



FACULTAD DE QUÍMICA

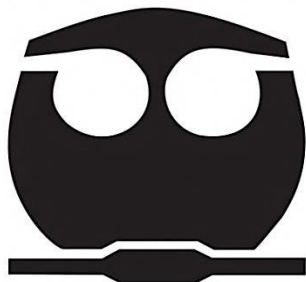
**CARACTERIZACIÓN DE LA EXTRACCIÓN DE
CALOR EN ENSAYOS DE TEMPLE A ESCALA
LABORATORIO CON PROBETAS DE ACERO
DE DIFERENTE GEOMETRÍA**

TESIS

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

PRESENTA:

EDER ISAAC DURÁN GARCÍA



CIUDAD DE MÉXICO

2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Presidente: Prof. ALBERTO INGALLS CRUZ
Vocal: Prof. JOSÉ BERNARDO HERNÁNDEZ MORALES
Secretario: Prof. SERGIO GARCÍA GALÁN
1er Suplente: Prof. ARTURO ALEJANDRO SÁNCHEZ SANTIAGO
2do Suplente: 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

Asesor técnico:

M. en C. Roberto Cruces Reséndez

Sustentante:

Eder Isaac Durán García

AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Profesores de la Facultad de Química y a la Sección 024 de la AAPAUNAM por la Cátedra “Fernando González Vargas.”

Contenido

Resumen.....	1
1 Introducción	3
1.1 Marco de trabajo	3
1.2 Justificación	4
1.3 Hipótesis	4
1.4 Objetivo	4
2 Antecedentes	5
2.1 Tratamiento térmico de temple	5
2.2 Análisis de curvas de enfriamiento	8
2.3 Frente de mojado.....	9
2.4 Condiciones hidrodinámicas alrededor de las probetas para ensayos de temple	10
2.5 Problema inverso de conducción de calor.....	11
3 Metodología experimental.....	13
3.1 Probetas.....	13
3.2 Dispositivo y condiciones experimentales	15
4 Resultados.....	18
4.1 Efecto de la geometría de la punta sobre el comportamiento de las curvas de enfriamiento.....	18
4.2 Efecto de la velocidad de flujo sobre las curvas de enfriamiento	24
4.3 Efecto de la temperatura inicial sobre las curvas de enfriamiento	28
5 Análisis de resultados	31
5.1 Rapidez de enfriamiento.....	31
5.2 Velocidad del frente de mojado.....	37
5.3 <i>Flux</i> de calor en la superficie	42
6 Conclusiones.....	50
7 Bibliografía	51

Índice de Figuras

Figura 2.1 Etapas de extracción de calor durante el enfriamiento por inmersión de una probeta cilíndrica de acero al cromo-níquel en agua a 30 °C con una velocidad del medio de 0.3 m/s [4].	6
Figura 2.2 a) Etapas del proceso de temple por inmersión, b) Variación del coeficiente de transferencia de calor por convección [7].	7
Figura 2.3 Ejemplo de una curva de enfriamiento en la que se representan las tres etapas del proceso: (A) enfriamiento en presencia de capa de vapor, (B) enfriamiento en presencia de burbujas y (C) enfriamiento por convección ([8], modificada).	8
Figura 2.4 Determinación del frente de mojado mediante el uso de tres termopares cercanos a la superficie en una probeta cilíndrica [10].	10
Figura 2.5 Líneas de flujo calculadas con flujo de agua a 0.6 m/s, (a) probeta de base plana, (b) probeta de punta hemiesférica y (c) probeta de punta cónica [12]. Los cálculos se realizaron con un modelo matemático isotérmico.	11
Figura 3.1 Probeta cilíndrica con punta cónica: (a) vista isométrica, (b) vista lateral y (c) vista superior.	14
Figura 3.2 Probeta cilíndrica con punta hemisférica: (a) vista isométrica, (b) vista lateral y (c) vista superior.	14
Figura 3.3 Probeta cilíndrica de base plana: (a) vista isométrica, (b) vista lateral y (c) vista superior.	15
Figura 3.4 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 [16].	16
Figura 4.1 Historial térmico, obtenido con la probeta de punta hemiesférica, durante el temple con agua a 60°C fluyendo a una velocidad de 0.2 m/s y una temperatura inicial de la probeta de 850°C.	19
Figura 4.2 Historial térmico, obtenido con la probeta de punta cónica, durante el temple con agua a 60°C fluyendo a una velocidad de 0.2 m/s y una temperatura inicial de la probeta de 850°C.	20
Figura 4.3 Historial térmico, obtenido con la probeta de base plana, durante el temple con agua a 60°C fluyendo a una velocidad de 0.2 m/s y una temperatura inicial de la probeta de 850°C.	21
Figura 4.4 Historiales térmicos en la posición del termopar TC2 para temperatura inicial de 850°C y flujo de 0.2 m/s para las tres geometrías.	22
Figura 4.5 Imágenes de la superficie de la probeta de punta hemiesférica, durante el temple con agua a 60 °C fluyendo a una velocidad de 0.2 m/s y una temperatura inicial de la probeta de 850°C. Las imágenes corresponden: (a) 0.0 s, (b) 9.6 s, (c) 12.6 s, (d) 15.2 s y (e) 22.0 s, con respecto al instante en el que la probeta llega a la posición de prueba.	23
Figura 4.6 Imágenes de la superficie de la probeta de punta cónica, durante el temple con agua a 60 °C fluyendo a una velocidad de 0.2 m/s y una temperatura inicial de la probeta de 850°C. Las imágenes corresponden: (a) 0.0 s, (b) 5.0 s, (c) 9.0 s, (d) 12.4 s y (e) 24.5 s, con respecto al instante en el que la probeta llega a la posición de prueba.	23
Figura 4.7 Imágenes de la superficie de la probeta de base plana, durante el temple con agua a 60 °C fluyendo a una velocidad de 0.2 m/s y una temperatura inicial de la probeta de 850°C. Las	

imágenes corresponden: (a) 0.0 s, (b) 11.8 s, (c) 15.2 s, (d) 23.6 s y (e) 26.5 s, con respecto al instante en el que la probeta llega a la posición de prueba..... 23

Figura 4.8 Historial térmico para la probeta de punta hemiesférica en la posición del termopar TC2, temperatura inicial de 950 °C y ambas velocidades de flujo estudiadas..... 25

Figura 4.9 Historial térmico para la probeta de punta cónica en la posición del termopar TC2, temperatura inicial de 950 °C y ambas velocidades de flujo estudiadas..... 25

Figura 4.10 Historial térmico para la probeta de base plana en la posición del termopar TC2, temperatura inicial de 950 °C y ambas velocidades de flujo estudiadas..... 26

Figura 4.11 Imágenes de la zona cercana a la punta de la probeta de base plana enfriada desde temperatura inicial de 950 °C, con velocidad del medio de temple de 0.6 m/s. Las imágenes corresponden: (a) 0.0 s, (b) 3.8 s y (c) 7.5 s, con respecto al instante en el que la probeta llega a la zona de prueba..... 27

Figura 4.12 Imágenes de la zona cercana a la punta de la probeta de punta hemiesférica enfriada desde temperatura inicial de 950 °C, con velocidad del medio de temple de 0.6 m/s. Las imágenes corresponden: (a) 0.0 s, (b) 6.2 s y (c) 8.2 s, con respecto al instante en el que la probeta llega a la zona de prueba..... 27

Figura 4.13 Imágenes de la zona cercana a la punta de la probeta de punta cónica enfriada desde temperatura inicial de 950 °C, con velocidad del medio de temple de 0.6 m/s. Las imágenes corresponden: (a) 0.0 s, (b) 0.652 s y (c) 0.9 s, con respecto al instante en el que la probeta llega a la zona de prueba. 27

Figura 4.14 Historiales térmicos para la probeta de punta hemiesférica en la posición del termopar TC2, para la velocidad de flujo de 0.6 m/s y ambos valores de temperatura inicial..... 28

Figura 4.15 Historiales térmicos para la probeta de punta cónica en la posición del termopar TC2, para la velocidad de flujo de 0.6 m/s y ambos valores de temperatura inicial..... 29

Figura 4.16 Historiales térmicos para la probeta de base plana en la posición del termopar TC2, para la velocidad de flujo de 0.6 m/s y ambos valores de temperatura inicial..... 30

Figura 5.1 Rapidez de enfriamiento, en función del tiempo, para la posición del termopar TC2 durante el temple con una velocidad de flujo de 0.2 m/s y temperatura inicial de 950 °C, para las tres geometrías. 32

Figura 5.2 Rapidez de enfriamiento, en función del tiempo, para la posición del termopar TC2 durante el temple con una velocidad de flujo de 0.6 m/s y temperatura inicial de 950 °C, para las tres geometrías. 33

Figura 5.3 Cálculo de: (a) gradiente térmico radial y (b) gradiente térmico axial. En el lado derecho de la imagen se muestra, como ejemplo, la distribución de termopares en la probeta de base plana..... 34

Figura 5.4 Evolución de los gradientes térmicos axial y radial durante el temple de la probeta de punta hemiesférica en agua a 60°C con velocidad de 0.6 m/s y temperatura inicial de 950 °C. 35

Figura 5.5 Evolución de los gradientes térmicos axial y radial durante el temple de la probeta de punta cónica en agua a 60°C con velocidad de 0.6 m/s y temperatura inicial de 950 °C. 36

Figura 5.6 Evolución de los gradientes térmicos axial y radial durante el temple de la probeta de base plana en agua a 60°C con velocidad de 0.6 m/s y temperatura inicial de 950 °C..... 36

Figura 5.7 Posición del frente de mojado, en función del tiempo, durante el temple de una probeta de punta cónica en agua a 60°C, fluyendo a una velocidad de 0.6 m/s, para dos valores de

temperatura inicial: valores (símbolos), regresión (líneas). Se muestra también el valor de R^2 para cada regresión.	38
Figura 5.8 Velocidad del frente de mojado en función de la velocidad del medio de temple para temperatura inicial de 850 °C para las tres geometrías.	39
Figura 5.9 Imágenes extraídas de las videograbaciones para las tres geometrías, para temperatura inicial de 850 °C en el instante en el que el frente de mojado pasa por la posición del termopar TC3. Las imágenes (a) 5.8 s, (b) 9.6 s y (c) 14.6 s para velocidad de flujo de 0.2 m/s, mientras que las imágenes (d) 2.9 s, (e) 3.4 s y (f) 7.7 s con velocidad de flujo de 0.6 m/s. Los tiempos están referidos al instante en el que la probeta llega a la posición de prueba.	40
Figura 5.10 Velocidad del frente de mojado en función de la velocidad del medio de temple para temperatura inicial de 950 °C para las tres geometrías.	41
Figura 5.11 Imágenes extraídas de las videograbaciones para las tres geometrías, para temperatura inicial de 950 °C en el instante en el que el frente de mojado pasa por la posición del termopar TC3. Las imágenes (a) 6.4 s, (b) 16.9 s y (c) 13.6 s a velocidad de flujo de 0.2 m/s, mientras que las imágenes (d) 4.4 s, (e) 9.3 s y (f) 9.5 s a velocidad de flujo de 0.6 m/s. Los tiempos están referidos al instante en el que la probeta llega a la posición de prueba.	42
Figura 5.12 Historia de flux de calor en la superficie para la posición del termopar TC2 durante el temple, con temperatura inicial de 950 °C y velocidad de flujo 0.6 m/s, para las tres geometrías de probeta.	43
Figura 5.13 Flux de calor e historiales térmicos local y de la superficie en la posición del termopar TC2 durante el temple, para temperatura inicial de 950 °C y agua fluyendo a 0.6 m/s, probeta de punta hemiesférica.	45
Figura 5.14 Flux de calor e historiales térmicos local y de la superficie en la posición del termopar TC2 durante el temple, para temperatura inicial de 950 °C y agua fluyendo a 0.6 m/s, probeta de punta cónica.	45
Figura 5.15 Flux de calor e historiales térmicos local y de la superficie en la posición del termopar TC2 durante el temple, para temperatura inicial de 950°C y agua fluyendo a 0.6 m/s, probeta de base plana.	46
Figura 5.16 Flux de calor en la superficie en función de la temperatura de la superficie para la posición del termopar TC2 durante el temple con temperatura inicial de 950°C y con agua fluyendo a 0.6 m/s, para las tres geometrías de probeta.	47
Figura 5.17 Detalle del historial térmico en la superficie para la posición del termopar TC2 durante el temple con temperatura inicial de 950 °C y velocidad de medio de temple de 0.6 m/s, para las tres geometrías de probeta.	48
Figura 5.18 Flux de calor máximo (en la posición del termopar TC2) en función de la temperatura inicial de la probeta durante el temple, para las tres geometrías y agua fluyendo a 0.2 m/s.	49
Figura 5.19 Flux de calor máximo (en la posición del termopar TC2) en función de la temperatura inicial de la probeta durante el temple, para las tres geometrías y velocidad de flujo de 0.6 m/s.	49

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Diferentes medios de enfriamiento para el proceso de temple, ordenados en función de la severidad del mismo [6] (modificada).	7
Tabla 3.1 Condiciones de trabajo experimentales para las tres geometrías (punta cónica, punta hemiesférica y base plana).	17
Tabla 5.1 Rapidez de enfriamiento máxima (en valor absoluto) para las tres geometrías estudiadas; temperatura inicial de 950 °C y ambas velocidades de flujo de agua.	34
Tabla 5.2 Gradiente máximo de temperatura para las tres geometrías; temperatura inicial de 950 °C y ambas velocidades de flujo estudiadas.....	37
Tabla 5.3 Temperaturas de superficie y local en el instante de máxima extracción de calor en la posición del termopar TC2 para las tres geometrías de punta, con temperatura inicial de 950 °C y velocidad de flujo de 0.6 m/s.	44

Listado de símbolos

Símbolo	Cantidad	Unidades
k	Conductividad térmica	$W m^{-1} K^{-1}$
ρ	Densidad	$kg m^{-3}$
C_p	Calor específico a presión constante	$J kg^{-1} K^{-1}$
T	Temperatura	$^{\circ}C$
T_0	Temperatura inicial	$^{\circ}C$
Y_j	Temperatura local medida al tiempo t_j	$^{\circ}C$
r	Coordenada radial en coordenadas cilíndricas.	m
q	<i>Flux</i> de calor en la superficie	$W m^{-2}$
t	Tiempo	s
t_j	Tiempo i -ésimo	s

Resumen

La transferencia de calor desde una pieza de acero hacia el medio de enfriamiento durante el temple constituye un fenómeno complejo debido a los mecanismos de transferencia de calor que se presentan durante este proceso, por lo cual debe caracterizarse con precisión para contar con información confiable que pueda alimentarse a un modelo matemático determinístico del proceso. En este trabajo se midieron historiales térmicos locales que luego se analizaron para cuantificar la extracción de calor hacia el medio de enfriamiento y su efecto en el enfriamiento de tres probetas cilíndricas de diferente geometría de la punta: cónica, hemiesférica y plana. La matriz experimental incluyó, además de la geometría de la probeta, dos valores de temperatura inicial (850 y 950 °C) y dos valores de velocidad de flujo del medio de enfriamiento (0.2 y 0.6 m/s), que son típicos de procesos industriales. El medio de enfriamiento utilizado fue agua a 60 °C, para favorecer la formación de capa de vapor de larga duración.

Para las pruebas experimentales se empleó un dispositivo de temple a escala laboratorio y probetas cilíndricas fabricadas con acero inoxidable AISI 304, instrumentadas con termopares tipo K para adquirir historiales térmicos locales; al mismo tiempo se filmaron los eventos en la superficie de la probeta durante el proceso de temple. A partir de imágenes extraídas de los videos se calculó la velocidad de avance del frente de mojado; con las respuestas térmicas se estimó el *flux* de calor en la superficie de la probeta (mediante un *software* basado en la resolución del problema inverso de conducción de calor, *IHCP* por sus siglas en inglés) para construir curvas de ebullición inversa (*flux* de calor de la superficie en función de la temperatura de superficie, en el sentido del enfriamiento).

De los resultados se concluye que la punta de la probeta cónica provoca que la duración de la capa de vapor sea mucho menor en comparación con los valores obtenidos con las otras dos geometrías. Al incrementar la temperatura inicial de 850 a 950 °C no se modifica significativamente la pendiente de las curvas de enfriamiento en la región con presencia de capa de vapor, para todas las probetas.

La velocidad del frente de mojado es constante para las tres geometrías, para la mayor parte de la longitud de la probeta; debido a la duración de la capa de vapor, se forma un segundo frente de mojado para las probetas de punta hemiesférica y de base plana. La probeta de base plana, bajo condiciones de velocidad de flujo de 0.6 m/s y temperatura inicial de 850 °C, presenta el mayor valor de velocidad de frente de mojado. Para las tres geometrías, el aumento de velocidad de flujo tiene un mayor impacto sobre la velocidad de frente de mojado que el incremento de temperatura inicial. Por otra parte, la probeta de punta hemiesférica presenta el mayor gradiente de temperatura en dirección radial, seguido de la probeta de punta cónica y luego la probeta de base plana, por lo que los valores de rapidez de enfriamiento local máximo y de *flux* de calor en la superficie máximo siguen ese orden.

Finalmente, para las tres probetas se observó un recalentamiento en la historia térmica estimada en la superficie, asociado a la transición de la etapa de ebullición con presencia de burbujas a la etapa de convección.

1 Introducción

En este primer capítulo se describen algunos aspectos que permiten familiarizar al lector con el tema de estudio. También se definen la justificación, la hipótesis y el objetivo del presente trabajo de investigación.

1.1 Marco de trabajo

La respuesta de un componente a un tratamiento térmico de temple se caracteriza comúnmente con ayuda del análisis de curvas de enfriamiento medidas al interior de probetas de materiales metálicos. Estos ensayos se realizan generalmente en dispositivos a escala laboratorio. Dado que en la práctica se utilizan medios de temple vaporizables, las curvas de enfriamiento muestran etapas características que están asociadas con los distintos fenómenos de ebullición que ocurren en la interfase sólido-fluido.

Aunque los estándares internacionales [1-2] para ensayos de curvas de enfriamiento a escala laboratorio utilizan probetas cilíndricas de base plana, en el Depto. de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Química de la UNAM se ha mostrado que, cuando se emplea ese tipo de probetas, el avance del frente de mojado es irregular, afectando así la reproducibilidad de los experimentos. Esto se debe a la interacción entre la base de la probeta y el fluido, que modifica el patrón de flujo alrededor de la probeta.

Es por eso que en este trabajo se estudia el efecto de la geometría de la punta de una probeta cilíndrica de acero inoxidable austenítico sobre la extracción de calor durante el temple por convección forzada (flujo paralelo) en un dispositivo a escala laboratorio. En particular, se estudiaron tres geometrías de la punta: plana, cónica y hemiesférica, siendo esta última una geometría novedosa en los experimentos para análisis de curvas de enfriamiento. En los tres casos se trabajó con dos valores de temperatura inicial y dos valores de velocidad del medio de temple (agua a 60 °C).

1.2 Justificación

Los estándares internacionales para curvas de enfriamiento proponen usar probetas cilíndricas de base plana, instrumentadas con un termopar ubicado en el centro geométrico de las mismas. Sin embargo, resultados obtenidos en el Depto. de Ingeniería Metalúrgica de la UNAM sugieren que deben explorarse otras geometrías de la punta, ya que con la probeta de base plana se ha observado que el avance del frente de mojado es irregular.

1.3 Hipótesis

La probeta de punta hemiesférica generará valores intermedios de velocidad de frente de mojado con respecto a los observados con las probetas de punta cónica y de base plana.

1.4 Objetivo

El objetivo del presente trabajo es cuantificar la extracción de calor durante el temple por convección forzada de una probeta de punta hemiesférica, a escala laboratorio, y comparar los resultados obtenidos con los de las probetas de punta cónica y de base plana.

Para alcanzar el objetivo, se plantean las metas siguientes (para cada una de las tres geometrías):

- Adquirir historiales térmicos locales en diferentes posiciones a lo largo de la probeta.
- Calcular la rapidez de enfriamiento local.
- Calcular la velocidad del frente de mojado.
- Estimar los historiales térmicos y de *flux* de calor en la superficie.

2 Antecedentes

En esta sección se abordan aspectos generales del tratamiento térmico de temple por inmersión. Posteriormente se presentan conceptos de análisis de curvas de enfriamiento, frente de mojado, interacción sólido-fluido durante el temple por convección forzada y el problema inverso de conducción de calor.

2.1 Tratamiento térmico de temple

Los tratamientos térmicos son un conjunto de operaciones que involucra ciclos de calentamiento y enfriamiento controlados, para modificar la microestructura en una pieza metálica y, con ello, sus propiedades mecánicas [3].

Uno de los procesos utilizados con mayor frecuencia en la industria de los tratamientos térmicos es el temple [3]. En este tratamiento térmico se calienta la pieza de acero a la temperatura de austenización, se mantiene a esta temperatura durante un tiempo determinado, y luego se enfría rápidamente para transformar la austenita a martensita. Comúnmente, el temple se realiza por inmersión, es decir, sumergiendo la pieza en un baño líquido, el cual se encuentra agitado. Dado que al inicio del enfriamiento la pieza está a alta temperatura, se favorece la ebullición del medio de temple. Es así que durante un temple se presentan tres etapas caracterizadas por distintos mecanismos, como se muestra en la Figura 2.1 [4]:

-Etapa A: enfriamiento en presencia de una capa de vapor. En esta etapa, la temperatura del metal es tan alta que el medio de temple se vaporiza rápidamente en la superficie del metal, formando una película de vapor que rodea al metal caliente. El enfriamiento se efectúa por conducción y radiación a través de la película gaseosa y, como las películas de vapor son pobres conductoras del calor, la rapidez de enfriamiento es relativamente lenta durante esta etapa.

-Etapa B: enfriamiento en presencia de burbujas. Esta etapa empieza cuando el metal se ha enfriado a una temperatura tal que la película de vapor ya no es estable, permitiendo que el baño re-moje la superficie del metal, produciendo ebullición. El calor se elimina del metal muy rápidamente durante esta etapa.

-Etapa C: enfriamiento en presencia de convección. Esta etapa empieza cuando la temperatura de la superficie del metal no es suficientemente alta como para provocar la ebullición del medio de temple. Ya no se forma más vapor, de modo que el enfriamiento se efectúa por convección.

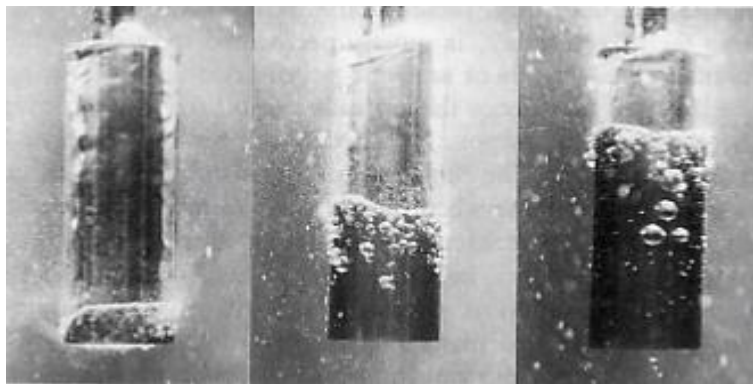


Figura 2.1 Etapas de extracción de calor durante el enfriamiento por inmersión de una probeta cilíndrica de acero al cromo-níquel en agua a 30 °C con una velocidad del medio de 0.3 m/s [4].

Por otra parte, la distribución de rapidez de enfriamiento al interior de una pieza durante el enfriamiento depende de varios factores: las propiedades termofísicas del material, la geometría de la pieza, el tipo de medio de temple y las condiciones del mismo tales como: temperatura y nivel de agitación [5]. El tipo de medio, su temperatura y el nivel de agitación del baño dan lugar a que exista una variedad de valores de la severidad de temple y del coeficiente de transferencia de calor por convección (ver Tabla 2.1 [6]).

Tabla 2.1 Diferentes medios de enfriamiento para el proceso de temple, ordenados en función de la severidad del mismo [6] (modificada).

Medio de temple	Factor H de Grossman	Coefficiente de transferencia de calor por convección, $W/(m^2 K)$
Aceite sin agitación	2.4	272.6
Aceite con agitación moderada	4.2	477.0
Aceite con buena agitación	6.0	681.4
Aceite con agitación violenta	8.4	965.3
Agua sin agitación	12.0	1362.8
Agua con agitación fuerte	18.0	2044.2
Salmuera sin agitación	24.0	2725.6
Salmuera con agitación fuerte	60.0	6814.0

En la Figura 2.2 se muestra la variación del coeficiente de transferencia de calor a lo largo de una probeta cilíndrica, en un instante durante el temple [7]. En la zona de enfriamiento en presencia de capa de vapor el coeficiente de transferencia de calor por convección muestra un valor constante; posteriormente, cuando la capa de vapor rompe y el frente de mojado comienza a ascender, el valor del coeficiente alcanza un máximo; finalmente, disminuye en la zona de convección.

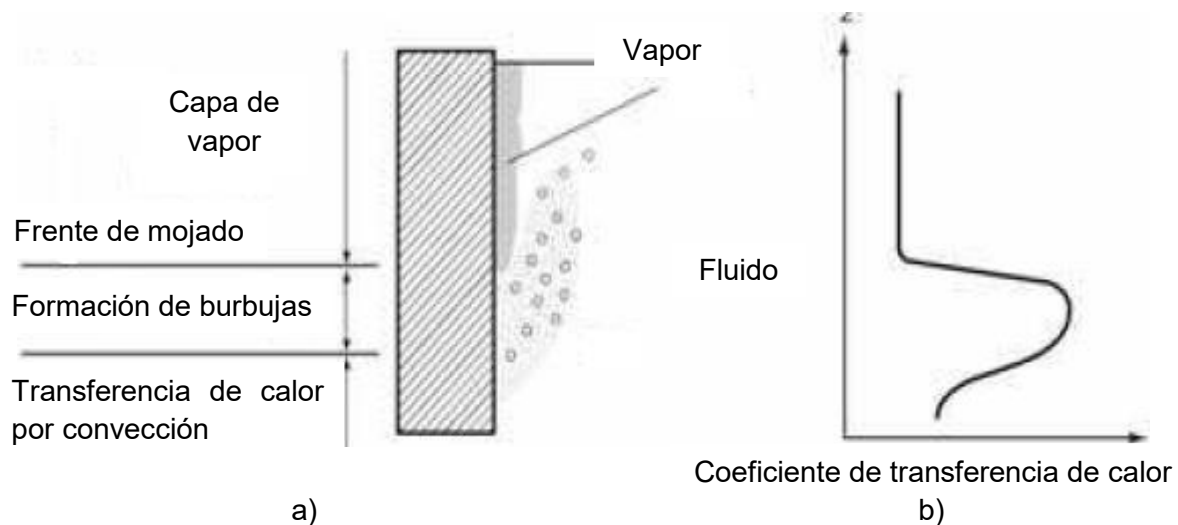


Figura 2.2 a) Etapas del proceso de temple por inmersión, b) Variación del coeficiente de transferencia de calor por convección [7].

2.2 Análisis de curvas de enfriamiento

Para estudiar la transferencia de calor durante el temple, se emplea comúnmente el análisis de curvas de enfriamiento (representación gráfica de la evolución de la temperatura local vs. tiempo), que es una metodología para caracterizar el “poder de enfriamiento” del medio de temple [8]. La forma de esta curva es indicativa de los diversos mecanismos de enfriamiento que ocurren durante el proceso de temple (etapas A, B y C), tal como se observa en la Figura 2.3 ([8] modificada).

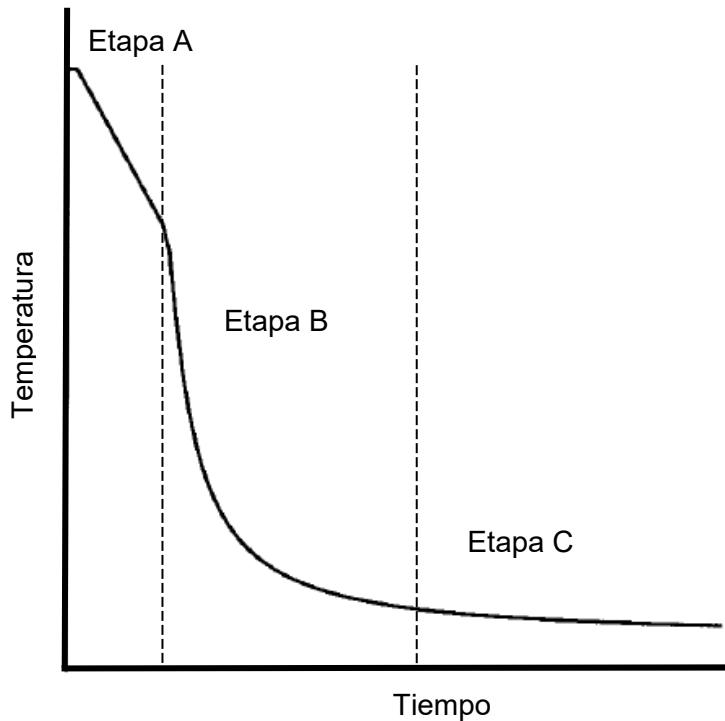


Figura 2.3 Ejemplo de una curva de enfriamiento en la que se representan las tres etapas del proceso: (A) enfriamiento en presencia de capa de vapor, (B) enfriamiento en presencia de burbujas y (C) enfriamiento por convección ([8], modificada).

Para la adquisición de historiales térmicos, es común colocar termopares en posiciones determinadas de la probeta; a partir de esos datos es posible estimar la condición de frontera térmica, expresada como el *flux* de calor en la superficie o como el coeficiente de transferencia de calor [5]. Para esto, se han desarrollado modelos matemáticos que

permiten estimar la condición de frontera térmica mediante la solución del problema inverso de conducción de calor, *IHCP* por sus siglas en inglés.

2.3 Frente de mojado

Para el caso de temple en agua, los fenómenos de ebullición locales dependen del tiempo y de la posición a lo largo de la probeta [9]. Lo anterior tiene como consecuencia que se origine un frente de mojado. El frente de mojado es la frontera móvil que separa a la capa de vapor de la zona de burbujas; dicho de otra manera, es la región de transición entre la etapa A y la etapa B.

Para medir el avance del frente de mojado se pueden utilizar las respuestas térmicas medidas en una probeta instrumentada con termopares cercanos a la superficie en distintas posiciones (ver Figura 2.4). Conociendo la distancia entre las posiciones de los termopares T_{01} y T_{03} y la diferencia entre t_s^* y t_f^* , es posible estimar la velocidad del frente de mojado. Sin embargo, debe tenerse presente que esta información es local por lo que no refleja fielmente lo que ocurre en la superficie de la probeta, a menos que ésta se construya con un material cuya conductividad térmica sea mucho mayor que la del acero.

Otra metodología para estimar la velocidad del frente de mojado consiste en videograbar el avance del mismo para posteriormente aplicar metodologías de análisis de imágenes [16].

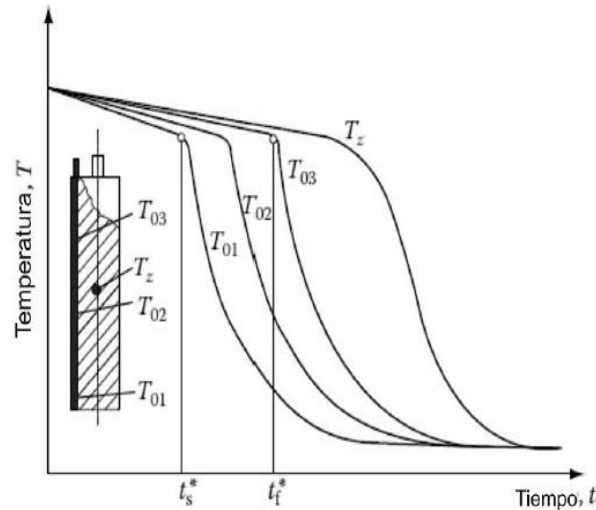


Figura 2.4 Determinación del frente de mojado mediante el uso de tres termopares cercanos a la superficie en una probeta cilíndrica [10].

2.4 Condiciones hidrodinámicas alrededor de las probetas para ensayos de temple

En los procesos de temple con agitación, la dinámica de fluidos tiene un papel importante debido a que reduce la duración de la etapa de enfriamiento en presencia de capa de vapor (Etapa A) [11]. Esto se debe a la interacción entre el sólido y el fluido.

En la Figura 2.5 se muestran las líneas de flujo alrededor de probetas de diversas geometrías para ensayos de temple, calculadas con el *software* comercial *Fluent* [12] para el caso en el que la probeta estuviera a temperatura ambiente. Se observa que, en la región cercana a la punta de la probeta con base plana (ver Figura 2.5 (a)), el impacto del fluido produce un “salto” significativo en las líneas de corriente, que provoca la separación del fluido de la superficie de la probeta. Este efecto se reduce significativamente para las otras geometrías de la punta simuladas (hemiesférica y cónica). En vista de estos resultados, se espera que la extracción de calor con la probeta de punta hemiesférica sea distinta a la medida con las otras dos geometrías. Esto constituye la aportación principal de este trabajo.

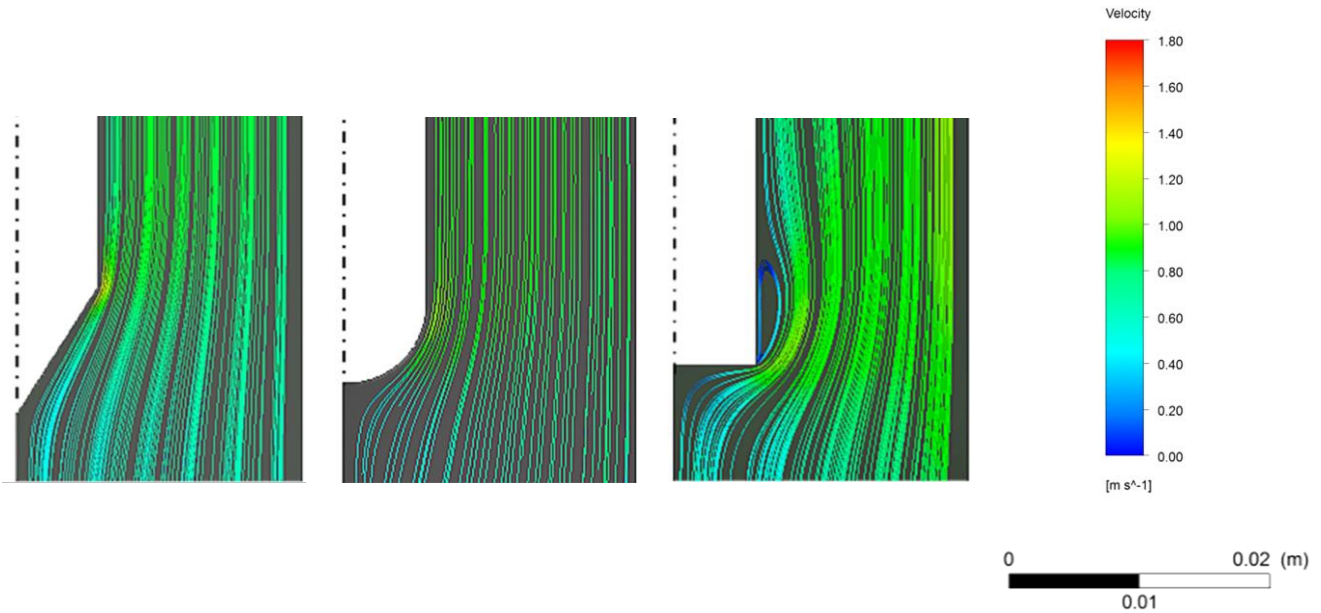


Figura 2.5 Líneas de flujo calculadas con flujo de agua a 0.6 m/s, (a) probeta de base plana, (b) probeta de punta hemisférica y (c) probeta de punta cónica [12]. Los cálculos se realizaron con un modelo matemático isotérmico.

2.5 Problema inverso de conducción de calor

El problema matemático que hace uso de la respuesta térmica local para estimar la condición de frontera activa de transferencia de calor es conocido como el Problema Inverso de Conducción de Calor (*IHCP* por sus siglas en inglés) [13], el cual es opuesto al problema directo de conducción de calor (*DHCP*), el cual consiste en calcular la evolución del campo térmico para un conjunto de condiciones iniciales y de frontera.

Con base en la definición anterior, la formulación matemática del *IHCP* aplicable en el presente trabajo parte de la ecuación gobernante en coordenadas cilíndricas, considerando flujo de calor unidimensional en dirección radial, estado inestable y propiedades térmicas variables (ver Ec. 2.1 [14]).

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho C \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad 0 \leq r \leq R, \quad 0 \leq t \leq t_f \quad (2.1)$$

La Ec. 2.1 está sujeta a las condiciones de frontera siguientes:

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

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad r = 0 \quad 0 \leq t \leq t_f \quad (2.3)$$

Y a la condición inicial:

$$T = T_0 \quad t = 0 \quad 0 \leq r \leq R \quad (2.4)$$

Debe remarcarse, que $q(t)$ es una función desconocida.

3 Metodología experimental

A continuación se describe la metodología utilizada para obtener los historiales térmicos al interior de cada probeta y las videograbaciones de los eventos sobre la superficie de la probeta durante el proceso de temple.

3.1 Probetas

La técnica experimental se basa en la grabación de la respuesta térmica de los termopares que se encuentran distribuidos a lo largo de la porción cilíndrica de las probetas, mediante un sistema de adquisición de datos.

Los experimentos se realizaron con probetas cilíndricas, fabricadas con acero AISI 304 (composición química nominal: 0.08 %C, 2.00 % Mn, 0.04 %P, 0.03 %S, 0.75 %Si, 18-20.00%Cr, 8-11.00 %Ni [15]), instrumentadas con termopares tipo K; tres distribuidos a lo largo de la longitud de la probeta (a 2.38 mm de la superficie) y uno más colocado en el centro geométrico de la misma (ver Figuras 3.1 a 3.3).

Para que las probetas tuvieran la misma cantidad de energía térmica al inicio de los experimentos realizados con un mismo valor de temperatura inicial, se aseguró que tuvieran la misma masa; para ello, se calculó del volumen de la punta y de la sección del cople que los une a una lanza (para transportar a la probeta durante los experimentos) ajustándose así la altura de la sección cilíndrica. Así, la masa de cada probeta es de 55.0 g.

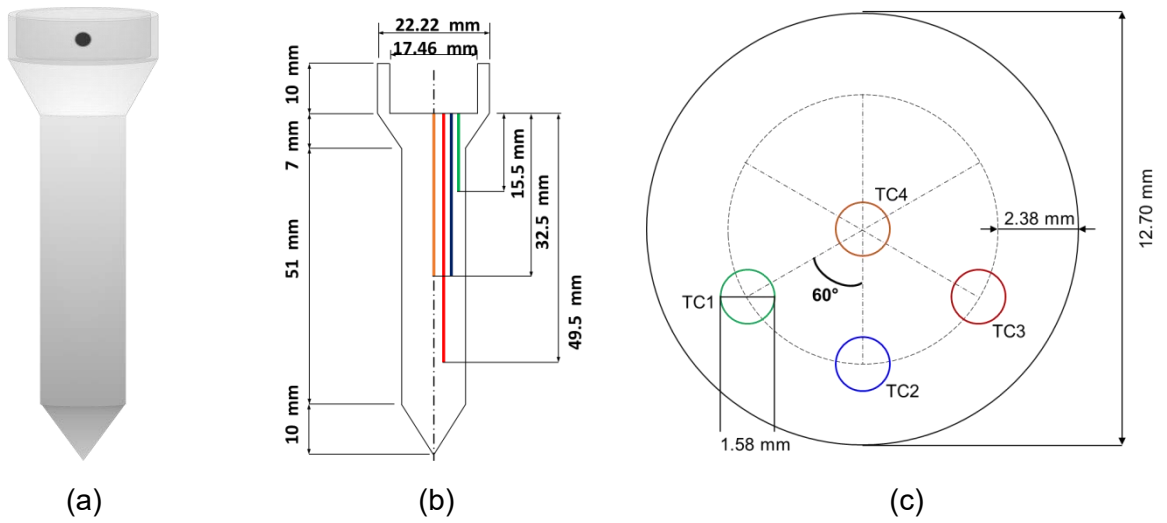


Figura 3.1 Probeta cilíndrica con punta cónica: (a) vista isométrica, (b) vista lateral y (c) vista superior.

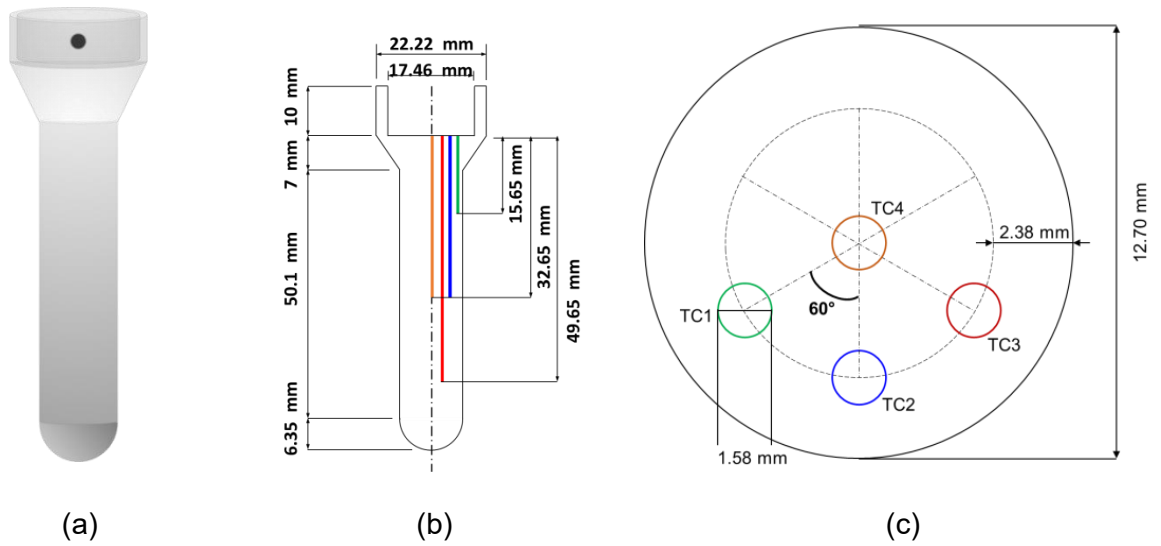


Figura 3.2 Probeta cilíndrica con punta hemisférica: (a) vista isométrica, (b) vista lateral y (c) vista superior.

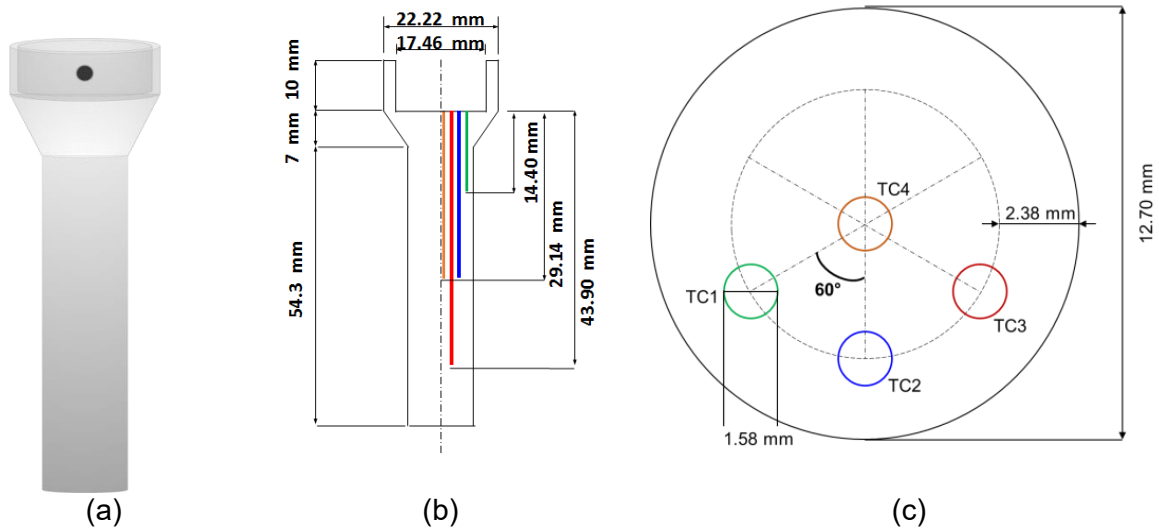


Figura 3.3 Probeta cilíndrica de base plana: (a) vista isométrica, (b) vista lateral y (c) vista superior.

3.2 Dispositivo y condiciones experimentales

En la Figura 3.4 se muestra un esquema del equipo experimental. El agua contenida en el tanque es impulsada por una bomba de 0.5 HP, el flujo es regulado con un rotámetro (*Blue White*, modelo F420, escala de 0-100 L/min) y circula por un tubo de acrílico de 45 mm de diámetro interno y 1.85 m de longitud. Esto último asegura que el perfil de velocidad del fluido esté completamente desarrollado antes de impactar la probeta en la zona de prueba. Después de circular alrededor de la probeta, el agua se captura y recircula al depósito principal. Para calentar el agua a la temperatura de operación se empleó una resistencia eléctrica sumergible mientras que para calentar la probeta se empleó un horno de resistencia tipo libro.

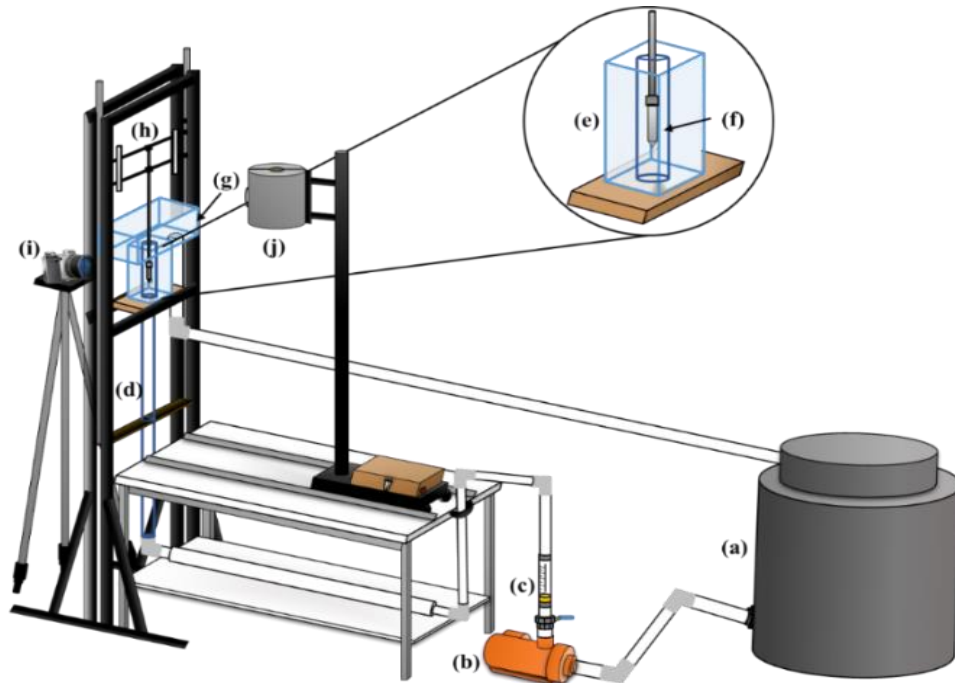


Figura 3.4 Dispositivo experimental: (a) depósito de agua, (b) bomba, (c) rotámetro, (d) tubo de acrílico, (e) tanque de vidrio, (f) probeta, (g) depósito secundario, (h) soporte móvil de la probeta, (i) videocámara y (j) horno tipo libro [16].

El sistema de adquisición de datos está compuesto de una computadora portátil, un adquisidor de datos (marca *IOTECH* modelo *TempScan 1100*) y termopares tipo K con sus correspondientes extensiones. Para registrar los eventos en la superficie de la probeta durante el proceso de enfriamiento se grabaron videos con una cámara digital *reflex* (*Samsung* modelo *NX30*) que se colocó frente a la posición final de la probeta (posición de inmersión). Previo a la realización de los experimentos, los termopares se calibraron siguiendo la metodología descrita en [16], ver Apéndice A.

Las variables de interés para esta investigación son: la geometría de la punta de la probeta, la temperatura inicial de la probeta y la velocidad del medio de temple. Se estudiaron tres tipos de geometría (punta cónica, punta hemiesférica y base plana), dos valores de temperatura inicial (850 y 950°C) y dos valores de velocidad de flujo de agua (0.2 y 0.6 m/s) [17]; la temperatura del medio de temple se fijó a 60°C, para favorecer la estabilidad de la capa de vapor. La matriz experimental se presenta en la Tabla 3.1. Los

experimentos se llevaron a cabo por triplicado para asegurar la reproducibilidad de los mismos.

Tabla 3.1 Condiciones de trabajo experimentales para las tres geometrías (punta cónica, punta hemiesférica y base plana).

Temperatura inicial (°C)	Velocidad de flujo (m/s)	
850 ± 5	0.2 ± 0.01	0.6 ± 0.03
950 ± 5	0.2 ± 0.01	0.6 ± 0.03

Una vez obtenidos los historiales térmicos de la matriz experimental, se filtró el ruido provocado por la inestabilidad de la señal asociado con la corriente eléctrica con el *software SigmaPlot* v. 12.3, empleando un suavizador *Bisquare* para las geometrías cónica y plana, el cual realiza una regresión polinomial (grado del polinomio 2) ponderando los valores calculados usando una función de distribución normal; para la geometría de punta hemiesférica se utilizó un suavizador *Negative Exponencial* con diferencia en la regresión polinomial (grado del polinomio 4).

4 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos con el trabajo experimental: historiales térmicos e imágenes extraídas de las videograbaciones de los experimentos.

4.1 Efecto de la geometría de la punta sobre el comportamiento de las curvas de enfriamiento

En la Figura 4.1 se muestran los historiales térmicos locales (curva de enfriamiento local) para los termopares cercanos a la superficie (TC1, TC2 y TC3; referirse a la Figura 3.1) durante un experimento a 850°C y velocidad de flujo de 0.2 m/s para la probeta de punta hemiesférica. Cabe aclarar que los historiales térmicos se midieron al interior de la probeta mientras que las videograbaciones se tomaron de la superficie de la probeta. El tiempo para llevar la probeta del horno a la posición de prueba se estimó en 1.0 s (para todos los experimentos). En la primera parte de todas las curvas de enfriamiento se observa una región donde la temperatura local permanece constante, indicando que no hay extracción de calor; esto está asociado con el hecho de que la probeta aún se encontraba dentro del horno. Una vez que la probeta se sumerge en el medio de enfriamiento se forma una capa de vapor que la rodea, provocando un decremento suave en la temperatura local. Posteriormente, cuando la energía almacenada al interior de la probeta no es suficiente para mantener la película de vapor se forma un frente de mojado que asciende desde la base de la probeta y que provoca un descenso súbito de temperatura local. Finalmente, el agua deja de evaporarse, por lo que el enfriamiento se lleva a cabo por convección con el agua en estado líquido, lo que produce una disminución suave de las curvas de enfriamiento locales. El termopar TC1 muestra un comportamiento distinto al descrito previamente; esto se debe a que en la parte superior de la probeta se formó un segundo frente de mojado (descendente) que modifica el historial térmico en esa posición.

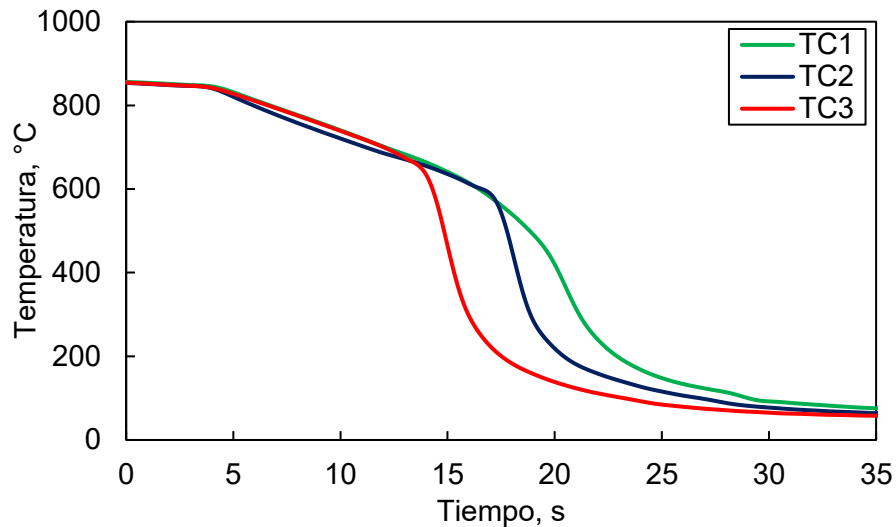


Figura 4.1 Historial térmico, obtenido con la probeta de punta hemiesférica, durante el temple con agua a 60°C fluyendo a una velocidad de 0.2 m/s y una temperatura inicial de la probeta de 850°C.

En la Figura 4.2 se presenta el historial térmico para un experimento realizado con la probeta de punta cónica en condiciones análogas al descrito previamente. El comportamiento general es similar al de la probeta de punta hemiesférica, pero, a medida que el frente de mojado se mueve en forma ascendente, provoca una disminución de temperatura local en el orden siguiente: primero la zona cercana al termopar TC3, seguida de TC2 y finalmente TC1. Cuando la evaporación cesa en la superficie, el enfriamiento local es mucho más suave debido a que en la superficie la probeta se enfría por el mecanismo de convección. Como esta probeta no favorece la formación de un segundo frente de mojado, el historial térmico medido con TC1 sigue la forma de los medidos con TC2 y TC3.

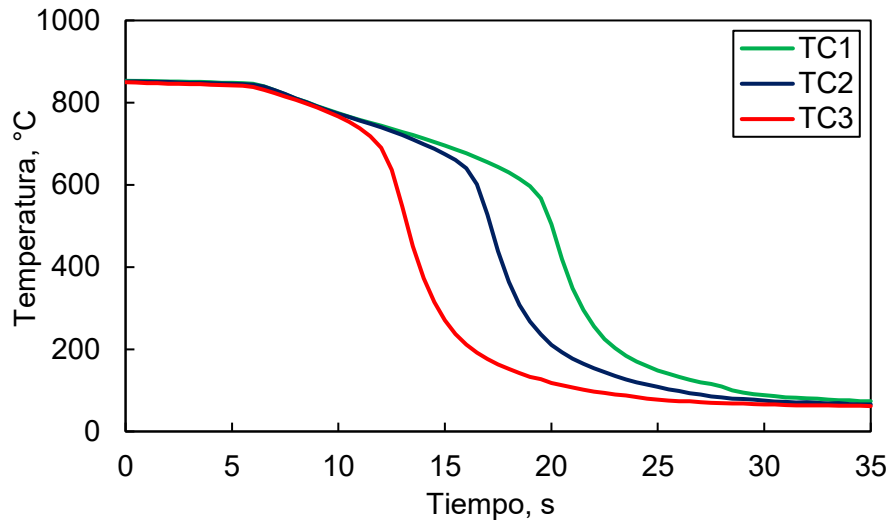


Figura 4.2 Historial térmico, obtenido con la probeta de punta cónica, durante el temple con agua a 60°C fluyendo a una velocidad de 0.2 m/s y una temperatura inicial de la probeta de 850°C.

En la Figura 4.3 se grafican los historiales térmicos para un experimento realizado a 850°C y velocidad de flujo de 0.2 m/s, con la probeta de base plana. Nuevamente, cuando la probeta llega a la posición de prueba está cubierta por una película de vapor, provocando un decremento suave en la temperatura local; comparando esta etapa con sus equivalentes para las otras dos geometrías se observa que la capa de vapor dura mayor tiempo. Este prolongado tiempo de duración de la película de vapor también permite la formación de un segundo frente de mojado descendente, que alcanza a llegar a la zona cercana al termopar colocado en la parte superior (TC1), modificando drásticamente el comportamiento de la curva de enfriamiento local correspondiente.

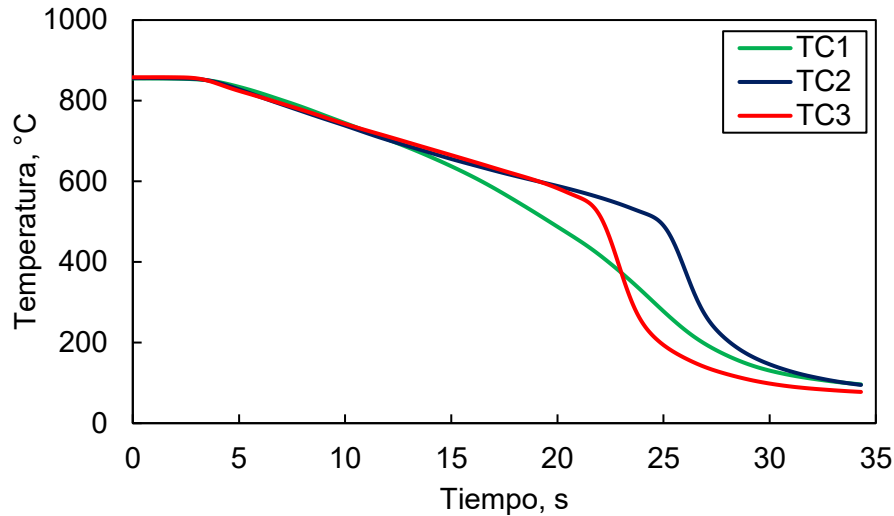


Figura 4.3 Historial térmico, obtenido con la probeta de base plana, durante el temple con agua a 60°C fluyendo a una velocidad de 0.2 m/s y una temperatura inicial de la probeta de 850°C.

En la Figura 4.4 se muestran los historiales térmicos para las tres geometrías, para experimentos realizados a temperatura inicial de 850 °C y velocidad del agua de 0.2 m/s. Se observa que la evidencia de la etapa de enfriamiento en presencia de burbujas inicia a menor tiempo y mayor temperatura local para la probeta de punta cónica, seguida de la probeta de punta hemiesférica y luego la probeta de base plana; debe recordarse que los eventos en la superficie están relacionados estrictamente con la temperatura de superficie, pero el historial térmico local es un indicativo de esos eventos. El comportamiento observado se debe a que la punta cónica favorece la ruptura de la capa de vapor, dando paso a la formación del frente de mojado. La probeta de punta hemiesférica provoca un enfriamiento mucho más suave y, por consiguiente, una mayor duración de la capa de vapor. Por otra parte, la interacción entre el fluido y la base de la probeta de base plana distorsiona el flujo en esa región lo que resulta en mucho mayor duración de la capa de vapor.

Dado que la probeta sigue enfriándose durante la etapa de ebullición con capa de vapor, a menor tiempo de presencia de la capa de vapor mayor es la temperatura a la que comienza la etapa de ebullición con burbujas; es por esto, que este valor de temperatura

es mayor para la probeta de punta cónica (que tiene una capa de vapor de corta duración) que para las otros dos tipos de probeta.

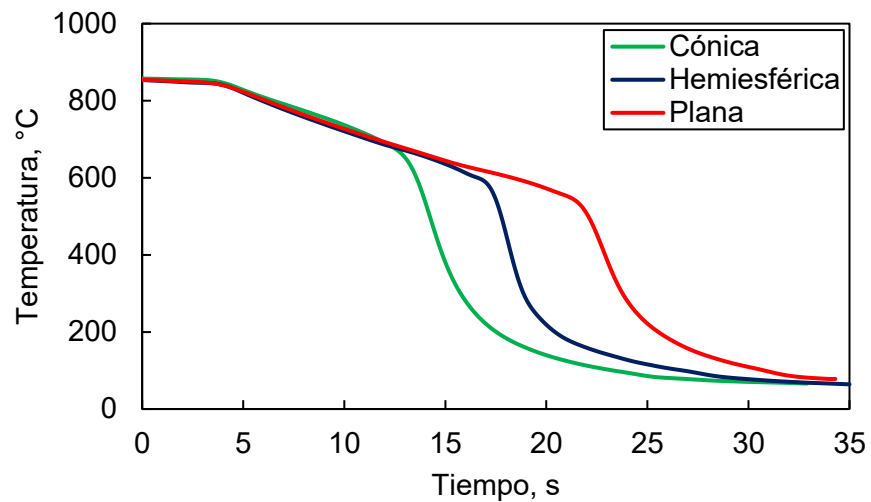
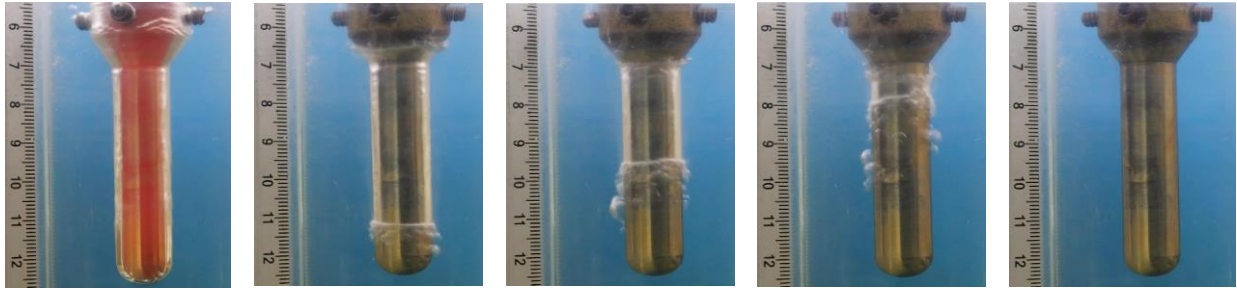


Figura 4.4 Historiales térmicos en la posición del termopar TC2 para temperatura inicial de 850°C y flujo de 0.2 m/s para las tres geometrías.

En las Figuras 4.5 a 4.7 se muestran secuencias de imágenes de las tres probetas, para experimentos realizados a temperatura inicial de 850 °C y velocidad de agua de 0.2 m/s. El frente de mojado avanza simétricamente en las probetas hemiesférica y de punta cónica pero no en la probeta de base plana. En las imágenes se observa que en las probetas de punta hemiesférica y de base plana se genera un segundo frente de mojado.



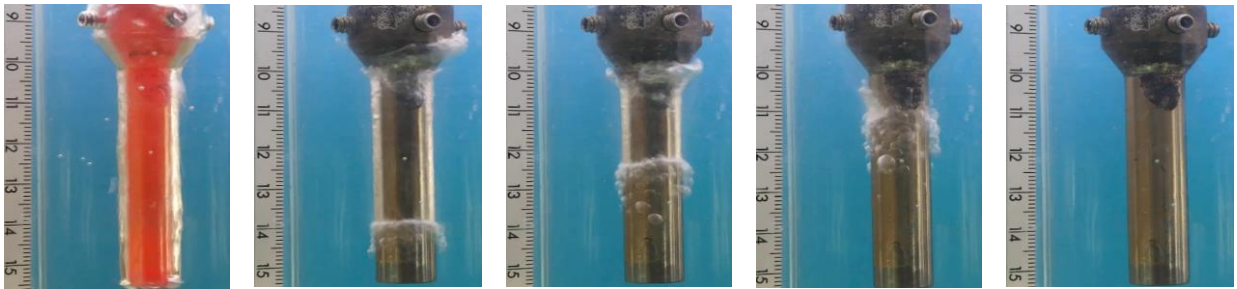
(a) (b) (c) (d) (e)

Figura 4.5 Imágenes de la superficie de la probeta de punta hemiesférica, durante el temple con agua a 60 °C fluyendo a una velocidad de 0.2 m/s y una temperatura inicial de la probeta de 850°C. Las imágenes corresponden: (a) 0.0 s, (b) 9.6 s, (c) 12.6 s, (d) 15.2 s y (e) 22.0 s, con respecto al instante en el que la probeta llega a la posición de prueba.



(a) (b) (c) (d) (e)

Figura 4.6 Imágenes de la superficie de la probeta de punta cónica, durante el temple con agua a 60 °C fluyendo a una velocidad de 0.2 m/s y una temperatura inicial de la probeta de 850°C. Las imágenes corresponden: (a) 0.0 s, (b) 5.0 s, (c) 9.0 s, (d) 12.4 s y (e) 24.5 s, con respecto al instante en el que la probeta llega a la posición de prueba.



(a) (b) (c) (d) (e)

Figura 4.7 Imágenes de la superficie de la probeta de base plana, durante el temple con agua a 60 °C fluyendo a una velocidad de 0.2 m/s y una temperatura inicial de la probeta de 850°C. Las imágenes corresponden: (a) 0.0 s, (b) 11.8 s, (c) 15.2 s, (d) 23.6 s y (e) 26.5 s, con respecto al instante en el que la probeta llega a la posición de prueba.

4.2 Efecto de la velocidad de flujo sobre las curvas de enfriamiento

En las Figuras 4.8 a 4.10 se presentan gráficos para mostrar el efecto de la velocidad de flujo en los historiales térmicos locales para cada una de las geometrías estudiadas. Al comparar estas figuras se observa que al aumentar la velocidad del medio de temple, la extracción de calor se lleva a cabo en un menor tiempo. Respecto a las probetas de punta hemiesférica y de base plana, al aumentar la velocidad del medio de temple se reduce significativamente el tiempo de la etapa de enfriamiento en presencia de capa de vapor (ver Figuras 4.9 y 4.10), mientras que para la probeta de punta cónica este efecto no es significativo. Esto último refuerza la observación de que la punta actúa como un extractor de calor eficiente. Otro punto importante a resaltar es que al aumentar la velocidad del medio de temple se incrementa la temperatura que indica el inicio de la etapa de nucleación y crecimiento de burbujas. Este efecto es mayor para la probeta de punta hemiesférica: a la velocidad de 0.6 m/s esta etapa inicia aproximadamente a 691 °C mientras que a velocidad de 0.2 m/s comienza a una temperatura cercana a 577 °C. Para la probeta de punta cónica, la diferencia de temperatura es menor en comparación con la probeta de punta hemiesférica: a velocidad de 0.6 m/s la temperatura de inicio es de 786 °C y a velocidad de 0.2 m/s esta temperatura es cercana a 744 °C. Y para la probeta de base plana, las temperaturas son 648 °C y 618 °C, para velocidades de 0.6 y 0.2 m/s, respectivamente.

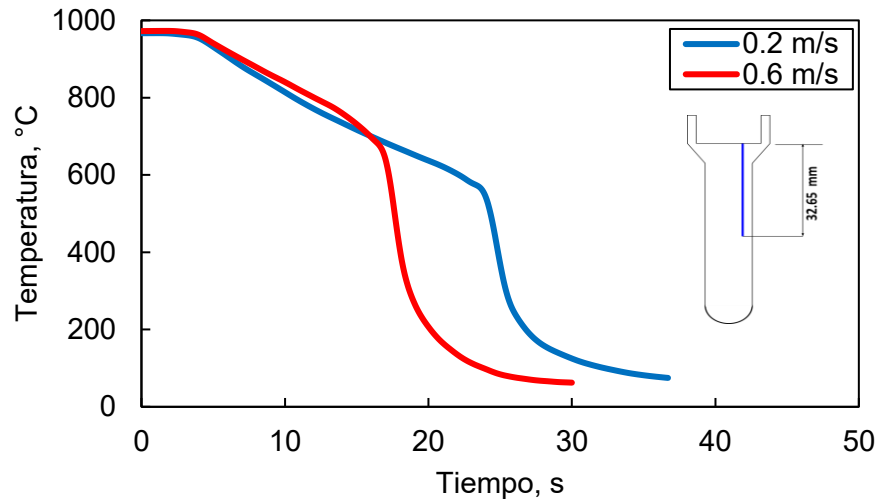


Figura 4.8 Historial térmico para la probeta de punta hemisférica en la posición del termopar TC2, temperatura inicial de 950 °C y ambas velocidades de flujo estudiadas.

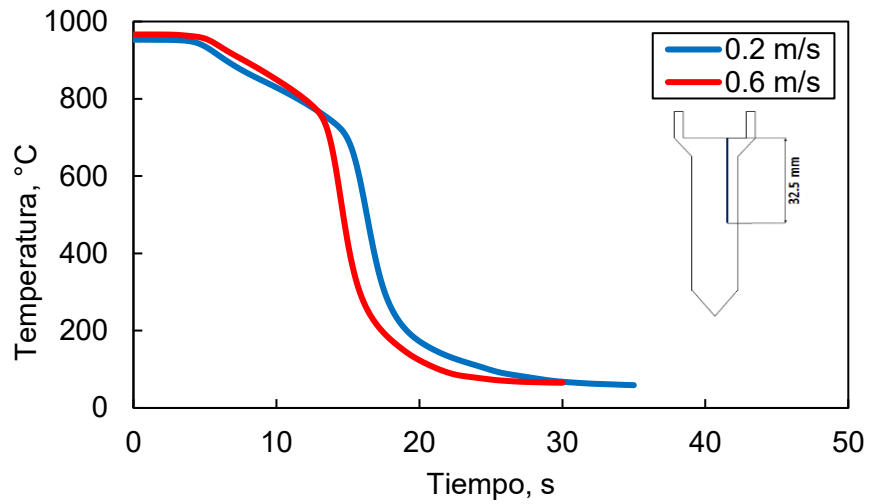


Figura 4.9 Historial térmico para la probeta de punta cónica en la posición del termopar TC2, temperatura inicial de 950 °C y ambas velocidades de flujo estudiadas.

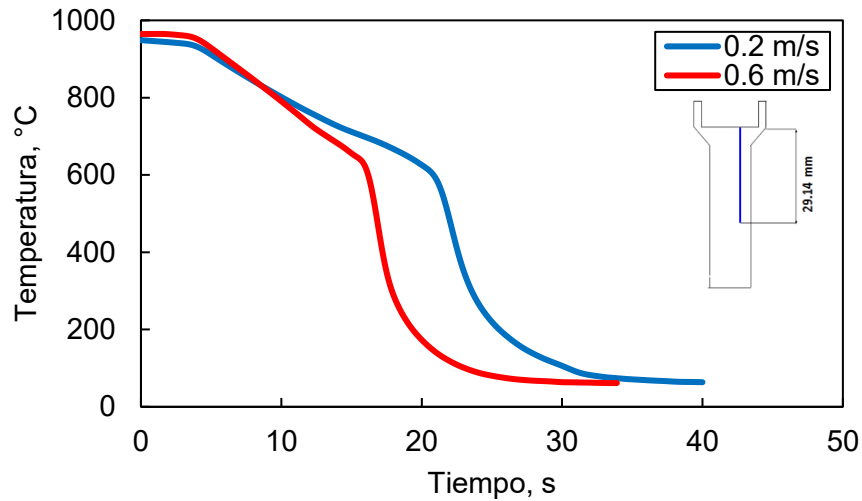
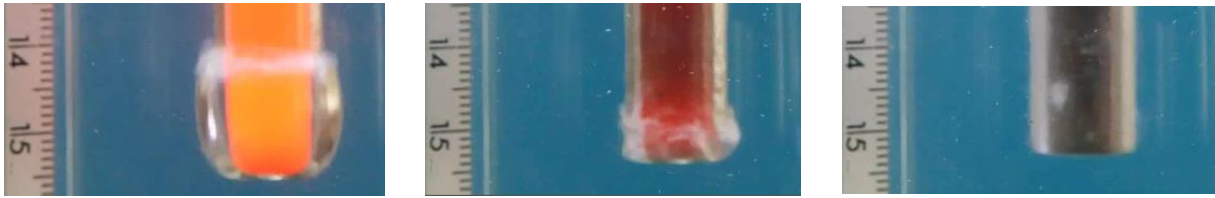


Figura 4.10 Historial térmico para la probeta de base plana en la posición del termopar TC2, temperatura inicial de 950 °C y ambas velocidades de flujo estudiadas.

La interacción entre el fluido en movimiento y la probeta es distinta para cada tipo de geometría. En la Figura 4.11 se muestra una secuencia de imágenes en la región cercana a la punta de la probeta de base plana (temperatura inicial 950 °C, velocidad de flujo 0.6 m/s). Como consecuencia de la interacción sólido-fluido la película de vapor se expande en esa zona, posiblemente debido a que se forma una región de baja presión. Al avanzar el enfriamiento de la probeta esta región de la capa de vapor se adelgaza hasta desaparecer. Esto retarda la formación de la siguiente etapa del enfriamiento (nucleación y crecimiento de burbujas). En la Figura 4.12 se observa que la probeta de punta hemisférica reduce este engrosamiento de la capa de vapor, y finalmente, para la probeta de punta cónica este efecto no se presenta (Figura 4.13). Estas observaciones ayudan a explicar las diferencias en la duración de la etapa con presencia de capa de vapor al usar probetas de distinta geometría.

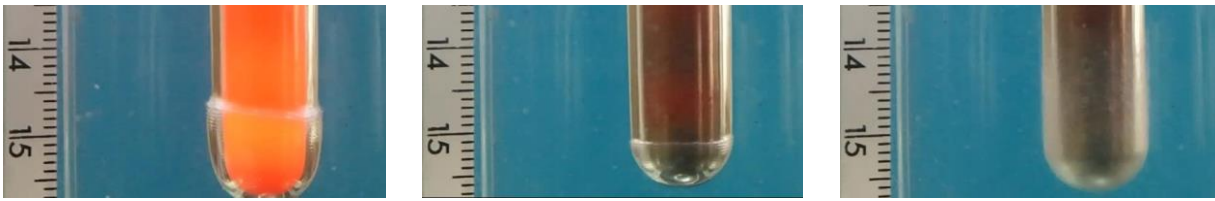


(a)

(b)

(c)

Figura 4.11 Imágenes de la zona cercana a la punta de la probeta de base plana enfriada desde temperatura inicial de 950 °C, con velocidad del medio de temple de 0.6 m/s. Las imágenes corresponden: (a) 0.0 s, (b) 3.8 s y (c) 7.5 s, con respecto al instante en el que la probeta llega a la zona de prueba.

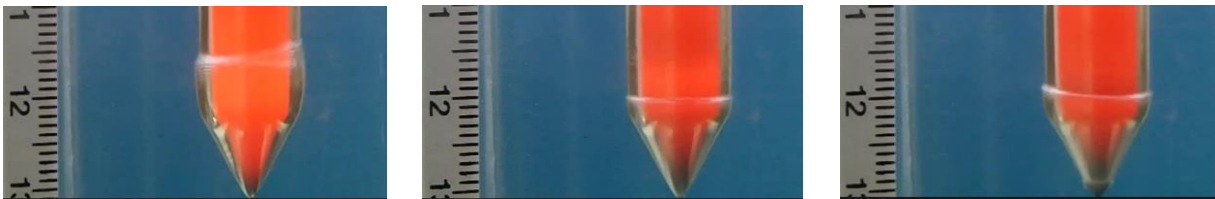


(a)

(b)

(c)

Figura 4.12 Imágenes de la zona cercana a la punta de la probeta de punta hemisférica enfriada desde temperatura inicial de 950 °C, con velocidad del medio de temple de 0.6 m/s. Las imágenes corresponden: (a) 0.0 s, (b) 6.2 s y (c) 8.2 s, con respecto al instante en el que la probeta llega a la zona de prueba.



(a)

(b)

(c)

Figura 4.13 Imágenes de la zona cercana a la punta de la probeta de punta cónica enfriada desde temperatura inicial de 950 °C, con velocidad del medio de temple de 0.6 m/s. Las imágenes corresponden: (a) 0.0 s, (b) 0.652 s y (c) 0.9 s, con respecto al instante en el que la probeta llega a la zona de prueba.

4.3 Efecto de la temperatura inicial sobre las curvas de enfriamiento

En la Figura 4.14 se grafican los historiales térmicos medidos al interior de la probeta de punta hemiesférica para dos valores de temperatura inicial y velocidad de flujo de 0.6 m/s. Para la prueba realizada a 850°C, la temperatura a la que la curva local muestra evidencia del cambio a la etapa de nucleación y crecimiento de burbujas se presenta aproximadamente a 650°C y un tiempo de 10.7 s, mientras que al incrementar la temperatura inicial a 950°C, los valores son 663°C y 16.8 s. Como puede observarse, a menor temperatura inicial la duración de la capa de vapor disminuye, lo que resulta en un menor enfriamiento de la probeta para el instante en el que rompe la capa de vapor. Cabe mencionar que, en la etapa de enfriamiento en presencia de capa de vapor, las curvas para ambas temperaturas muestran pendientes diferentes. En particular, el enfriamiento es ligeramente más rápido al disminuir la temperatura inicial.

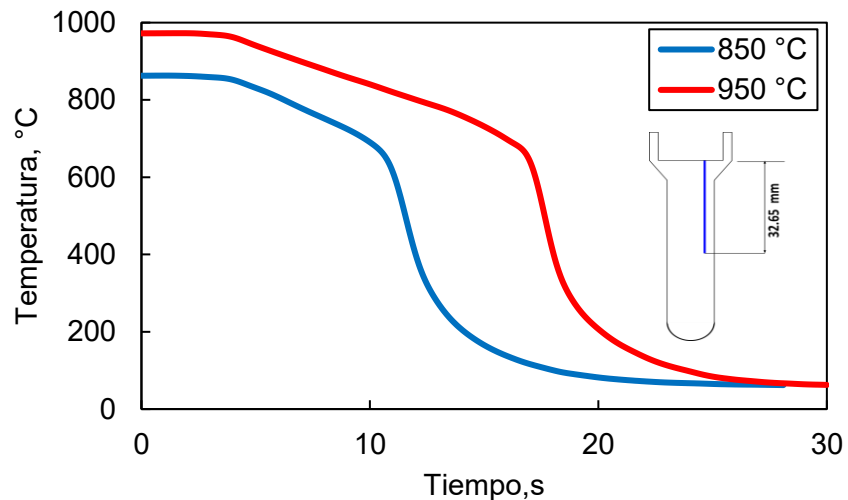


Figura 4.14 Historiales térmicos para la probeta de punta hemiesférica en la posición del termopar TC2, para la velocidad de flujo de 0.6 m/s y ambos valores de temperatura inicial.

Los historiales térmicos obtenidos con la probeta de punta cónica para dos valores de temperatura inicial y velocidad de flujo de 0.6 m/s se grafican en la Figura 4.15. En el experimento realizado a temperatura inicial de 850 °C, la temperatura a la que se observa evidencia del inicio de la etapa de nucleación y crecimiento de burbujas es de

aproximadamente 688 °C y ocurre a un tiempo de 10.7 s, mientras que para la prueba con temperatura inicial de 950 °C esta etapa comienza cerca de 737 °C a un tiempo de 12.3 s. La diferencia en los valores de tiempo para el rompimiento de la capa de vapor en una posición dada se debe a que al incrementar la temperatura inicial se aumenta el contenido de energía en la probeta, lo que a su vez extiende la duración de la capa de vapor. Con esta probeta, las curvas en la zona de capa de vapor tienen pendientes similares.

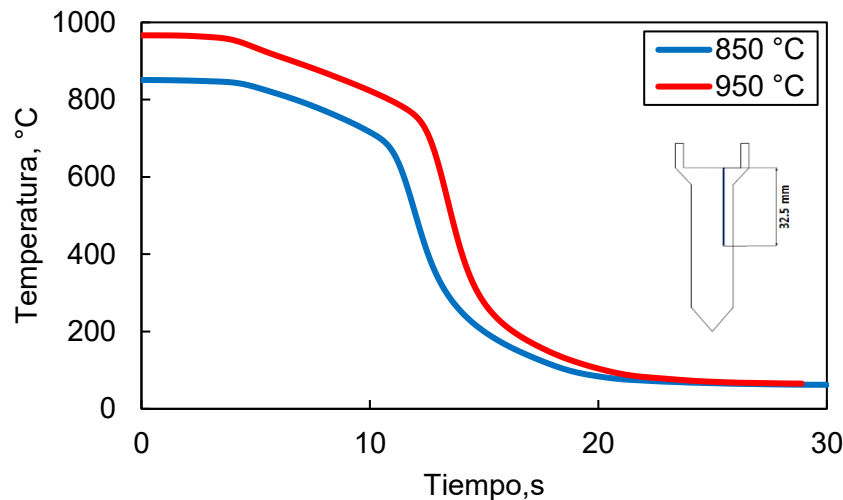


Figura 4.15 Historiales térmicos para la probeta de punta cónica en la posición del termopar TC2, para la velocidad de flujo de 0.6 m/s y ambos valores de temperatura inicial.

En la Figura 4.16 se muestran los resultados para la probeta de base plana para velocidad de flujo de 0.6 m/s y los dos valores de temperatura inicial. Para la prueba realizada a temperatura inicial de 850 °C, la temperatura a la que se aprecia evidencia del inicio de la etapa de nucleación y crecimiento de burbujas es de aproximadamente 612°C a un tiempo de 12.6 s, mientras que para la prueba a temperatura inicial de 950°C, esto ocurre cerca de 648°C a los 15.3 s. La forma de los historiales térmicos es semejante al que se observó con la probeta de punta cónica pero la duración de la capa de vapor es mucho mayor.

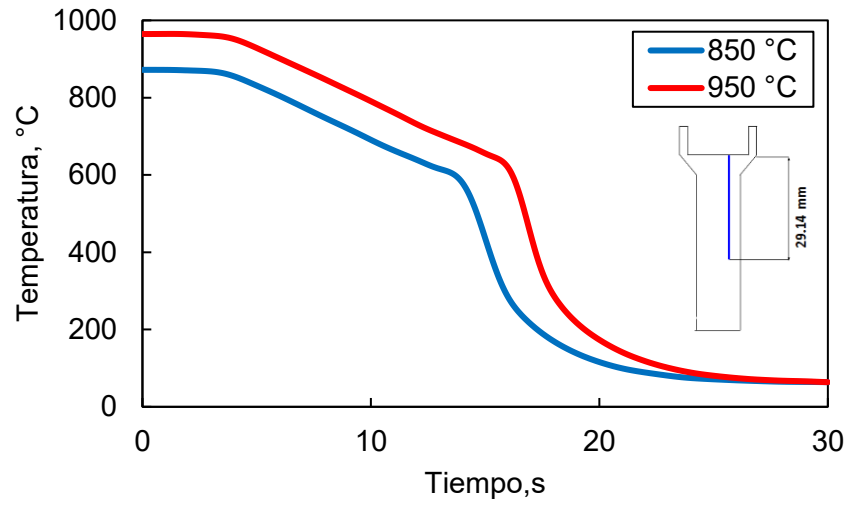


Figura 4.16 Historiales térmicos para la probeta de base plana en la posición del termopar TC2, para la velocidad de flujo de 0.6 m/s y ambos valores de temperatura inicial.

5 Análisis de resultados

Para analizar los resultados obtenidos experimentalmente, en esta sección se presentan curvas de rapidez de enfriamiento, velocidad del frente de mojado, historiales de *flux* de calor y curvas de ebullición inversa para cada una de las geometrías de las probetas bajo las condiciones experimentales estudiadas.

5.1 Rapidez de enfriamiento

Para analizar las curvas de enfriamiento, se usó, en primera instancia, la rapidez de enfriamiento local, que se obtiene derivando numéricamente las curvas de enfriamiento con respecto al tiempo para cada pareja de datos, como se muestra en la ecuación 5.1:

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

Las gráficas de las Figuras 5.1 y 5.2 muestran la historia de rapidez de enfriamiento para la posición del termopar TC2 para cada una de las geometrías estudiadas (referirse a las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3) durante el temple en agua a 60 °C con valores de velocidad de flujo de 0.2 y 0.6 m/s, respectivamente, y temperatura inicial de 950°C. En ambos casos, las curvas presentan inicialmente un comportamiento horizontal (rapidez de enfriamiento muy cercana a cero) debido a que no hay extracción de calor. Posteriormente, se observa un ligero descenso provocado por la inmersión de la probeta en el medio de temple. Enseguida se aprecia una región horizontal donde la rapidez de enfriamiento se mantiene casi constante debido a la presencia de la película de vapor sobre la superficie de la probeta, la cual actúa como aislante térmico. Inmediatamente después se observa un aumento súbito en la rapidez de enfriamiento, asociado con la formación de burbujas, hasta alcanzar el valor máximo (en valor absoluto) después del cuál, la rapidez de enfriamiento disminuye hasta llegar a cero cuando la probeta se equilibra térmicamente con el medio de temple. Es importante mencionar que la información capturada por los termopares internos está desfasada con respecto a los eventos en la superficie de la

probeta debido a la resistencia térmica por conducción existente entre la superficie y la posición del termopar.

En la Figura 5.1 se comparan las curvas de rapidez de enfriamiento medidas en la posición del termopar TC2 para experimentos con velocidad de flujo de 0.2 m/s y temperatura inicial de 950 °C. Con este gráfico es posible determinar el orden de la duración de la etapa de capa de vapor (que termina al observarse el segundo cambio de pendiente en las curvas) para cada geometría de la punta (de menor a mayor): cónica, plana, hemiesférica. Por otra parte, el orden de los valores de máxima rapidez de enfriamiento local es: hemiesférica (209.0 °C/s), cónica (197.0 °C/s), plana (146.0 °C/s).

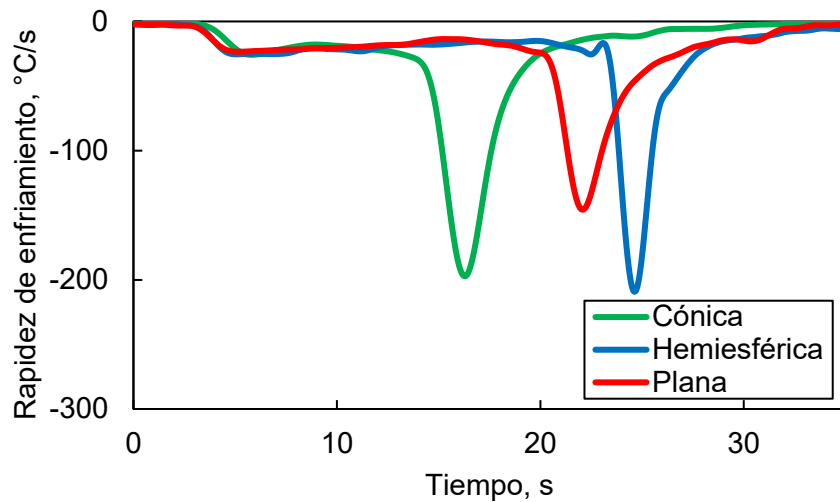


Figura 5.1 Rapidez de enfriamiento, en función del tiempo, para la posición del termopar TC2 durante el temple con una velocidad de flujo de 0.2 m/s y temperatura inicial de 950 °C, para las tres geometrías.

En el gráfico de la Figura 5.2 (velocidad de flujo de 0.6 m/s y temperatura inicial de 950 °C) se observa que, para las probetas de punta hemiesférica y base plana, la duración de la capa de vapor es similar. La máxima rapidez de enfriamiento (en valor absoluto) corresponde a la probeta con punta hemiesférica (269 °C/s), seguida por la probeta con punta cónica (239 °C/s) y, finalmente, la probeta de base plana (222 °C/s).

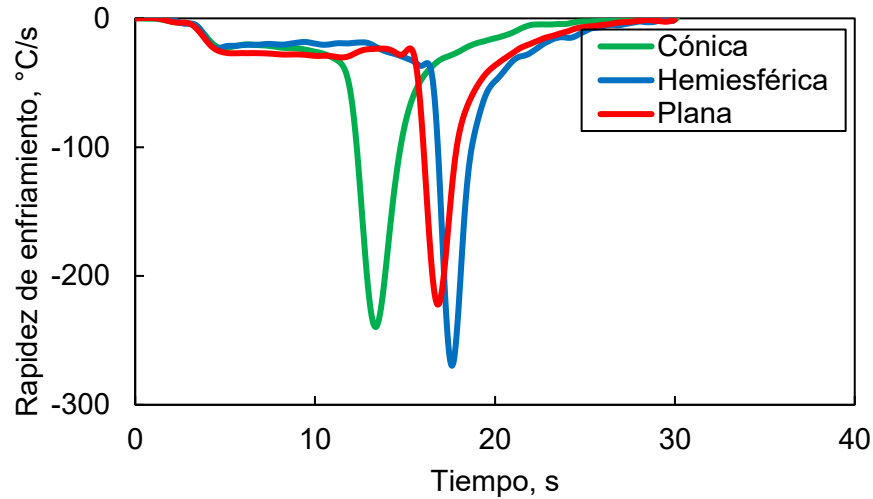


Figura 5.2 Rapidez de enfriamiento, en función del tiempo, para la posición del termopar TC2 durante el temple con una velocidad de flujo de 0.6 m/s y temperatura inicial de 950 °C, para las tres geometrías.

Al comparar los gráficos anteriores entre sí se observa que al aumentar la velocidad de flujo se reducen significativamente los tiempos de enfriamiento y se incrementa la rapidez de enfriamiento máxima que se alcanza para los tres tipos de probeta estudiadas. Esto se debe a que la renovación del fluido en contacto con la superficie de la probeta ocurre con una mayor rapidez, promoviendo así una mayor extracción de calor.

En la Tabla 5.1 se presentan los valores máximos de rapidez de enfriamiento para todos los experimentos. Como ya se ha mencionado, la probeta de punta hemiesférica presenta los mayores valores de rapidez de enfriamiento en comparación con las otras dos geometrías de probeta.

Tabla 5.1 Rapidez de enfriamiento máxima (en valor absoluto) para las tres geometrías estudiadas; temperatura inicial de 950 °C y ambas velocidades de flujo de agua.

Probeta	Punta hemiesférica (°C/s)	Punta cónica (°C/s)	Base plana (°C/s)
0.2 m/s	209.0	197.2	145.7
0.6 m/s	269.7	239.4	222.1

Para explicar el orden de los valores máximos de rapidez de enfriamiento observado en las Figuras 5.1 y 5.2, se estimaron los gradientes térmicos en las direcciones axial y radial como se muestra en la Figura 5.3.

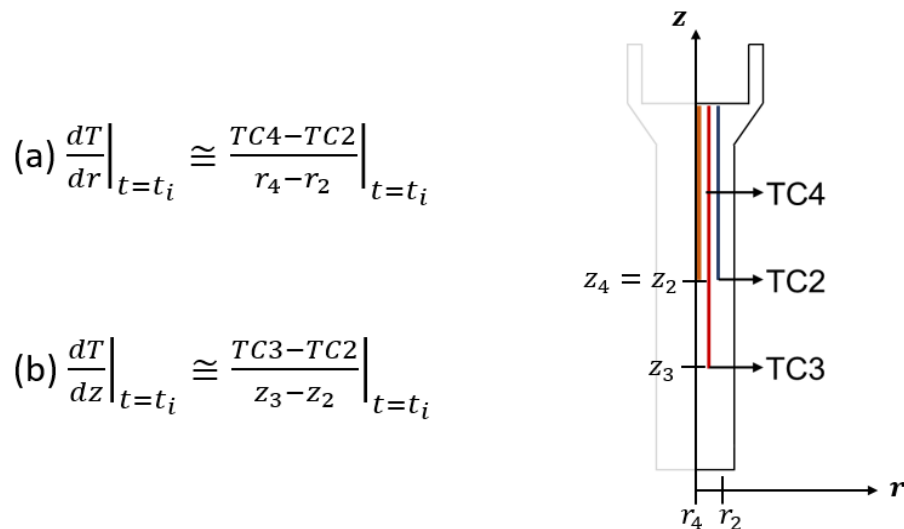


Figura 5.3 Cálculo de: (a) gradiente térmico radial y (b) gradiente térmico axial. En el lado derecho de la imagen se muestra, como ejemplo, la distribución de termopares en la probeta de base plana.

En las Figuras 5.4 a 5.6 se presentan los gradientes térmicos (axial y radial) en función del tiempo para las tres geometrías de punta, calculados con las ecuaciones que se muestran en la Figura 5.3, en la posición de TC2. En todos los casos el gradiente térmico en dirección radial comienza cuando la probeta es introducida al medio de temple y

permanece constante hasta que el frente de mojado pasa por la posición del termopar TC2; en contraste, el gradiente térmico en dirección axial presenta valores cercanos a cero durante un mayor tiempo.

Los valores máximos del gradiente térmico en dirección axial son similares para las tres geometrías, tal como se muestra en la Tabla 5.2, mientras que en dirección radial, la probeta de punta hemiesférica genera los valores máximos mayores, seguida de la probeta de punta cónica y luego la probeta de base plana. Esto explica el orden observado en los valores máximos de rapidez de enfriamiento local.

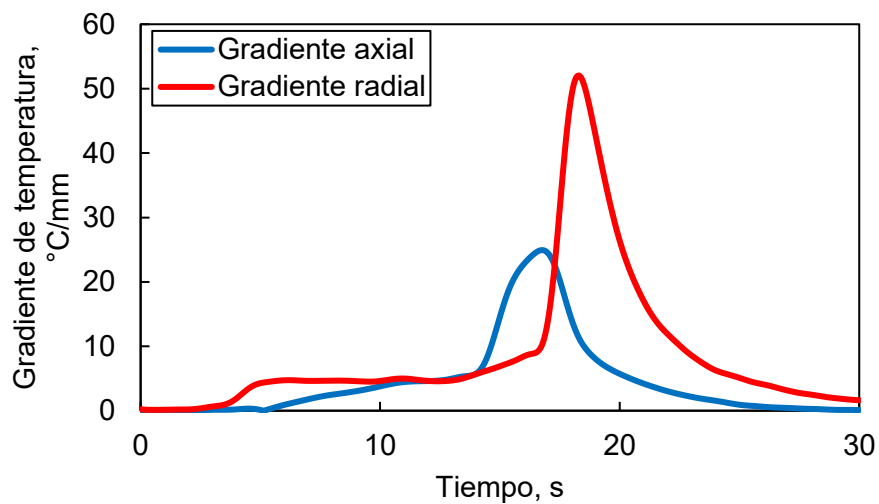


Figura 5.4 Evolución de los gradientes térmicos axial y radial durante el temple de la probeta de punta hemiesférica en agua a 60°C con velocidad de 0.6 m/s y temperatura inicial de 950 °C.

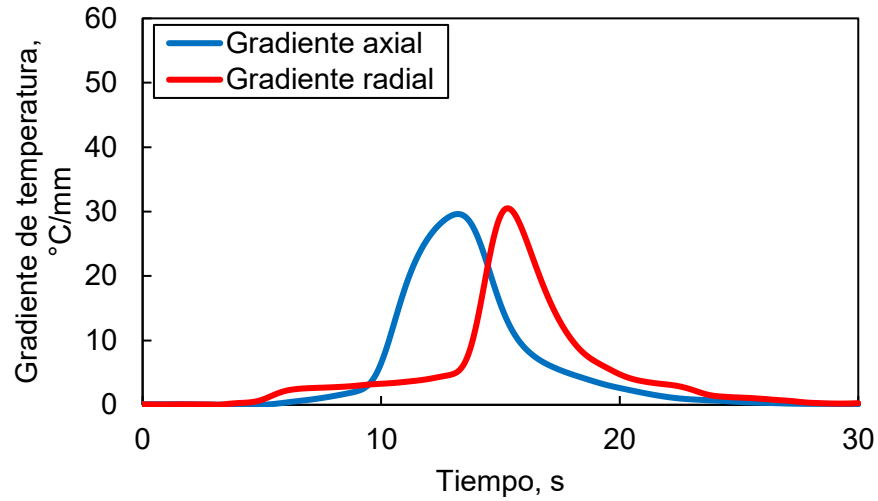


Figura 5.5 Evolución de los gradientes térmicos axial y radial durante el temple de la probeta de punta cónica en agua a 60°C con velocidad de 0.6 m/s y temperatura inicial de 950 °C.

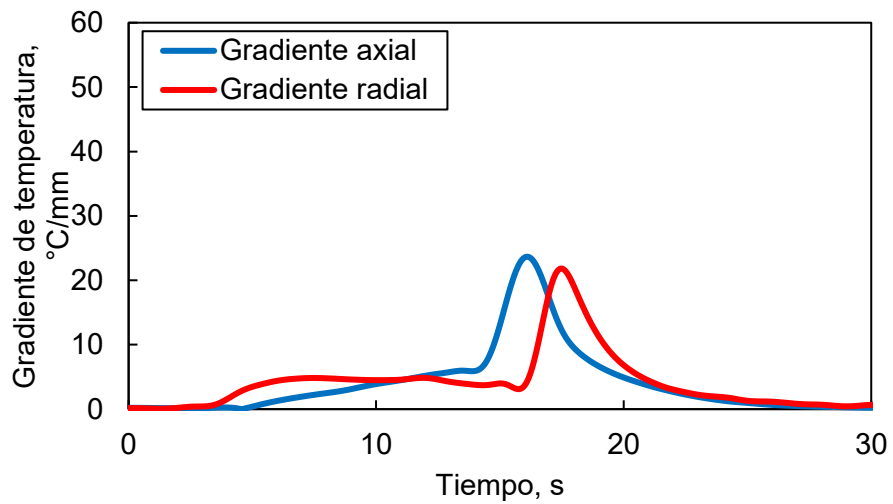


Figura 5.6 Evolución de los gradientes térmicos axial y radial durante el temple de la probeta de base plana en agua a 60°C con velocidad de 0.6 m/s y temperatura inicial de 950 °C.

Tabla 5.2 Gradiente máximo de temperatura para las tres geometrías; temperatura inicial de 950 °C y ambas velocidades de flujo estudiadas.

	Geometría de la probeta					
	Hemiesférica		Cónica		Plana	
Velocidad del medio	0.2 m/s	0.6 m/s	0.2 m/s	0.6 m/s	0.2 m/s	0.6 m/s
Gradiente axial máximo (°C/mm)	19.44	24.92	29.71	29.62	24.39	23.66
Gradiente radial máximo (°C/mm)	41.13	52.04	23.57	30.51	19.41	21.82

5.2 Velocidad del 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. Tomando como tiempo inicial el instante en el que el frente de mojado pasa por la base de la parte cilíndrica de la probeta, esa posición se fijó como valor “0 cm”. Las parejas de datos (tiempo y distancia) se graficaron para, posteriormente, buscar una regresión que representara la dependencia entre la posición del frente de mojado y el tiempo.

En la Figura 5.7 se muestran ejemplos de los resultados de este procedimiento, para experimentos con velocidad de flujo de 0.6 m/s y dos valores de temperatura inicial, para la probeta de punta cónica. Observando los puntos para ambas curvas se puede postular que se representarían correctamente mediante una regresión (lineal); donde la pendiente de la recta corresponde a la velocidad del frente de mojado. Al realizar las regresiones se observó que R^2 (coeficiente de determinación) tiene un valor mayor a 0.99 para todos los casos, por lo cual se deduce que la velocidad del frente de mojado es constante durante cada prueba. Por otra parte, en la figura se observa que la velocidad de avance del frente de mojado es menor (pendiente menor) al aumentar el valor de la temperatura inicial. Este efecto está relacionado con la cantidad de energía almacenada en la probeta

en el instante que el frente de mojado pasa por la posición de cada uno de los termopares y que resulta en una temperatura de superficie mayor en ese momento.

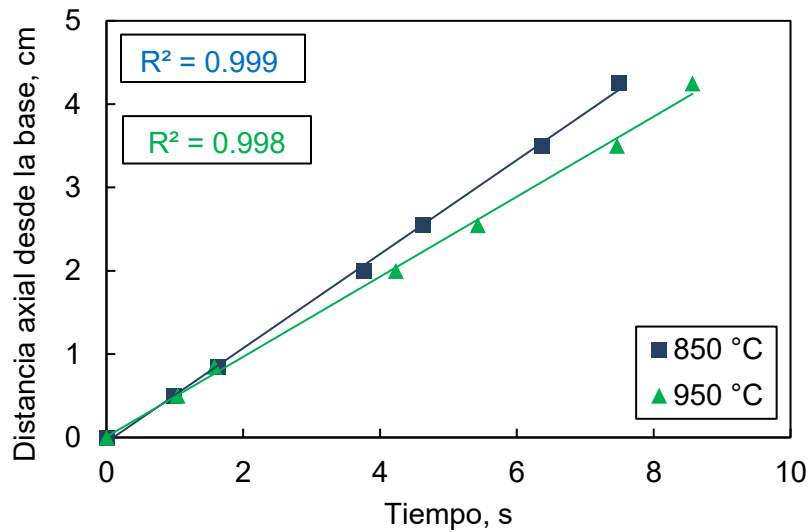


Figura 5.7 Posición del frente de mojado, en función del tiempo, durante el temple de una probeta de punta cónica en agua a 60°C, fluyendo a una velocidad de 0.6 m/s, para dos valores de temperatura inicial: valores (símbolos), regresión (líneas). Se muestra también el valor de R^2 para cada regresión.

En la Figura 5.8 se muestran los efectos de la de la geometría de la punta y de la velocidad del medio de temple y sobre la velocidad del frente de mojado, manteniendo la temperatura inicial constante (850 °C). Se observa que, para cada geometría de probeta, al incrementar la velocidad del medio de temple aumenta la velocidad del frente de mojado.

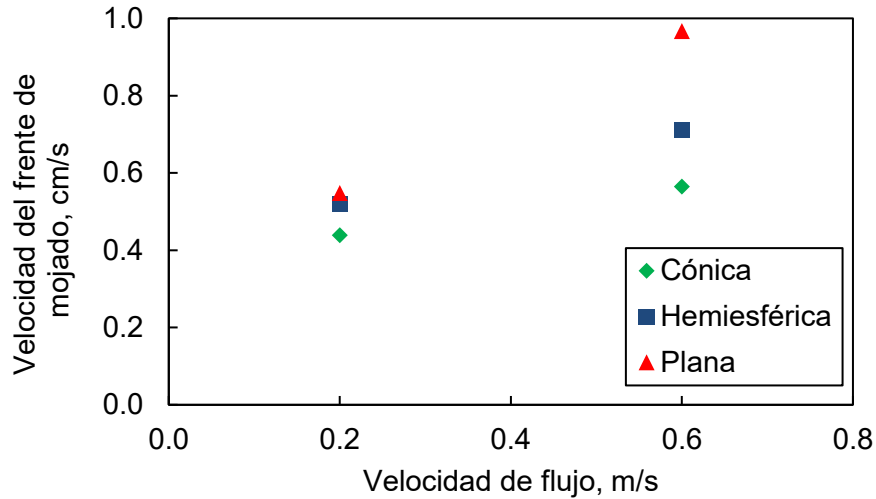


Figura 5.8 Velocidad del frente de mojado en función de la velocidad del medio de temple para temperatura inicial de 850 °C para las tres geometrías.

Asimismo, para velocidad de flujo de 0.2 m/s, la probeta de punta cónica presenta la menor velocidad de frente de mojado mientras que las probetas de punta hemiesférica y de base plana muestran valores similares. Al aumentar la velocidad de flujo a 0.6 m/s, la probeta de base plana exhibe el mayor valor de velocidad de frente de mojado, seguido de la probeta de punta hemiesférica y finalmente la probeta de punta cónica. Para explicar estas observaciones se analizaron imágenes extraídas de los videos, al momento en el que el frente de mojado pasaba por la posición de TC3 (ver Figura 5.9).

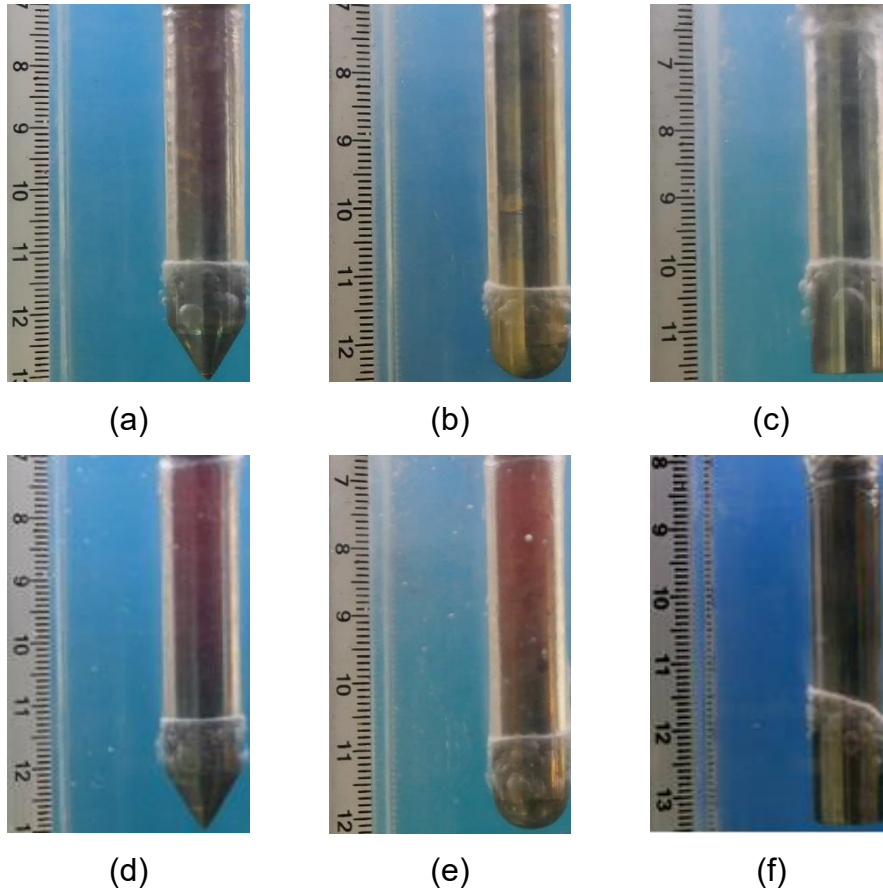


Figura 5.9 Imágenes extraídas de las videograbaciones para las tres geometrías, para temperatura inicial de 850 °C en el instante en el que el frente de mojado pasa por la posición del termopar TC3. Las imágenes (a) 5.8 s, (b) 9.6 s y (c) 14.6 s para velocidad de flujo de 0.2 m/s, mientras que las imágenes (d) 2.9 s, (e) 3.4 s y (f) 7.7 s con velocidad de flujo de 0.6 m/s. Los tiempos están referidos al instante en el que la probeta llega a la posición de prueba.

Se observa -cualitativamente- que la probeta de punta cónica está más caliente, mientras que las probetas de punta hemisférica y de base plana muestran coloración similar. Esto explica el comportamiento observado para velocidad de flujo de 0.2 m/s en la Figura 5.8, dado que el frente de mojado estaría avanzando frente a una región más caliente en el caso de la probeta de punta cónica, resultando así en una menor velocidad del frente de mojado. Por el contrario, para velocidad de flujo de 0.6 m/s, las imágenes 5.9 (d), 5.9 (e) y 5.9 (f) indican que la probeta de base plana está localmente más fría, la probeta de punta cónica es la más caliente y la probeta de punta hemisférica está a una temperatura intermedia entre las dos.

Por otra parte, en la Figura 5.10, se grafica la velocidad del frente de mojado para cada una de las tres geometrías, en función de la velocidad de flujo, en experimentos con agua a 950 °C. Para la velocidad de flujo de 0.2 m/s, la velocidad del frente de mojado (en orden decreciente) es: punta hemiesférica, base plana y punta cónica. En cambio, para el caso de 0.6 m/s la velocidad del frente de mojado (en orden decreciente) es: base plana, punta hemiesférica, punta cónica. De nuevo, estas observaciones pueden explicarse postulando que la temperatura de la superficie por encima del frente de mojado sigue ese mismo orden, lo que puede corroborarse con las imágenes de la Figura 5.11.

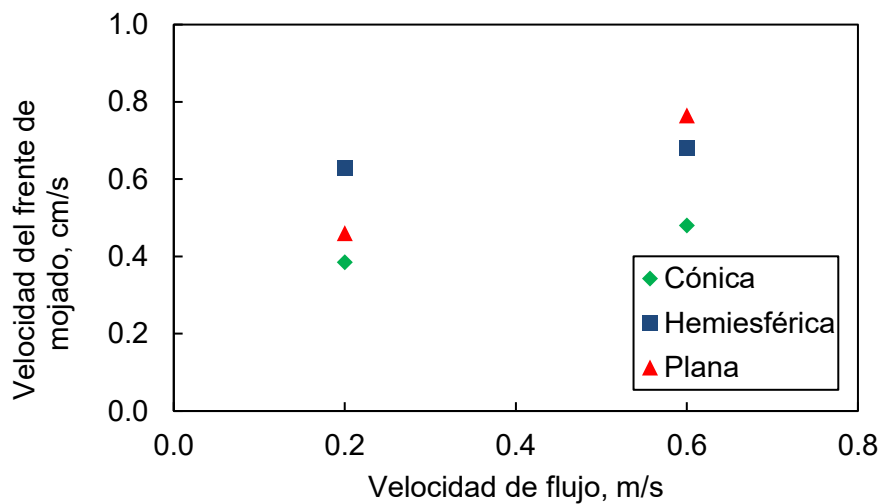


Figura 5.10 Velocidad del frente de mojado en función de la velocidad del medio de temple para temperatura inicial de 950 °C para las tres geometrías.

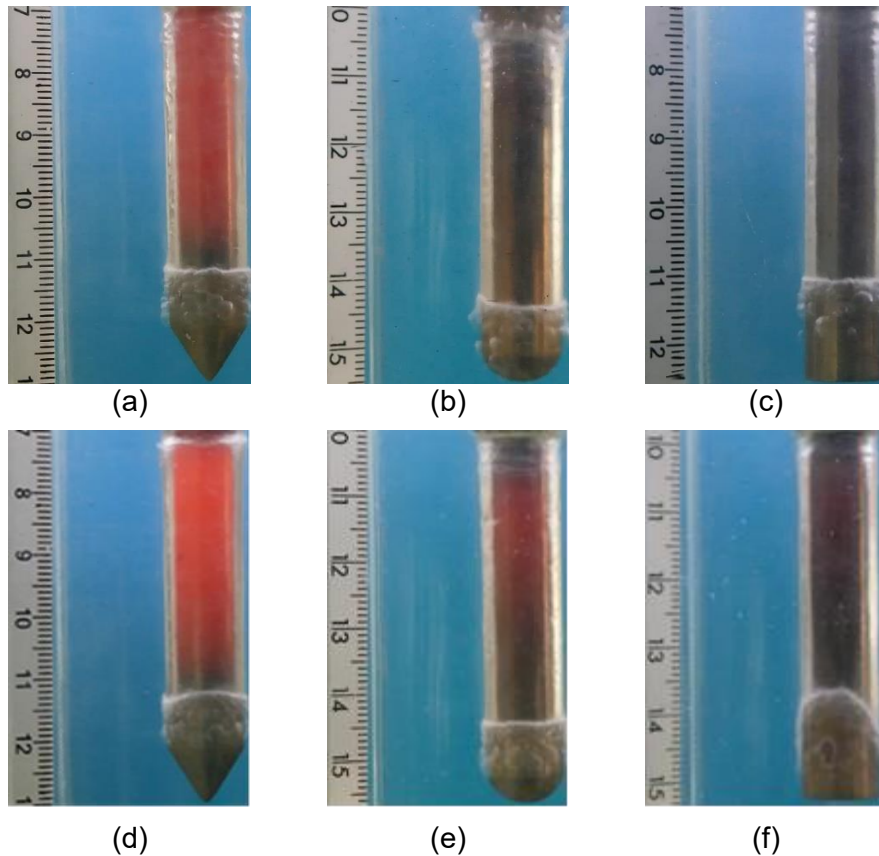


Figura 5.11 Imágenes extraídas de las videograbaciones para las tres geometrías, para temperatura inicial de 950 °C en el instante en el que el frente de mojado pasa por la posición del termopar TC3. Las imágenes (a) 6.4 s, (b) 16.9 s y (c) 13.6 s a velocidad de flujo de 0.2 m/s, mientras que las imágenes (d) 4.4 s, (e) 9.3 s y (f) 9.5 s a velocidad de flujo de 0.6 m/s. Los tiempos están referidos al instante en el que la probeta llega a la posición de prueba.

5.3 Flux de calor en la superficie

En la Figura 5.12 se presentan las curvas de historias de *flux* de calor en la superficie (estimadas con *WinProbe* [18]) para el temple con temperatura inicial de 950°C y velocidad de flujo de 0.6 m/s, para las tres geometrías estudiadas. Nótese que el *flux* de calor tiene signo negativo, debido a que se extrae de la pieza hacia el medio de enfriamiento. En la primera parte de la gráfica se observa que casi no hay extracción de calor, ya que la probeta aún se encuentra dentro del horno. Después se aprecia una zona en la cual el *flux* de calor presenta un valor constante, que se mantiene durante un cierto

intervalo de tiempo para cada termopar, a consecuencia de la presencia de la película de vapor que rodea a la probeta.

Al igual que en el caso de las curvas de historia de rapidez de enfriamiento, al iniciar la etapa de extracción de calor en presencia de burbujas el *flux* de calor aumenta hasta alcanzar un valor máximo para luego disminuir monotónicamente hasta alcanzar un valor cercano a cero. El comportamiento que presentan estas curvas es similar al que se aprecia en las curvas de rapidez de enfriamiento en función del tiempo pero, al tratarse del *flux* de calor en la superficie, ahora no hay desfase con los eventos en la superficie..

Para las condiciones experimentales de la Figura 5.12, el máximo valor de *flux* de calor en la superficie lo presenta la probeta de punta hemiesférica (-3.7 MW/m^2), seguida de la probeta de punta cónica (-3.1 MW/m^2) y la probeta de base plana (-2.9 MW/m^2). Por otra parte, se observa que la duración de capa de vapor (delimitada por el segundo cambio de pendiente) es similar entre las probetas de punta hemiesférica y de base plana (16.1 y 15.2 s, respectivamente) y mucho menor (10.8 s) para la probeta de punta cónica. Esto se debe a que la punta cónica favorece el rompimiento de la capa de vapor al proveer de un punto de concentración de extracción de calor, a la manera de un concentrador de esfuerzos.

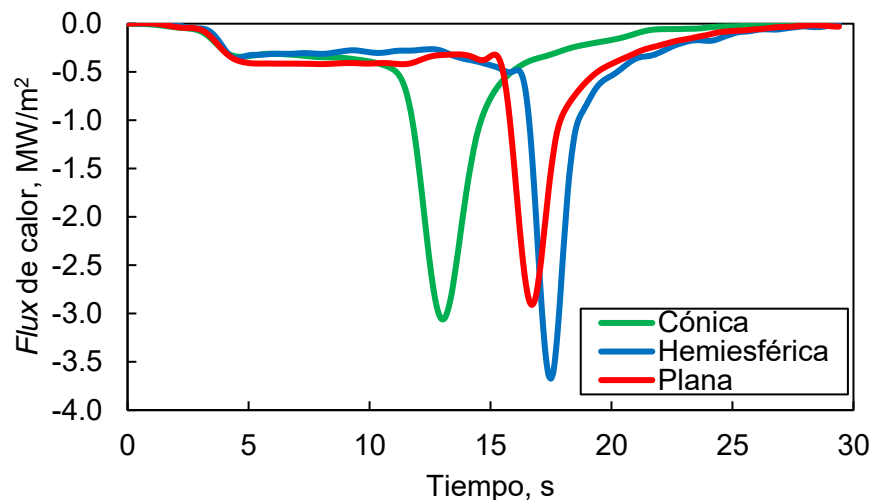


Figura 5.12 Historia de *flux* de calor en la superficie para la posición del termopar TC2 durante el temple, con temperatura inicial de $950 \text{ }^\circ\text{C}$ y velocidad de flujo 0.6 m/s , para las tres geometrías de probeta.

En las Figuras 5.13 a 5.15 se muestran la historia de *flux* de calor e historiales térmicos local (medido) y de superficie (estimado) en la posición del termopar TC2 durante el temple con temperatura inicial de 950 °C y agua fluyendo a 0.6 m/s para las tres probetas. Para las tres geometrías se observa una diferencia significativa entre los historiales térmicos local y de superficie, debido a que el acero tiene una conductividad térmica relativamente baja. Esta diferencia de temperaturas es mayor para probeta de punta hemiesférica, seguida de la probeta de punta cónica y la probeta de base plana, tal como se muestra en la Tabla 5.3.

Así, en el instante en el que se observa la máxima extracción de calor en la superficie (que corresponde al paso del frente de mojado) la temperatura en la curva de enfriamiento del termopar al interior de la probeta es significativamente mayor que la registrada por el termopar.

Tabla 5.3 Temperaturas de superficie y local en el instante de máxima extracción de calor en la posición del termopar TC2 para las tres geometrías de punta, con temperatura inicial de 950 °C y velocidad de flujo de 0.6 m/s.

Probeta	Hemiesférica	Cónica	Plana
Temperatura local (°C)	539.6	587.5	510.2
Temperatura de superficie (°C)	206.2	309.0	479.6

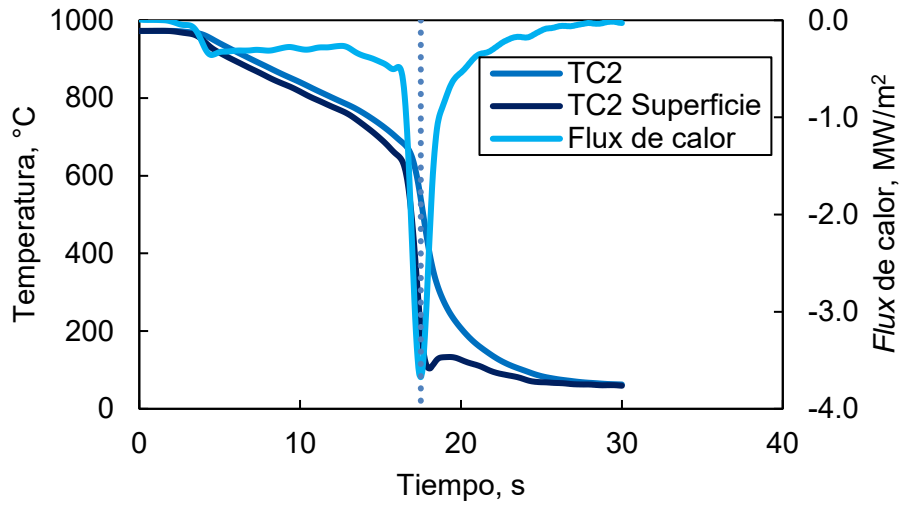


Figura 5.13 Flux de calor e historiales térmicos local y de la superficie en la posición del termopar TC2 durante el temple, para temperatura inicial de 950 °C y agua fluyendo a 0.6 m/s, probeta de punta hemiesférica.

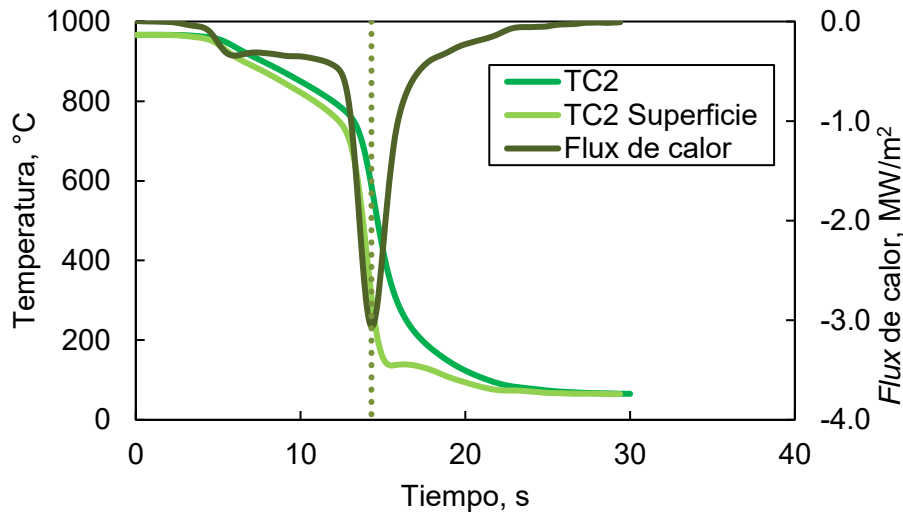


Figura 5.14 Flux de calor e historiales térmicos local y de la superficie en la posición del termopar TC2 durante el temple, para temperatura inicial de 950 °C y agua fluyendo a 0.6 m/s, probeta de punta cónica.

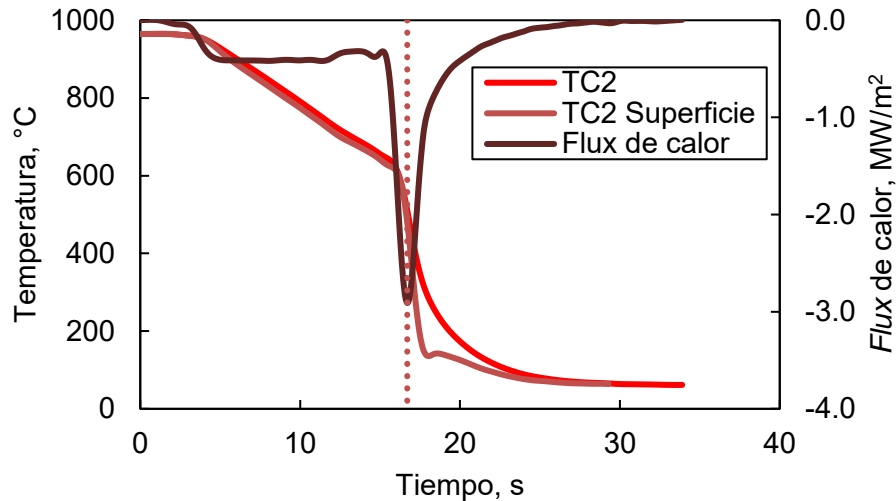


Figura 5.15 Flux de calor e historiales térmicos local y de la superficie en la posición del termopar TC2 durante el temple, para temperatura inicial de 950°C y agua fluyendo a 0.6 m/s, probeta de base plana.

En la Figura 5.16 se presenta el efecto de la geometría de la punta sobre la curva de ebullición inversa (*flux* de calor como función de la temperatura de superficie) para la posición del termopar TC2, para experimentos con temperatura inicial de 950°C y velocidad de flujo de 0.6 m/s. Es importante señalar que este tipo de gráfica se lee de derecha a izquierda. En todas las curvas se observa un aumento en la 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 constante (y baja) actuando como una capa aislante sobre la superficie de la probeta. Posteriormente al rompimiento de la capa de vapor la extracción de calor aumenta hasta alcanzar un valor máximo, que también depende de la geometría de la probeta. Posteriormente, el *flux* de calor disminuye hasta que aproximadamente a 135°C, la curva cambia de forma a una línea recta, la cual corresponde a la etapa de convección sin ebullición y es, por lo tanto, similar para las tres geometrías.

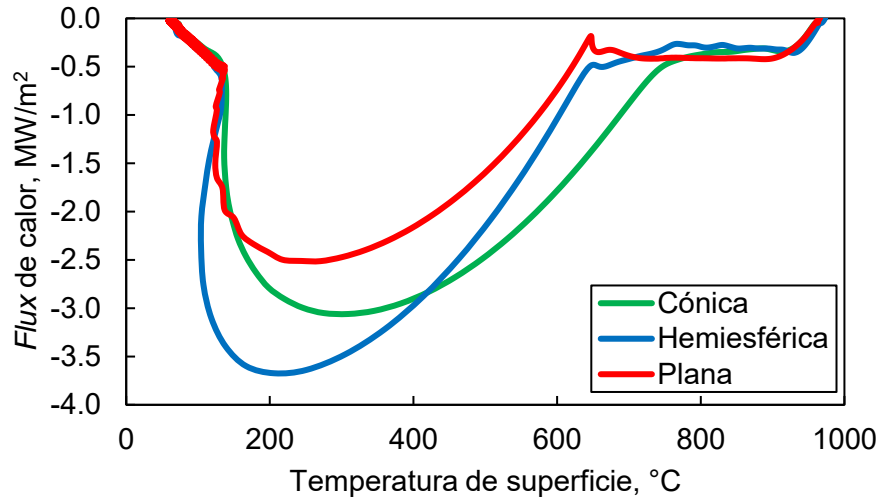


Figura 5.16 Flux de calor en la superficie en función de la temperatura de la superficie para la posición del termopar TC2 durante el temple con temperatura inicial de 950°C y con agua fluyendo a 0.6 m/s, para las tres geometrías de probeta.

Para temperaturas bajas se observa un comportamiento no esperado, dado que hay más de un valor de *flux* de calor en la superficie para un valor dado de temperatura de la superficie; el efecto es más notable para la probeta de punta hemiesférica, menos notable para la probeta de base plana y casi imperceptible para la probeta de punta cónica. Esto puede explicarse analizando los historiales térmicos en la superficie para las tres geometrías estudiadas con temperatura inicial de 950 °C y agua fluyendo a 0.6 m/s (ver Figura 5.17); recuérdese que estos valores son estimados durante la solución numérica del *IHCP*. En la Figura 5.17 se observa que hay un recalentamiento de la superficie instantes después de que se presenta el máximo de *flux* de calor. Este recalentamiento no es causado por cambio de fase (recuérdese que el material de la probeta es acero inoxidable austenítico) sino por el cambio de medio de enfriamiento (de ebullición con formación de burbujas a convección sin ebullición), el cual es muy severo cerca del máximo y posteriormente mucho más suave. Como resultado de este recalentamiento, la superficie experimenta valores similares de temperatura más de una vez, razón por la cual se genera el comportamiento observado en las Figuras 5.13 a 5.15. De la Figura 5.17 se desprende que el recalentamiento es más notorio para la probeta de punta hemiesférica, seguido de la probeta de base plana y mucho menor para la probeta de

punta cónica, por lo que la distorsión de la curva *flux* de calor en la superficie vs. temperatura de la superficie es mayor para la probeta de punta hemiesférica, seguida de la probeta de base plana y casi imperceptible para la probeta de punta cónica, como se observa en la Figura 5.16.

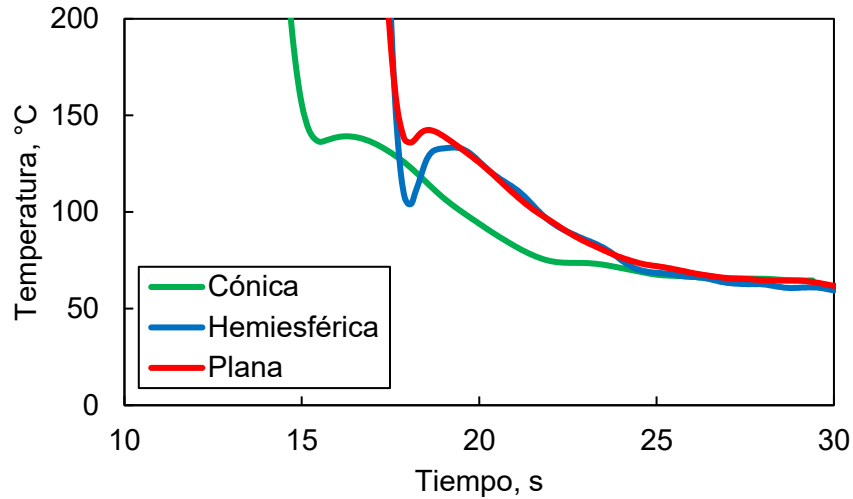


Figura 5.17 Detalle del historial térmico en la superficie para la posición del termopar TC2 durante el temple con temperatura inicial de 950 °C y velocidad de medio de temple de 0.6 m/s, para las tres geometrías de probeta.

En las Figuras 5.18 y 5.19 se muestran los valores de *flux* de calor en la superficie máximo (en la posición del termopar TC2) en función de la temperatura inicial de la probeta para ambas velocidades de flujo. Se observa que, para todos los valores de temperatura inicial, el *flux* de calor en la superficie máximo presenta valores mayores para la velocidad de 0.6 m/s, debido a que en esta condición de flujo se tiene una mayor eficiencia en la extracción de calor, ya que se incrementa la influencia del mecanismo de convección; esto se observa de manera más evidente para la temperatura de 950°C. Por otra parte, el efecto de incrementar la temperatura inicial es menor en comparación con el aumento de la velocidad de medio de temple; por ejemplo, para la probeta de base plana, al incrementar la temperatura inicial de 850 a 950°C el valor máximo del *flux* de calor en la superficie (en la posición del termopar TC2) para velocidad de flujo de 0.2 m/s aumenta de 1.69 a 1.96 MW/m², mientras que al aumentar la velocidad de flujo de 0.2 m/s a 0.6 m/s, manteniendo la temperatura inicial en 850°C, el cambio es de 1.69 a 2.37 MW/m².

Es importante mencionar que el orden seguido por los valores de *flux* de calor máximo en la superficie máximo observado en las Figuras 5.18 y 5.19 (probeta de punta hemiesférica > probeta de punta cónica > probeta de base plana) sigue el orden del gradiente radial máximo (ver Figuras 5.4 a 5.6).

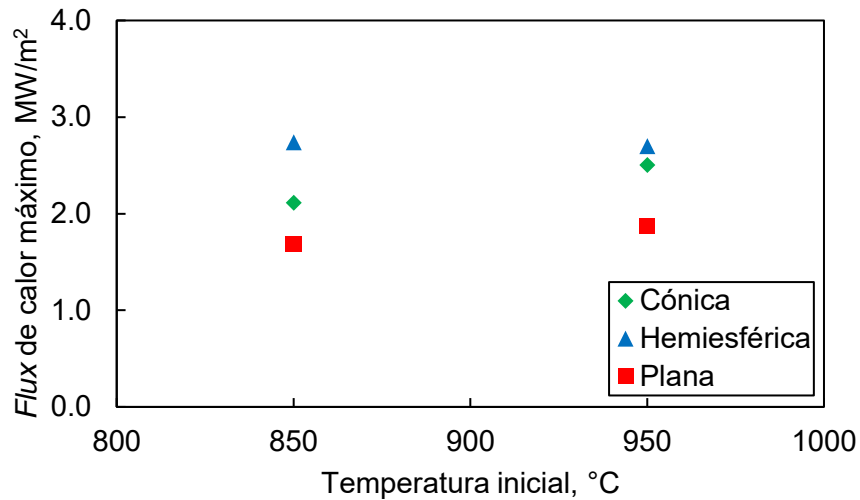


Figura 5.18 Flux de calor máximo (en la posición del termopar TC2) en función de la temperatura inicial de la probeta durante el temple, para las tres geometrías y agua fluyendo a 0.2 m/s.

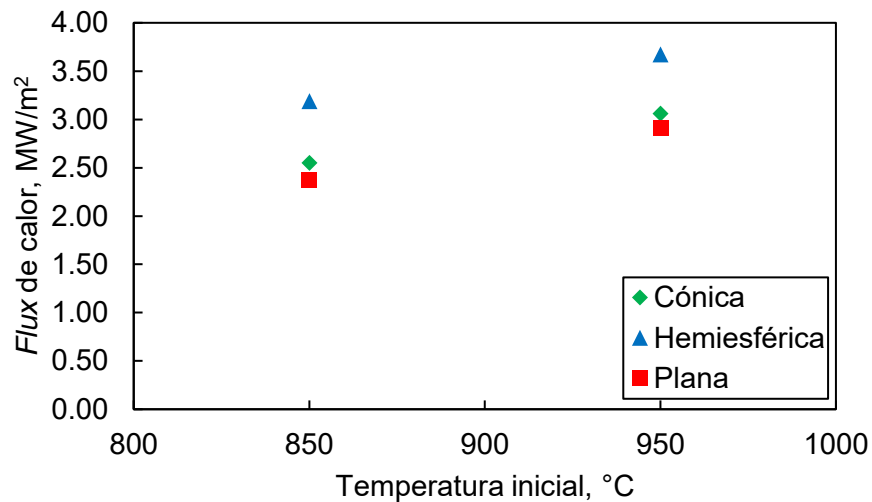


Figura 5.19 Flux de calor máximo (en la posición del termopar TC2) en función de la temperatura inicial de la probeta durante el temple, para las tres geometrías y velocidad de flujo de 0.6 m/s.

6 Conclusiones

- La duración de la capa de vapor es menor para la probeta de punta cónica debido a que la punta actúa como un concentrador de extracción de calor.
- El incremento de 850 a 950 °C en temperatura inicial, no modifica significativamente la pendiente de las curvas de enfriamiento en la región con presencia de capa de vapor, para todas las probetas.
- El mayor valor de velocidad de frente de mojado se presenta para la probeta de base plana bajo las condiciones de velocidad de flujo de 0.6 m/s y temperatura inicial de 850°C. La velocidad del medio de temple tiene un mayor impacto sobre la velocidad del frente de mojado que la temperatura inicial.
- La probeta con el mayor gradiente de temperatura en dirección radial es la probeta con punta hemiesférica, seguida de la de punta cónica y luego la de base plana, por lo que los valores de rapidez de enfriamiento local máximo y de *flux* de calor en la superficie máximo siguen ese orden.
- Para las tres probetas se observó recalcancia en el historial térmico de la superficie después de que ocurre la máxima extracción de calor; este comportamiento se asocia a la transición de la etapa de ebullición con formación de burbujas a la etapa de convección, que representa un cambio severo en la extracción de calor. Esto provoca un comportamiento anómalo en las curvas de ebullición inversa (*flux* de calor en la superficie vs. temperatura de la superficie) en la etapa final del enfriamiento en presencia de ebullición.

7 Bibliografía

1. ISO 9950: Industrial Quenching Oils-Determination of Cooling Characteristics-Nickel-Alloy Probe Test Method, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1995.
2. ASTM D6482, "Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Aqueous Polymer Quenchants by Cooling Curve Analysis with Agitation (Tensi Method)", ASTM International, 2011.
3. J. Apráiz Barreiro. "**Tratamientos térmicos de los aceros**", Editorial Dosselt, ISBN 9788495312563.
4. Tensi, H.M. y Lainer, K., "Rewetting and heat transfer during immersion cooling in high speed quenching oils", *Härterei-Techn. Mitt.*, Vol. 52, No. 5, 1997, pp. 298-303.
5. Hernández-Morales B., "Characterization of Heat Transfer during Quenching", In **ASM Handbook**, Vol. 4A, **Steel Heat Treating Fundamentals and Processes**, pp. 158-175, J.L. Dossett and G.E. Totten, eds., ASM International, Materials Park, OH, 2013. ISBN-13: 978-1-61503-011-83.
6. Geiger, G.H. y Poirier D.R., **Transport Phenomena in Metallurgy**. 1a ed. EUA, Addison-Wesley Company, 1973, pág. 259.
7. Stitzelberger-Jakob, P., "Hartevorherbestimmung mit Hilfe des Benetzungsablaufes beim Tauchkühlen von Stählen", Tesis, Faculty for Mechanical Engineering of the Technical University of Munich, 1961, pp. 160.
8. Totten G.E., Dakins M.E., y Heins M.W., "Cooling curve analysis of synthetic quenchants- A historical perspective", *Journal of Heat Treating*, Vol 6, No 2, 1988, pp. 87-95.
9. Tensi H.M., Totten G.E. y Kunzel T., "Physics and Technology of Quenching in Fluids Part II: Technology of Quenching", *Memorias de la 20th ASM Heat Treating Society Conference*, San Luis MO., 2000, pp. 727-730.
10. Tensi, H.M. y Liscic, B. "Determination of Quenching Power of Various Fluids", **Quenching Theory and Technology**, 2nd Edition, Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL, 2010, pp. 315-327.

11. Tensi H., Stich A. y Totten, G. "Fundamentals about quenching by submerging" Memorias de *International Heat-Treating Conference: Equipment and Processes*, 1994, pp. 243-251.
12. Hernández-Morales B., Cruces-Reséndez R., Vergara-Hernández H.J. y Solorio Díaz G. "Hydrodynamic Behavior of Liquid Quenchants in the Vicinity of Quench Probes." Memorias de la *6th International Quenching and Control of Distortion Conference*, Chicago, Ill., 2012, ASM International, pp. 362-372.
13. Beck, J.V., Blackwell, B. y St. Clair, Jr., C.R., **Inverse Heat Conduction: Ill-Posed Problems**, Wiley-Interscience, New York, 1985.
14. Hernández Morales B., "Cooling Curve Analysis", en **Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys**, Vol. II, Colás R. y G.E. Totten G.E. (eds), CRC Press/Taylor & Francis Group, Boca Ratón, FL, 2016, pp 854-874. ISBN 978-1466511040.
15. ASM (Eds), *Classification and Designation of Carbon and Low-Alloy Steels*, ASM Handbook, Vol 1, Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys, Metals Park OH: American Society for Metals, 1995.
16. Cruces-Reséndez R., "Análisis Inverso del Flujo de Calor en 2D para Ensayos de Temple de Probetas a Escala Laboratorio." Tesis de Maestría. Programa de Ciencia e Ingeniería de Materiales. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, México, D.F., 2015.
17. Inoue T., Watanabe Y., Okamura K., Narazaki M., H. Shichino, Ju D., Kanamori H., Ichitani K., "A cooperative activity on quenching process simulation-Japanese IMS-VHT project on the benchmark analysis and experiment", *Transactions of Materials and Heat Treatment* 5 (2005), pp. 28–34.
18. Meekisho L., Hernández-Morales B., Téllez-Martínez J.S. y Chen X. "Computer-aided cooling curve analysis using WinProbe", *Materials and Product Technology*, Vol. 24, Nos. 1-4, 2004, pp.155-169.

Apéndice A Calibración de termopares¹

Este procedimiento tiene por objetivo establecer y definir un protocolo para realizar la calibración de termopares tipo K por comparación con un sensor de temperatura (*RTD*, por sus siglas en inglés) inmerso en un medio isotérmico de temperatura especificada.

Geometría y dimensiones de la probeta

Las pruebas de calibración se realizaron con una probeta cilíndrica sólida de una longitud de 40 mm y un diámetro de 25.4 mm (1 in), fabricada con acero 4140. En una de las tapas tiene 4 barrenos equidistantes con una profundidad de 20 mm. En el centro de la cara lateral del cilindro se realizaron dos barrenos más para colocar dos puntos de sujeción (uno de cada lado) tal como se muestra en la Figura A1.

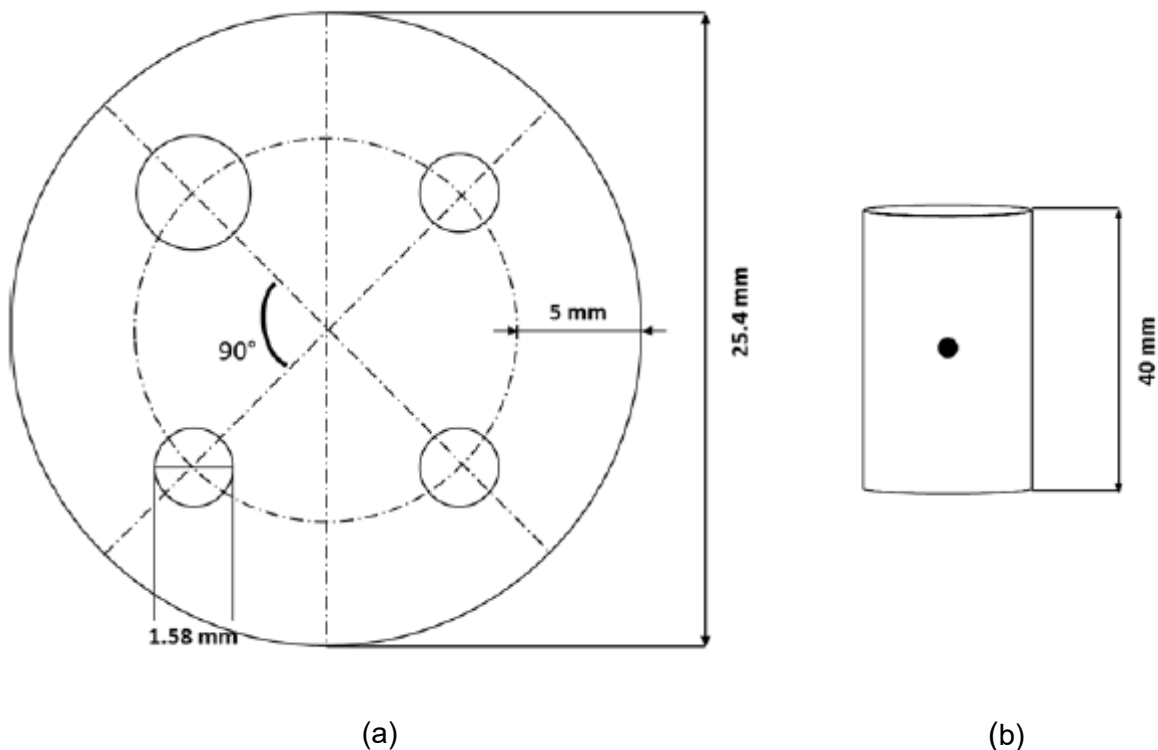


Figura A1. Esquema de la probeta cilíndrica: (a) vista superior de la distribución de todos los barrenos para termopares, (b) vista lateral de los barrenos para colocar los puntos de sujeción.

¹ Roberto Cruces Reséndez

Tesis de Maestría: "Análisis inverso del flujo de calor en 2D para ensayos de temple de probetas a escala laboratorio"

Programa: Posgrado en Ciencia e Ingeniería de Materiales, UNAM.

Equipo experimental

El equipo experimental mostrado esquemáticamente en la Figura A2, está compuesto de un calibrador portátil (*Yokogawa CA51/71 Handy CAL Calibrator*) al cual se conecta un detector de temperatura resistivo (*Resistance Temperature Detector*) PT100 de 3 hilos. Este sensor se coloca en la probeta al igual que los termopares (Tipo K). Para realizar las lecturas de temperatura de los termopares se empleó un sistema de adquisición de datos que consiste de una computadora y una adquisidor de datos (marca Pico Technology modelo TC-08).

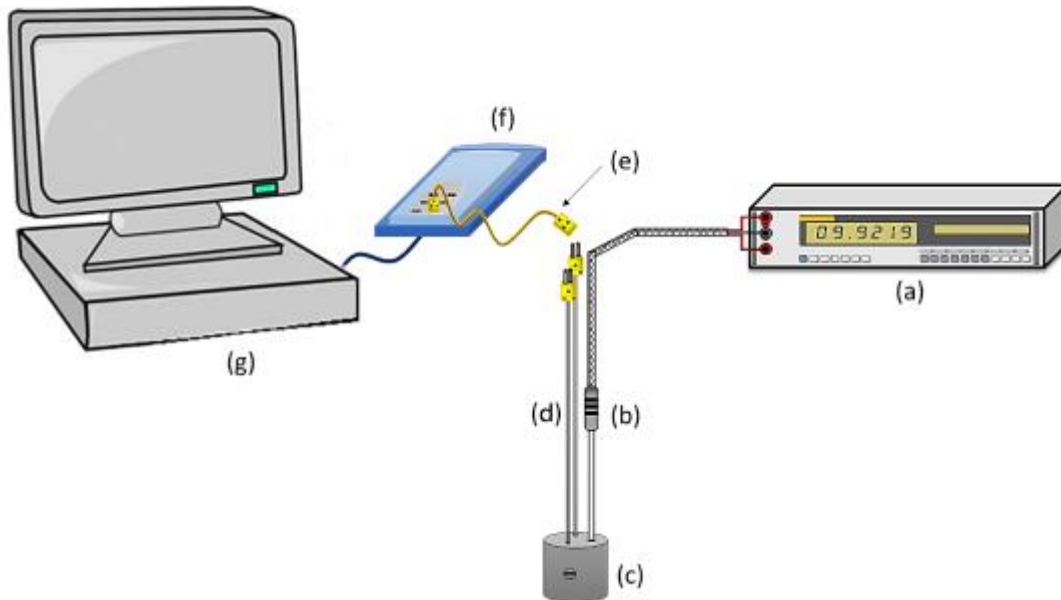


Figura A2. Representación esquemática del equipo experimental empleado para la calibración de termopares: (a) calibrador CA51/71, (b) sensor de temperatura PT100, (c) probeta, (d) termopares tipo K, (e) extensiones para termopar, (f) adquisidor de temperatura y (g) computadora.

Procedimiento experimental

A continuación se describe el procedimiento que se siguió para la realización de cada uno de los experimentos de calibración:

1. Se coloca el *RTD* y los termopares en los barrenos de la probeta revisando que correspondan a la profundidad especificada etiquetándolos debidamente para identificarlos durante los experimentos.
2. Se ajusta la probeta en el centro de la cámara de calentamiento del horno de resistencia ajustando la altura con un par de alambres sujetos a los barrenos laterales con tornillos.
3. Antes de comenzar la calibración, se conectan los equipos (computadora, calibrador y adquisidor) a un regulador de corriente para mantener un voltaje constante durante la prueba. Posteriormente se hacen las conexiones del *RTD* a las terminales del calibrador y los termopares con sus extensiones a los puertos del adquisidor.
4. El calentamiento del horno se hace de forma escalonada en intervalos de 50°C a partir de la temperatura ambiente y hasta 500°C para evitar daños en el *RTD*. Una vez alcanzada la temperatura a la cual se realiza la medición, es necesario dejar un tiempo de estabilización adecuado para tomar la lectura.

Resultados

Un dispositivo termo-resistivo Pt100 consiste en un alambre de platino que a 0 °C tiene una resistencia de 100 Ω y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica. Este incremento de la resistencia no es lineal pero si creciente y característico del platino de tal forma que mediante tablas es posible encontrar la temperatura exacta a la que corresponde. En el gráfico de la Figura A3 se muestra una la curva de resistencia en función de la temperatura para un *RTD* de platino de 100 W.

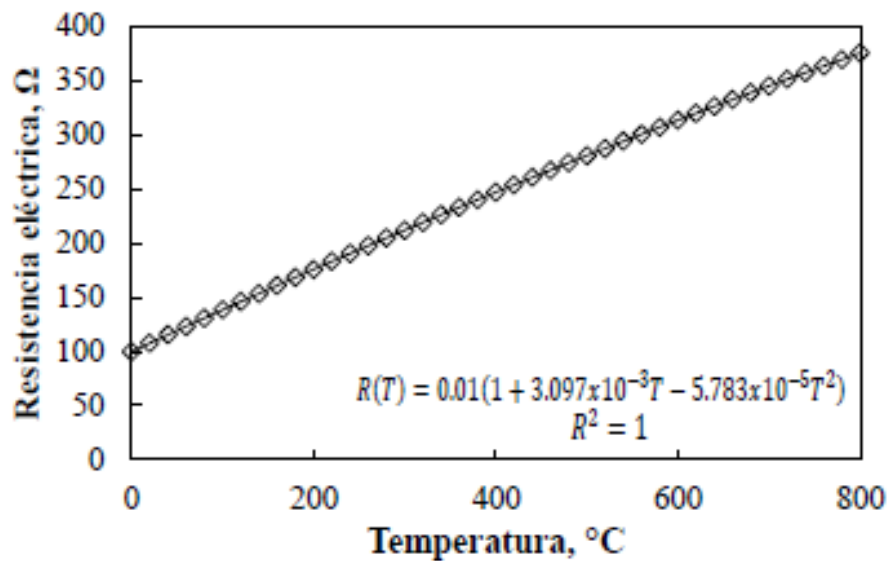


Figura A3. Gráfico de resistencia en función de la temperatura para un *RTD* de Platino de 100 Ω.

Los valores típicos de resistencia nominal para *RTDs* de platino de película delgada son 100 Ω y 1000 Ω. La relación entre resistencia y temperatura cumple con una ecuación cuadrática de la forma: $(T) = R_0(1 + aT - bT^2)$

Donde:

R_0 , es la resistencia nominal del *RTD*, a , b , son constantes usadas para escalar el *RTD* que se conocen como coeficientes Callendar-Van Dusen y se encuentran bajo la Norma DIN 43760.

Análisis estadístico

Para determinar si existe diferencia significativa entre las mediciones de temperatura del *RTD* respecto de las lecturas de temperatura de los termopares se realiza una prueba t student para muestras apareadas con nivel de confianza del 95%; este tipo de prueba se utiliza cuando las muestras son dependientes; esto es, cuando se trata de una única muestra que ha sido evaluada dos veces (muestras repetidas) como es el caso. En una tabla se reportan los resultados obtenidos del análisis estadístico.

La hipótesis que se pone a prueba:

La diferencia de medias toma un determinado valor, cero si se asumen iguales.

La hipótesis nula:

No existe diferencia significativa entre la diferencia de medias, es decir no existe diferencia entre las mediciones de temperatura del sensor termo-resistivo y las mediciones de los termopares.

La hipótesis alterna:

Existe diferencia significativa entre las medias, es decir existe diferencia entre las mediciones de temperatura del sensor termo-resistivo y las mediciones de los termopares.

De una tabla de distribución t student para un nivel de confianza del 95 % se obtiene una t crítica para una muestra de n valores, este valor representa el máximo. Si todos los valores se encuentran por debajo del valor crítico de la tabla de distribución t student la hipótesis nula se acepta, indicando que no existe diferencia significativa entre las lecturas de temperatura del RTD y las mediciones de temperatura registradas por los termopares con un nivel de confianza del 95% en un intervalo de (25-500°C.)