] TABLA DE ACEROS SAE - AISI. Servicio Industrial, S.A. de C.V. [en línea]. [Fecha de consulta: 08 Agosto 2013]. Disponible en: <http://www.sisa1.com.mx/pdf/Aceros%20SISA%20Tabla%20SAE%20AISI.pdf>
- [20] Vergara-Hernández H.J., y Hernandez-Morales B., A novel probe design to study wetting front kinematics during forced convective quenching. Experimental Thermal and Fluid Science. Vol. 33. No 5. 2009; pp. 797–807.
- [21] Electronics components database. Ficha técnica *tempscan 110*. [en línea]. [Fecha de consulta: 18 Agosto 2013]. Disponible en: http://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/239/TEMPSCAN_1100.php.
- [22] B. Carnahan, H.A. Luther y J.O. Wilkes. Applied Numerical Methods. John Wiley & Sons, New York. 1969; pp. 128 – 130.