



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**ANÁLISIS DE CURVAS DE ENFRIAMIENTO  
DURANTE EL TEMPLE DE UNA ALEACIÓN DE  
ALUMINIO**

**TESIS**

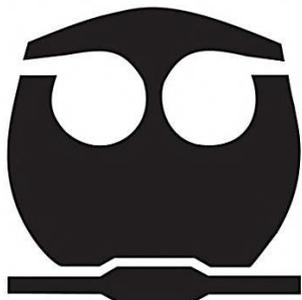
**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**P R E S E N T A:**

**ALEJANDRO GARCÍA GARCÍA**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. JOSÉ BERNARDO HERNÁNDEZ MORALES**



**CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2017**



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. ALBERTO INGALLS CRUZ

Vocal: Prof. JOSÉ BERNARDO HERNÁNDEZ MORALES

Secretario: Prof. SERGIO GARCÍA GALÁN

1er Suplente: Prof. BALBINA OJEDA RAMÍREZ

2do Suplente: Prof. BENJAMÍN BELTRÁN FRAGOSO

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

Supervisor técnico:

---

M. en C. Roberto Cruces Reséndez

Sustentante:

---

Alejandro García García

## Contenido

Resumen.....	1
1 Introducción .....	3
1.1 Justificación .....	3
1.2 Hipótesis .....	4
1.3 Objetivo.....	4
2 Antecedentes .....	5
2.1 Ciclo térmico del tratamiento de endurecimiento por precipitación .....	5
2.2 Enfriamiento de aleaciones de aluminio.....	7
2.3 Sensibilidad de temple .....	7
2.4 Extracción de calor durante el enfriamiento en medios volátiles.....	9
2.5 Problema inverso de conducción de calor ( <i>IHCP</i> ) .....	12
2.5.1 Formulación matemática del <i>IHCP</i> .....	12
3 Procedimiento experimental.....	15
3.1 Condiciones experimentales .....	15
3.2 Probeta .....	15
3.3 Dispositivo experimental .....	16
4 Resultados .....	18
4.1 Respuesta térmica e imágenes.....	18
5 Análisis de resultados .....	25
5.1 Rapidez de enfriamiento .....	25
5.2 Frente de mojado .....	30
5.3 <i>Flux</i> de calor en la superficie .....	33
5.4 Efecto del material de la probeta .....	43
6 Conclusiones .....	48
7 Referencias.....	49

## Índice de Figuras

<b>Figura 2.1</b> Representación esquemática del ciclo térmico de las etapas de disolución y precipitación durante el proceso de endurecimiento por precipitación [1]. .....	6
<b>Figura 2.2</b> Diagrama de precipitación bajo condiciones de enfriamiento continuo de una aleación de aluminio 6005A [9]. .....	8
<b>Figura 2.3</b> Etapas de transferencia de calor durante un temple por inmersión [16]. .....	10
<b>Figura 3.1</b> Probeta cilíndrica con punta cónica: (a) vista isométrica, (b) vista lateral y (c) vista superior. ....	16
<b>Figura 3.2</b> Dispositivo experimental: (a) depósito de agua, (b) bomba, (c) rotámetro, (d) tubo de acrílico, (e) tanque de vidrio, (f) probeta, (g) depósito secundario, (h) soporte móvil de la probeta, (i) videocámara y (j) horno tipo libro [22]. .....	17
<b>Figura 4.1</b> Curva de enfriamiento para el termopar TC3 durante el enfriamiento súbito con agua a 60°C fluyendo a una velocidad de 0.2 m/s y una temperatura inicial de la probeta de 550°C. Las imágenes corresponden a: (a) 2.30 s, (b) 2.74 s, (c) 3.20 s, (d) 4.45 s y (e) 5.60 s (referirse a la curva de enfriamiento).....	19
<b>Figura 4.1</b> (Continuación) Curva de enfriamiento para el termopar TC3 durante el enfriamiento súbito con agua a 60°C fluyendo a una velocidad de 0.2 m/s y una temperatura inicial de la probeta de 550°C. Las imágenes corresponden a: (a) 2.30 s, (b) 2.74 s, (c) 3.20 s, (d) 4.45 s y (e) 5.60 s (referirse a la curva de enfriamiento). .....	20
<b>Figura 4.2</b> Curva de enfriamiento durante el enfriamiento súbito con agua a 60°C fluyendo a una velocidad de 0.2 m/s y una temperatura inicial de la probeta de 550°C. Las imágenes corresponden a: (a) 4.45 s, (b) 4.90 s y (c) 5.30 s, con respecto a las curvas de enfriamiento Las flechas indican la posición longitudinal de cada uno de los termopares.....	21
<b>Figura 4.3</b> Curva de enfriamiento para el termopar TC3 durante el temple con agua a 60°C fluyendo a una velocidad de 0.6 m/s y una temperatura inicial de la	

probeta de 550°C. Las imágenes corresponden a: (a) 1.95 s, (b) 2.50 s, (c) 2.85 s, (d) 4.20 s y (e) 5.00 s (referirse a la curva de enfriamiento)..... 22

**Figura 4.4** Curva de enfriamiento durante el temple con agua a 60°C fluyendo a una velocidad de 0.6 m/s y una temperatura inicial de la probeta de 550°C. Las imágenes corresponden a: (a) 4.20 s, (b) 4.50 s y (c) 4.77 s con respecto a las curvas de enfriamiento. Las flechas indican la posición longitudinal de cada uno de los termopares. .... 23

**Figura 5.1** Rapidez de enfriamiento (en la posición de TC3), en función del tiempo, para un experimento con temperatura inicial de la probeta de 450 °C, para ambas velocidades de flujo..... 26

**Figura 5.2** Rapidez de enfriamiento, en función del tiempo, para un experimento con temperatura inicial de la probeta de 500 °C para ambas velocidades de flujo. .... 27

**Figura 5.3** Rapidez de enfriamiento, en función del tiempo, para un experimento con temperatura inicial de la probeta de 550 °C para ambas velocidades de flujo. .... 27

**Figura 5.4** Rapidez de enfriamiento, en función del tiempo, para el termopar TC2, para ambas velocidades de flujo, a una temperatura inicial de la probeta de: (a) 450 °C, (b) 500 °C y (c) 550 °C..... 28

**Figura 5.4** (Continuación) Rapidez de enfriamiento, en función del tiempo, para el termopar TC2, para ambas velocidades de flujo, a una temperatura inicial de la probeta de: (a) 450 °C, (b) 500 °C y (c) 550 °C..... 29

**Figura 5.5** Rapidez de enfriamiento, en función del tiempo, para el termopar TC1, para ambas velocidades de flujo, a una temperatura inicial de la probeta de: (a) 450 °C, (b) 500 °C y (c) 550 °C..... 30

**Figura 5.6** Posición del frente de mojado en función del tiempo durante un temple en agua a 60°C, fluyendo a una velocidad de 0.6 m/s a una temperatura inicial de 450 °C: datos (puntos), regresión (línea). Se incluye el valor de R<sup>2</sup>. .... 31

**Figura 5.7** Posición del frente de mojado en función del tiempo durante un temple en agua a 60°C, fluyendo a una velocidad de 0.6 m/s para tres valores de

temperatura inicial: datos (puntos), regresión (líneas). Se incluyen los valores de $R^2$ . .....	32
<b>Figura 5.8</b> Velocidad del frente de mojado en función de la temperatura inicial de la probeta para las dos velocidades de flujo estudiadas. ....	33
<b>Figura 5.9</b> Historia de flux de calor en la superficie para TC1, TC2 y TC3 durante el temple con temperatura inicial de 550°C y velocidad de flujo de 0.2 m/s. ....	35
<b>Figura 5.10</b> Historia de flux de calor en la superficie para temperatura inicial de 450°C y ambas velocidades de flujo: (a) TC3 y (b) TC2. ....	37
<b>Figura 5.11</b> Historia de flux de calor en la superficie para a una temperatura de 500 °C y ambas velocidades de flujo para: (a) TC3 y (b) TC2. ....	38
<b>Figura 5.12</b> Historia de flux de calor para una temperatura de 550 °C y ambas velocidades de flujo para: (a) TC3 y (b) TC2. ....	39
<b>Figura 5.12</b> (Continuación) Historia de flux de calor para una temperatura de 550 °C y ambas velocidades de flujo para: (a) TC3 y (b) TC2. ....	40
<b>Figura 5.13</b> Flux de calor en la superficie en función de la temperatura de superficie para la posición de TC3 durante el temple con agua fluyendo a 0.2 m/s y 0.6 m/s a una temperatura inicial de: (a) 450 °C, (b) 500 °C y (c) 550 °C. ....	41
<b>Figura 5.14</b> Flux de calor en la superficie en función de la temperatura de superficie para la posición de TC2 durante el temple con agua fluyendo a 0.2 m/s y 0.6 m/s a una temperatura inicial de: (a) 450 °C, (b) 500 °C y (c) 550 °C. ....	42
<b>Figura 5.15</b> Comparación del avance del frente de mojado para experimentos realizados a una temperatura inicial de 550 °C y velocidad de flujo de 0.2 m/s para aluminio ((a) - (c)) y acero ((d) - (f)). La posición del frente de mojado está en: (a) y (d) la base cilíndrica de la probeta, (b) y (e) la posición del termopar TC2; (c) y (f) hacia el final del experimento. ....	44
<b>Figura 5.16</b> Historia de flux de calor en la superficie en la posición de los tres termopares, para pruebas realizadas a temperatura inicial de 550 °C y velocidad de flujo de 0.2 m/s en probetas de: (a) acero y (b) aleación de aluminio. ....	46
<b>Figura 5.17</b> Historias de temperatura local, temperatura de superficie y flux de calor en la superficie para la posición de TC2 durante experimentos con	

temperatura inicial de 550 °C y velocidad de flujo de 0.2 m/s: (a) acero y (b)  
aluminio..... 47

## Índice de Tablas

<b>Tabla 5.1</b> Tiempo de duración de la capa de vapor.....	28
<b>Tabla 5.2</b> Propiedades térmicas del aluminio [20]. .....	34
<b>Tabla 5.3</b> Relación de tiempos correspondientes a las imágenes de la Figura 5.15. ....	45
<b>Tabla 5.4</b> Velocidad del frente de mojado para temperatura inicial de 550 °C y velocidad de flujo de 0.2 m/s.....	45

### Listado de símbolos

Símbolo	Cantidad	Unidades
$C_p$	Calor específico a presión constante	$J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$
$k$	Conductividad térmica	$W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$
$q$	<i>Flux</i> de calor	$W\ m^{-2}$
$r$	Coordenada radial del sistema cilíndrico	$m$
$R$	Radio	$m$
$t$	Tiempo	$s$
$t_j$	Tiempo $i$ -ésimo	$s$
$t_f$	Tiempo final	$s$
$T$	Temperatura	$^\circ C$
$T_R$	Temperatura en la superficie	$^\circ C$
$Y_j$	Temperatura local medida al tiempo $t_j$	$^\circ C$
$\alpha$	Difusividad térmica	$m^2\ s^{-1}$
$\rho$	Densidad	$kg\ m^{-3}$

## Resumen

La etapa de enfriamiento súbito durante el tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación en aleaciones de aluminio es un paso crítico, ya que debe realizarse de tal manera que se evite la formación de precipitados, previo a que se realice el envejecimiento. Por ello, es importante evaluar la extracción de calor de la pieza tratada hacia el medio de temple como un paso inicial en la modelación matemática de esta etapa del proceso.

En este trabajo se empleó una probeta cilíndrica con punta cónica, instrumentada con 3 termopares tipo K distribuidos a lo largo de ésta (cercanos a la superficie), para obtener la respuesta térmica en posiciones internas durante el enfriamiento de la probeta. La probeta se calentó en un horno vertical y posteriormente se sumergió dentro de un tubo de acrílico, por el cual circulaba agua a una temperatura de 60°C y velocidad de flujo constante. Además, se obtuvieron videograbaciones durante los experimentos para extraer imágenes de los videos. Las variables estudiadas fueron la temperatura inicial de la probeta y la velocidad de flujo del agua. Se trabajó con tres valores de temperatura inicial (450, 500 y 550 °C que están dentro del rango del tratamiento de solubilización) y dos valores de velocidad de flujo de agua (0.2 y 0.6 m/s comunes en procesos industriales).

Con los datos obtenidos durante las pruebas: se calculó la rapidez de enfriamiento local, se estimó la velocidad del frente de mojado y, mediante la solución al problema inverso de conducción de calor (*IHCP*), se estimó el *flux* de calor en la superficie.

Las mayores rapidezces de enfriamiento se obtuvieron para temperatura inicial de 550 °C y velocidad de flujo de 0.6 m/s. La mayor velocidad de frente de mojado se obtuvo para la velocidad de flujo de 0.6 m/s y temperatura inicial de 450 °C, mientras que los más bajos se obtuvieron para temperatura inicial de 550 °C y velocidad de flujo de 0.6 m/s. Las velocidades de frente de mojado son muy parecidas a 550 °C, independientemente de la velocidad de flujo; estos resultados indican que a mayor energía acumulada el efecto de la velocidad de

flujo pierde influencia en el avance del frente de mojado. Los valores máximos de *flux* de calor de la superficie son mayores a 550 °C debido a una mayor cantidad de energía térmica disponible al momento en el que el frente de mojado pasa frente al termopar correspondiente.

Comparando los resultados de este trabajo con los de una investigación en la que se usaron probetas de acero, se observó que el frente de mojado avanza más rápidamente cuando se usan probetas de la aleación de aluminio. Por otro lado, la diferencia en conductividad térmica entre ambos materiales se refleja en que, para las probetas de acero, existe una diferencia significativa entre la temperatura local y la temperatura de superficie, mientras que para la aleación de aluminio esta diferencia es mínima.

## **1 Introducción**

Las propiedades mecánicas deseadas en componentes fabricados con algunas aleaciones de aluminio se obtienen con un tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación. Típicamente, el proceso consta de tres etapas: 1) solubilización, 2) enfriamiento súbito y 3) precipitación [1]. La etapa de solubilización se lleva a cabo en un rango de temperaturas entre 400 y 540 °C, y tiene por objetivo producir una solución sólida saturada. La etapa de enfriamiento se realiza para asegurar que los átomos de soluto se mantengan disueltos, por lo que la estructura de la aleación al final de esta etapa consiste en una solución sólida sobresaturada, es decir, que contiene soluto en exceso.

La etapa de temple dentro del proceso de endurecimiento debe llevarse a cabo de manera tal que, los átomos de soluto se mantengan disueltos en la matriz evitando una precipitación anticipada. La trayectoria de enfriamiento requerida para cumplir con este objetivo depende de la composición química de la aleación y de la geometría de la pieza, y es función de la historia de rapidez de extracción de calor hacia el medio de enfriamiento. Al respecto, debe mencionarse que, durante el enfriamiento de una pieza en un medio de enfriamiento líquido, ocurren varios fenómenos: a) presencia de capa de vapor, b) formación de burbujas, y c) convección sin ebullición; la duración de cada una de estas etapas define a la historia de extracción de calor. La frontera entre las zonas de capa de vapor y de burbujas se conoce como el frente de mojado, cuya velocidad está relacionada con la duración de las etapas mencionadas anteriormente.

### **1.1 Justificación**

Un primer paso para el diseño ingenieril de la etapa de enfriamiento súbito en el tratamiento térmico de aleaciones de aluminio es la evaluación de la extracción de calor hacia el medio de temple, lo cual puede realizarse mediante el análisis de curvas de enfriamiento obtenidas en ensayos de laboratorio. Típicamente, el enfriamiento súbito de aleaciones de aluminio se realiza en agua o en soluciones acuosas de polímeros, por lo que es necesario evaluar las etapas de extracción

de calor comúnmente presentes en medios vaporizables (película de vapor, nucleación y crecimiento de burbujas, y convección), así como la evolución del frente de mojado. Aun cuando es práctica común el utilizar probetas cilíndricas de base plana para ensayos de laboratorio de este tipo [2], en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica se ha demostrado que se mejora considerablemente la reproducibilidad de los ensayos al utilizar probetas de punta cónica, provocando que el avance del frente de mojado sea uniforme.

Es por esto que en este proyecto se estudiará el efecto de la temperatura inicial y de la velocidad de flujo del medio de enfriamiento sobre la extracción de calor durante ensayos de temple a escala laboratorio de probetas cilíndricas de punta cónica fabricadas con una aleación de aluminio.

## **1.2 Hipótesis**

Al incrementar la temperatura inicial o disminuir la velocidad del flujo, la velocidad del frente de mojado disminuirá.

## **1.3 Objetivo**

Evaluar la extracción de calor durante el enfriamiento por convección forzada, a escala laboratorio, de probetas de una aleación de aluminio, mediante el análisis de curvas de enfriamiento.

## 2 Antecedentes

El aluminio y sus aleaciones tienen propiedades sobresalientes, tales como:

- Buena resistencia a la corrosión
- Alta conductividad eléctrica y térmica
- Baja densidad

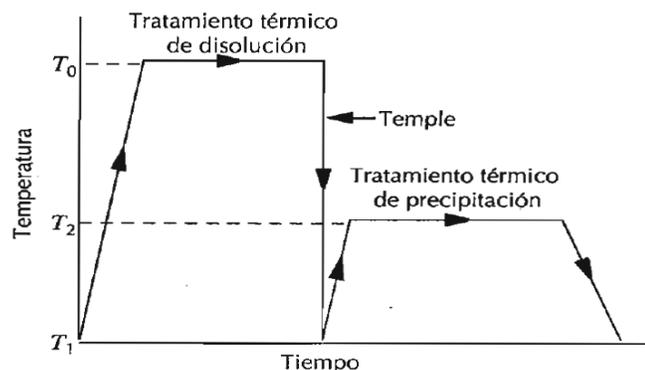
Debido a estas propiedades, el aluminio y sus aleaciones se utilizan para la producción de: papel aluminio, latas de bebida, utensilios para cocina, estructuras arquitectónicas y estructuras de barcos, aviones y automóviles [3]. Como resultado de la formación natural de una película de óxido superficial tenaz ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), un gran número de aleaciones de aluminio tienen resistencia a la corrosión excepcional en muchos ambientes atmosféricos y químicos. Su resistencia a la corrosión es especialmente importante en la arquitectura y en aplicaciones de transporte. Su alta conductividad térmica es útil en aplicaciones tales como radiadores y utensilios de cocina. Su baja densidad es importante para todas las formas de transporte, en especial aeronaves. Las aleaciones de aluminio se pueden deformar y maquinar fácilmente. Las aleaciones endurecibles por precipitación pueden conformarse en un estado relativamente suave y luego ser tratadas térmicamente para obtener mayores niveles de resistencia mecánica final [3]. Por ejemplo una aleación AA6061 tiene una dureza Brinell de 74 HBW para un envejecimiento natural (a temperatura ambiente) y un valor de dureza de 110 HBW con un envejecimiento artificial a 170 °C durante 24 horas [4].

### 2.1 Ciclo térmico del tratamiento de endurecimiento por precipitación

En la Figura 2.1 se presenta el ciclo térmico de un tratamiento térmico para endurecimiento por precipitación [1]. Como puede observarse, el endurecimiento por precipitación se consigue mediante tres etapas diferentes. La primera es un tratamiento térmico de disolución o solubilización, en el que los átomos de soluto se disuelven para formar una solución sólida. El tratamiento consiste en calentar la aleación a una temperatura dentro del campo de fase  $\alpha$  ( $T_0$ , por ejemplo, que es la temperatura de solubilización y está en un rango de 400 hasta 550 °C [1]),

y mantener la pieza a esa temperatura hasta que los átomos de soluto presentes se disuelvan completamente. En este punto, la aleación consiste solo de la fase  $\alpha$ . A continuación se enfría súbitamente (rapidez de enfriamiento promedio de 46 a 50 °C/s [5]) a la temperatura  $T_1$  (temperatura ambiente) de modo que la difusión de soluto no sea significativa. Así, a  $T_1$  existe una situación de no equilibrio en la cual la fase  $\alpha$  aparece como una solución sólida sobresaturada con átomos de soluto. Además, en la mayoría de las aleaciones de aluminio la rapidez de difusión a  $T_1$  es extremadamente lenta, de modo que la fase  $\alpha$  permanece a esta temperatura durante períodos relativamente largos.

La etapa de precipitación consiste en calentar la solución sólida sobresaturada  $\alpha$  a una temperatura intermedia dentro de la región bifásica, temperatura a la cual la rapidez de difusión es apreciable (por ejemplo de un orden de  $10^{-13}$  m<sup>2</sup>/s para cobre en aluminio a 500 °C [6]). La fase precipitada comienza a formarse como partículas finamente dispersas, proceso que al cual se denomina “envejecimiento”. Después de permanecer el tiempo adecuado a la temperatura  $T_2$  (temperatura de envejecimiento que puede ir desde 120 hasta 250 °C [5]), la aleación se enfría hasta temperatura ambiente. Las características de las partículas precipitadas y, por consiguiente, la resistencia mecánica y la dureza finales de la aleación dependen de la temperatura de precipitación  $T_2$  y del tiempo de envejecimiento a esta temperatura. En algunas aleaciones, el envejecimiento ocurre a temperatura ambiente si la pieza se mantiene durante largos periodos de tiempo.



**Figura 2.1** Representación esquemática del ciclo térmico de las etapas de disolución y precipitación durante el proceso de endurecimiento por precipitación [1].

## 2.2 Enfriamiento de aleaciones de aluminio

El objetivo del enfriamiento súbito es la retención del grado más alto posible de solución con el nivel más bajo de tensiones residuales inducidas y la menor deformación o distorsión. Esto se logra con una rapidez de enfriamiento suficientemente alta como para evitar la formación de precipitados, pero no tan alta que favorezca la formación de gradientes térmicos significativos dentro de la pieza. El enfriamiento rápido desde la temperatura de solución hasta la temperatura ambiente es crítico y, a menudo, es el paso menos controlado en el proceso de endurecimiento por precipitación de aleaciones de aluminio; un mal control en la etapa de enfriamiento provoca la formación de precipitados y, en consecuencia, bajos valores de dureza final [7].

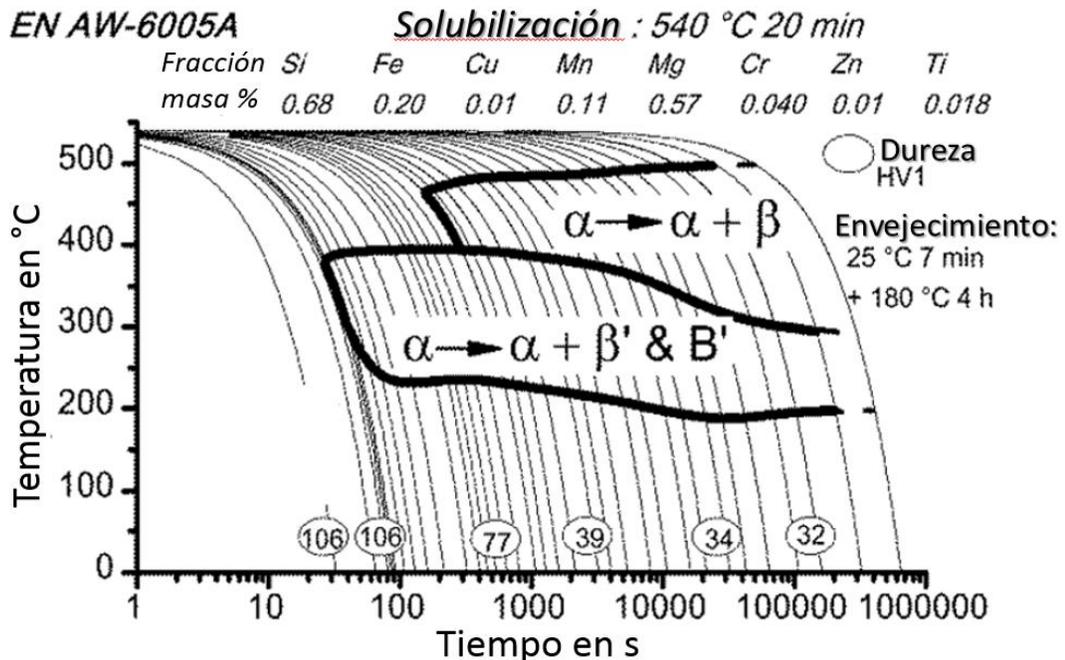
Valores comunes de rapidez de enfriamiento promedio para la etapa de enfriamiento súbito de placas con espesor de 13 mm son: 46°C/s en agua caliente, 50 °C/s en agua a temperatura ambiente y 85 °C/s en salmuera [5]. Estos valores son altos con respecto al normalizado del acero, que tiene valores de rapidez de enfriamiento promedio de 4 a 12 °C/min [8].

## 2.3 Sensibilidad de temple

Como ya se mencionó, para conseguir la resistencia mecánica, dureza y resistencia a la corrosión especificada, es necesario evitar la precipitación durante el enfriamiento, manteniendo los elementos que promueven el endurecimiento en solución sólida hasta que la aleación sea endurecida por envejecimiento. En este contexto, la "sensibilidad de temple" (*quench sensitivity*) se define como la tendencia de una aleación para formar precipitados durante un enfriamiento rápido [9]. La sensibilidad de temple de aleaciones de aluminio depende de la composición de la aleación y del tipo de enfriamiento.

Una manera de mostrar la sensibilidad de temple es con un diagrama de enfriamiento continuo en el que se muestren las zonas de precipitación. En la Figura 2.2 se presenta un diagrama de este tipo para la aleación 6005A. Como

puede verse, si el enfriamiento no es suficientemente rápido, la dureza al final del ciclo térmico completo disminuye debido a que hay precipitación durante el enfriamiento.



**Figura 2.2** Diagrama de precipitación bajo condiciones de enfriamiento continuo de una aleación de aluminio 6005A [9].

Si una pieza de grandes dimensiones se fabrica con una aleación de aluminio que sea sensible al temple, el enfriamiento induciría heterogeneidad en la microestructura (porque la rapidez de enfriamiento sería más baja en el centro que en la superficie) y, por tanto, en las propiedades [10]. Además, si existen gradientes térmicos significativos, la probabilidad de que la pieza se distorsione es mayor. Por ejemplo, Keleshian *et al.* [11] evaluaron la distorsión en secciones en forma de T de la aleación AA7249 después del temple en agua. Las dimensiones de cada una de estas secciones fueron: 25.4 cm de largo y cada brazo de la "T" de 4.7 cm de ancho y 4.3 cm de largo; para un tratamiento T6 encontraron distorsión significativa.

La sensibilidad de temple se asocia principalmente con partículas dispersas y límites de grano, que promueven la precipitación heterogénea [12]. La composición química también tiene gran influencia en la sensibilidad de temple,

que aumenta con el contenido total de elementos de aleación (tales como Cu, Mg y/oZn) que inducen la descomposición de fases de equilibrio si el enfriamiento es lento. Por ejemplo, con referencia a la Figura 2.2, si la rapidez de enfriamiento promedio es menor a 5.5 °C/s aproximadamente, entonces precipitará la fase  $\beta$ .

Se han realizado estudios sobre los parámetros que afectan la sensibilidad de temple. El uso de zirconio como formador de dispersores, la inhibición de la recristalización mediante un tratamiento termo-mecánico y el envejecimiento dúplex, son soluciones parciales para la disminución de la sensibilidad de enfriamiento [12].

En la actualidad, existen diferentes métodos para evaluar la sensibilidad de enfriamiento de una aleación de aluminio, tales como el ensayo tipo Jominy [13] las curvas temperatura-tiempo-transformación (TTT), las curvas de temperatura-tiempo-propiedades (TTP) y las curvas de transformación bajo condiciones de enfriamiento continuo (CCT) [9].

#### **2.4 Extracción de calor durante el enfriamiento en medios volátiles**

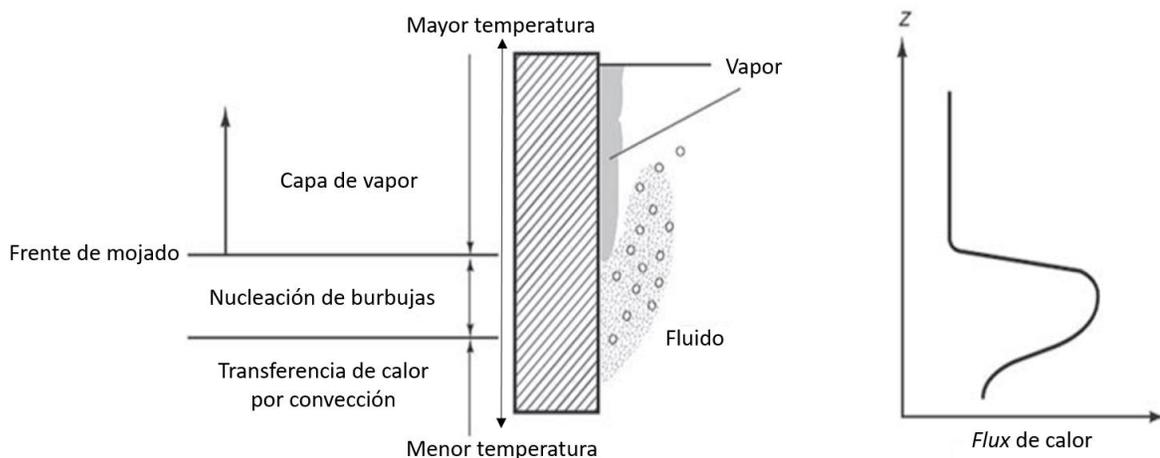
La ebullición ocurre cuando un líquido vaporizable se calienta a una temperatura por encima de su temperatura de saturación (a una presión específica), dando lugar a una transición de líquido a vapor. Aunque la ebullición es comúnmente asociada con la formación de burbujas, a temperaturas de superficie suficientemente altas es posible formar una película de vapor [14].

Los diferentes modos de ebullición se clasifican según la hidrodinámica del baño y la temperatura de operación del fluido con respecto a su punto de saturación [14]: si el líquido está en reposo, el modo de ebullición se denomina ebullición de piscina (*pool boiling*), mientras que si el líquido está en movimiento debido a una fuerza externa el modo de ebullición se conoce como ebullición convectiva forzada (*forced convective boiling*).

En un estudio pionero, Nukiyama [15] realizó un experimento de calentamiento controlado para caracterizar el comportamiento de ebullición del agua a presión atmosférica. Observó que el flujo de calor superficial aumentaba a medida que el sobrecalentamiento de la pared aumentaba hasta alcanzar un máximo. De sus observaciones, las regiones de nucleación y de película de vapor se pueden definir en una curva de extracción de calor. La región de ebullición nucleada se asocia con la nucleación, crecimiento y desprendimiento de burbujas, y su límite superior (en la curva de extracción de calor) se define por el *flux* de calor superficial máximo, también conocido como el *flux* de calor crítico; por otro lado, en la zona de ebullición con formación de capa de vapor, una película de vapor cubre la superficie de la pieza.

Como consecuencia de lo anterior, durante el enfriamiento en medios volátiles tales como agua, aceite o soluciones acuosas de polímeros, ocurren fenómenos en la superficie del sólido que generan condiciones de frontera de transferencia de calor que son no lineales y dependientes del tiempo.

En la Figura 2.3 se ilustran las etapas de la ebullición (para un enfriamiento súbito en un medio vaporizable), así como las variaciones en extracción de calor que se lleva a cabo en cada una de ellas.



**Figura 2.3** Etapas de transferencia de calor durante un temple por inmersión [16].

En orden de mayor a menor temperatura superficial se pueden distinguir tres regímenes de transferencia de calor [16]:

- 1) *Enfriamiento en presencia de una película de vapor.* Esta primera etapa se caracteriza por la formación de una capa de vapor continua y estable que rodea a la superficie de la pieza y que se genera cuando el líquido se pone en contacto con la superficie caliente, que lo vaporiza inmediatamente.
- 2) *Enfriamiento en presencia de burbujas.* Esta etapa inicia cuando el líquido entra de nuevo en contacto con la pieza (lo que se conoce como “remojado”), debido al colapso de la capa de vapor, produciendo burbujas. En esta etapa el calor se transfiere rápidamente debido a que se remueve como calor de vaporización.
- 3) *Enfriamiento por convección sin ebullición.* Esta etapa comienza cuando la ebullición cesa y la superficie de la pieza entra en contacto completamente con el medio de enfriamiento en estado líquido. En esta etapa el enfriamiento se lleva a cabo por el mecanismo de convección.

El remojado (es decir, cuando líquido fresco entra en contacto con la superficie del sólido que queda libre al colapsar la capa de vapor) es un fenómeno que desempeña un papel clave en la definición de las características de extracción de calor de un líquido de temple. El remojado marca el final de la etapa de capa de vapor y el comienzo de la ebullición con formación de burbujas (ver Figura 2.3); esta transición entre etapas se conoce como el frente de mojado [14]. Una forma de caracterizar el remojado es mediante el tiempo de remojado, que es el momento en el que ocurre la transición de la película de vapor a la ebullición con formación de burbujas. Una cantidad relacionada es la temperatura de Leidenfrost; en el contexto de procesos de enfriamiento, esta cantidad es la temperatura a la cual la etapa en presencia de película de vapor termina y comienza la transición a la ebullición con formación de burbujas [17]. Otra manera de definir a la temperatura de Leidenfrost es (para calentamiento): el valor de la

temperatura superficial para la cual el flujo de calor es el mínimo y el líquido toma el máximo tiempo para evaporarse completamente [18].

## **2.5 Problema inverso de conducción de calor (*IHCP*)**

Debido a los fenómenos de evaporación que tienen lugar en la interfase metal-medio de temple no es posible estimar directamente el *flux* de calor, por lo que es común utilizar un método indirecto que se basa en la solución del problema inverso de conducción de calor. El problema matemático del uso de la respuesta térmica local para estimar una condición de frontera de transferencia de calor se conoce como el problema inverso de conducción de calor (*IHCP*, por sus siglas en inglés), en contraste con el problema directo de conducción de calor (*DHCP*, por sus siglas en inglés), que consiste en calcular la evolución del campo térmico para un conjunto dado de condiciones iniciales y de frontera [19].

En lugar de instrumentar una pieza real, muchos de los investigadores han concentrado sus esfuerzos estudiando la extracción de calor en equipos a escala laboratorio utilizando piezas relativamente pequeñas y de geometrías simples. En muchos casos, los materiales utilizados no transforman durante el temple; además, bajo ciertas condiciones, los gradientes térmicos dentro de la probeta se han considerado insignificantes [14].

Estimar la evolución del *flux* de calor en la superficie durante el enfriamiento de probetas en equipos a escala laboratorio, provee de información fundamental para modelar matemáticamente un proceso de enfriamiento bajo condiciones reales.

### **2.5.1 Formulación matemática del *IHCP***

El uso más común del *IHCP* es en relación con la estimación del *flux* de calor superficial o el historial de temperatura superficial a partir de la medición del historial térmico en una ubicación al interior de la pieza.

Para ilustrar esto, se considera primero un problema directo de flujo de calor unidimensional (componente radial en un cilindro) [20]:

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad 0 \leq r \leq R, \quad t > 0 \quad (2.1a)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad r = 0, \quad t > 0 \quad (2.1b)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = q_R(t) \quad r = R, \quad t > 0 \quad (2.1c)$$

$$T(r, t) = T_0 \quad 0 \leq r \leq R \quad t = 0 \quad (2.1d)$$

Si  $\rho$ ,  $C_p$ ,  $q_R(t)$  y  $T_0$  son conocidas, entonces el problema consiste en determinar la distribución de la temperatura en el interior del sólido en función del tiempo.

Considérese ahora un problema similar al anterior, pero en el que la condición de frontera en  $r = R$  sea desconocida. Para compensar la falta de información sobre la condición de frontera, se conoce la respuesta térmica ( $T(r_1, t_j) = Y_j$ ) en un punto interior  $r_1$ , a ciertos tiempos  $t_j$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ), en un intervalo de tiempo especificado  $0 < t \leq t_f$ , donde  $t_f$  es el tiempo final. Lo anterior se trata de un *IHCP* porque se refiere a la estimación de la condición de frontera desconocida. La formulación matemática de este problema está dada por [20]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad 0 \leq r \leq R, \quad 0 < t \leq t_f \quad (2.2a)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad r = 0, \quad 0 < t \leq t_f \quad (2.2b)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = q_R(t) \quad r = R, \quad 0 < t \leq t_f \quad (2.2c)$$

$$T(r, t) = T_0 \quad 0 \leq r \leq R \quad t = 0 \quad (2.2d)$$

Análogamente, se pueden plantear *IHCPs* de propiedades termofísicas desconocidas, rapidez de generación de energía desconocida, condición inicial

desconocida, y así sucesivamente. Además, también se pueden prever problemas inversos de convección, radiación, cambio de fase y otros factores.

La principal dificultad en la solución de los problemas inversos es que están matemáticamente “mal planteados”; esto quiere decir que la solución no es única. Como consecuencia de que estos problemas están mal planteados, la solución se vuelve inestable bajo pequeños cambios en los datos de entrada [20]. Es por esto que se ha recurrido a métodos numéricos (como por ejemplo, el método secuencial de especificación de la función, desarrollado por Beck y colaboradores [19]) que estabilicen a las soluciones numéricas (que se requieren debido a que, usualmente, los problemas son no lineales).

### **3 Procedimiento experimental**

A continuación, se describe la metodología utilizada para obtener las historias térmicas en el interior de la probeta, así como videograbaciones de la superficie de la probeta durante el enfriamiento.

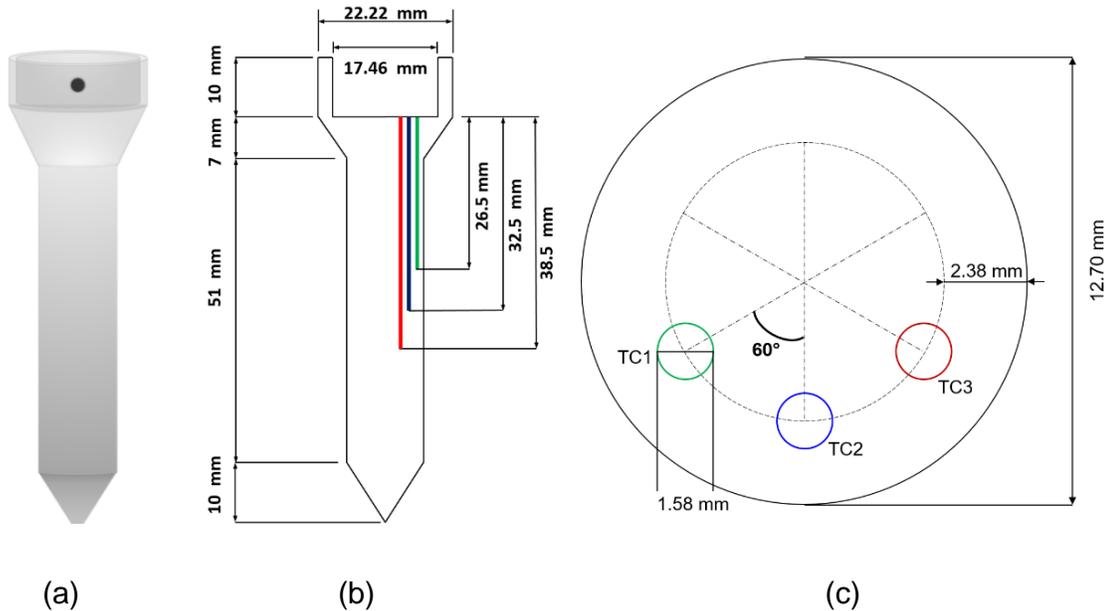
#### **3.1 Condiciones experimentales**

Las variables de interés en este trabajo fueron: la temperatura inicial de la probeta y la velocidad del medio de enfriamiento en la región de flujo libre, es decir, antes de impactar a la probeta. Se estudiaron tres valores de temperatura inicial: 450, 500 y 550 °C y dos distintas velocidades de flujo de agua: 0.2 y 0.6 m/s; estos valores son típicos de la etapa de enfriamiento en el tratamiento de endurecimiento por precipitación de aleaciones de aluminio [21]. En particular, el rango de temperatura inicial es el intervalo, de valores de temperatura de solubilización usados industrialmente y el rango de velocidad de flujo es el intervalo usado en tanques agitados. La temperatura del medio de temple se fijó en 60°C (para favorecer la estabilidad de la capa de vapor, lo que permite estudiar mejor los fenómenos de ebullición). La velocidad de descenso de la probeta se mantuvo constante e igual a 44 cm/s. Una vez alcanzada la posición de prueba, la probeta ya no se mueve. Cada experimento se realizó por duplicado, para asegurar la reproducibilidad en las mediciones. Los experimentos se realizaron con una probeta cilíndrica de punta cónica fabricada con una aleación de aluminio 6061 (composición nominal: 0.15-0.4 %Cu, 0.8-1.2 %Mg, 0.15 %Mn, 0.4-0.8 %Si, 0.7 %Fe, 0.04-0.35 %Cr, 0.25 %Zn, 0.15 %Ti), situada en el centro de un tubo cilíndrico de acrílico a través dentro del cual fluye agua en flujo paralelo a la probeta.

#### **3.2 Probeta**

La parte cilíndrica de la probeta tiene una longitud de 51 mm y un diámetro de 12.7 mm ( $\frac{1}{2}$  in). Está instrumentada con 3 termopares distribuidos a lo largo de la longitud de la probeta (a 2.38 mm de la superficie), tal como se muestra en la Figura 3.1. Todos los termopares fueron calibrados previamente de acuerdo a la

metodología descrita en [22]. En la parte superior de la probeta se maquinaron barrenos para sujetarla a una lanza que ayuda a desplazar a la probeta a la posición de ensayo.

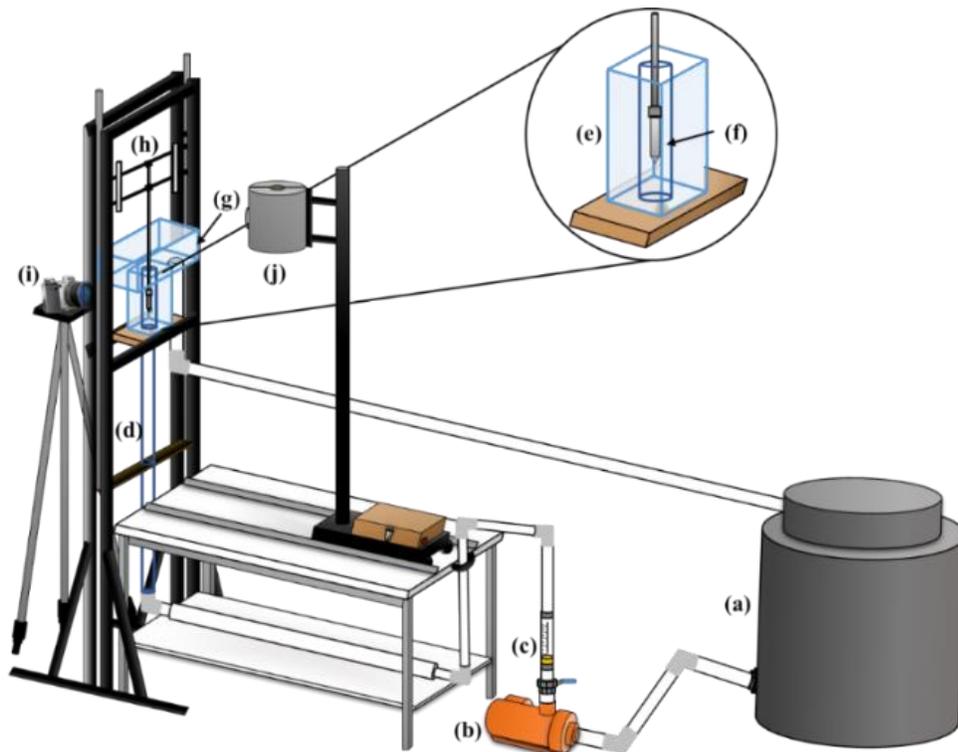


**Figura 3.1** Probeta cilíndrica con punta cónica: (a) vista isométrica, (b) vista lateral y (c) vista superior.

### 3.3 Dispositivo experimental

El equipo experimental se muestra, esquemáticamente, en la Figura 3.2 [22]. Está compuesto de una bomba de  $\frac{1}{2}$  HP que impulsa agua (contenida en un tanque) a través de un circuito de tuberías con un flujo regulado mediante un rotámetro (Blue White, modelo F429, escala: 0-100 L/min) que alimenta un tubo de acrílico de 45 mm de diámetro interno y una longitud de 1.85 m (que garantiza que el perfil de velocidad del fluido esté completamente desarrollado al llegar la probeta a la zona de prueba). La posición de enfriamiento de la probeta se ubica 15 cm por debajo de la salida del tubo (1.7 m por encima del codo). Después de circular alrededor de la probeta, el agua se vierte en un contenedor secundario que captura el exceso de agua y lo recircula al depósito principal. Para calentar el agua a la temperatura de operación se empleó una resistencia eléctrica sumergible; para calentar la probeta se empleó un horno de resistencia.

La técnica experimental está basada en la grabación de la respuesta térmica medida mediante un sistema de adquisición de datos, el cual está compuesto de una computadora, un adquisidor de datos (marca IOTECH modelo TempScan 1100) y termopares tipo K (calibrados previamente). Para registrar los eventos en la superficie de la probeta durante el enfriamiento se grabó video con una cámara digital *reflex* (Samsung, modelo NX30), que se colocó de frente, y perpendicularmente, a la posición final de la probeta.



**Figura 3.2** Dispositivo experimental: (a) depósito de agua, (b) bomba, (c) rotámetro, (d) tubo de acrílico, (e) tanque de vidrio, (f) probeta, (g) depósito secundario, (h) soporte móvil de la probeta, (i) videocámara y (j) horno tipo libro [22].

Una vez que se obtuvieron las historias térmicas de la matriz experimental, se utilizó el *software* SigmaPlot V.10 para filtrar el ruido provocado por la inestabilidad de la señal asociada con corrientes eléctricas parásitas, empleando un filtro tipo *Bisquare*, que realiza una regresión polinomial ponderando los valores calculados usando una función de distribución normal. Como parámetros del filtro se utilizaron: polinomio de grado 2 y con una proporción de muestra de 0.1.

## 4 Resultados

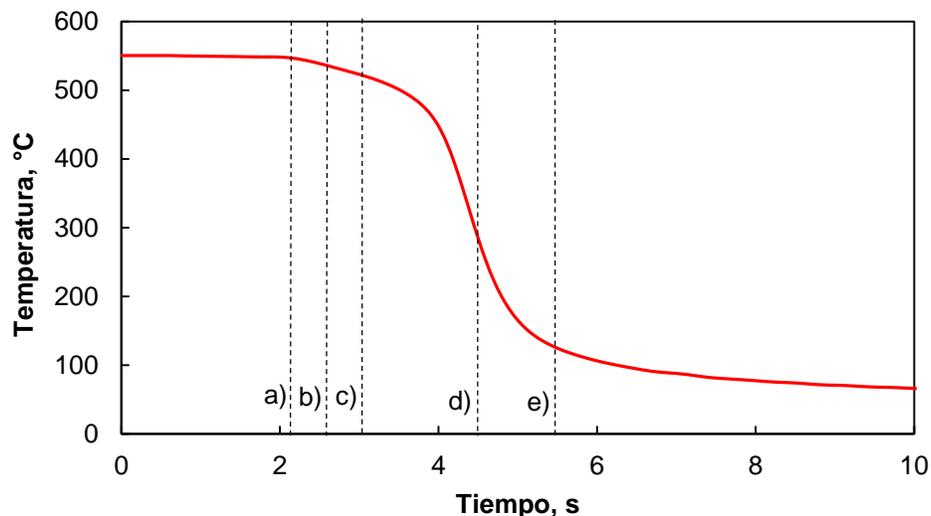
Los resultados que se obtuvieron de las pruebas experimentales fueron: 1) historias térmicas (curvas de enfriamiento) medidas en las posiciones de los termopares al interior la probeta y 2) imágenes extraídas de las videograbaciones de los eventos ocurridos en la frontera fluido-probeta durante los experimentos.

### 4.1 Respuesta térmica e imágenes

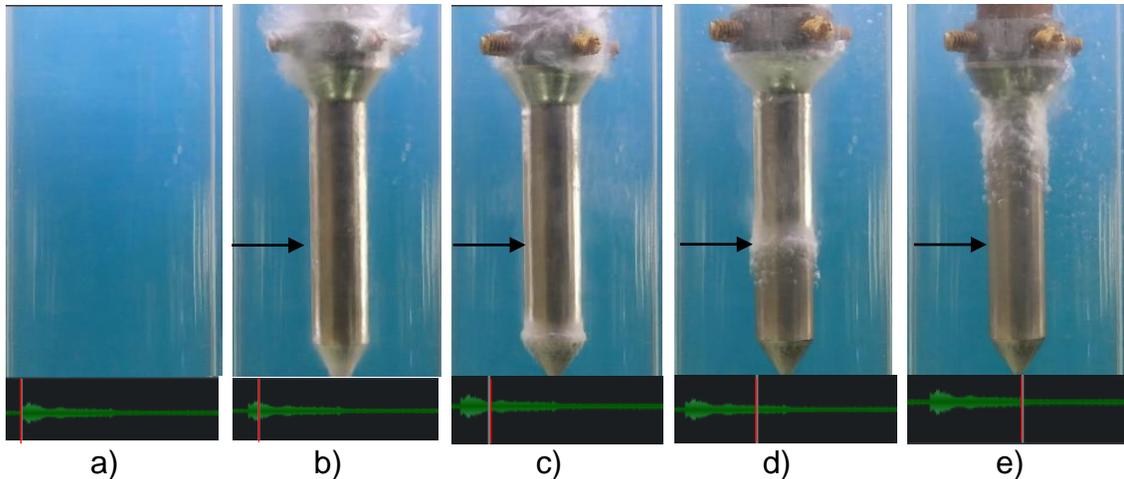
Como ejemplo de los resultados obtenidos, en las Figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 se muestran las respuestas térmicas de los termopares cercanos a la superficie para las pruebas realizadas a 550°C y con una velocidad de flujo de 0.2 m/s y 0.6 m/s. También se muestran imágenes extraídas de los videos; las líneas punteadas indican el tiempo al que corresponde cada imagen. En las imágenes, la flecha horizontal indica la posición del termopar TC3.

Con relación a la gráfica de la Figura 4.1 (enfriamiento súbito desde 550 °C en agua fluyendo a 0.2 m/s), se aprecia que, después de una zona donde la temperatura disminuye poco (lo que indica que la probeta está siendo trasladada del horno a la posición de prueba como se muestra en las Figuras 4.1(a) y (b)), la curva de enfriamiento presenta una región con un ligero cambio de pendiente, asociado a que la capa de vapor generada comienza a romperse en la punta de la probeta hasta alcanzar la parte cilíndrica de ésta (Figura 4.1(c)). Después de que la probeta alcanzó su posición final en el baño, ya se ha formado una capa de vapor que rodea la superficie cilíndrica de la probeta (exceptuando a la punta cónica) provocando un decremento de la temperatura local a una rapidez de enfriamiento aproximadamente constante y relativamente baja, dado que la capa de vapor actúa como un aislante térmico. Al continuar avanzando el frente de mojado, este alcanza la posición del termopar TC3 (Figura 4.1(d)) provocando un aumento en la pendiente de la curva. Conforme sigue avanzando el frente de mojado la probeta se va enfriando más rápidamente hasta el punto en que se desestabiliza el remanente de la capa de vapor, provocando su rompimiento súbito (Figura 4.1(e)).

En las imágenes también se muestra el registro de audio (obtenido de las videograbaciones) correspondiente a cada imagen; la línea roja vertical indica el tiempo correspondiente. Se observa que, al comenzar la inmersión en el agua (Figura 4.1(a)), el registro de audio se modifica. Luego, se observa otro cambio (Figura 4.1(b)) asociado con el instante en el que el frente de mojado comienza a romper en la punta de la probeta, que va acompañado de un sonido característico. Al comenzar el avance del frente de mojado en la parte cilíndrica de la probeta (Figura 4.1(c)) se nota un nuevo cambio en el registro de audio. Al llegar el frente a la posición del termopar TC3 (Figura 4.1(d)), el registro de audio cambia, bajando su intensidad. Una vez que se desestabiliza la capa de vapor (Figura 4.1(e)), el registro de audio disminuye casi por completo en intensidad, lo que indica el fin de la ebullición y el comienzo de la etapa de convección.

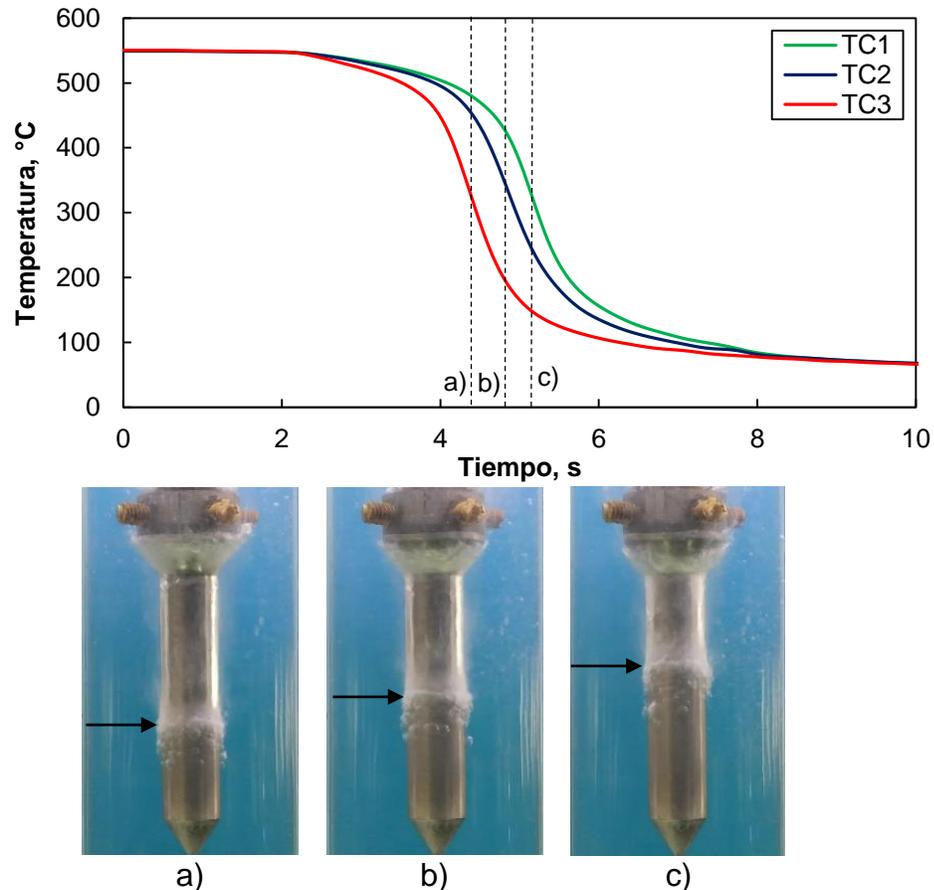


**Figura 4.1** Curva de enfriamiento para el termopar TC3 durante el enfriamiento súbito con agua a 60°C fluyendo a una velocidad de 0.2 m/s y una temperatura inicial de la probeta de 550°C. Las imágenes corresponden a: (a) 2.30 s, (b) 2.74 s, (c) 3.20 s, (d) 4.45 s y (e) 5.60 s (referirse a la curva de enfriamiento).



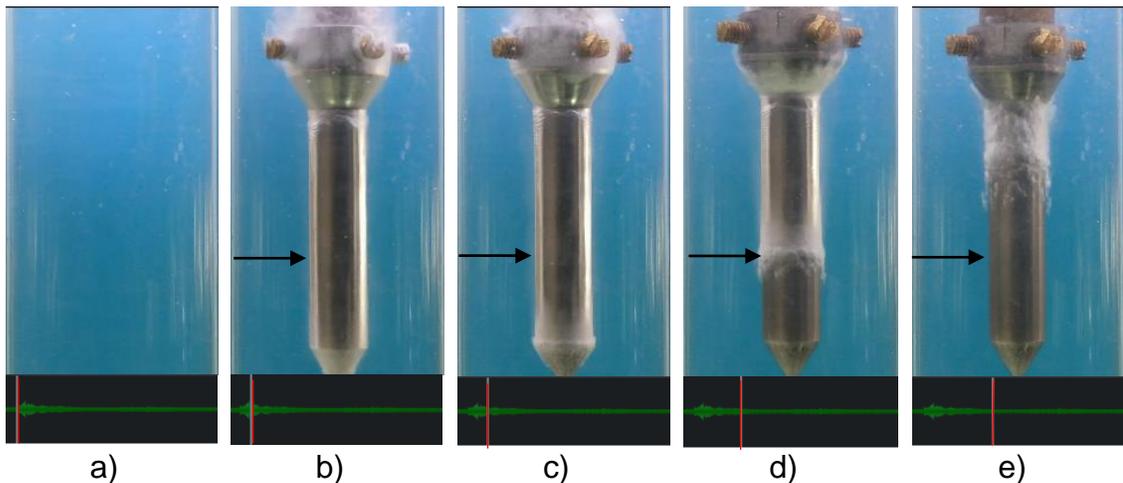
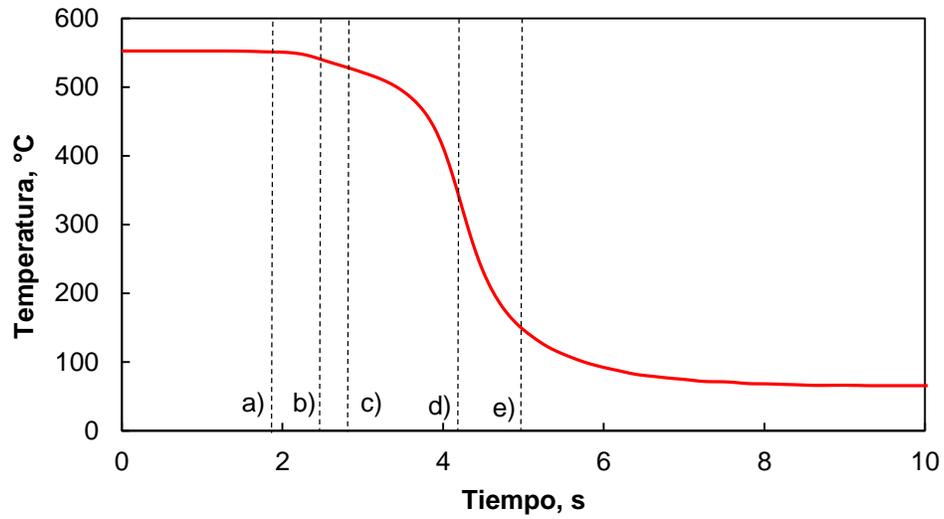
**Figura 4.2** (Continuación) Curva de enfriamiento para el termopar TC3 durante el enfriamiento súbito con agua a  $60^{\circ}\text{C}$  fluyendo a una velocidad de  $0.2\text{ m/s}$  y una temperatura inicial de la probeta de  $550^{\circ}\text{C}$ . Las imágenes corresponden a: (a)  $2.30\text{ s}$ , (b)  $2.74\text{ s}$ , (c)  $3.20\text{ s}$ , (d)  $4.45\text{ s}$  y (e)  $5.60\text{ s}$  (referirse a la curva de enfriamiento).

La Figura 4.2 muestra las curvas de enfriamiento para los termopares TC1, TC2 y TC3, para temperatura inicial de  $550^{\circ}\text{C}$  y velocidad de flujo de  $0.2\text{ m/s}$ . Inicialmente se observa que la temperatura permanece constante debido a que se está llevando a cabo el traslado de la probeta del horno a la posición de prueba como se mencionó en la Figura 4.1. Debido a que el frente de mojado avanza de abajo hacia arriba el termopar TC3 es el que se enfría primero (Figura 4.2(a)) y posteriormente el termopar TC2 y luego el termopar TC1 (Figuras 4.2(b) y (c), respectivamente). Nótese que la diferencia entre las curvas de TC3 y TC2 es mayor que entre las de TC2 y TC1. Esto es resultado de la alta conductividad térmica de la aleación de aluminio, que favorece flujo de calor en la dirección axial, además del flujo de calor en la dirección radial provocado por el medio de enfriamiento.

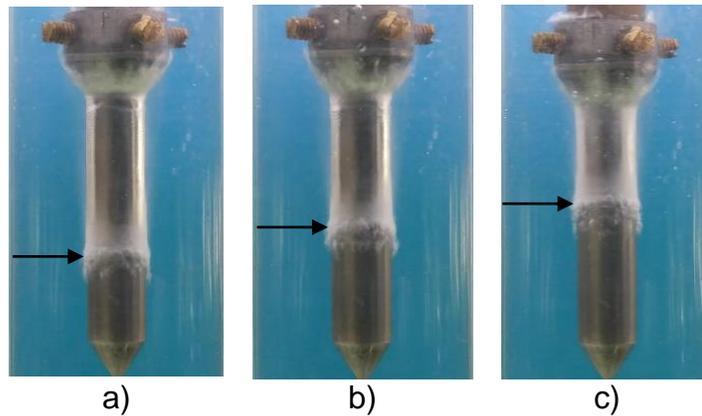
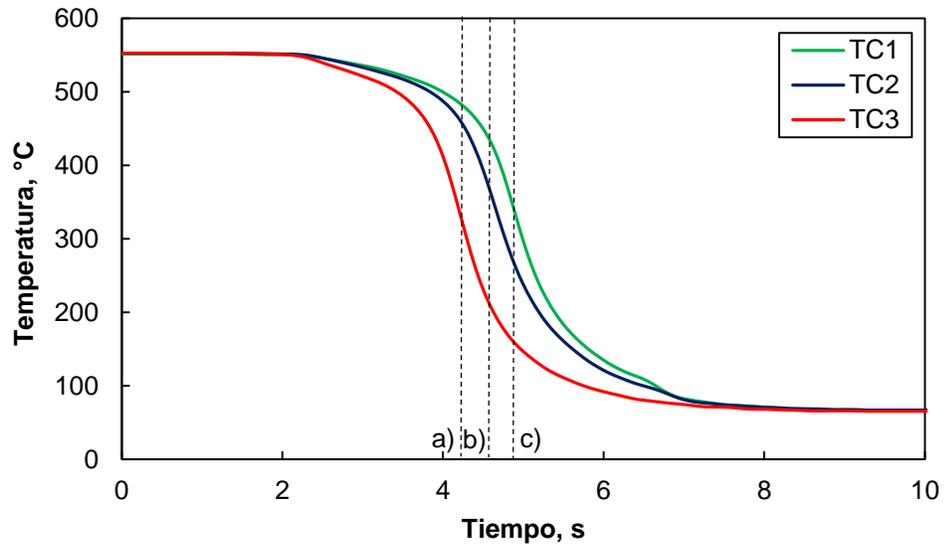


**Figura 4.3** Curva de enfriamiento durante el enfriamiento súbito con agua a 60°C fluyendo a una velocidad de 0.2 m/s y una temperatura inicial de la probeta de 550°C. Las imágenes corresponden a: (a) 4.45 s, (b) 4.90 s y (c) 5.30 s, con respecto a las curvas de enfriamiento. Las flechas indican la posición longitudinal de cada uno de los termopares.

En las Figuras 4.3 y 4.4 se presenta el mismo patrón de resultados, pero para una prueba de temperatura inicial de 550°C y velocidad de flujo de 0.6 m/s. Se observan las mismas etapas de enfriamiento de las Figuras 4.1 y 4.2, pero éstas duran menor tiempo cada una; esta es una indicación del efecto de la velocidad del flujo. De nueva cuenta, el registro de audio permite identificar puntos específicos de la operación de temple. Las curvas para TC2 y TC1 son ahora aún más parecidas que en el caso de 0.2 m/s.



**Figura 4.4** Curva de enfriamiento para el termopar TC3 durante el temple con agua a 60°C fluyendo a una velocidad de 0.6 m/s y una temperatura inicial de la probeta de 550°C. Las imágenes corresponden a: (a) 1.95 s, (b) 2.50 s, (c) 2.85 s, (d) 4.20 s y (e) 5.00 s (referirse a la curva de enfriamiento).



**Figura 4.5** Curva de enfriamiento durante el temple con agua a 60°C fluyendo a una velocidad de 0.6 m/s y una temperatura inicial de la probeta de 550°C. Las imágenes corresponden a: (a) 4.20 s, (b) 4.50 s y (c) 4.77 s con respecto a las curvas de enfriamiento. Las flechas indican la posición longitudinal de cada uno de los termopares.

En los experimentos realizados se observó que, una vez que el frente de mojado pasaba por la posición de TC1, el resto de la capa de vapor colapsaba instantáneamente (Figura 4.1(e) y 4.3(e)). Al desaparecer por completo la capa de vapor, toda la superficie de la probeta entraba en contacto con el agua en estado líquido; en esta última etapa, el enfriamiento se debe a la transferencia de calor por convección forzada entre la probeta y el medio, sin presencia de ebullición.

La temperatura local a la cual pasaba el frente de mojado por cada una de las posiciones de los termopares cuando el agua fluía a 0.2 m/s (Figura 4.2) fue: 359,

318 y 309 °C para TC3, TC2 y TC1, respectivamente. Por otra parte, los valores correspondientes cuando se usó agua a 0.6 m/s (Figura 4.4) fueron: 379, 361 y 334 °C para TC3, TC2 y TC1, respectivamente. Esto es una indicación de que el frente de mojado avanza más rápidamente al aumentar la velocidad de flujo.

## 5 Análisis de resultados

Para analizar los resultados obtenidos, se estimó la rapidez de enfriamiento local, la velocidad del frente de mojado, el *flux* de calor en la superficie y la historia térmica en la superficie.

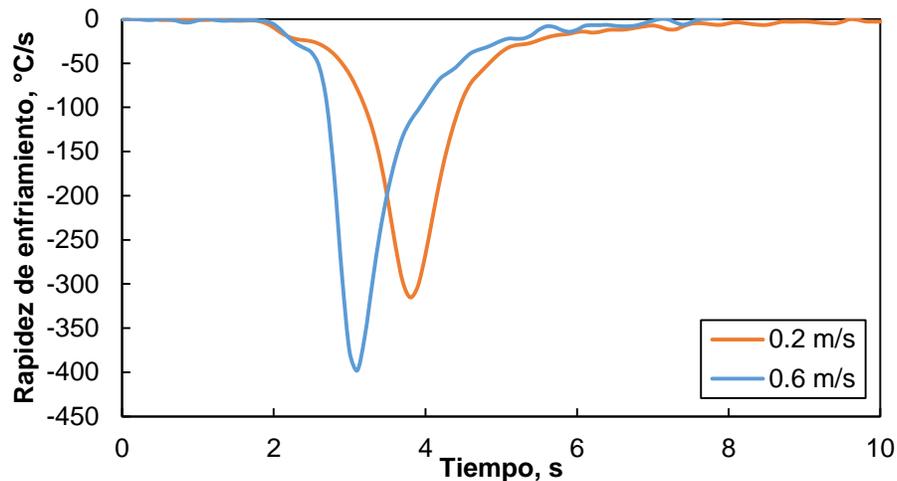
### 5.1 Rapidez de enfriamiento

Como se mencionó anteriormente, la rapidez de enfriamiento se utiliza comúnmente en el análisis de curvas de enfriamiento y se obtiene derivando numéricamente las curvas de enfriamiento con respecto al tiempo para cada pareja de datos:

$$\frac{dY}{dt} \cong \frac{Y_2 - Y_1}{t_2 - t_1} \quad (5.1)$$

La Figura 5.1 muestra la historia de rapidez de enfriamiento para la posición del termopar TC3 durante el temple en agua a 60°C con velocidad de flujo libre de 0.2 m/s y 0.6 m/s, y temperatura inicial de 450 °C. En la figura, las curvas muestran inicialmente un comportamiento casi horizontal (rapidez de enfriamiento cercana a cero) debido a que la probeta se encuentra aún dentro del horno. Posteriormente, se observa un ligero descenso provocado por el rompimiento de la capa de vapor en la punta cónica y la generación del frente de mojado. Inmediatamente se observa un aumento súbito de la rapidez de enfriamiento (los valores negativos en la gráfica representan que es un enfriamiento). Las dos curvas tienen un comportamiento diferente, indicando que las condiciones de enfriamiento son distintas. A una mayor velocidad de flujo se tiene una mayor rapidez de enfriamiento, debido a un mayor coeficiente de transporte convectivo. Para una menor velocidad de flujo el tiempo de permanencia de la capa de vapor es mayor, es decir, el frente de mojado tarda más en pasar por la posición de TC3. Esto se debe a que la capa de vapor no es un aislante perfecto, por lo que hay pérdidas de calor a través de ésta; esto provoca que la zona de TC3 continúe enfriándose de tal manera que la temperatura local en el instante en el que el frente de mojado pasa por la posición

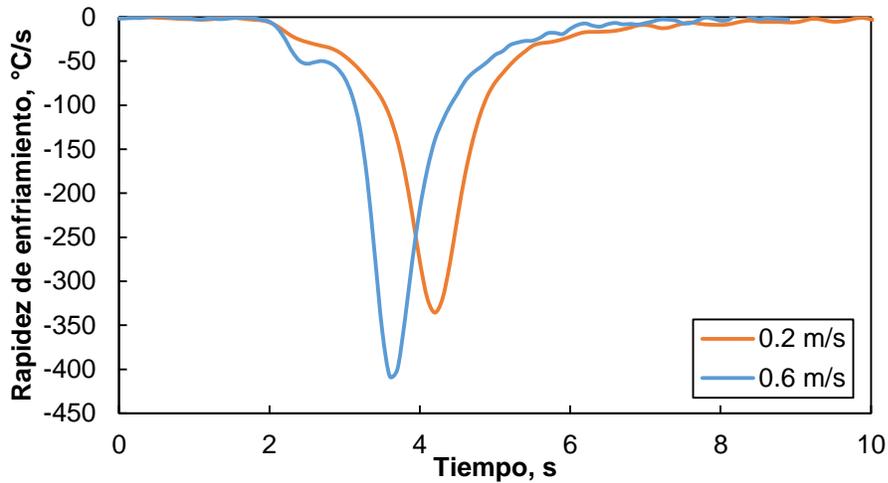
de TC3 es menor (con respecto al valor correspondiente para la mayor velocidad de flujo) y, por tanto, la rapidez de enfriamiento para cuando el frente de mojado pasa por la posición de TC3 es también menor al disponerse de una menor cantidad de energía.



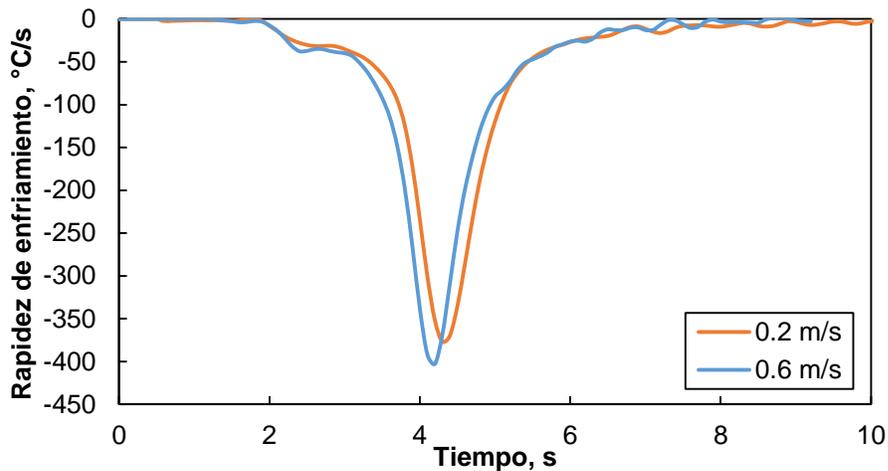
**Figura 5.1** Rapidez de enfriamiento (en la posición de TC3), en función del tiempo, para un experimento con temperatura inicial de la probeta de 450 °C, para ambas velocidades de flujo.

En las Figuras 5.2 y 5.3 se presenta la rapidez de enfriamiento para la posición del termopar TC3 en experimentos a temperatura inicial de 500 y 550 °C, respectivamente, para ambas velocidades de flujo. El comportamiento es consistente con el de la Figura 5.1 (temperatura inicial de 450 °C) en cuanto a que la máxima rapidez de enfriamiento se observa a menor tiempo para el caso de velocidad de flujo de 0.6 m/s y posteriormente para el experimento con velocidad de 0.2 m/s.

En las Figuras 5.1 a 5.3, también se observa que, al aumentar la temperatura inicial, las curvas de rapidez de enfriamiento en función del tiempo son cada vez más parecidas entre sí. Esto indica que la cantidad de energía térmica inicial domina sobre el efecto del coeficiente de transporte convectivo.



**Figura 5.2** Rapidez de enfriamiento, en función del tiempo, para un experimento con temperatura inicial de la probeta de 500 °C para ambas velocidades de flujo.



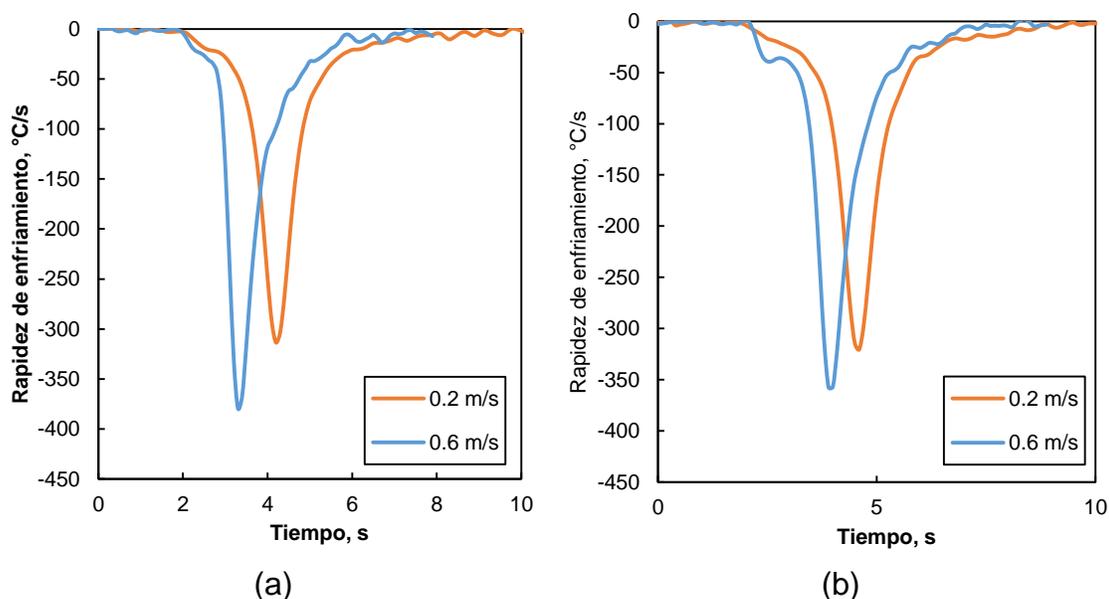
**Figura 5.3** Rapidez de enfriamiento, en función del tiempo, para un experimento con temperatura inicial de la probeta de 550 °C para ambas velocidades de flujo.

Por otra parte, comparando las Figuras 5.1 a 5.3 se observa que, al aumentar la temperatura inicial, el tiempo al cuál se observa el valor máximo (en valor absoluto) de la rapidez de enfriamiento aumenta, lo cual es una indicación de que la capa de vapor dura más tiempo, lo que a su vez es resultado de tener una mayor cantidad de energía térmica disponible al inicio de la prueba. En la Tabla 5.1 se muestran los valores de tiempo de duración de la capa de vapor para las diversas condiciones de operación estudiadas. Como puede apreciarse, los tiempos más cortos corresponden a la combinación de temperatura inicial más baja y velocidad de flujo más alta.

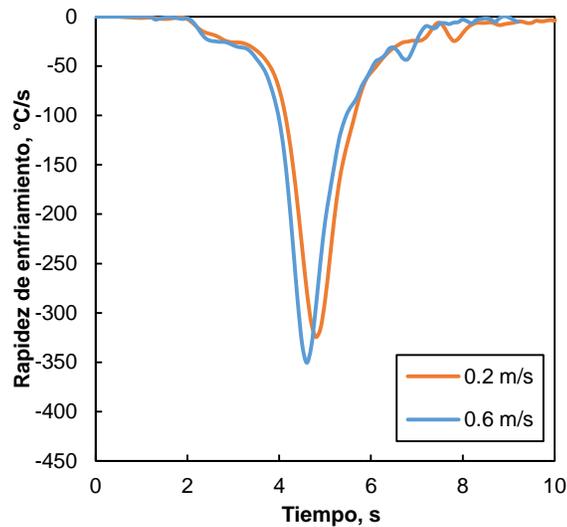
**Tabla 5.1** Tiempo de duración de la capa de vapor.

Temperatura, °C	Tiempo de duración de la capa de vapor, s					
	0,2 m/s			0,6 m/s		
	TC3	TC2	TC1	TC3	TC2	TC1
450	0.8	1.0	1.2	0.7	0.8	0.9
500	1.2	1.4	1.6	1.0	1.2	1.4
550	1.4	1.6	1.8	1.3	1.5	1.7

La Figura 5.4 muestra las historias de rapidez de enfriamiento para el termopar TC2, en experimentos con temperatura inicial de 450, 500 y 550 °C, respectivamente. Se observa que, al aumentar la velocidad de flujo y manteniendo la temperatura inicial constante, aumenta la rapidez de enfriamiento, mientras que al aumentar la temperatura inicial aumenta el tiempo al cuál ocurre el máximo valor de rapidez de enfriamiento; esto es debido a que el tiempo de existencia de la capa de vapor es mayor, retrasando el enfriamiento. Para una velocidad de flujo de 0.6 m/s, se encontró que, al aumentar la temperatura inicial, la rapidez máxima disminuye, esto indica que se pierde más energía a través de la capa de vapor en comparación con lo que ocurre en la posición del termopar TC3, debido a que la región del termopar TC2 está expuesta un mayor tiempo a la capa de vapor.



**Figura 5.4** Rapidez de enfriamiento, en función del tiempo, para el termopar TC2, para ambas velocidades de flujo, a una temperatura inicial de la probeta de: (a) 450 °C, (b) 500 °C y (c) 550 °C.

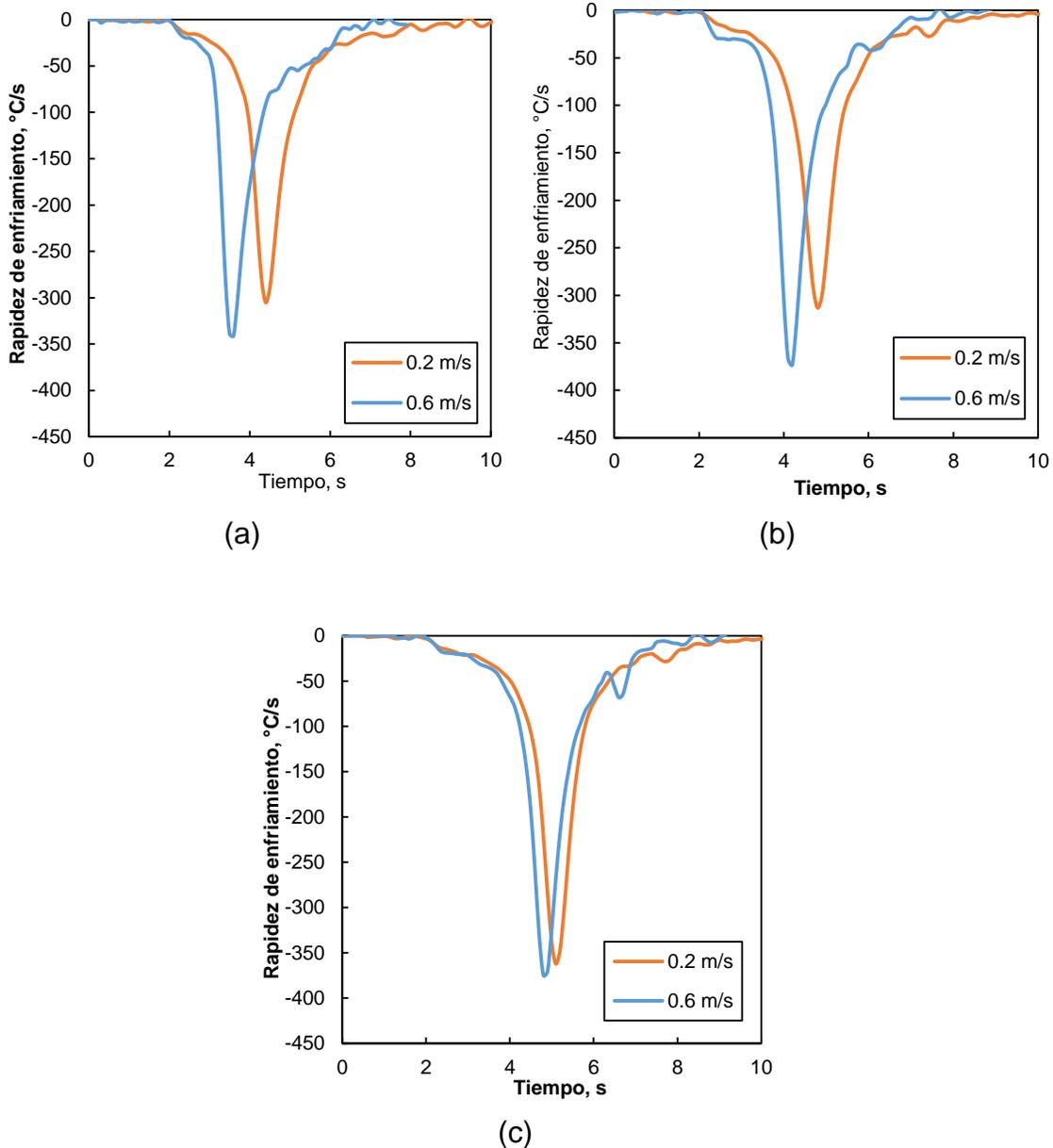


(c)

**Figura 5.5** (Continuación) Rapidez de enfriamiento, en función del tiempo, para el termopar TC2, para ambas velocidades de flujo, a una temperatura inicial de la probeta de: (a) 450 °C, (b) 500 °C y (c) 550 °C.

La Figura 5.5 muestra la rapidez de enfriamiento para el termopar TC1 para ambos valores de velocidad de flujo libre y las tres temperaturas iniciales estudiadas.

Comparando las curvas de rapidez de enfriamiento en las posiciones de TC2 (Figura 5.4) y TC1 (Figura 5.5) se aprecia que, al aumentar la temperatura inicial de prueba, la rapidez de enfriamiento máxima en la posición de TC1 es mayor que la correspondiente para TC2, a pesar de que la región de TC1 está expuesta mayor tiempo a la capa de vapor. Este comportamiento se debe a que poco después de que el frente de mojado pasa por la posición de TC1 la capa de vapor se rompe súbitamente, ocasionando que una gran área esté expuesta a un enfriamiento relativamente severo lo que, debido a la alta conductividad del aluminio, genera extracción de calor axial significativa, lo que incrementa la rapidez de enfriamiento registrada por el termopar TC1.

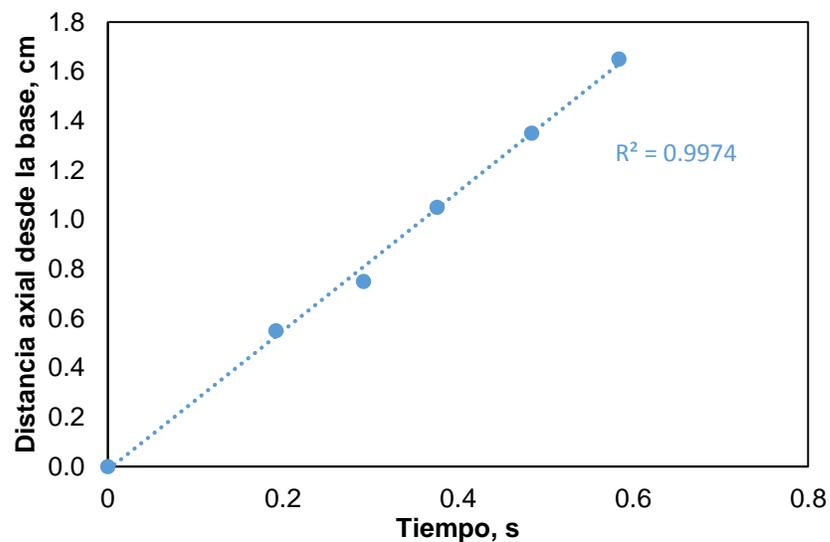


**Figura 5.6** Rapidez de enfriamiento, en función del tiempo, para el termopar TC1, para ambas velocidades de flujo, a una temperatura inicial de la probeta de: (a) 450 °C, (b) 500 °C y (c) 550 °C.

## 5.2 Frente de mojado

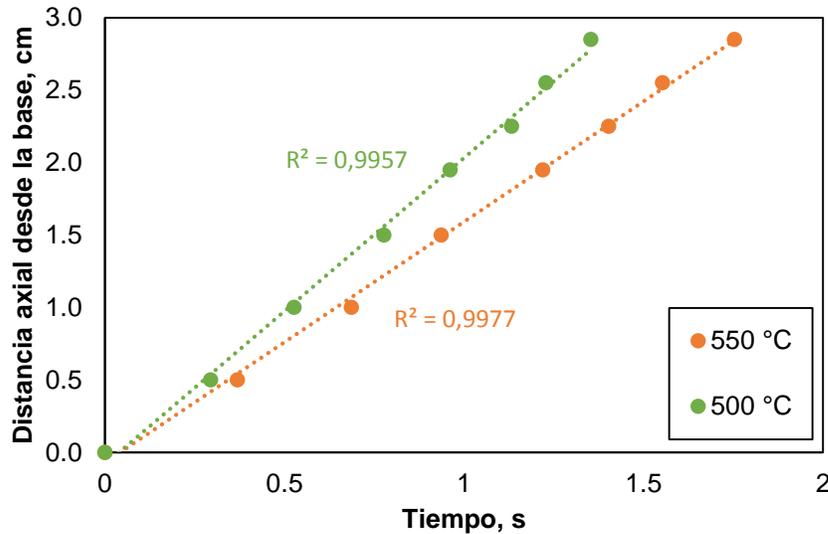
Para estimar la velocidad del frente de mojado, se determinaron datos de tiempo y posición del frente de mojado a partir de imágenes extraídas de las videograbaciones. El punto (0,0) en la gráfica corresponde al inicio de la parte cilíndrica de la probeta; para los experimentos a temperatura inicial de 450 °C este punto se tomó un poco más arriba debido a que, para cuando la probeta

había llegado a la posición de ensayo, el frente ya había avanzado debido a la alta velocidad del flujo y la baja cantidad de energía al inicio de la prueba. Los datos se graficaron y, basándose en una inspección visual, se aplicó una regresión lineal; la pendiente de la recta corresponde a la velocidad del frente de mojado. En las regresiones realizadas se observó que  $R^2$  (coeficiente de correlación) tiene un valor muy cercano a 1, lo que indica que la velocidad del frente de mojado es prácticamente constante durante cada prueba. Como ejemplo del tratamiento de los datos, en la Figura 5.6 se presentan la información para una temperatura inicial de 450 °C y una velocidad de flujo de 0.6 m/s.



**Figura 5.7** Posición del frente de mojado en función del tiempo durante un temple en agua a 60°C, fluyendo a una velocidad de 0.6 m/s a una temperatura inicial de 450 °C: datos (puntos), regresión (línea). Se incluye el valor de  $R^2$ .

En la Figura 5.7 (con datos para velocidad de flujo de 0.6 m/s y valores de temperatura inicial de 500 y 550 °C) se observa que la velocidad de avance del frente de mojado disminuye (menor pendiente de la recta) al aumentar la temperatura inicial. Esto se debe al aumento de la energía contenida en la probeta, lo que permite estabilizar la capa de vapor, es decir, que ésta dure mayor tiempo.



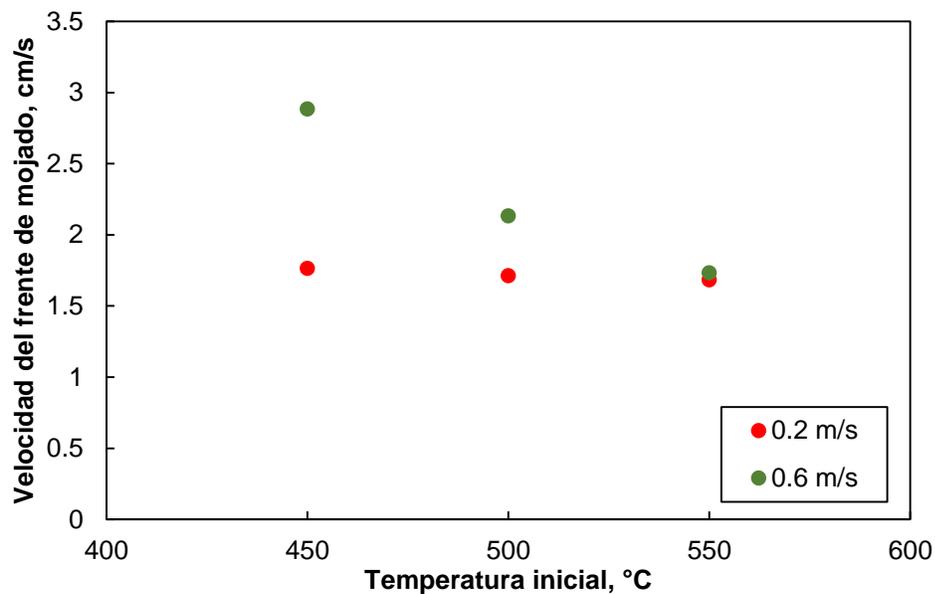
**Figura 5.8** Posición del frente de mojado en función del tiempo durante un temple en agua a 60°C, fluyendo a una velocidad de 0.6 m/s para tres valores de temperatura inicial: datos (puntos), regresión (líneas). Se incluyen los valores de  $R^2$ .

En la Figura 5.8 se muestra gráficamente el efecto de las dos variables independientes estudiadas sobre la velocidad del frente de mojado. Se observa que, conforme aumenta la temperatura inicial, la velocidad de avance del frente de mojado disminuye, lo cual está asociado con una mayor cantidad de energía almacenada al inicio de la prueba lo que a su vez provoca que la parte de la pieza por arriba del frente de mojado esté más caliente al aumentar la temperatura inicial de la prueba. Cabe mencionar que, en un estudio independiente, se calcularon valores de velocidad del frente de mojado para acero (bajo las mismas condiciones de temperatura inicial y velocidad de flujo), que son menores a los reportados aquí.

Por otra parte, la velocidad de avance del frente de mojado aumenta al aumentar la velocidad del medio de enfriamiento (especialmente a bajos valores de temperatura inicial), lo que se debe a que el fluido en contacto con la capa de vapor se renueva más rápidamente, aumentando la extracción de calor hacia el medio, provocando que el frente de mojado avance a una mayor velocidad.

Cuando se combina el efecto de ambas variables se observa que la velocidad del frente de mojado es poco sensible a la velocidad de flujo cuando la temperatura inicial es de 550 °C. Es interesante notar que este resultado es consistente con

la observación hecha en la sección de evolución de la rapidez de enfriamiento local, donde se observó que las curvas de rapidez de enfriamiento eran muy similares para las pruebas con temperatura inicial de 550 °C. Al respecto, cabe recordar que los resultados de velocidad de frente de mojado se basan en imágenes extraídas de las videograbaciones mientras que los valores de rapidez de enfriamiento se obtienen de las respuestas térmicas locales, por lo que ambos son resultados independientes, aun cuando se trate de un solo sistema y condición experimental.



**Figura 5.9** Velocidad del frente de mojado en función de la temperatura inicial de la probeta para las dos velocidades de flujo estudiadas.

### 5.3 Flux de calor en la superficie

El *flux* de calor en la superficie representa a la condición de frontera en la intercara sólido/fluido, por lo que es un parámetro importante para la modelación matemática de procesos de enfriamiento.

A partir de las respuestas térmicas locales medidas durante los experimentos se estimó el *flux* de calor en la superficie con un programa de cómputo, desarrollado en el Depto. de Ingeniería Metalúrgica, que resuelve el problema inverso de conducción de calor para flujo 1D en geometría cilíndrica, dirección radial, sin transformación de fase [23]. A pesar de que en los experimentos existe evidencia

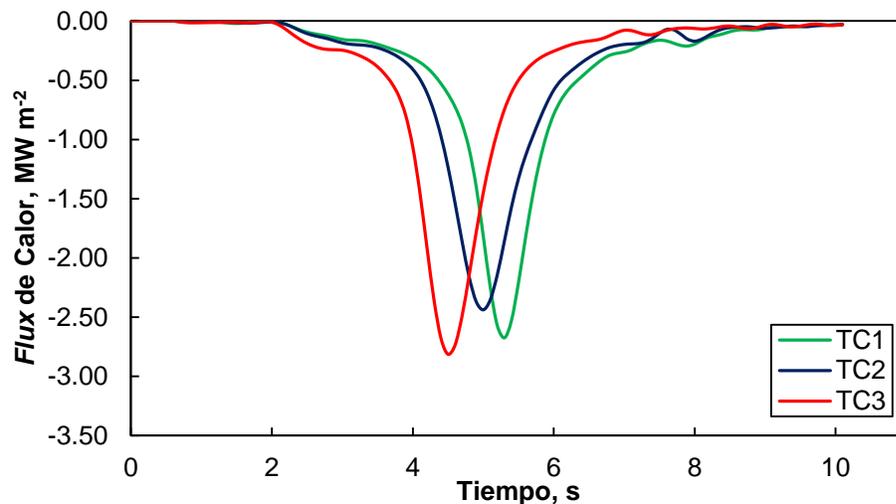
de flujo de calor en dos dimensiones (particularmente para la zona superior de la probeta), desarrollar la solución numérica del IHCP en dos dimensiones no es trivial, por lo que se decidió usar el código existente, aunque implique un error de modelado. Las propiedades que se tomaron del aluminio para la solución numérica del problema inverso se presentan en la Tabla 5.4; como puede apreciarse, se consideraron valores constantes.

**Tabla 5.2** Propiedades térmicas del aluminio [20].

Propiedad	Símbolo	Valor
Conductividad térmica	$k$	204 W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>
Calor específico	$C_p$	896 J kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>
Densidad	$\rho$	2707 kg m <sup>-3</sup>
Difusividad térmica	$\alpha$	8.418 x 10 <sup>5</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>

En la Figura 5.9 se grafican curvas de historia de *flux* de calor para el enfriamiento súbito desde una temperatura inicial de 550 °C y velocidad de flujo de 0.2 m/s, para los tres termopares. Los valores negativos se deben a que el *flux* de calor sale de la probeta (que es el dominio de cálculo de la solución del IHCP). En la primera parte de la gráfica la extracción de calor es prácticamente nula, ya que la probeta se encuentra en el traslado del horno a la posición de prueba; una vez que la probeta llega a la posición de prueba y comienza el avance del frente de mojado se observa un ligero aumento (en valor absoluto) en el *flux* de calor debido al transporte hacia la posición de enfriamiento. Después, se aprecia un incremento en el *flux* de calor hasta alcanzar un valor que varía poco durante un cierto intervalo de tiempo (específico para cada termopar); esto indica la presencia de una capa de vapor que rodea la superficie de la probeta. Posteriormente se observa un aumento (en valor absoluto) del *flux* de calor, comenzando en la posición del termopar TC3, seguido de la posición de TC2 y finalmente la de TC1; esta secuencia se debe a que el frente de mojado avanza

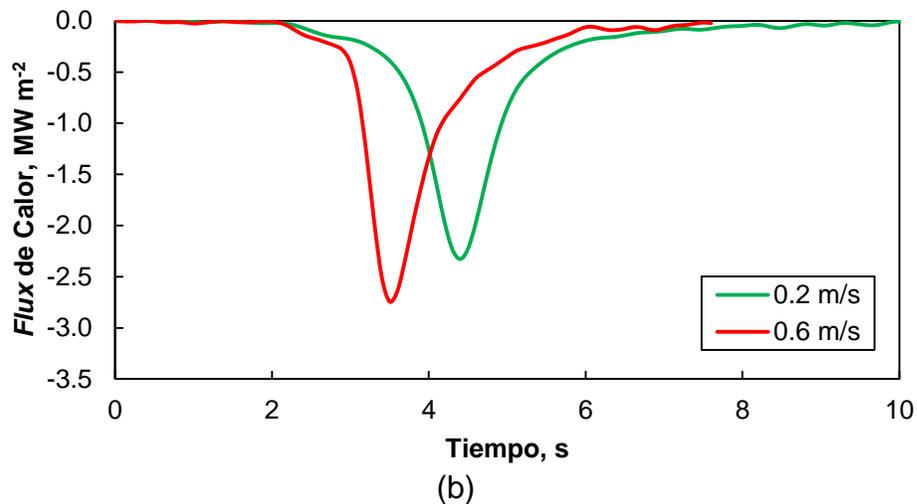
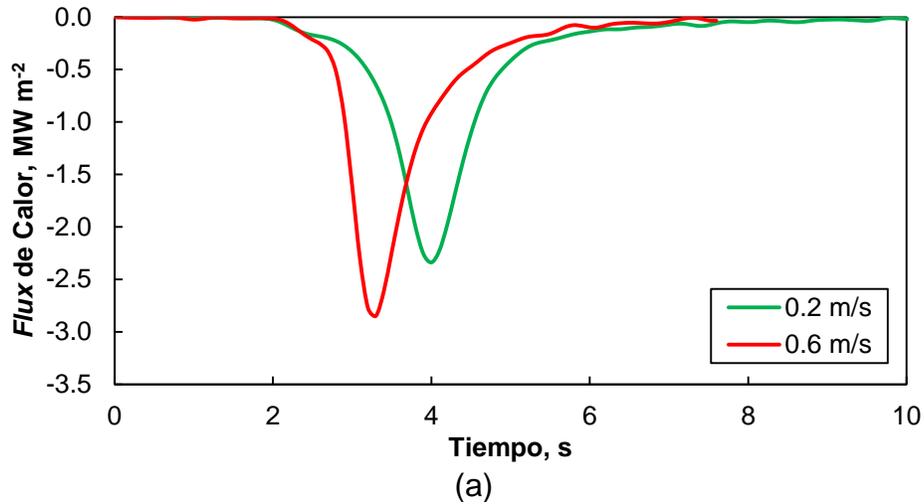
de abajo hacia arriba, por lo que alcanza primero la posición de TC3. Revisando las videograbaciones se observó que cuando el frente de mojado pasa justo por la posición del termopar TC3 y comienza la nucleación de burbujas, corresponde al instante en el que se alcanza el valor máximo de *flux* de calor local ( $2.81 \text{ MW m}^{-2}$ ) en la gráfica. Este valor de *flux* resulta ser el mayor debido a que aún no se ha perdido demasiada energía. Del comportamiento observado en la posición del termopar TC2 se deduce que, aunque la capa de vapor tiene apariencia uniforme, no es un aislante térmico perfecto por lo que parte de la energía acumulada en esa sección de la probeta alcanza a perderse tal que cuando el frente de mojado pasa por dicha posición y se forman las burbujas el *flux* de calor máximo es de  $2.43 \text{ MW m}^{-2}$ . Se esperaría que la curva para TC1 siguiera un comportamiento similar debido a que está expuesto un mayor tiempo a la capa de vapor, pero, después de que el frente de mojado pasa por la posición de TC1, se produce el rompimiento súbito del remanente de la capa de vapor, dejando expuesta un área considerable de la probeta a la nucleación de burbujas, ocasionando que la extracción de calor máxima sea mayor para la posición de TC1 ( $2.67 \text{ MW m}^{-2}$ ) que para la de TC2, lo que sugiere extracción de calor 2D (provocada por el rompimiento súbito del remanente de la capa de vapor y la alta conductividad térmica del aluminio).



**Figura 5.10** Historia de *flux* de calor en la superficie para TC1, TC2 y TC3 durante el temple con temperatura inicial de  $550^{\circ}\text{C}$  y velocidad de flujo de  $0.2 \text{ m/s}$ .

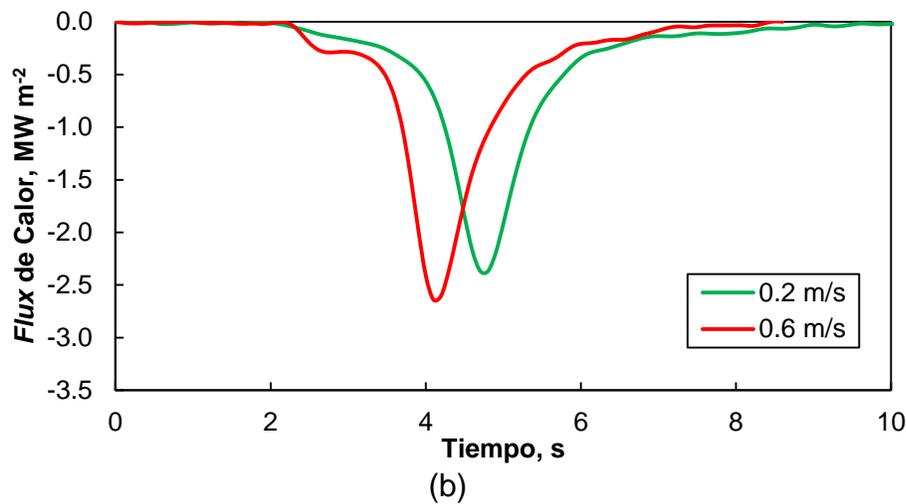
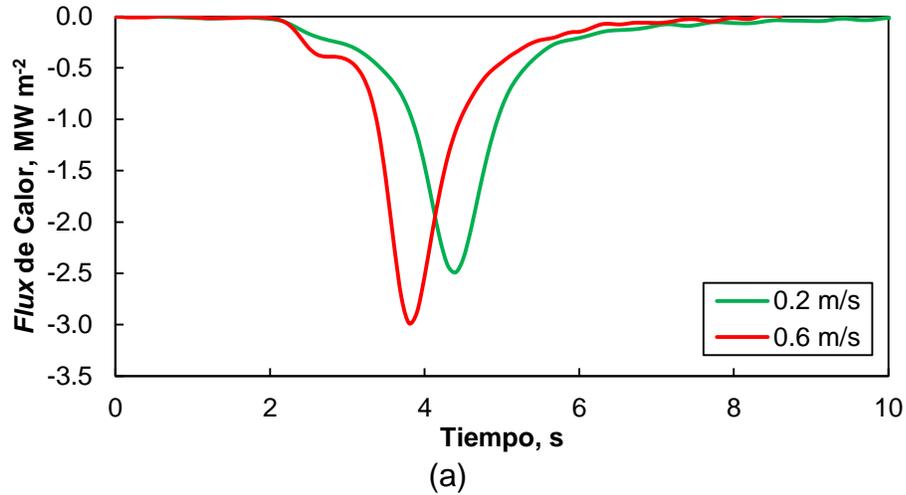
Por el comportamiento anómalo que presentó el termopar TC1 (Figura 5.9) se decidió descartarlo del análisis del *flux* de calor para analizar los resultados de las otras condiciones experimentales.

En la Figura 5.10 se compara el *flux* de calor en la superficie para las posiciones de TC3 y TC2 de experimentos con temperatura inicial de la probeta de 450 °C, para ambas velocidades de flujo. Se aprecia que, conforme aumenta la velocidad de flujo, la máxima extracción de calor se lleva a cabo a menores tiempos (para ambos termopares), debido a que la capa de vapor es menos estable al aumentar la velocidad de flujo y la velocidad del frente de mojado es mayor. Por otro lado, la máxima extracción de calor se lleva a cabo menores tiempos (3.3 s en comparación con 3.5 s) para el termopar TC3 con respecto a TC2, debido a que el frente de mojado pasa antes por esta posición dado que avanza de abajo hacia arriba. Como el avance del frente de mojado es más rápido para el experimento con velocidad de flujo libre de 0.6 m/s, se pierde menos energía a través de la capa de vapor, lo que resulta en un valor mayor del máximo *flux* de calor en la superficie en comparación con el resultado del experimento con velocidad de 0.2 m/s. Comparando los resultados en la posición del termopar TC3 con los de TC2, se aprecia que los valores máximos de *flux* de calor para TC3 (2.84 MW m<sup>-2</sup> a 0.6 m/s y 2.33 MW m<sup>-2</sup> a 0.2 m/s) son ligeramente mayores en comparación con los de TC2 (2.74 MW m<sup>-2</sup> a 0.6 m/s y 2.32 MW m<sup>-2</sup> a 0.2 m/s), debido a que la región del termopar TC2 está expuesta un mayor tiempo a la capa de vapor por lo que continua perdiendo energía a través de ésta en lo que llega el frente de mojado a esa posición.



**Figura 5.11** Historia de *flux* de calor en la superficie para temperatura inicial de 450°C y ambas velocidades de flujo: (a) TC3 y (b) TC2.

La Figura 5.11 presenta la historia de *flux* de calor para temperatura inicial de 500°C en las posiciones de TC3 y TC2. La diferencia en el tiempo al que se observaron los valores máximos de *flux* de calor es menor (0.7 s para la posición de TC2) en comparación con los resultados de los experimentos con temperatura inicial de 450 °C (0.9 s para la posición de TC2). Esto se debe a que el frente de mojado avanza más lentamente cuando se enfría la probeta desde una mayor temperatura inicial. Los valores máximos de *flux* de calor para esta temperatura inicial fueron de 2.98 MW m<sup>-2</sup> (a 3.8 s) a 0.6 m/s y de 2.49 MW m<sup>-2</sup> (a 4.4 s) a 0.2 m/s para el termopar TC3; y de 2.64 MW m<sup>-2</sup> (a 4.1 s) a 0.6 m/s y de 2.37 MW m<sup>-2</sup> (a 4.8 s) a 0.2 m/s para el termopar TC2.

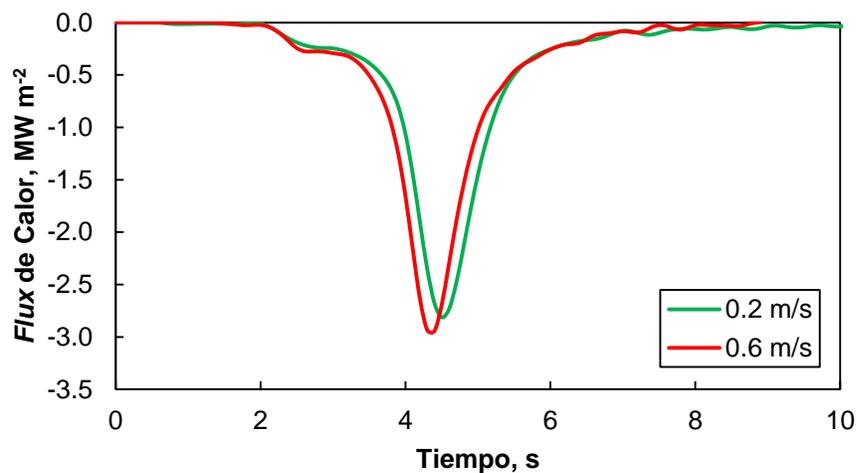


**Figura 5.12** Historia de *flux* de calor en la superficie para a una temperatura de 500 °C y ambas velocidades de flujo para: (a) TC3 y (b) TC2.

En la Figura 5.12 se presenta el *flux* de calor en la superficie estimado con las respuestas térmicas medidas con los termopares TC3 y TC2, en experimentos con temperatura inicial de 550 °C y ambas velocidades de flujo. Comparando la Figura 5.11 con la Figura 5.12 se aprecia que, al aumentar la temperatura inicial, la diferencia en tiempos al que ocurre la máxima extracción de calor para una posición de termopar dada es mayor con respecto a los valores calculados para experimentos con menor temperatura inicial, debido a que la velocidad de frente de mojado disminuye al aumentar la temperatura inicial. Además, conforme aumenta la temperatura inicial, la historia de extracción de calor para los dos valores de velocidad de flujo se va haciendo más parecida; esto quiere decir que la energía acumulada al inicio del enfriamiento comienza a regir la historia de

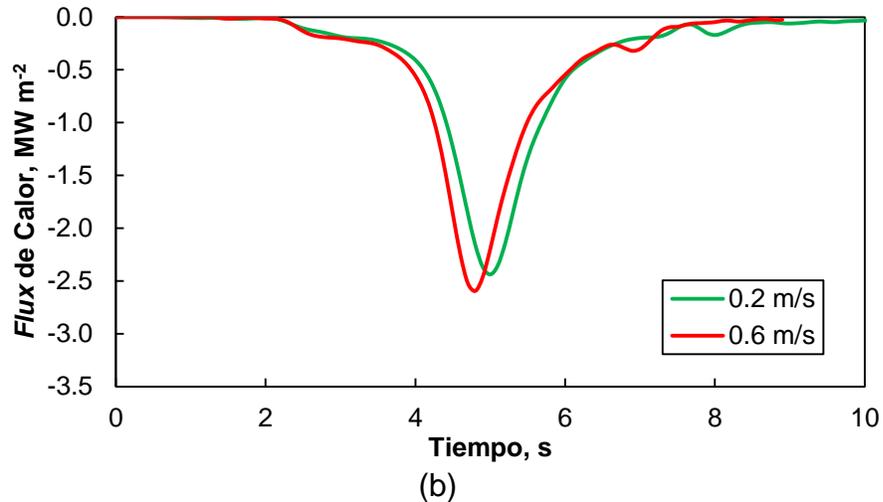
extracción de calor por encima de la contribución del coeficiente de transferencia convectivo. A esta temperatura inicial, los valores máximos de *flux* de calor en la superficie para el termopar TC3 fueron de 2.94 MW m<sup>-2</sup> para 0.6 m/s y 2.93 MW m<sup>-2</sup> para 0.2 m/s; para el termopar TC2 fueron de 2.59 MW m<sup>-2</sup> para 0.6 m/s y 2.46 MW m<sup>-2</sup> para 0.2 m/s.

Comparando las gráficas para el termopar TC2, desde la Figura 5.10 hasta la 5.12, se aprecia que el valor máximo de *flux* de calor a una velocidad de flujo de 0.6 m/s va disminuyendo al aumentar la temperatura inicial. Esto se debe a que, al ser más lento el avance del frente de mojado a una mayor temperatura inicial, el termopar TC2 está expuesto un mayor tiempo a la capa de vapor, perdiendo energía a través de esta; así, para el instante en el que el frente de mojado pasa por la posición de TC2 ya no hay la misma cantidad de energía que al inicio de la prueba.



(a)

**Figura 5.13** Historia de *flux* de calor para una temperatura de 550 °C y ambas velocidades de flujo para: (a) TC3 y (b) TC2.

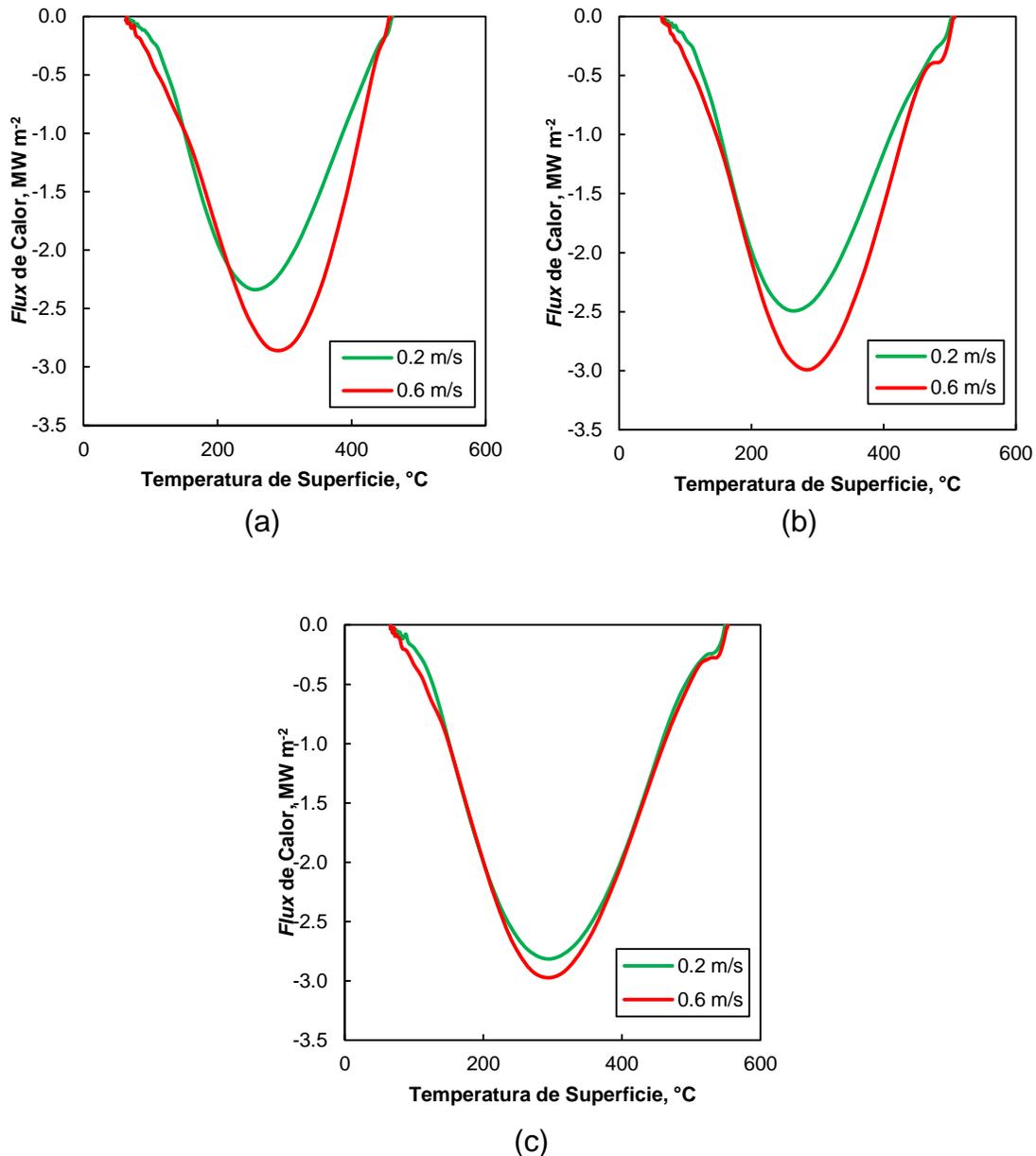


**Figura 5.14** (Continuación) Historia de *flux* de calor para una temperatura de 550 °C y ambas velocidades de flujo para: (a) TC3 y (b) TC2.

La Figura 5.13 muestra el *flux* de calor en función de la temperatura de la superficie a medida que ésta disminuye (curva de ebullición inversa [18]) para la posición del termopar TC3, para ambas velocidades de flujo y las distintas temperaturas iniciales de trabajo. Este tipo de gráficas se lee de derecha a izquierda. En las tres gráficas es evidente que las curvas constituyen una familia, lo que indica que ocurre la misma secuencia de fenómenos de transporte de energía. En todas las curvas se observa extracción de calor desde el inicio del enfriamiento hasta que se alcanza un valor prácticamente constante de *flux* de calor; esto ocurre debido a que en ese momento la capa de vapor ocasiona que la extracción de calor sea relativamente baja y constante; sin embargo, la presencia de esta capa de vapor es de muy poca duración. Nótese que, conforme aumenta la temperatura inicial de la pieza, hay mayor evidencia de capa de vapor. Para temperatura inicial de 450 °C (Figura 5.13(a)), la zona horizontal es prácticamente nula debido a que hay muy poca energía acumulada y al aumentar el flujo de agua la capa de vapor es muy inestable y el frente de mojado avanza rápidamente.

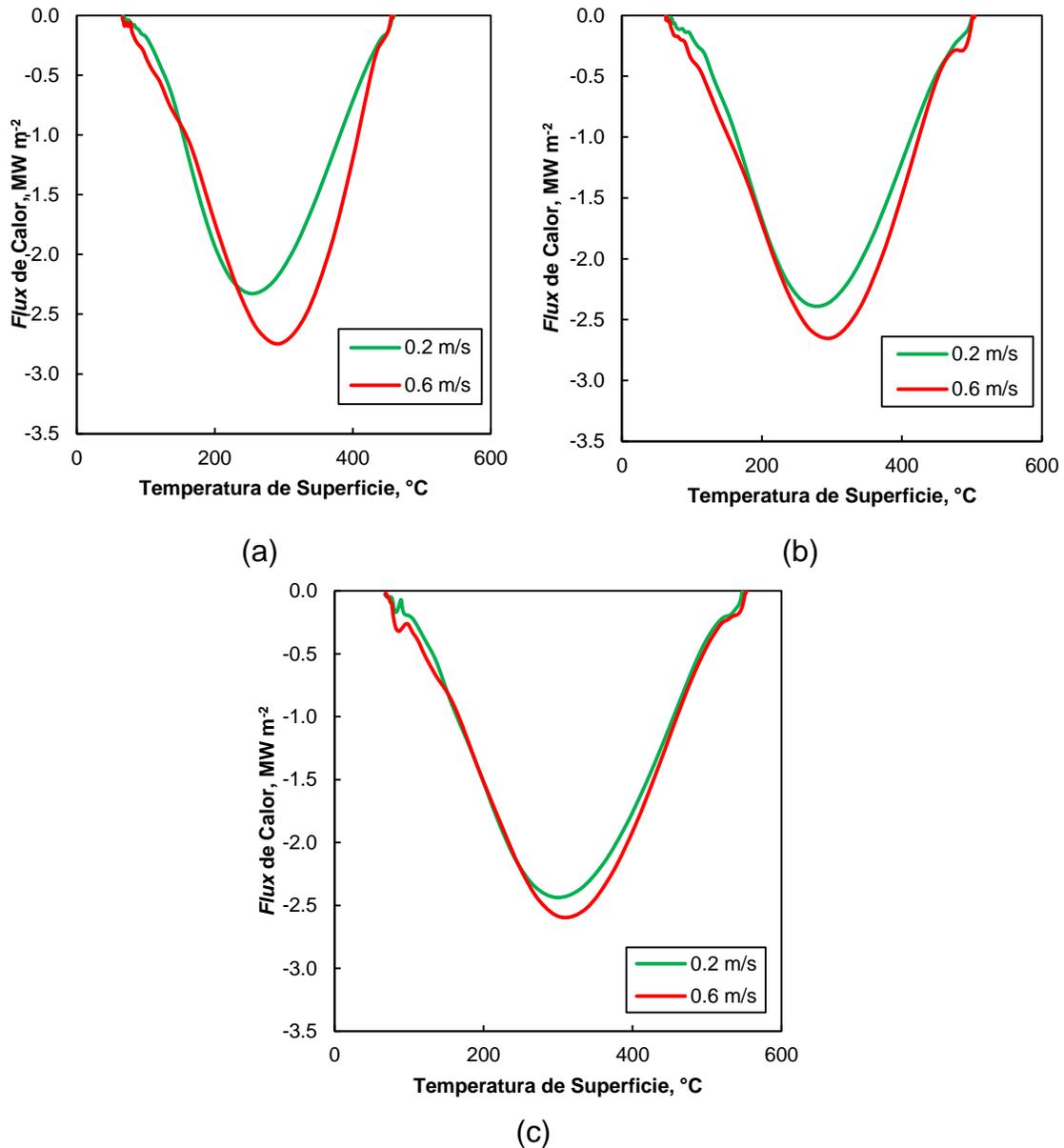
Una vez que se rompe la capa de vapor aumenta la extracción de calor hasta alcanzar un valor máximo, que también depende de la temperatura inicial de la probeta y de la velocidad de flujo del medio de temple. El valor máximo del *flux* de calor en la superficie aumenta al aumentar la temperatura inicial (debido a una

mayor cantidad de energía térmica almacenada al inicio del enfriamiento), siendo mayor este efecto para el temple con agua a 0.2 m/s: 2.33 MW m<sup>-2</sup>, 2.49 MW m<sup>-2</sup> y 2.93 MW m<sup>-2</sup> para valores de temperatura inicial de 450, 500 y 550 °C, respectivamente. En concordancia con las curvas de *flux* de calor en la superficie como función del tiempo, las curvas inversas de ebullición se asemejan entre sí a medida que la temperatura inicial de la prueba aumenta.



**Figura 5.15** Flux de calor en la superficie en función de la temperatura de superficie para la posición de TC3 durante el temple con agua fluyendo a 0.2 m/s y 0.6 m/s a una temperatura inicial de: (a) 450 °C, (b) 500 °C y (c) 550 °C.

La Figura 5.14 muestra el *flux* de calor en función de la temperatura de superficie para la posición del termopar TC2. Al aumentar la velocidad de flujo el máximo valor de *flux* de calor aumenta, debido a que el frente de mojado avanza más rápido y se pierde menos energía a través de la capa de vapor.

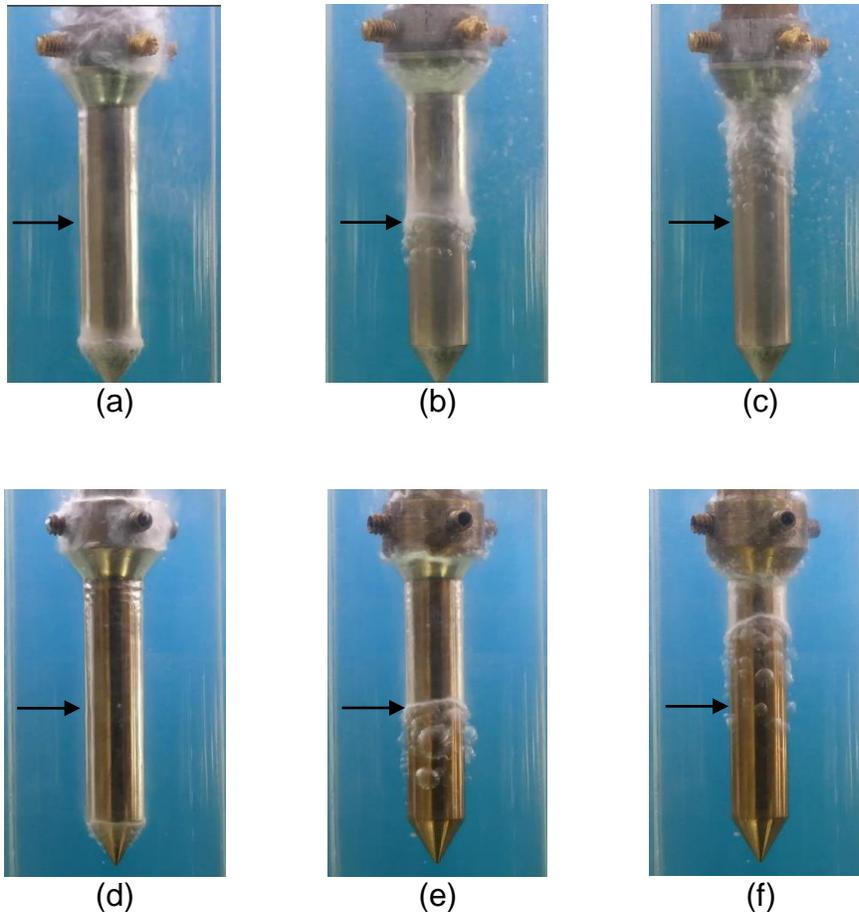


**Figura 5.16** Flux de calor en la superficie en función de la temperatura de superficie para la posición de TC2 durante el temple con agua fluyendo a 0.2 m/s y 0.6 m/s a una temperatura inicial de: (a) 450 °C, (b) 500 °C y (c) 550 °C.

#### **5.4 Efecto del material de la probeta**

En esta sub-sección se compara la extracción de calor desde probetas de aleación de aluminio (que tienen alta conductividad térmica) con el caso de probetas de acero (que tienen menor conductividad térmica) para enfriamientos súbitos desde 550 °C, en ambos casos.

La Figura 5.15 ilustra las diferencias en el avance del frente de mojado cuando se utilizan probetas de aleación de aluminio o de acero (AISI 304). Para cuando el frente de mojado pasa por la posición del termopar TC2 (marcada por las flechas negras) en la probeta de aleación de aluminio, se observa que existe un área de color grisáceo por arriba del frente de mojado, indicando que la capa de vapor se está comenzando a desestabilizar poco antes de que el frente pase por esa posición, lo que no ocurre con la probeta de acero; como consecuencia, el frente de mojado es más difuso cuando se utilizan probetas de aleación de aluminio. Hacia el final del enfriamiento se aprecia que la probeta de acero mantiene la estabilidad de la capa de vapor y, por tanto, un avance constante del frente de mojado prácticamente a lo largo de la probeta; en contraste, la probeta de aleación de aluminio no logra mantener la capa de vapor durante todo el enfriamiento, provocando que esta se rompa de forma súbita en la zona superior de la probeta. Esta última observación está relacionada con la alta conductividad de la aleación de aluminio, que favorece flujo de calor en dos dimensiones por lo que la región de la probeta por arriba del frente de mojado se enfría más rápidamente con respecto a la probeta de acero. Por otra parte, las burbujas en la zona por debajo del frente de mojado son de mayor tamaño para la probeta de acero que para la aleación de aluminio.



**Figura 5.17** Comparación del avance del frente de mojado para experimentos realizados a una temperatura inicial de 550 °C y velocidad de flujo de 0.2 m/s para aluminio ((a) - (c)) y acero ((d) - (f)). La posición del frente de mojado está en: (a) y (d) la base cilíndrica de la probeta, (b) y (e) la posición del termopar TC2; (c) y (f) hacia el final del experimento.

A partir de los videos, se determinó el tiempo correspondiente a cada imagen de la Figura 5.15. Los resultados se muestran en la Tabla 5.5. El frente de mojado tarda más en pasar por cada una de las posiciones correspondientes a las imágenes de la Figura 5.15 cuando se usó una probeta de acero. Esto concuerda con la menor velocidad del frente de mojado que se obtuvo para la probeta de acero (ver Tabla 5.6). Debido a la mayor difusividad térmica de la aleación de aluminio ( $8.418 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  [20]) en comparación con la del acero ( $1.474 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  [20]), la disipación de la energía térmica contenida en la probeta es más rápida, lo que provoca una mayor velocidad del frente de mojado para el caso de la probeta de aleación de aluminio.

**Tabla 5.3** Relación de tiempos correspondientes a las imágenes de la Figura 5.15.

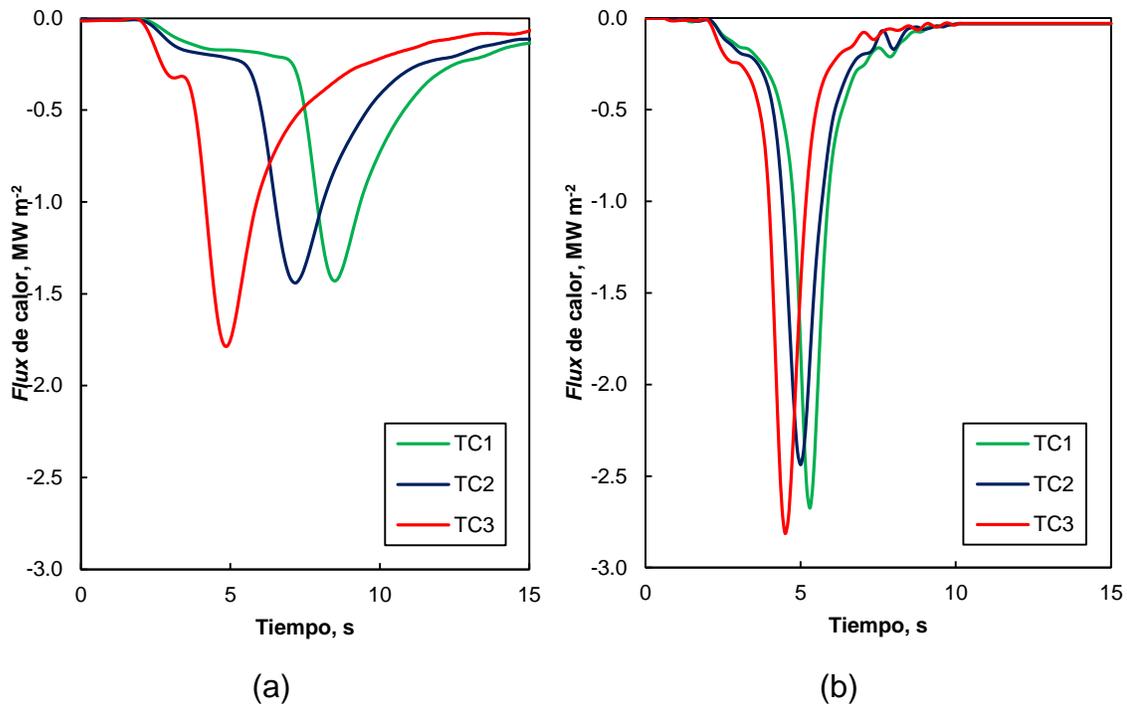
Material	Tiempo en segundos para la posición de:		
	La base cilíndrica de la probeta	La posición del termopar TC2	Hacia el final del experimento
Aleación de aluminio	3.2	4.9	5.6
Acero	3.4	5.8	7.4

**Tabla 5.4** Velocidad del frente de mojado para temperatura inicial de 550 °C y velocidad de flujo de 0.2 m/s.

Material	Velocidad del frente de mojado, cm/s
Aleación de aluminio	1.71
Acero	1.01

La Figura 5.16 muestra la comparación entre la historia de extracción de calor de las probetas de acero y de la aleación de aluminio. Para la probeta de acero se aprecia claramente la presencia de la capa de vapor (región casi horizontal en las curvas), lo que es consecuencia de que estabiliza a ésta al no permitir fácilmente la extracción de calor. Se observa que la probeta de aleación de aluminio presenta valores máximos de *flux* de calor en la superficie mayores que los de la probeta de acero. Además, los valores máximos de *flux* de calor de la superficie se alcanzan a menores tiempos para la probeta de aleación de aluminio debido a que el frente de mojado avanza más rápidamente que en el caso del acero, por lo cual se pierde poca energía térmica a través de la capa de vapor; en consecuencia, hay mayor cantidad de energía térmica disponible al momento en el que pasa el frente de mojado por una posición dada. En la probeta de acero, el termopar TC1 no presenta el mismo comportamiento que en la probeta de aleación de aluminio, ya que la capa de vapor se mantiene a lo largo

de la probeta de acero durante toda la prueba, mientras que para la aleación de aluminio la capa de vapor rompe súbitamente en la parte superior de la probeta.

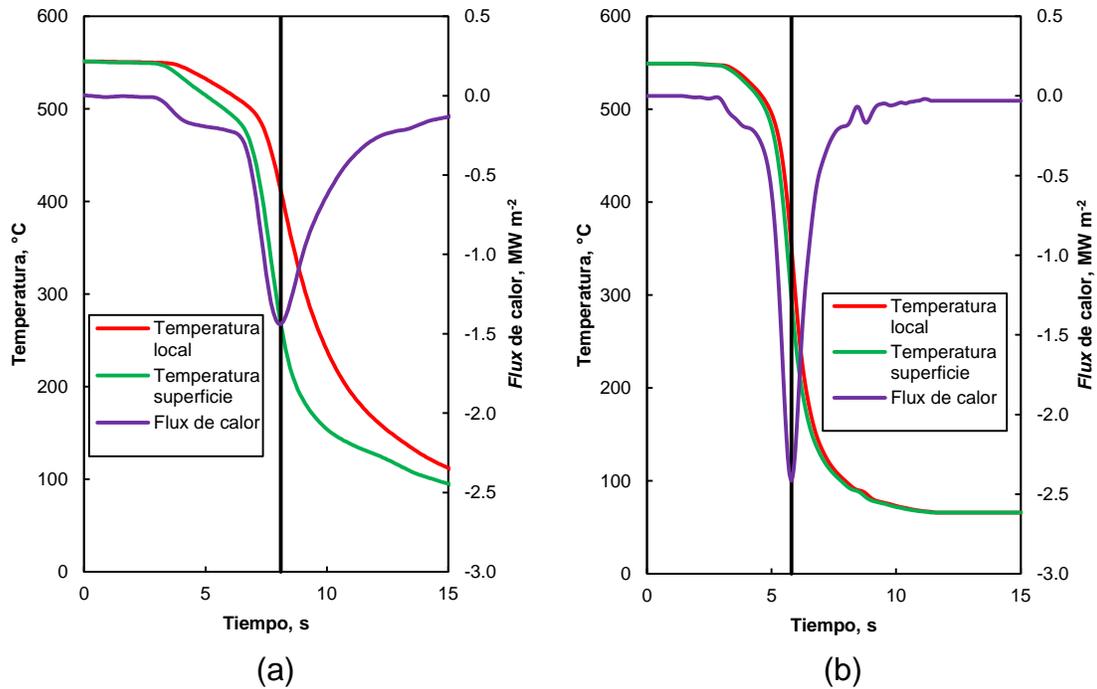


**Figura 5.18** Historia de *flux* de calor en la superficie en la posición de los tres termopares, para pruebas realizadas a temperatura inicial de 550 °C y velocidad de flujo de 0.2 m/s en probetas de: (a) acero y (b) aleación de aluminio.

La Figura 5.17 muestra las curvas de enfriamiento local (medida) y de la superficie (estimada en la solución del *IHCP*) para TC2 durante el enfriamiento súbito desde 550 °C con agua a 0.2 m/s cuando se usan probetas de distintos materiales. Se observa que existe una mayor diferencia entre la temperatura local y la de superficie en la probeta de acero que en la de la aleación de aluminio. Esto se debe a que el acero tiene una conductividad térmica más baja que la del aluminio, provocando que exista una mayor diferencia de temperaturas.

En esa figura también se muestra la curva de historia de *flux* de calor de la superficie. La línea vertical en la figura indica el tiempo al que se observa el máximo valor de *flux* de calor y la posición correspondiente en las curvas de enfriamiento. En la probeta de acero, su baja conductividad térmica provoca que la temperatura local a la cuál ocurre la máxima extracción de calor sea mucho

mayor que la correspondiente en la superficie, caso contrario a lo que se observa para la probeta de aleación de aluminio.



**Figura 5.19** Historias de temperatura local, temperatura de superficie y flux de calor en la superficie para la posición de TC2 durante experimentos con temperatura inicial de 550 °C y velocidad de flujo de 0.2 m/s: (a) acero y (b) aluminio.

## 6 Conclusiones

- La velocidad del frente de mojado disminuye al aumentar la temperatura inicial y disminuir la velocidad del flujo.
- Debido a la alta conductividad térmica del aluminio y a la ruptura súbita de la capa de vapor en una región relativamente grande (en la parte superior de la probeta) hacia el final del ensayo, el flujo de calor en la parte superior de la probeta es 2D, ocasionando una mayor extracción de calor para el termopar TC1 de lo esperado. Para este tipo de ensayos, no debe colocarse ningún termopar en esa posición.
- Al aumentar la temperatura inicial, la velocidad de flujo pierde influencia en la extracción de calor y en la velocidad del frente de mojado.
- La diferencia entre la temperatura local y la temperatura de superficie es menor en probetas de aleación de aluminio que en probetas de acero, debido a la alta conductividad del aluminio.

## 7 Referencias

- [1] W. D. Callister, *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, 3a. ed, Editorial Reverté, Barcelona, 1995, pp. 349-353.
- [2] B. Hernández-Morales, “Cooling: Curve Analysis”, en *Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys*, Vol. 2, R. Colás y G. E. Totten, eds., CRC Press/Taylor & Francis Group, Boca Ratón, FL, 2016, pp. 854–873. ISBN 978-1466511040.
- [3] F. C. Campbell, *ASM Handbook, Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*. ASM International, Ohio, 2008, 135-148.
- [4] S. Pogatscher, H. Antrekowitsch, T. Ebner y M. Leoben, “The Role of Co-clusters in the Artificial Aging of AA6061 and AA6060” *Light Metals*, 2012, pp. 415–420.
- [5] T. Arai, G. Baker, *ASM Handbook Vol. 4, Heat Treating*, ASM International, Materials Park, Ohio, 1991, pp. 1861-1898.
- [6] J. Shackelford, *Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros*, 6a. ed., Pearson, Madrid, 2005, pp. 161.
- [7] J. G. Kaufman y E. L. Rooy, *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes and Applications*, 1a ed, ASM International, Ohio, 2004, 61-64.
- [8] J. Dossett y G. Totten, *ASM Handbook Vol. 4A, Steel Heat Treating Fundamentals and Processes*. ASM International, Ohio, 2013.
- [9] Z. Li, B. Xiong, Y. Zhang, B. Zhu, X. Li, H. Liu, P. Li, y J. Liu, “Investigation on Quench Sensitivity Characterization of Selected Heat-treatable Al Alloys based on Jominy End Quench”, *The Japan Institute of Light Metals*, 2010, pp. 2363–2368.
- [10] C. Li, S. Wang, D. Zhang, S. Liu, Z. Shan, y X. Zhang, “Effect of Zener-Hollomon parameter on quench sensitivity of 7085 aluminum alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 688, 2016, pp. 456–462.

- [11] N. Keleshian, R. Kyser, J. Rodriguez, C. Cueva, V. Vega, E. W. Lee, J. Ogren, y O. S. Es-Said, “*On the Distortion and Warpage of 7249 Aluminum Alloy After Quenching and Machining*”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 20, no. 7, 2011, pp. 1230–1234.
- [12] S. T. Lim, S. J. Yun, y S. W. Nam, “*Improved quench sensitivity in modified aluminum alloy 7175 for thick forging applications*”, *Elsevier, Materials Science and Engineering A*, Vol. 371, no. 1–2, 2004, pp. 82–90.
- [13] S. Ma y M. Maniruzzaman, “*A Methodology to Predict the Effects of Quench Rates on Mechanical Properties of Cast Aluminum Alloys*”, *Metallurgical and Materials Transactions B-Process Metallurgy and Materials Processing Science*, Vol. 4, 2007, pp. 583–589.
- [14] B. Hernández Morales, “*Characterization of Heat Transfer during Quenching*” en *ASM Handbook, Vol. 4A, Steel Heat Treating Fundamentals and Processes*, J. L. Dossett y G.E. Totten, ASM International, Ohio, 2013, pp. 158–175.
- [15] S. Nukiyama, “*The Maximum and Minimum Values of the Heat Q Transmitted from Metal to Boiling Water Under Atmospheric Pressure*”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 9, 1966, pp. 1419–1433.
- [16] A. Stich y H. M. Tensi, “*Heat Transfer and Temperature Distribution with Wetting Process During Immersion Quenching*”, *Harterei-Technische Mitteilungen*, Vol. 50(1), 1995, pp. 31–34.
- [17] B. Gottfried, C. Lee, y K. Bell, “*The Leidenfrost Phenomenon: Film Boiling of Liquid Droplets on a Flat Plate*”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 9, 1966, pp. 1167–1187.
- [18] Z. Hasan, M. R. Ullah, A. Hossain, y M. A. Islam, “*Sessile Drop Evaporation and Leidenfrost Phenomenon on High Temperature Metallic Surface*”, *American Journal of Applied Science*, Vol. 7, 2010, pp. 846–851.

- [19] J. V. Beck, B. Litkouhi, yC. R. St. Clair Jr, "*Efficient Sequential Solution of the Nonlinear Inverse Heat Conduction Problem*", *Numerical Heat Transfer*, Vol. 5, 1982, pp. 275–286.
- [20] M. N. Ozisik, *Heat Conduction*. 2a ed., John Wiley & Sons, Inc., USA, 1993, pp. 571-573.
- [21] A. M. A. Mohamed and F. H. Samuel, "*A Review on the Heat Treatment of Al-Si-Cu/Mg Casting Alloys*", *Heat Treatment - Conventional and Novel Applications*, 2012, pp. 55–72.
- [22] R. Cruces Reséndez, "*Análisis Inverso del Flujo de Calor en 2D para Ensayos de Temple de Probetas a Escala Laboratorio*", Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2015, pp. 45-52, 119-123.
- [23] J. S. Téllez, "*Desarrollo de un Nuevo Dispositivo para Caracterizar la Extracción de Calor en Baños de Temple*", Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2000.