



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

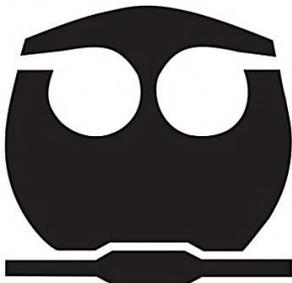
**DESARROLLO DE UN MODELO EXPERIMENTAL,  
A ESCALA LABORATORIO, DE UN PROCESO DE  
TEMPLE Y AUTO-REVENIDO DE VARILLAS DE  
ACERO**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA**

**PRESENTA:**

**ERIKA ABRIL PINEDA XOLALPA**



**CIUDAD DE MÉXICO 2017**



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.

Jurado asignado:

Presidente: Prof. JOSÉ BERNARDO HERNÁNDEZ MORALES

Vocal: Prof. SERGIO GARCIA GALAN

Secretario: Prof. ARTURO ALEJANDRO SANCHEZ SANTIAGO

1er Suplente: Prof. BALBINA OJEDA RAMIREZ

2do Suplente: Prof. CLARA SARAID FLORES ROSAS

Sitio donde se desarrolló el tema:

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

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

Asesor del tema:

---

Dr. José Bernardo Hernández Morales

Sustentante:

---

Erika Abril Pineda Xolalpa

# Contenido

Resumen.....	1
1 Introducción .....	3
1.1 Justificación .....	4
1.2 Hipótesis .....	4
1.3 Objetivo.....	5
1.4 Metas .....	5
2 Antecedentes.....	6
2.1 Tratamientos térmicos.....	6
2.1.1 Temple .....	6
2.1.2 Revenido .....	10
2.2 Templabilidad.....	10
2.3 Ensayo Jominy.....	11
2.4 Diagramas CCT .....	12
2.5 Proceso QTB (Quenched and Tempered Bar).....	13
2.6 Modelos experimentales .....	13
2.7 Acero AISI 9840 .....	14
3 Desarrollo Experimental .....	15
3.1 Selección del acero modelo .....	15
3.2 Ensayo Jominy estándar e interrumpido .....	15
3.3 Temple de probetas cilíndricas de punta cónica .....	19
3.4 Matriz experimental.....	22
4 Resultados.....	23
4.1 Ensayo Jominy.....	23
4.2 Temple de probetas cilíndricas de punta cónica .....	28
4.2.1 Pruebas con acero inoxidable AISI 304.....	28
4.2.2 Pruebas con el acero modelo: probeta tipo A.....	30
4.2.3 Pruebas con el acero modelo: probeta tipo B.....	34
5 Discusión de resultados.....	44
6 Conclusiones .....	51
7 Referencia .....	52

## Índice de Figuras

Figura 2.1 Curvas de enfriamiento del centro de muestras templadas en Agua a diferentes temperaturas y sin agitación [3].....	8
Figura 2.2 Ensayo Jominy y curva de templabilidad [7] .....	11
Figura 2.3 Diagrama CCT para un acero AISI 9840 [8] .....	12
Figura 3.1 Representación esquemática de la probeta Jominy de acero AISI 9840, mostrando los barrenos para insertar los termopares.....	16
Figura 3.2 Perfil de dureza resultante de un ensayo Jominy para varios aceros [13].....	16
Figura 3.3. Esquema del equipo experimental para el ensayo Jominy: a) tanque con agua, b) llave de paso, c) tanque de salida de agua con tubo de cobre, d) probeta Jominy montada en la lanza, e) estructura de acero con riel, f) tanque de captura y recirculación de agua, g) bomba de agua sumergible; (1) flujo del agua, (2) descarga de agua y (3) recirculación de agua [14]. .....	17
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 [15]. .....	19
Figura 3.5 Esquema y dimensiones de la probeta tipo A, cilíndrica de punta cónica: a) vista superior; b) vista isométrica; c) corte transversal. ....	20
Figura 3.6 Esquema y dimensiones de la probeta tipo B, cilíndrica de punta cónica: a) vista isométrica; b) corte transversal. ....	21
Figura 4.1 Respuesta térmica durante el ensayo Jominy estándar de acero AISI 9840. La línea punteada corresponde a la temperatura de inicio de transformación martensítica (Ms) para este acero. ....	23
Figura 4.2 Rapidez de enfriamiento en función de la temperatura local durante el ensayo Jominy estándar de una probeta de acero AISI 9840.....	24
Figura 4.3 Perfil de dureza de la probeta Jominy estándar: experimental (círculos) y reportada en [13] (triángulos). ....	25
Figura 4.4 Respuesta térmica durante el ensayo Jominy de una probeta de acero AISI 9840 con interrupción del temple. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms. ....	25
Figura 4.5 Rapidez de enfriamiento vs. temperatura (ambos locales) durante un ensayo Jominy interrumpido. ....	26
Figura 4.6 Perfil de dureza después del ensayo Jominy: estándar (círculos azules) e interrumpido (círculos naranjas). ....	27

Figura 4.7 Esquema de la probeta Jominy (izquierda) y fotomicrografía a 50X en cuatro posiciones a lo largo de la probeta: a) 10 mm, b) 20 mm, c) 40 mm, y d) 90 mm. ....	27
Figura 4.8 Respuesta térmica del acero inoxidable AISI 304 temple interrumpido a 300°C. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms para el acero AISI 9840. ....	28
Figura 4.9 Respuesta térmica del acero inoxidable 304 temple interrumpido a 400°C. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms para el acero AISI 9840. ....	29
Figura 4.10 Respuesta térmica del acero inoxidable 304 temple interrumpido a 500°C. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms para el acero AISI 9840. ....	29
Figura 4.11 Curvas de enfriamiento durante el temple estándar de una probeta de cilíndrica punta cónica tipo A de acero AISI 9840. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms. ....	30
Figura 4.12 Fotomicrografía de una región en el centro de una probeta tipo A sometida a temple estándar, 200X. ....	31
Figura 4.13 Curvas de enfriamiento durante el temple interrumpido de una probeta de cilíndrica punta cónica tipo A de acero AISI 9840. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms. ....	31
Figura 4.14 Perfil final de dureza (HRC) del temple interrumpido de una probeta tipo A. La distancia está medida desde la superficie. La línea vertical marca el centro geométrico de la probeta. ....	32
Figura 4.15 Fotomicrografía de una región cercana a la orilla de la probeta de acero 9840 con temple interrumpido, 80X. ....	33
Figura 4.16 Fotomicrografía del centro (izquierda) y la orilla (derecha) de la probeta de acero 9840 con temple interrumpido, 200X. ....	33
Figura 4.17 Curva de enfriamiento durante el ensayo de temple estándar, probeta punta cónica tipo B, acero AISI 9840, flujo de 20 LPM. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms para el acero modelo. ....	34
Figura 4.18 Curva de enfriamiento durante el ensayo de temple estándar, probeta punta cónica tipo B, acero AISI 9840, flujo de 40 LPM. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms para el acero modelo. ....	35
Figura 4.19 Curva de enfriamiento durante el ensayo de temple estándar, probeta punta cónica tipo B, acero AISI 9840, flujo de 60 LPM. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms para el acero modelo. ....	35
Figura 4.20 Respuesta térmica de TC1 probeta de punta cónica tipo B para las tres severidades de temple. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms. ....	36

Figura 4.21 Respuesta térmica en TC2 probeta de punta cónica tipo B para las tres severidades de temple. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms. ....	37
Figura 4.22 Respuestas térmicas durante el temple interrumpido de una probeta tipo B, con un flujo de 20 LPM. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms. ....	37
Figura 4.23 Imágenes obtenidas del video del temple interrumpido de una probeta tipo B, temperatura de austenización de 900 °C, flujo 20 LPM: a) 9.8s, b) 13.3s y c) 16.5 s (referirse a la Figura 4.21). ....	38
Figura 4.24 Respuestas térmicas durante el temple interrumpido de una probeta tipo B con agua a 60 °C y flujo de 60 LPM. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms. ....	39
Figura 4.25 Imágenes obtenidas del video del temple interrumpido de una probeta tipo B, temperatura de austenización de 900 °C, flujo 60 LPM: a) 9.5 s, b) 12.2 s y c) 14.9 s, (referirse a la Figura 4.24). ....	39
Figura 4.26 Perfil final de dureza (HRC) del temple interrumpido de una probeta tipo B con agua fluyendo a 20 LPM. La distancia está medida desde la superficie. La línea vertical marca el centro geométrico de la probeta. ....	40
Figura 4.27 Perfil final de dureza (HRC) del temple interrumpido de una probeta tipo B con agua fluyendo a 60 LPM. La distancia está medida desde la superficie. La línea vertical marca el centro geométrico de la probeta. ....	41
Figura 4.28 Fotomicrografías del temple interrumpido con 20LPM, a 10X. A la izquierda se muestra una representación esquemática de la distribución microestructural; a) microestructura bainítica, b) fase intermedia se observa una microestructura más fina, c) anillo martensítico. ....	42
Figura 4.29 Fotomicrografías del temple interrumpido con 60 LPM, a 10X. A la izquierda se muestra una representación esquemática de la distribución microestructural; a) microestructura bainítica, b) fase intermedia se observa una microestructura más fina, c) anillo martensítico. ....	43
Figura 5.1 Curvas de enfriamiento representativas del proceso QTB [16]. ....	44
Figura 5.2 Distribución microestructural (esquemática) resultado del proceso QTB [16]. ....	45
Figura 5.3 Microestructura obtenida; a) en la planta [17] y b) en el laboratorio. ....	45
Figura 5.4 Microestructura (arriba) y perfil de dureza (abajo) de una probeta tipo A, después del temple interrumpido. ....	46
Figura 5.5 Probeta tipo B de acero AISI 9840 al inicio del temple; ....	47
Figura 5.6 Imágenes de probetas tipo B fabricadas con el acero modelo AISI 9840 a) temple interrumpido (20 LPM), b) temple interrumpido (60 LPM). Ataque con Nital3, magnificación 5X. ....	48

Figura 5.7 Perfil final de microdureza en una probeta tipo B, temple interrumpido a 20 LPM (puntos verdes) temple interrumpido a 60 LPM, (puntos azules). La línea vertical marca el borde de la probeta. ....	49
Figura 5.8 Microestructura (arriba) y perfil de dureza (abajo) de una probeta tipo B después del temple interrumpido con flujo de medio de temple; a) 20 LPM, b) 60 LPM.....	49
Figura 5.9 Curva de enfriamiento durante el temple interrumpido: a) probeta tipo A de acero AISI 9840 con flujo de agua de 70 LPM y b) probeta tipo B de acero AISI 9840 con flujo de 60 LPM.....	50

### **Índice de Tablas**

Tabla 2.1 Composición química nominal del acero AISI 9840 .....	14
Tabla 2.2 Propiedades físicas del acero AISI 9840.....	14
Tabla 3.1 Resumen de experimentos realizados. ....	22

## Resumen

En la planta Tultitlán de la empresa Gerdau-Corsa se produce varilla corrugada de alta resistencia mecánica. Para lograr esto, la varilla ya conformada se temple mediante *coolers* hasta formar una capa superficial de martensita; luego, se interrumpe el temple, continuando con un enfriamiento en aire quieto para provocar el auto-revenido de la capa martensítica mientras el centro de la varilla transforma a trazas de bainita. Esta distribución microestructural produce una relación resistencia máxima/tensión de fluencia que cumple con los requerimientos para varilla de construcción. El proceso se conoce como *QTB* (*Quenched and Tempered Bar*).

En este trabajo se desarrolló un modelo experimental, a escala laboratorio, que permita estudiar procesos de temple + auto-revenido de varillas de acero procesadas mediante *QTB*.

Cuando no es factible utilizar en el laboratorio el mismo acero que se usa en planta se recurre a un acero modelo, de tal forma que la distribución final de la microestructura sea similar a la que se observa en planta. En este trabajo se seleccionó un acero de medio carbono baja aleación (AISI 9840) como modelo experimental.

Para seleccionar al acero modelo se realizaron pruebas Jominy estándar e interrumpidas; durante las pruebas se midió la respuesta térmica local en diversas posiciones a lo largo del eje de la probeta y posteriormente se realizó observación metalográfica y medición del perfil de dureza. Con estos resultados, se procedió a medir la curva de enfriamiento durante el temple interrumpido de probetas (cilíndricas, con punta cónica) fabricadas con el acero modelo.

Las probetas se instrumentaron con dos termopares: uno en el centro geométrico de la probeta y otro a una distancia de 2.38 mm de la superficie de la misma. Se

estudiaron tres severidades de temple: baja, media y alta. Las probetas ya templadas se prepararon metalográficamente, usando técnicas estándar, para su observación con el microscopio óptico. También se midió el perfil final de microdureza.

De los resultados obtenidos se concluye que por medio de la combinación del acero modelo propuesto y la técnica de enfriamiento se pudo generar un anillo externo de martensita y un centro de productos de transformaciones difusionales.

## 1 Introducción

En la planta de Gerdau Corsa (Tultitlán), las propiedades mecánicas de las varillas producidas se obtienen mediante el proceso de temple interrumpido conocido como *Quenched and Tempered Bar (QTB)*. Este proceso consiste en el calentamiento controlado de las varillas corrugadas hasta una temperatura específica, 1200°C en este caso, después de lo cual las varillas se templan con agua mediante el uso de dispositivos denominados “*coolers*” dentro de los cuales el material se enfría mediante inmersión en una corriente de agua en flujo paralelo a la dirección del desplazamiento de la varilla para formar una capa superficial martensítica mientras el núcleo permanece con una estructura austenítica. En ese momento se interrumpe el enfriamiento con agua, quedando la varilla expuesta a aire quieto. En esta segunda etapa del proceso, el núcleo austenítico transforma en una microestructura bainítica/ferrítica y el calor latente liberado por el núcleo durante esas transformaciones, produce un revenido a la estructura martensítica de la capa superficial. Así se obtiene una varilla con una estructura de alto límite de fluencia y buena ductilidad.

Si bien la industria de los tratamientos térmicos ha funcionado con base a experimentación, la metodología conocida como Ingeniería Microestructural (basada en modelos matemáticos mecanísticos, mediciones en planta y mediciones en el laboratorio) es cada vez más utilizada para proveer de una base sólida para el diseño y la optimización de procesos basados en tratamientos térmicos.

La Ingeniería Microestructural aplicada a tratamientos térmicos se fundamenta en la modelación matemática de los campos térmico, microestructural y de desplazamientos; el último solo se considera cuando las piezas sufren distorsiones significativas durante el tratamiento térmico. La validación de este tipo de modelos matemáticos puede llevarse a cabo en el laboratorio, en una

planta piloto o directamente en planta y utiliza: 1) curvas de enfriamiento medidas en planta y 2) distribución final de los microconstituyentes y/o propiedades mecánicas finales.

La medición de las curvas de enfriamiento permite también, a través de la solución del problema inverso de conducción de calor correspondiente, estimar la condición de frontera térmica activa. En la planta, las varillas se mueven a alta velocidad por cajas de enfriamiento (cerradas) para templarlas con agua usando *coolers*, por lo que no es sencillo instrumentarlas en planta. Por otra parte, para una aproximación inicial al proceso industrial no se justifica la construcción de una planta piloto.

### **1.1 Justificación**

Una aproximación inicial al proceso industrial del proceso *QTB* no justifica la construcción de una planta piloto. Es por esto que en este trabajo se desarrolló un modelo experimental, a escala laboratorio, que permite estudiar procesos de temple + auto-revenido de varillas de acero. Se espera que la información experimental generada pueda usarse para validar un modelo matemático que se desarrollará en el futuro.

### **1.2 Hipótesis**

Es posible desarrollar un modelo experimental del proceso de temple + auto-revenido usando un equipo de temple por convección forzada (flujo en paralelo) y una probeta cilíndrica de acero de medio carbono, baja aleación, que reproduzca el patrón de transformación de fase de varillas de acero al carbono templadas en la planta.

### **1.3 Objetivo**

- Seleccionar y validar un acero modelo del proceso de temple + auto-revenido, para ensayos a escala laboratorio.

### **1.4 Metas**

- Seleccionar el acero modelo.
- Fabricar probetas de ½ in. y 1 in. de diámetro, del acero modelo.
- Medir la respuesta térmica durante el ensayo Jominy del acero modelo.
- Medir la respuesta térmica durante el ensayo Jominy interrumpido del acero modelo.
- Medir la respuesta térmica durante el temple continuo de las probetas.
- Medir la respuesta térmica durante el temple interrumpido de las probetas.
- Caracterizar la distribución final de los microconstituyentes y el perfil de dureza de las probetas templadas.

## **2 Antecedentes**

### ***2.1 Tratamientos térmicos***

Una definición de tratamiento térmico es: “una combinación de operaciones de calentamiento y enfriamiento, en tiempos determinados y aplicadas a un metal o aleación en el estado sólido en una forma tal que producirá propiedades deseadas” [1]. Desde luego, las propiedades obtenidas dependen de la distribución final de microconstituyentes y de sus características morfológicas.

#### ***2.1.1 Temple***

Uno de los atributos del acero es su capacidad para endurecerse, lo que resulta de la transformación de austenita en martensita. Para obtener una microestructura martensítica con las propiedades deseables, el acero debe ser tratado térmicamente; el temple y el revenido son los tratamientos térmicos comúnmente utilizados para este fin.

El temple involucra calentar la pieza hasta la región de estabilidad de la austenita (austenización), mantener el material durante un cierto tiempo a esta temperatura y luego realizar un enfriamiento rápido, evitando cualquier transformación intermedia (por ejemplo, de austenita a ferrita, cementita, perlita o bainita) para asegurar la formación de martensita. Este procedimiento produce un incremento en la dureza debido a la formación de martensita. Su efectividad puede variar dependiendo del porcentaje de contenido de carbón y elementos de aleación del del acero, el tipo de medio de temple, así como la temperatura y la agitación del medio de temple [1].

Una herramienta ampliamente utilizada en la industria del temple es el análisis de curvas de enfriamiento [2]. Para esto se acostumbra utilizar probetas (usualmente cilíndricas) instrumentadas para medir la respuesta térmica (o curva de enfriamiento) cuando la probeta se sumerge completamente en el baño de

temple. A partir de esta información se pueden conocer las etapas de extracción de calor, caracterizar al medio de enfriamiento e incluso estimar la condición a la frontera del problema térmico. La estructura, dureza y resistencia resultantes del tratamiento térmico de temple, están determinadas por la rapidez de enfriamiento promedio durante el proceso. Si ésta es mayor que la crítica, se obtendrá una microestructura completamente martensítica; si es menor, la microestructura formada puede ser bainita o perlita fina. La dureza en cada caso será distinta; en el primer caso el acero endurece totalmente, mientras que en el segundo no. Como la historia de rapidez de enfriamiento depende de la extracción de calor hacia el medio de temple es necesario cuantificar los mecanismos de extracción de calor durante el temple [2].

Cuando se utiliza agua como medio de temple se observan tres etapas distintas, durante el temple [3]:

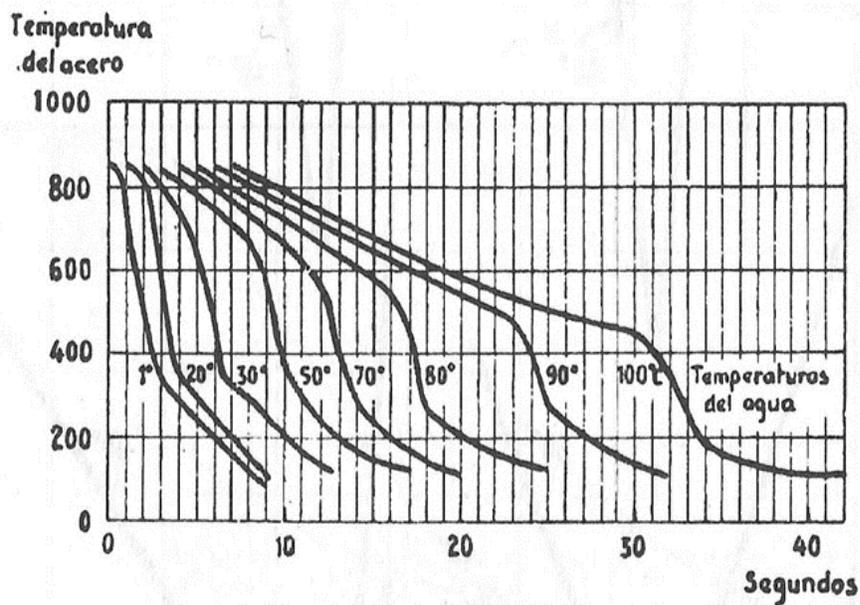
Primera etapa. Se caracteriza por la formación de una capa de vapor continua, que rodea al metal caliente y que se produce por a la temperatura tan alta a la que se encuentra el metal, lo cual provoca la vaporización del medio de temple en la superficie del metal; el enfriamiento se lleva a cabo por conducción y radiación a través de la capa gaseosa. Esta etapa se conoce como de ebullición en presencia de capa de vapor.

Segunda etapa. Cuando desciende la temperatura de la superficie del metal, la capa de vapor se rompe; sin embargo el líquido ebulle todavía alrededor de la pieza formándose burbujas que rodean el acero. Esta es la etapa más rápida de enfriamiento y es llamada ebullición con formación de burbujas.

Tercera etapa. El enfriamiento se lleva a cabo por convección cuando la diferencia de temperatura entre la superficie y el medio de enfriamiento es pequeña. Esta es la etapa más lenta de enfriamiento y depende de la temperatura del líquido y de su agitación.

La temperatura del baño de temple afecta marcadamente su habilidad para extraer calor. Generalmente, conforme aumenta la temperatura del medio de temple la rapidez de enfriamiento promedio disminuye lo cual se debe a un aumento en el tiempo de duración de la primera etapa. Como el medio está más cercano a su punto de ebullición, se necesita menos energía térmica para formar la capa de vapor.

La Figura 2.1 muestra curvas de enfriamiento para muestras templadas en agua a diferentes temperaturas y sin agitación [3]; como se puede ver, el temple en agua a 1°C requiere del menor tiempo para enfriar la muestra, siendo cada vez mayor el tiempo requerido para temperaturas altas. También se aprecia como aumenta la duración de la región de ebullición en presencia de capa de vapor.



**Figura 2.1** Curvas de enfriamiento del centro de muestras templadas en Agua a diferentes temperaturas y sin agitación [3].

En procesos de temple de aceros ocurren transformaciones de fase que son siempre exotérmicas (para enfriamiento) por lo que podría observarse recalescencia en las curvas de enfriamiento. Esto depende del balance de calor durante el enfriamiento.

Balance general de calor

$$\sum E + \sum G = \sum S + A \quad (2.1)$$

No hay entrada en el sistema

$$G = S + \rho C_p V \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.2)$$

Despejando la rapidez de enfriamiento se obtiene

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{G-S}{\rho C_p V} \quad (2.3)$$

Entonces, se tienen dos posibles escenarios:

$$\text{Si } G > S : \quad \frac{\partial T}{\partial t} > 0 \quad (2.4)$$

$$\text{Si } G < S : \quad \frac{\partial T}{\partial t} < 0 \quad (2.5)$$

### **2.1.2 Revenido**

El acero en estado endurecido carece de aplicación práctica debido a su condición de fragilidad, que surge por la formación de la martensita que resulta en esfuerzos internos significativos; por esta razón, el tratamiento térmico de revenido tiene como finalidad liberar los esfuerzos internos, mejorando la ductilidad y la tenacidad del acero, pero sin disminuir drásticamente la dureza obtenida por el temple [4].

El revenido del acero comprende el calentamiento del acero endurecido a una temperatura abajo de la crítica inferior ( $A_{c1}$ ) y enfriándolo a una velocidad conveniente. Por lo general, dentro del rango de temperaturas de revenido, hay un decremento en dureza y un mayor aumento en tenacidad conforme aumenta la temperatura del revenido [4].

### **2.2 Templabilidad**

Se puede definir la templabilidad como la capacidad que tiene un acero para endurecer a profundidad por medio del temple [5]. Cuando un acero se temple, la rapidez de enfriamiento es máxima en la superficie y disminuye hacia el centro. La formación de martensita sólo ocurre en la parte de la pieza donde se logró sobrepasar la rapidez crítica de enfriamiento.

Para aceros no aleados la rapidez crítica es tan alta, que sólo se obtiene una capa de martensita relativamente delgada, aun templando en agua. La variación de la rapidez de enfriamiento desde la superficie hasta el centro de la pieza, está determinada por la relación entre masa y superficie y es función también de las propiedades termofísicas del acero. La dureza de la martensita es dependiendo de su contenido de carbono. Si un dado que el acero no permite que se forme una estructura martensítica a una profundidad mínima requerida, hay que elegir otro acero [5].

### 2.3 Ensayo Jominy

Este ensayo normalizado, según los lineamientos de la norma ASTM "A 255-02" [6], consiste en enfriar una probeta de 1 in (25.4 mm) de diámetro y 4 in (101.6 mm) de largo, austenizada, por medio de un chorro de agua que se hace incidir en uno de sus extremos. De esta forma cada punto a lo largo de la probeta, a partir del extremo en contacto con el agua, presentará una historia de rapidez de enfriamiento distinta.

La dureza de la probeta se mide sobre uno de sus lados, ya rectificado, efectuando estas mediciones cada dieciseisavo de pulgada en la primera pulgada de longitud y después aumentando el espaciado entre medición y medición, permitiendo construir una gráfica de dureza contra distancia desde el extremo templado, como la mostrada en la Figura 2.2 [7].

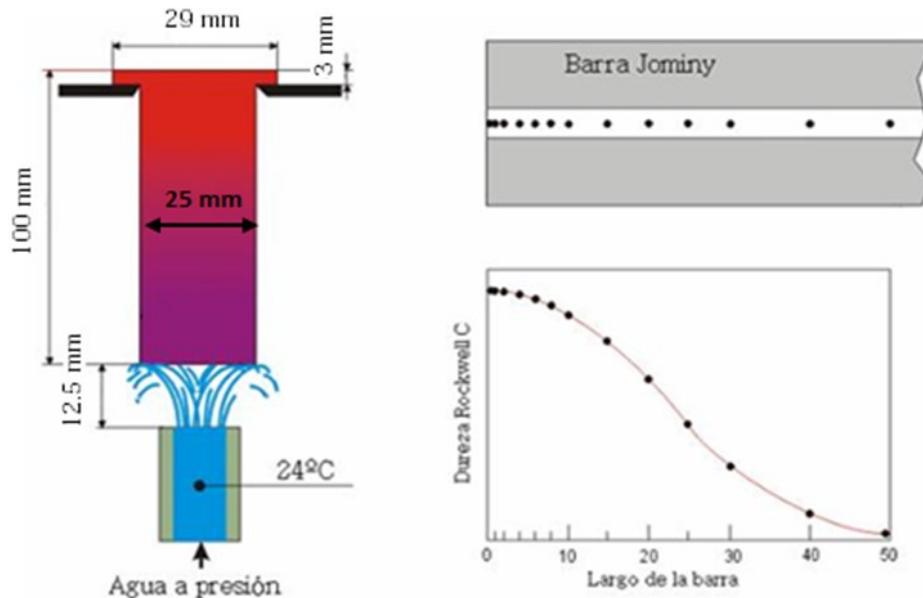
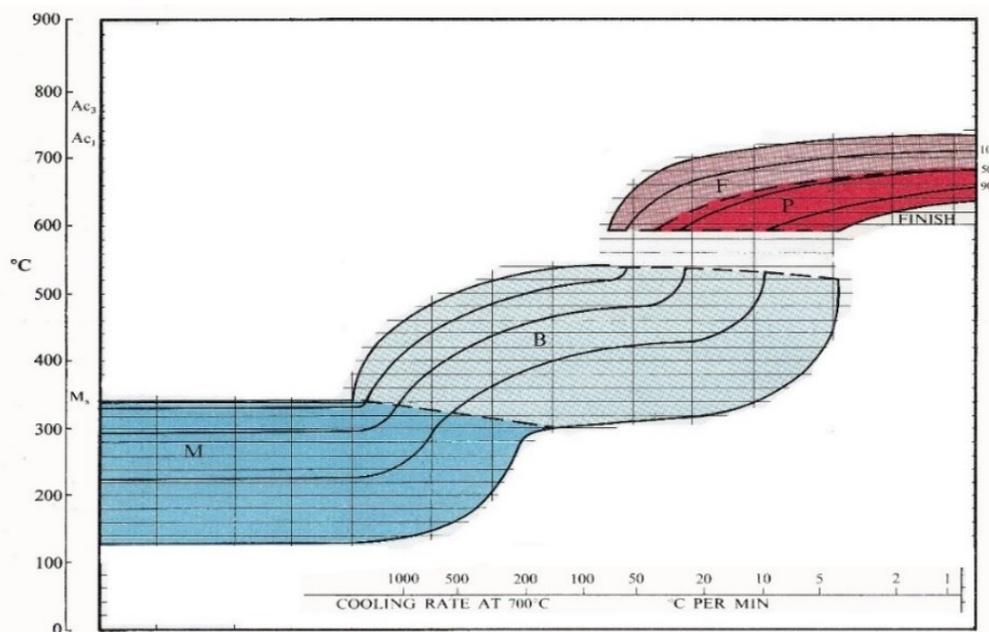


Figura 2.2 Ensayo Jominy y curva de templabilidad [7]

## 2.4 Diagramas CCT

La evolución de la microestructura durante un enfriamiento continuo se representa mediante diagramas CCT (*Continuous Cooling Transformation*), que pueden graficarse ya sea con el tiempo o con la rapidez de enfriamiento (a temperatura dada) en el eje de la variable independiente. Como ejemplo, en la Figura 2.3 se muestra el diagrama CCT para un acero AISI 9840; en él se observa la variación de la microestructura en función de la rapidez de enfriamiento [8]. Para este ejemplo, la rapidez crítica (medida a 700 °C) es de 2005.8 °C/min. Los colores delimitan las zonas de:

- F = Ferrita
- P = Perlita
- B = Bainita
- M = Martensita



**Figura 2.3** Diagrama CCT para un acero AISI 9840 [8]

## **2.5 Proceso QTB (*Quenched and Tempered Bar*)**

El proceso de temple interrumpido conocido como *QTB* (por sus siglas en inglés) consiste en hacer pasar la varilla caliente, a través de un adecuado sistema de enfriamiento con agua a presión, que le proporciona un corto e intenso tratamiento superficial [9].

Debido a que solo en una zona cercana a la superficie se rebasa la rapidez de enfriamiento crítica, la capa superficial de la varilla transforma a una estructura martensítica mientras el núcleo permanece con una estructura austenítica. Luego de este enfriamiento intenso por agua, la barra queda expuesta a enfriamiento con aire quieto, por lo que el calor latente liberado por el núcleo durante su posterior transformación produce un revenido a la estructura martensítica de la capa superficial. Así, el núcleo se transforma en una microestructura bainítica/ferrítica.

Como resultado de este proceso, se obtiene una barra con una estructura de alto límite de fluencia, combinado con una gran ductilidad. Las barras de acero así tratadas ofrecen una serie de ventajas respecto a las del tipo convencional, logrando satisfacer holgadamente los requisitos de las normas para el límite elástico, alargamiento y, fundamentalmente, proporcionándole una excelente característica de doblado [9].

## **2.6 Modelos experimentales**

El animal de laboratorio es una de las piezas fundamentales en las ciencias biomédicas. Son usados como modelos para investigar y comprender las causas, diagnóstico y tratamiento de enfermedades que afectan al humano y a los animales, sin arriesgar al usuario final. Es decir, el animal de laboratorio es un modelo experimental para realizar pruebas [10].

De manera similar, cuando no es factible utilizar en el laboratorio el mismo acero que se usa en planta se recurre a un acero modelo, de tal forma que la distribución final de la microestructura sea similar a la que se observa en planta. En este trabajo es necesario utilizar un acero modelo, ya que no se cuenta en el laboratorio con la presión ni con el flujo de agua necesario para lograr el efecto de temple que se quiere obtener en el acero usado en planta. Por otra parte no es factible, de momento, realizar mediciones en la planta.

## 2.7 Acero AISI 9840 [11]

**Tabla 2.1** Composición química nominal del acero AISI 9840

C% 0.38/0.43	Mn% 0.70/0.90	Mo% 0.20/0.30	P% 0.040 Máx.
Si% 0.20/0.35	Cr% 0.70/0.90	Ni% 0.85/1.15	S% 0.040 Máx.

- Descripción

Acero de baja aleación y medio carbono. Su alta templabilidad permite obtener buenas propiedades en secciones grandes; es considerado como una buena opción cuando se requiere de buena dureza y alta tenacidad.

- Aplicaciones

Industria automotriz: Cigüeñales, flecha para eje trasero, bielas motrices, propelas, engranes, flechas de dirección, semiejes para remolques, flechas de transmisión y potencia. Brocas de perforación.

**Tabla 2.2** Propiedades físicas del acero AISI 9840

Densidad, kg/cm <sup>3</sup>	Temperaturas críticas, °C	Temperatura de Austenización, °C
7.845	Ac1 = 738 Ac3 = 775	845

### **3 Desarrollo Experimental**

#### **3.1 Selección del acero modelo**

Para el trabajo experimental se planteó realizar experimentos de temple por convección forzada [12] con flujo en paralelo. Dado que ya se tenían resultados de curvas de enfriamiento obtenidas con probetas cilíndricas de punta cónica, fabricadas con acero inoxidable AISI 304, el primer paso fue calcular la rapidez de enfriamiento a valores específicos de temperatura local, dado que varios diagramas *CCT* tienen a esa variable como variable independiente.

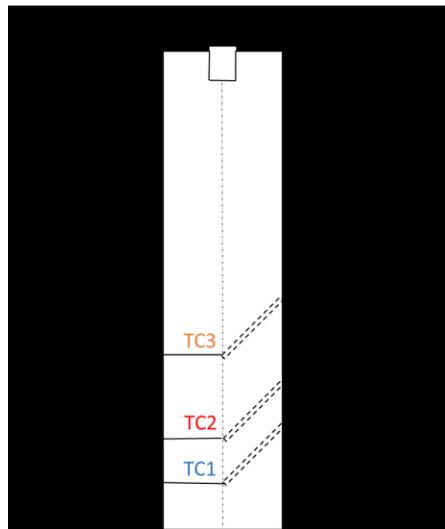
Con esa información, se revisaron diagramas *CCT* de aceros aleados para seleccionar al acero modelo tanto en términos de templabilidad como de existencia en el mercado. Como resultado de esto, se decidió trabajar con probetas fabricadas con acero AISI 9840. Las barras utilizadas ya contaban con un tratamiento de recocido previo a la experimentación.

#### **3.2 Ensayo Jominy estándar e interrumpido**

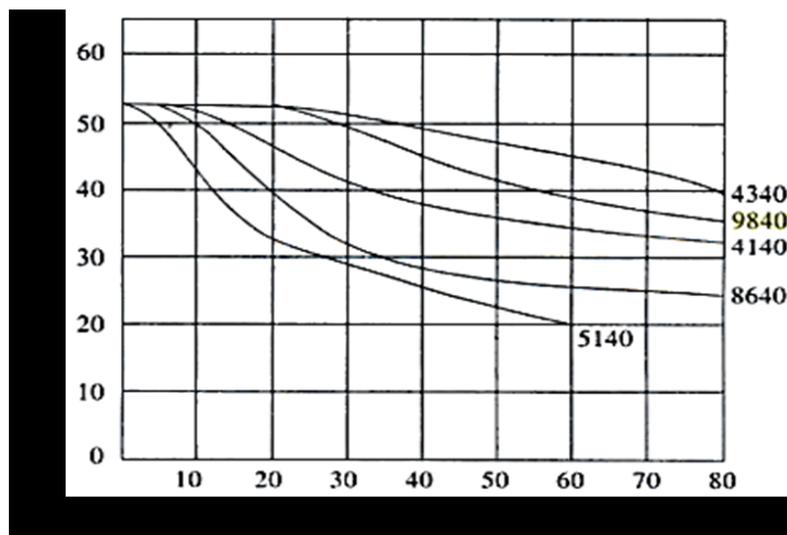
Como un primer paso para ensayar temples interrumpidos, el acero modelo se sometió a un ensayo Jominy, primero estándar y luego interrumpido. El objetivo de estas pruebas fue medir la curva de enfriamiento (respuesta térmica) en varios puntos a lo largo de la probeta, para su posterior análisis. Para la realización de los experimentos se utilizó una probeta Jominy estándar, de acero AISI 9840. Se siguieron los lineamientos de la norma ASTM "A 255-02" para las dimensiones de las probetas: 101.6 mm (4 in) de largo y 25.4 mm (1 in) de diámetro. Para poder medir las curvas de enfriamiento locales se maquinaron 3 barrenos a la probeta, con una inclinación de 45° - con respecto a la vertical - a diferentes distancias, como se observa en la Figura 3.1; en cada barreno se insertó un

termopar tipo K, de 1/16 in de diámetro y 60 cm de longitud, previamente calibrado.

Las probetas se ajustaban al extremo de una lanza de acero inoxidable la cual se podía montar posteriormente en el equipo que se utilizó para la realización de las pruebas. La distribución de los termopares se definió conociendo la templabilidad reportada del acero (ver Figura 3.2).

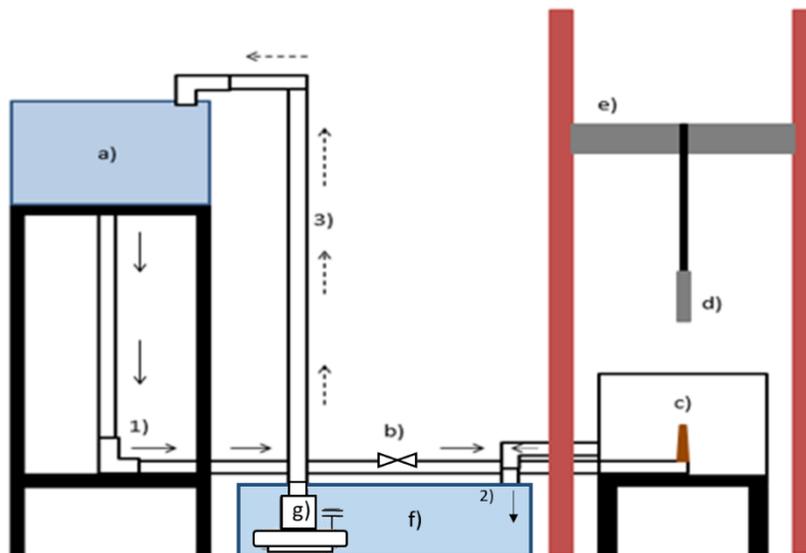


**Figura 3.1** Representación esquemática de la probeta Jominy de acero AISI 9840, mostrando los barrenos para insertar los termopares.



**Figura 3.2** Perfiles de dureza resultantes de un ensayo Jominy para varios aceros [13].

El equipo que se utilizó está compuesto (ver Figura 3.3) por un tanque de acrílico montado sobre una estructura de acero, con una conexión con un empaque en la parte inferior, el cual conecta con un tubo horizontal de PVC. Este a su vez se conecta mediante un codo con otra tubería de PVC, la cual tiene una llave de paso para controlar el flujo de agua. Esta última tubería se conecta con otro tanque de acrílico el cual contiene el tubo de salida del flujo de agua. El tubo de salida es de cobre y tiene un diámetro de 0.5 in, como indica la norma ASTM para el ensayo Jominy. Este último tanque también tiene una salida de agua hacia un contenedor de plástico. Este contenedor tiene una bomba sumergible con la cual se recircula el agua hacia el primer tanque haciendo que este proceso tenga recirculación continua del agua. Para poder manipular la probeta durante el ensayo, esta se ajustaba a una lanza de acero, la cual posteriormente se montaba en un riel que corría de arriba a abajo a lo largo de una estructura de acero de manera que la probeta subía lo necesario para ser calentada por el horno y bajaba hasta una cierta altura que se calculaba para que la base de la probeta fuera la única que entrara en contacto con el flujo de agua, respetando las distancias indicadas por la norma.



**Figura 3.3.** Esquema del equipo experimental para el ensayo Jominy: a) tanque con agua, b) llave de paso, c) tanque de salida de agua con tubo de cobre, d) probeta Jominy montada en la lanza, e) estructura de acero con riel, f) tanque de captura y recirculación de agua, g) bomba de agua sumergible; (1) flujo del agua, (2) descarga de agua y (3) recirculación de agua [14].

El procedimiento experimental consistió en adquirir la respuesta térmica en la posición de la punta caliente de los termopares introducidos en la probeta. Para ello se utilizó un sistema de adquisición de datos el cual consistía en una *laptop*, un adquisidor de datos (marca IOTECH modelo Personal Daq/56™), el *software* (personal Daqview 2.2.1) para controlar el adquisidor, termopares y extensiones para termopar. La frecuencia con la que se obtenían los datos fue de 10 datos por segundo, es decir, un dato cada 0.1 segundo.

Los pasos que se realizaron en la prueba fueron los siguientes:

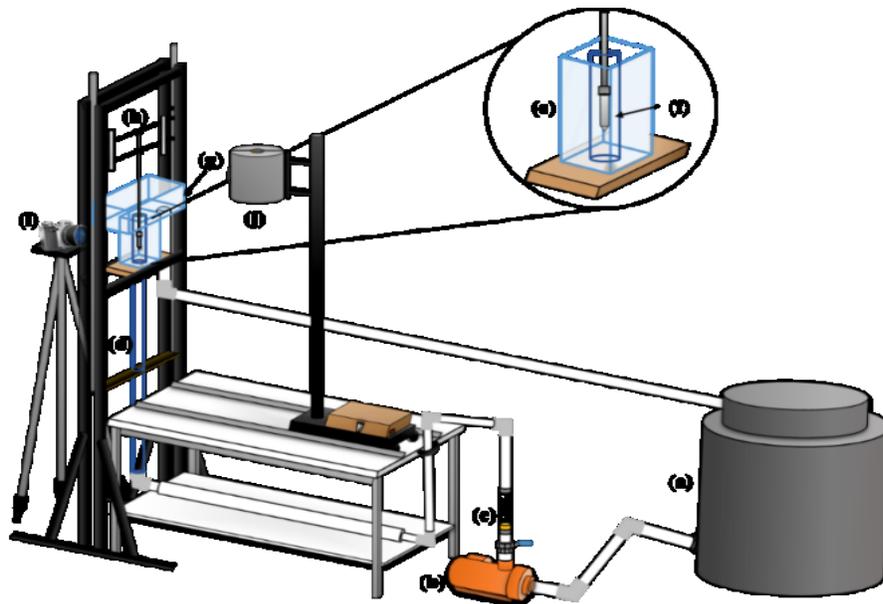
- 1) Fijar la distancia a la que bajaría la probeta, de manera que quedaran 0.5 in de separación entre la base de la probeta y la salida del tubo de cobre.
- 2) Calentar el horno a 900 °C.
- 3) Comenzar la circulación de agua.
- 4) Controlar el flujo de agua con la llave de paso a manera de que la salida de agua por el tubo de cobre tuviera una altura libre aproximada de 2.5 in.
- 5) Calentar la probeta en el horno hasta una temperatura similar a la de operación en la planta (900°C).
- 6) Mantener a esa temperatura durante 20 minutos.
- 7) Abrir y remover el horno.
- 8) Bajar rápidamente la probeta a la posición de prueba.

Se realizaron ensayos estándar, es decir, enfriando la probeta durante 10 minutos y ensayos interrumpidos, es decir, cortando el flujo de agua después que el termopar cercano a la base de la probeta alcanzaba una temperatura dada, por debajo de Ms de este acero.

Al finalizar el ensayo, se midió el perfil axial de dureza y se preparó una de las caras laterales de la probeta para observación metalográfica. El reactivo de ataque fue Nital al 3%. La observación se realizó con un microscopio óptico equipado con una cámara (OLYMPUS SZX16) del Instituto de Investigaciones en Materiales (UNAM).

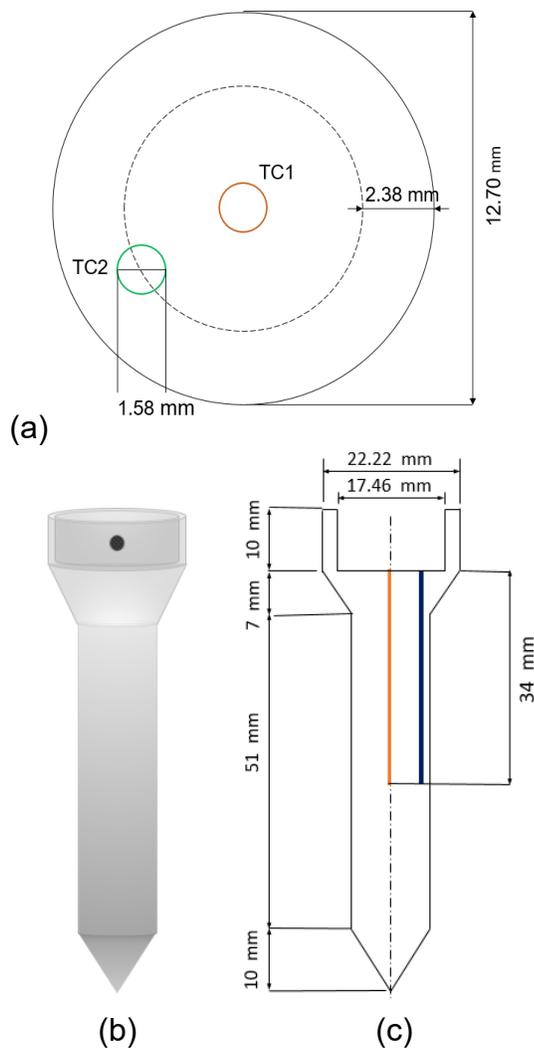
### 3.3 Temple de probetas cilíndricas de punta cónica

En la Figura 3.4 se muestra un esquema del equipo experimental para templar probetas cilíndricas de punta cónica con flujo paralelo a la probeta [15]. Para hacer fluir el agua se utiliza una bomba de 0.5 HP, que está conectada a un tanque de almacenamiento. El flujo de agua generado por la bomba se regula mediante un rotámetro (*Blue White*, modelo F429, 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 al impactar la probeta en la zona de prueba). Después de circular alrededor de la probeta, el agua se captura y se 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 [15].

En primera instancia, se trabajó con probetas de acero inoxidable AISI 304, que ofrece la ventaja de realizar varias pruebas con una misma probeta dado que, con este material, no era necesario conocer la microestructura final y por tanto, no se requería seccionar la probeta después del ensayo. El objetivo de estas pruebas fue el determinar la estrategia para realizar, luego, temple interrumpidos de probetas fabricadas con el acero modelo. La probeta tipo A de acero inoxidable tiene la geometría que se muestra en la Figura 3.5; las probetas se instrumentaron con dos termopares: uno en el centro geométrico de la probeta, y otro a una distancia de 2.38 mm de la superficie de la misma.

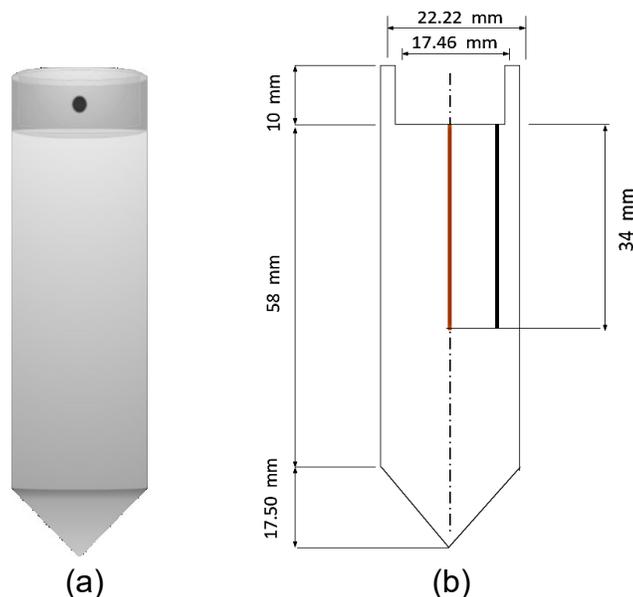


**Figura 3.5** Esquema y dimensiones de la probeta tipo A, cilíndrica de punta cónica:  
a) vista superior; b) vista isométrica; c) corte transversal.

En una segunda etapa, se midió la curva de enfriamiento durante el temple de probetas tipo A (cilíndricas, con punta cónica) fabricadas con acero AISI 9840, también en agua a 70 °C. Al igual que con las pruebas del ensayo Jominy, en este caso se estudió la respuesta de la probeta para: 1) temple estándar y 2) temple interrumpido.

Las probetas ya templadas se prepararon metalográficamente, usando técnicas estándar y se atacaron con Nital al 3%, para su observación con el microscopio óptico.

Para estudiar el efecto del diámetro de la probeta y de la velocidad de flujo en la distribución final de la microestructura se realizaron pruebas con probetas tipo B, cilíndricas de punta cónica de 1 in de diámetro (ver Figura 3.6). Al igual que en las probetas tipo A, estas probetas se instrumentaron con dos termopares tipo K, uno en el centro geométrico de la probeta, y otro a una distancia de 2.38 mm de la superficie de la misma.



**Figura 3.6** Esquema y dimensiones de la probeta tipo B, cilíndrica de punta cónica: a) vista isométrica; b) corte transversal.

Se estudió la respuesta de la probeta para: 1) temple estándar y 2) temple interrumpido. Las probetas templadas se prepararon metalográficamente, usando técnicas estándar y se atacaron con Nital al 3%. Para confirmar la distribución final de la microestructura se midió el perfil de microdureza con un microdurómetro *Shimadzu HMV-G*, del Instituto de Investigaciones en Materiales (UNAM). Se realizaron 25 puntos de indentación por cada muestra, desde el centro hacia la orilla, utilizando una carga de 1 kgf y un indentador con punta de diamante.

### 3.4 Matriz experimental

Los experimentos realizados se resumen en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Resumen de experimentos realizados.**

	Tipo de Temple	Condiciones	
		Temperatura del medio del temple, °C	Flujo del medio de temple, LPM
Ensayo Jominy	Estándar	Por norma	
	Interrumpido	No Aplica	
		Temperatura del medio del temple, °C	Flujo del medio de temple, LPM
Probeta tipo A de acero inoxidable AISI 304	Interrumpido	70	70
	Interrumpido	70	70
	Interrumpido	70	70
Probeta tipo A de acero AISI 9840	Estándar	70	70
	Interrumpido	70	70
Probeta tipo B de acero AISI 9840	Estándar	60	20
	Estándar	60	40
	Estándar	60	60
	Interrumpido	60	20
	Interrumpido	60	40

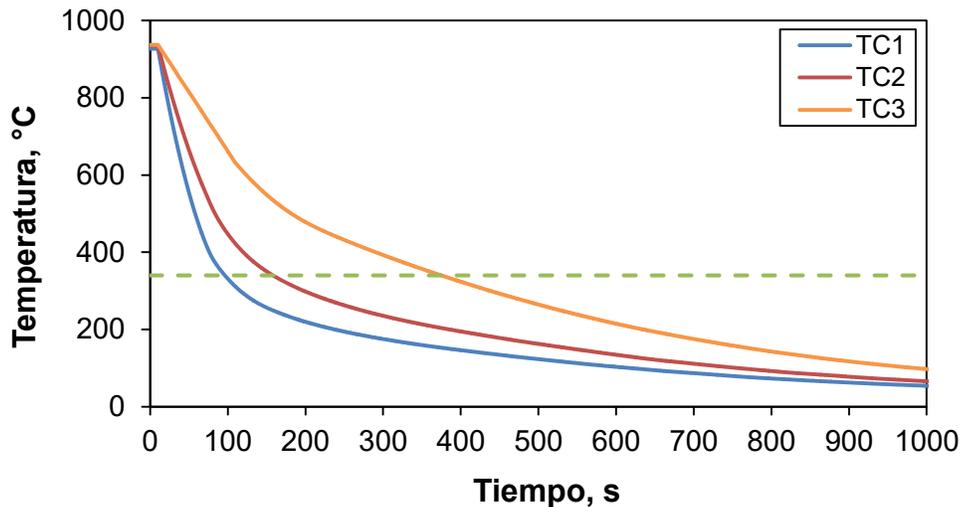
\* En todos los experimentos la probeta se austenizó a una temperatura de 900°C

## 4 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos con el trabajo experimental realizado: historias térmicas, curvas de rapidez de enfriamiento vs. temperatura de superficie, metalografías y perfil final de dureza. Se presentan en el orden siguiente: resultados del ensayo Jominy, temple interrumpidos realizados con las probetas tipo A de acero inoxidable AISI 304 y temple estándar e interrumpidos de probetas tipo A y tipo B de acero AISI 9840.

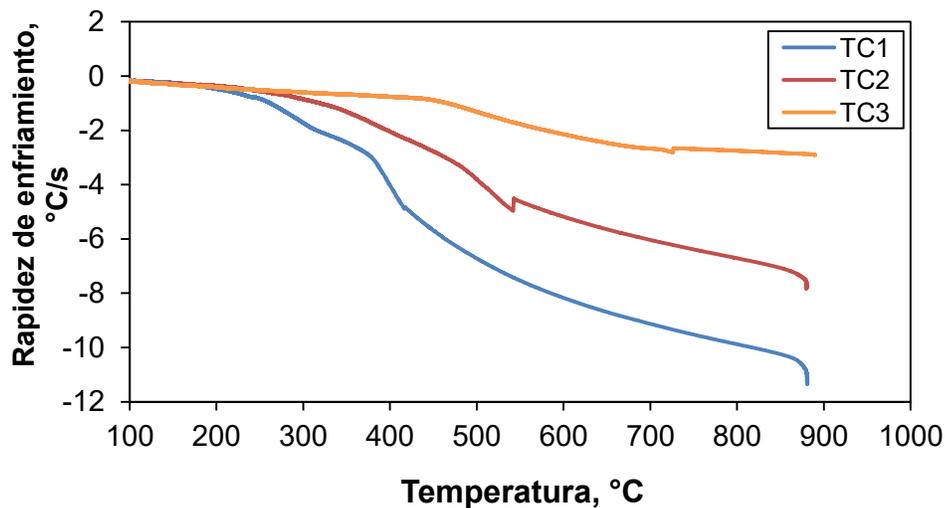
### 4.1 Ensayo Jominy

En la Figura 4.1 se muestra la respuesta térmica registrada por los termopares en el interior de la probeta de ensayo Jominy estándar. Las curvas indican, como se esperaba, que la zona donde se ubica el termopar TC1 (termopar cercano al extremo templado, ver Figura 3.1) se enfría más rápidamente que la correspondiente a los termopares TC2 y TC3.



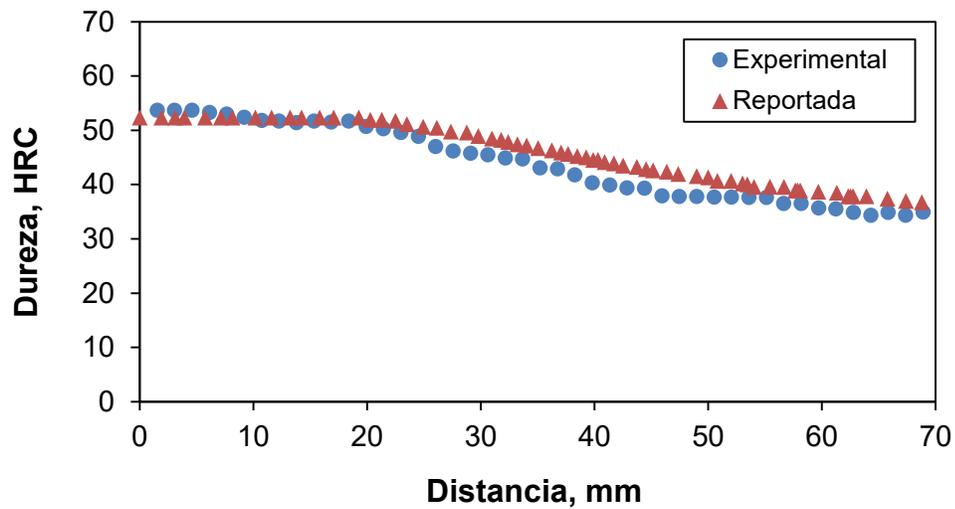
**Figura 4.1** Respuesta térmica durante el ensayo Jominy estándar de acero AISI 9840. La línea punteada corresponde a la temperatura de inicio de transformación martensítica (Ms) para este acero.

En la Figura 4.2 se observa la variación de la rapidez de enfriamiento en el ensayo Jominy estándar con respecto a la temperatura. Estas curvas se leen de derecha a izquierda, para seguir la trayectoria de enfriamiento. No se aprecia ninguna recalescencia asociada con la transformación martensítica, lo cual se debe a que la extracción de calor fue suficiente como para balancear al calor generado por la transformación de fase (ecuación 2.5). Sin embargo, pareciera haber una disminución de la rapidez de enfriamiento local cerca de 400 °C.



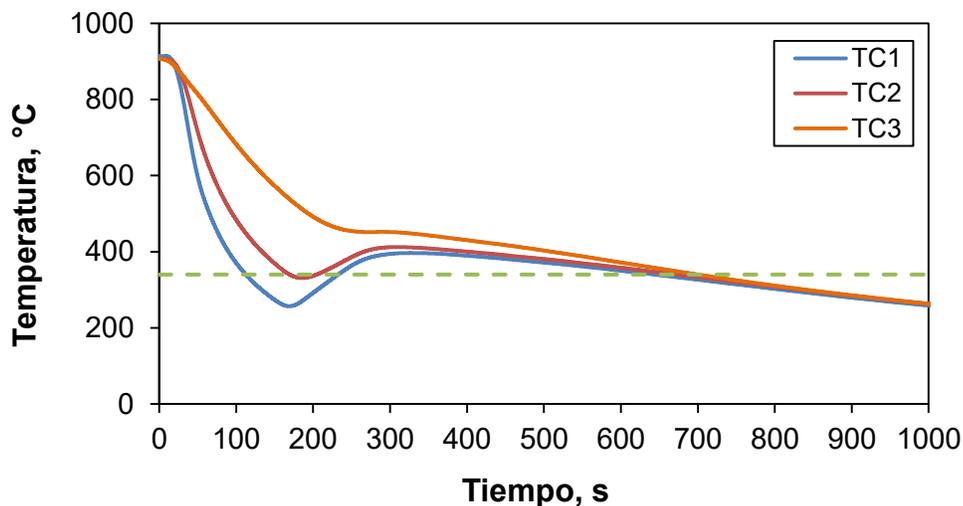
**Figura 4.2** Rapidez de enfriamiento en función de la temperatura local durante el ensayo Jominy estándar de una probeta de acero AISI 9840.

En la Figura 4.3 se compara el perfil de dureza obtenido en el ensayo Jominy estándar con la reportada en [13]. Como puede verse, ambas curvas son muy similares, lo que valida el ensayo realizado en este trabajo.



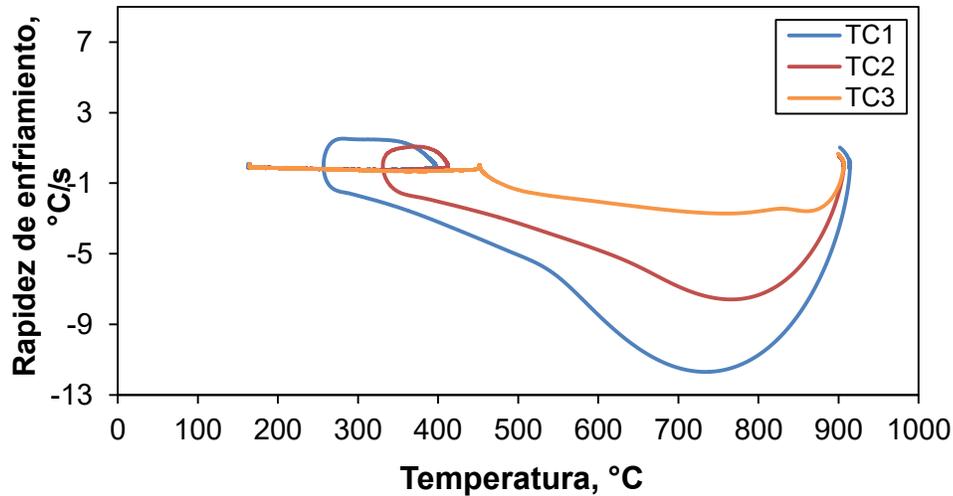
**Figura 4.3** Perfil de dureza de la probeta Jominy estándar: experimental (círculos) y reportada en [13] (triángulos).

En la Figura 4.4 se grafican las respuestas térmicas medidas durante un ensayo Jominy interrumpido. El cambio repentino en el comportamiento de las curvas se debe precisamente a que se cortó el flujo de agua a una temperatura local registrada por TC1 (superficie de la probeta) tal que se asegurara la formación de martensita en ese punto, pero no en las ubicaciones de los otros termopares.



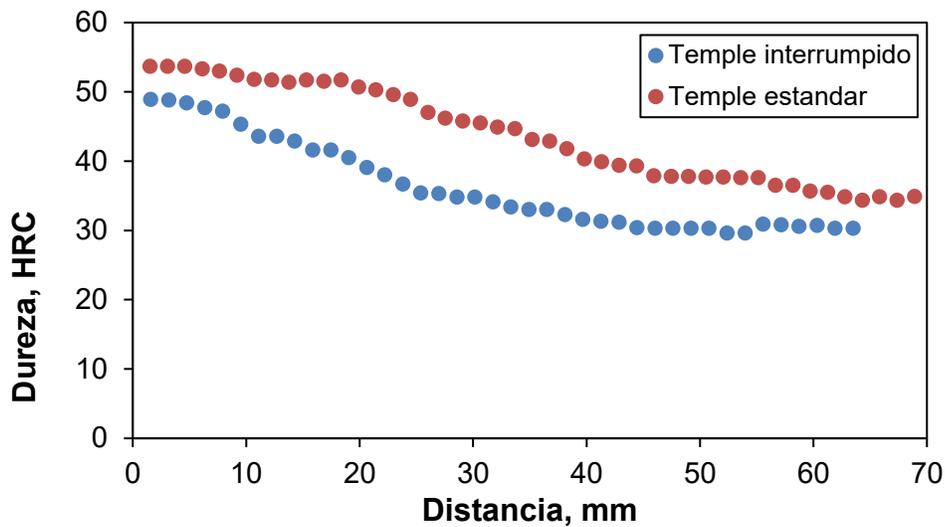
**Figura 4.4** Respuesta térmica durante el ensayo Jominy de una probeta de acero AISI 9840 con interrupción del temple. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms.

La Figura 4.5 muestra la evolución de la rapidez de enfriamiento con la temperatura local para ese ensayo. Después de alcanzar un valor máximo, la rapidez de enfriamiento disminuye hasta que, al cortar el flujo de agua, cruza hasta valores positivos. Esto no es una recalescencia debido al cambio de fase sino la respuesta del sistema al cambio súbito de medio de enfriamiento.



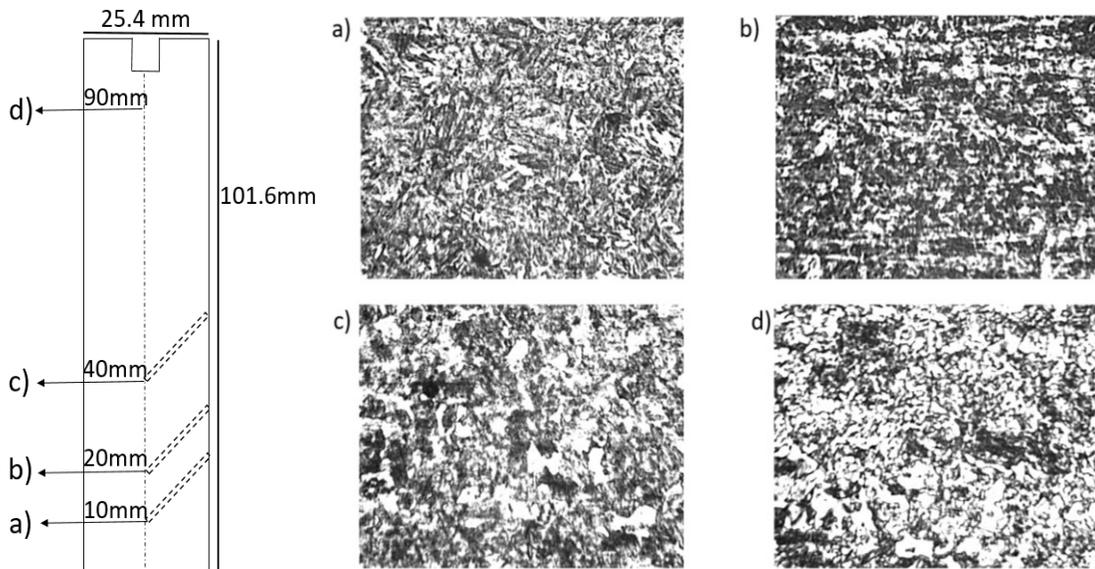
**Figura 4.5** Rapidez de enfriamiento vs. temperatura (ambos locales) durante un ensayo Jominy interrumpido.

En la Figura 4.6 se comparan los perfiles de durezas obtenidos con el ensayo Jominy estándar (círculos naranjas) y con el ensayo Jominy interrumpido (círculos azules). Como consecuencia del enfriamiento interrumpido, la dureza disminuye en todos los puntos medidos, lo cual simula lo que se pretende en el proceso.



**Figura 4.6** Perfil de dureza después del ensayo Jominy: estándar (círculos azules) e interrumpido (círculos naranjas).

En la Figura 4.7 se presenta el esquema de la probeta Jominy (señalando las posiciones de los termopares) y las fotomicrografías de las diferentes microestructuras obtenidas después del ensayo Jominy interrumpido, a lo largo de la misma, tomando como origen del sistema de coordenadas a la base de la probeta. La microestructura cambia de martensita a mezclas de bainita y perlita a medida que la zona está más alejada de la base de la probeta.

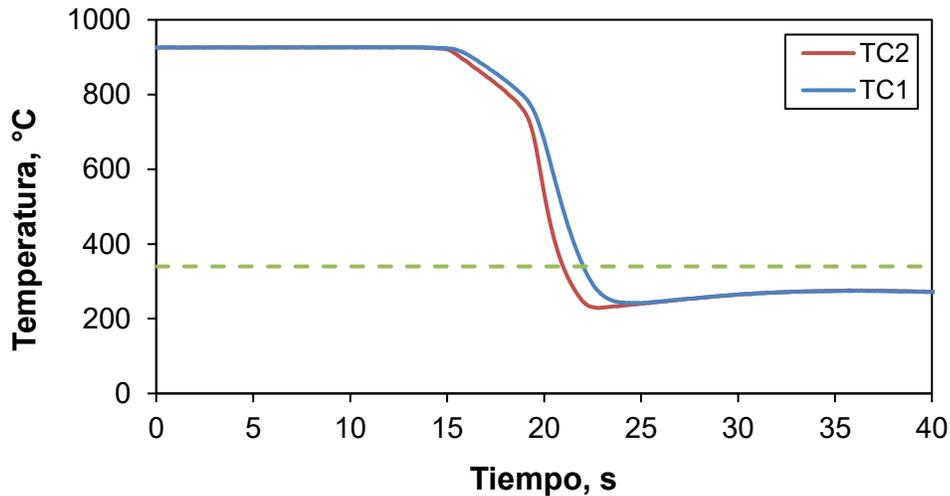


**Figura 4.7** Esquema de la probeta Jominy (izquierda) y fotomicrografía a 50X en cuatro posiciones a lo largo de la probeta: a) 10 mm, b) 20 mm, c) 40 mm, y d) 90 mm.

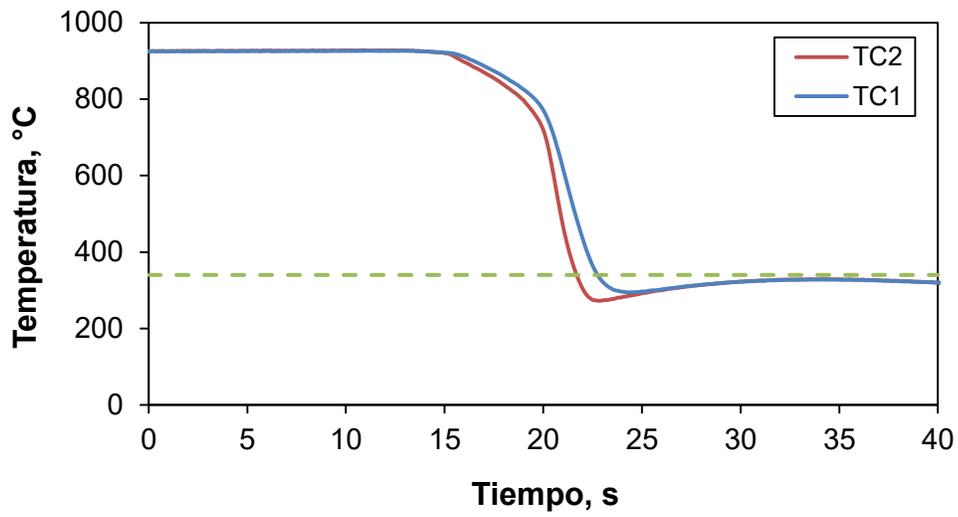
## 4.2 Temple de probetas cilíndricas de punta cónica

### 4.2.1 Pruebas con acero inoxidable AISI 304

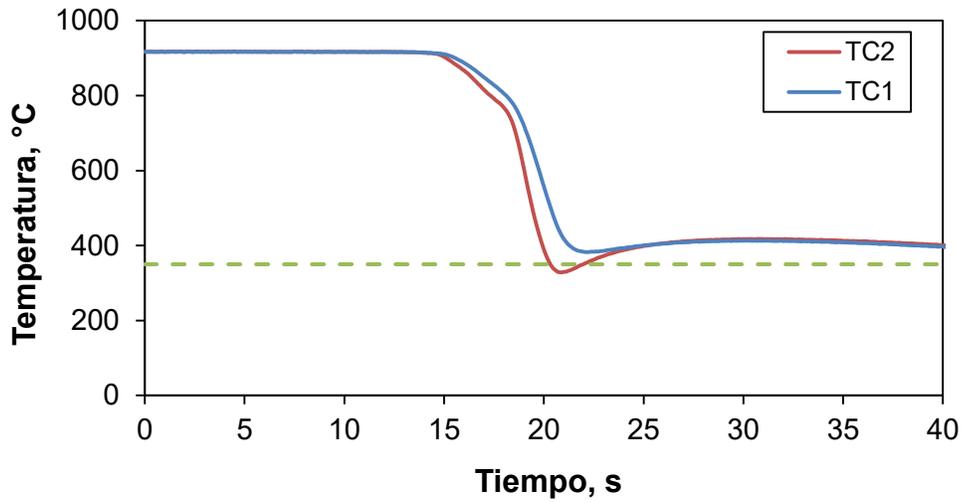
Se realizaron diversas pruebas con la probeta de acero inoxidable austenítico, como referencia para estimar a qué temperatura debería interrumpirse el temple de las probetas fabricadas con el acero modelo. En las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10 se grafica la respuesta térmica de la probeta de acero inoxidable AISI 304 sujeta a un temple interrumpido, tomando como referencia para interrumpir el temple el instante en el que el termopar más cercano a la superficie alcanzara una temperatura aproximada de 300 °C, 400 °C y 500 °C, respectivamente. En todas las figuras se aprecia una diferencia de temperatura entre el centro y la sub-superficie, lo cual es una indicación de que podrían obtenerse distintos microconstituyentes con el acero modelo. Debido a la inercia térmica de la probeta, ambas curvas rebasan la temperatura a la que se interrumpió el temple en los dos primeros casos.



**Figura 4.8** Respuesta térmica del acero inoxidable AISI 304 temple interrumpido a 300°C. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms para el acero AISI 9840.



**Figura 4.9** Respuesta térmica del acero inoxidable 304 temple interrumpido a 400°C. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms para el acero AISI 9840.

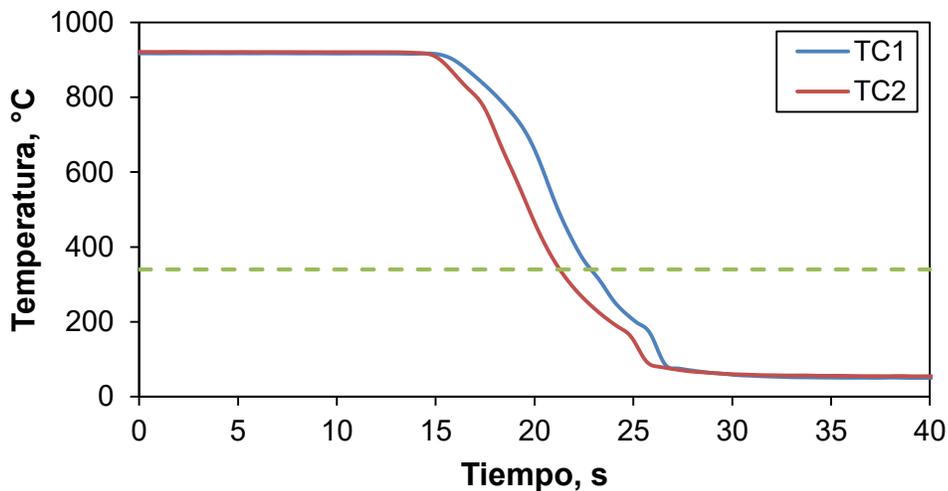


**Figura 4.10** Respuesta térmica del acero inoxidable 304 temple interrumpido a 500°C. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms para el acero AISI 9840.

#### 4.2.2 Pruebas con el acero modelo: probeta tipo A

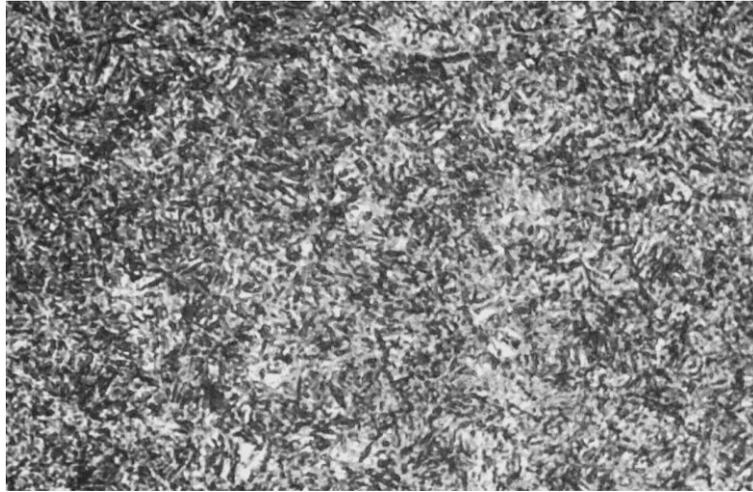
Con base a los resultados reportados en la subsección previa se realizaron temple interrumpidos con probetas de punta cónica fabricadas con el acero modelo. Al igual que en el caso del ensayo Jominy, primero se realizó un temple estándar.

En la Figura 4.11 se observa la curva de enfriamiento en un temple estándar para una probeta tipo A de acero AISI 9840. Debido al balance de calor, no se aprecia recalescencia a temperaturas cercanas a  $M_s$  de este acero. La disminución súbita de temperatura cercana a los  $100\text{ }^\circ\text{C}$  se debe, probablemente, a que llegó agua a la punta caliente de los termopares.



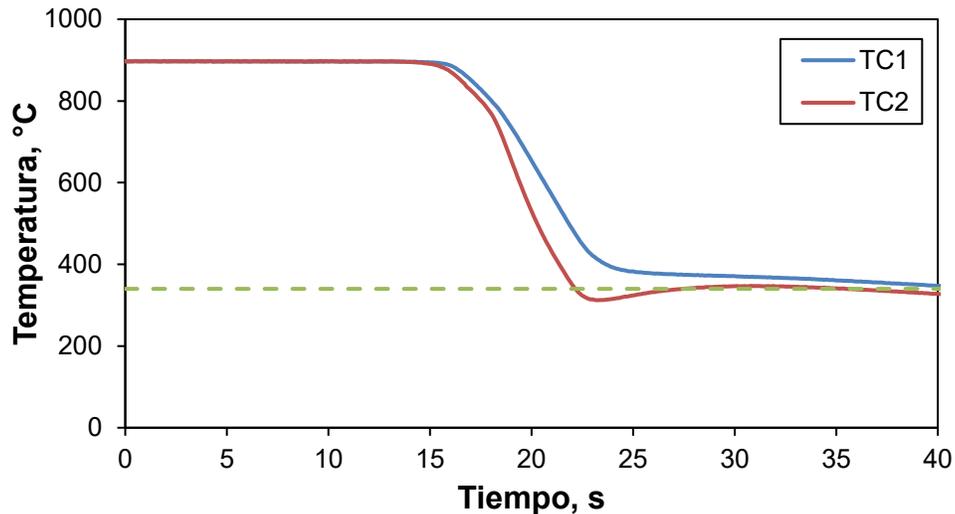
**Figura 4.11** Curvas de enfriamiento durante el temple estándar de una probeta de cilíndrica punta cónica tipo A de acero AISI 9840. La línea punteada corresponde a la temperatura de  $M_s$ .

En la Figura 4.12 se aprecia la microestructura en el centro de la probeta tipo A a un aumento de  $200\times$ , obtenida en el temple estándar de una probeta de acero AISI 9840 tipo A. Como puede apreciarse, la microestructura es martensítica.



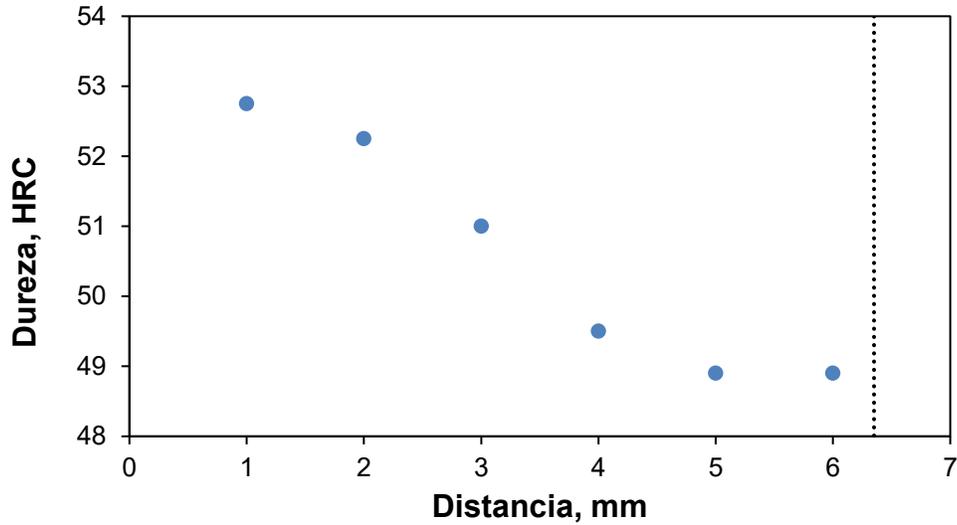
**Figura 4.12** Fotomicrografía de una región en el centro de una probeta tipo A sometida a temple estándar, 200X.

Por otro lado, en la Figura 4.13 se muestra la respuesta térmica del acero AISI 9840 interrumpiendo el temple cuando el termopar más cercano a la superficie alcanzó una temperatura aproximada de 480°C. La inercia térmica permite que en la zona cercana a la superficie ocurra la transformación a martensita.



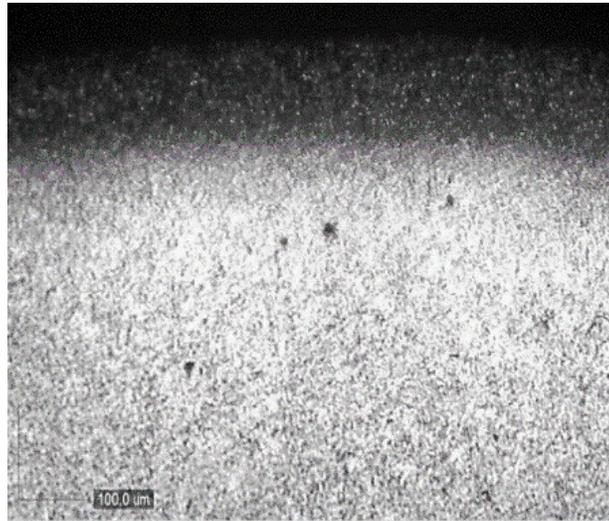
**Figura 4.13** Curvas de enfriamiento durante el temple interrumpido de una probeta de cilíndrica punta cónica tipo A de acero AISI 9840. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms.

En Figura 4.14 se muestra el perfil de dureza (graficado desde la superficie hacia el centro) final después del temple interrumpido de la probeta tipo A. La dureza en la superficie es similar a la máxima dureza para este acero (curva Jominy), luego hay una zona de transición y finalmente un núcleo (pequeño) de dureza uniforme. La dureza del núcleo es similar a la de bainita para este acero.



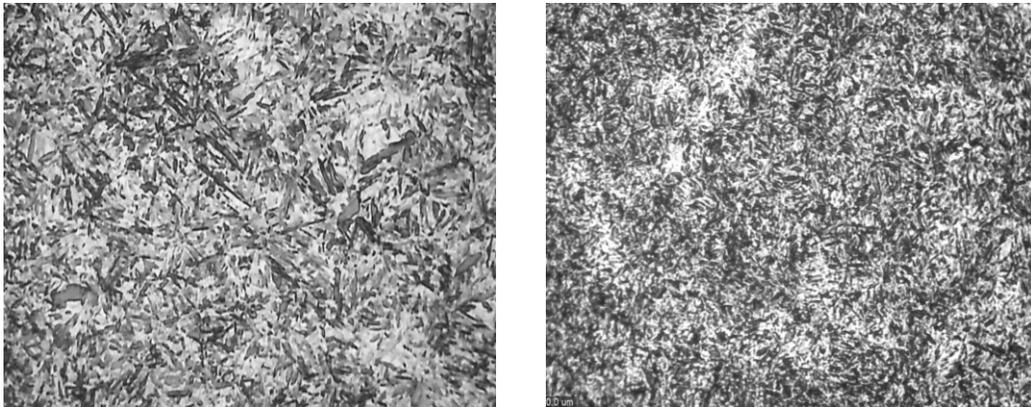
**Figura 4.14** Perfil final de dureza (HRC) del temple interrumpido de una probeta tipo A. La distancia está medida desde la superficie. La línea vertical marca el centro geométrico de la probeta.

En la Figura 4.15 se muestra la microestructura de la probeta de acero AISI 9840 (tipo A) con temple interrumpido, en una zona cercana a la orilla. Se observa el anillo martensítico superficial (zona oscura), enseguida hay una zona de transición y, finalmente, el núcleo bainítico. De aquí se concluye que el acero modelo produjo una microestructura final similar a la buscada.



**Figura 4.15** Fotomicrografía de una región cercana a la orilla de la probeta de acero 9840 con temple interrumpido, 80X.

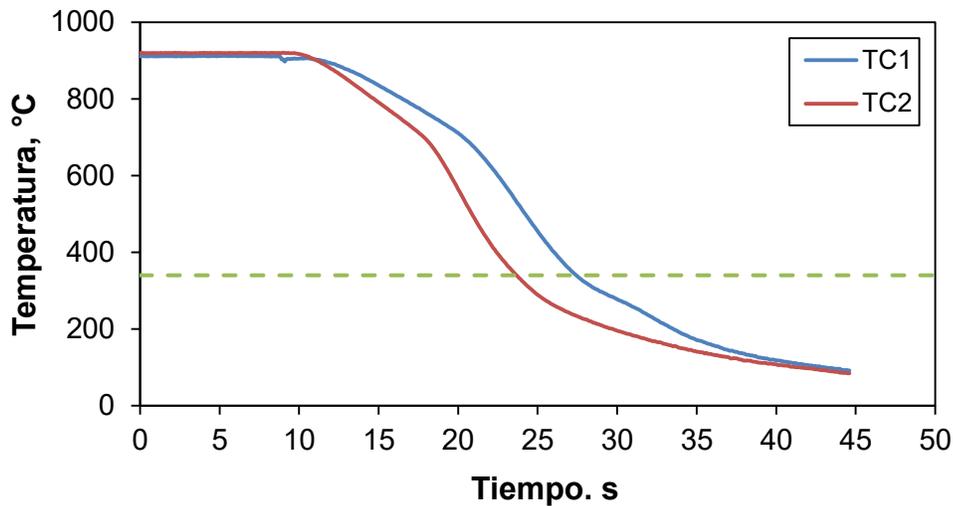
En la Figura 4.16 se presentan las microestructuras en el centro (izquierda) y en la orilla (derecha) de la probeta de acero AISI 9840 tipo A con el temple interrumpido. Ambas fotografías se tomaron a un aumento de 200X. Se observa que, en el centro de la probeta, la microestructura es bainita mientras que en la orilla podemos apreciar martensita.



**Figura 4.16** Fotomicrografía del centro (izquierda) y la orilla (derecha) de la probeta de acero 9840 con temple interrumpido, 200X.

### 4.2.3 Pruebas con el acero modelo: probeta tipo B

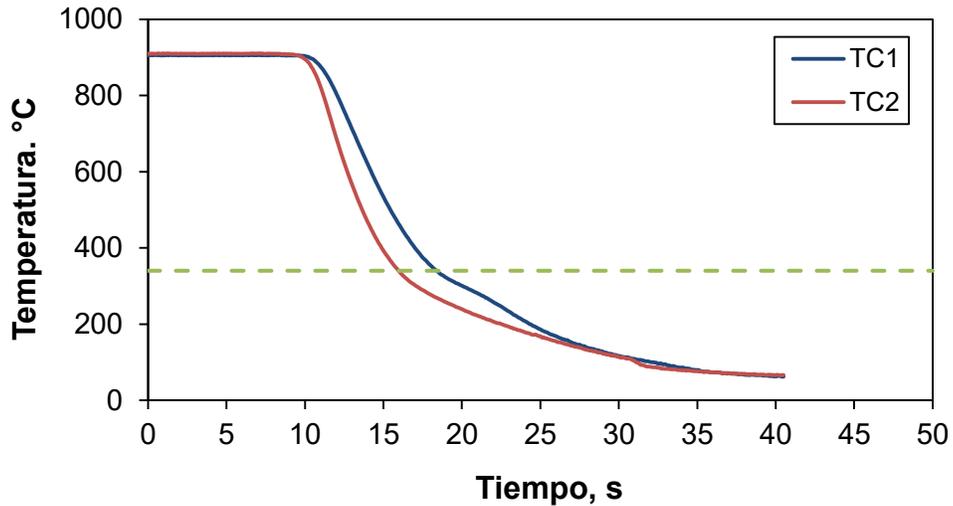
Se realizó un temple estándar para cada nivel de flujo del medio de temple: baja (flujo de 20 LPM), media (40 LPM), y alta (60 LPM), manteniendo la temperatura del medio de temple (agua) a 60°C. En las Figuras 4.17, 4.18, 4.19 se muestra la respuesta térmica para cada uno de esos experimentos. Puede observarse que a mayor flujo la pendiente en las curvas de enfriamiento es mayor, por lo que el enfriamiento ocurre en menor tiempo. Además, la curva de enfriamiento para la posición de TC1 muestra recalentamiento a una temperatura ligeramente menor que Ms. La región recta al inicio del enfriamiento en ambas curvas en la Figura 4.17 indica la presencia de capa de vapor durante el temple.



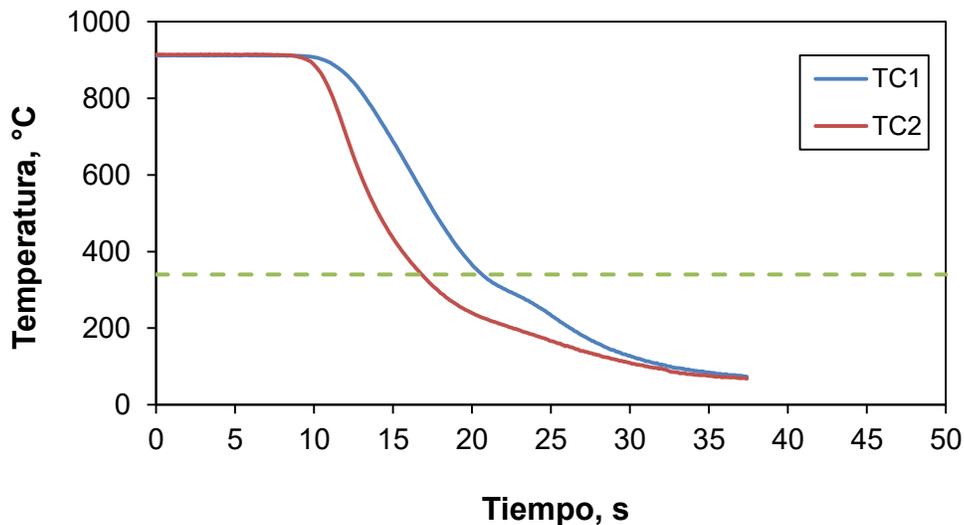
**Figura 4.17** Curva de enfriamiento durante el ensayo de temple estándar, probeta punta cónica tipo B, acero AISI 9840, flujo de 20 LPM. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms para el acero modelo.

Al aumentar el flujo a 40 LPM las curvas de enfriamiento sugieren que la etapa de capa de vapor se ha suprimido. Esto provoca que la probeta llegue a Ms en mucho menor tiempo.

Un aumento del flujo (hasta 60 LPM) incrementa la diferencia entre las dos curvas de enfriamiento lo que es consecuencia de un incremento en el coeficiente de transferencia de calor.

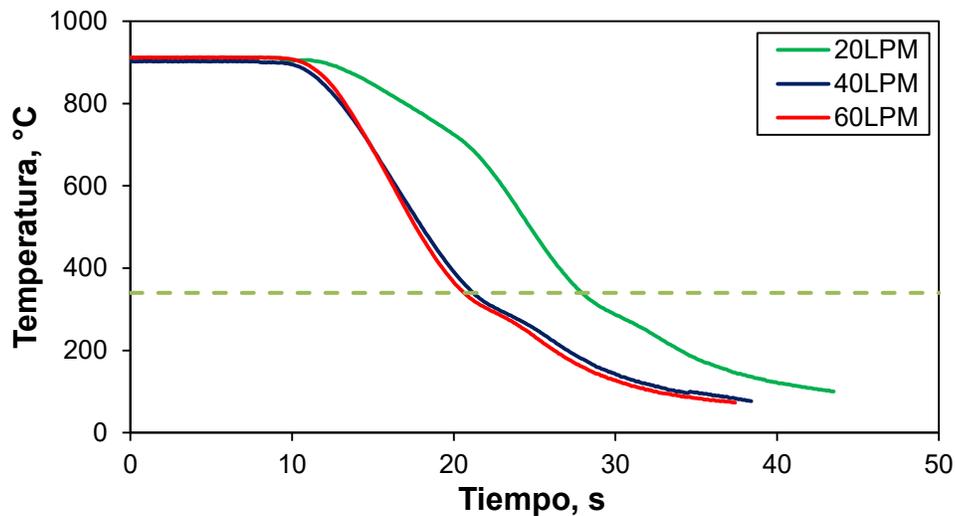


**Figura 4.18** Curva de enfriamiento durante el ensayo de temple estándar, probeta punta cónica tipo B, acero AISI 9840, flujo de 40 LPM. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms para el acero modelo.



**Figura 4.19** Curva de enfriamiento durante el ensayo de temple estándar, probeta punta cónica tipo B, acero AISI 9840, flujo de 60 LPM. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms para el acero modelo.

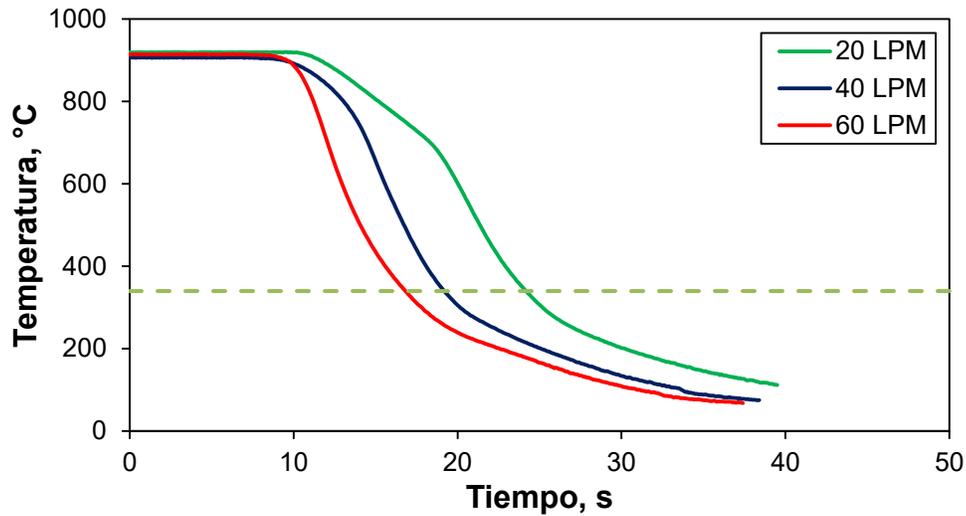
En las Figura 4.20 se muestra la respuesta térmica de TC1, (termopar en el centro geométrico de la probeta) para las tres niveles de flujo de temple. Se observa que las pruebas realizadas a 40 LPM y 60 LPM, presentan respuestas térmicas similares, mientras que la curva de enfriamiento para el temple con menor flujo produjo una curva de enfriamiento mucho más suave en esa posición.



**Figura 4.20** Respuesta térmica de TC1 probeta de punta cónica tipo B para las tres severidades de temple. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms.

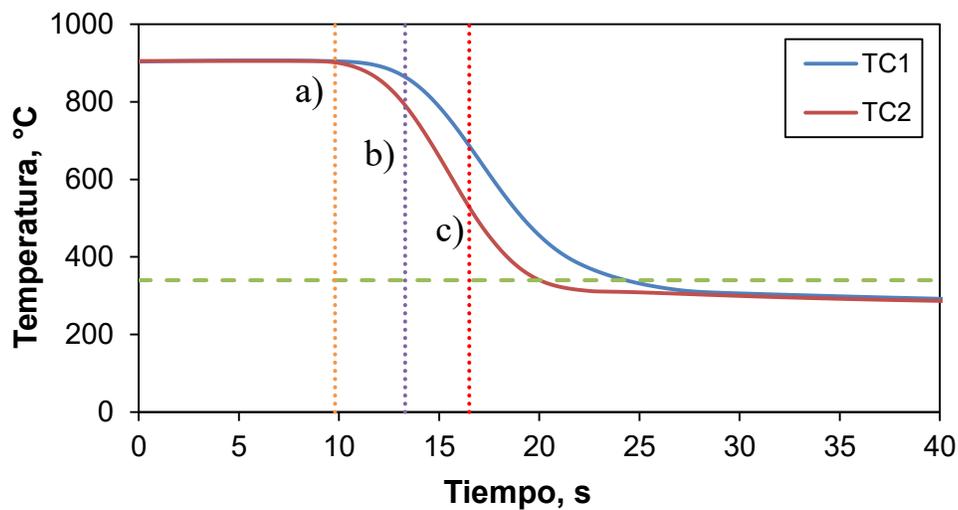
En la Figura 4.21 se grafican las respuestas térmicas correspondientes a la posición de TC2 (termopar ubicado en la sub-superficie de la probeta). La parte inicial de las curvas es distinta, observándose claramente un comportamiento lineal para el caso del medio de temple fluyendo a 20 LPM; esto indica la existencia de una capa de vapor estable alrededor de la probeta al inicio del temple.

Debido a lo observado anteriormente se decidió solo estudiar niveles de flujo del medio de temple bajo (20 LPM) y alto (60 LPM); en estas condiciones se realizaron temples interrumpidos.



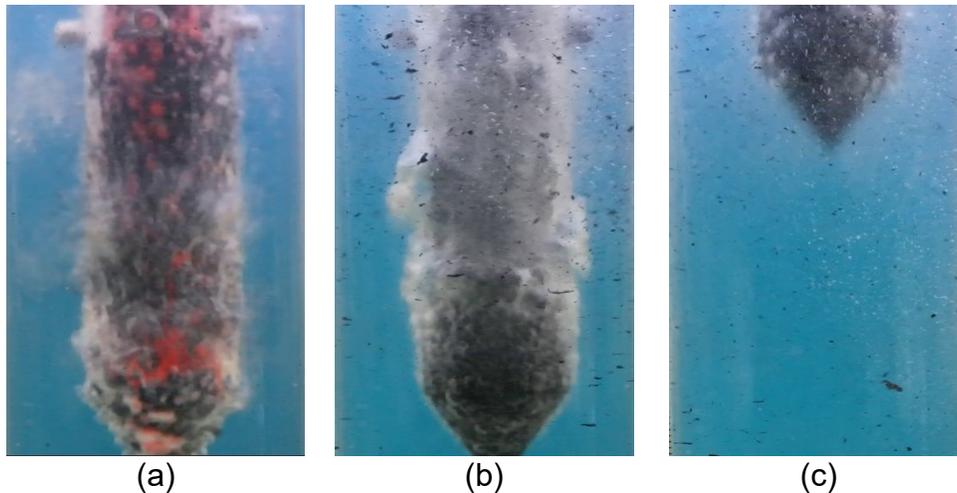
**Figura 4.21** Respuesta térmica en TC2 probeta de punta cónica tipo B para las tres severidades de temple. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms.

En la Figura 4.22 se muestran las repuestas térmicas del temple interrumpido con un flujo de agua de 20 LPM. No se observa recalescencia debido a la transformación; además, no presentan la misma forma de las curvas con las probetas tipo A, ya que ambas curvas cruzan Ms sin mostrar algún recalentamiento proveniente del calor liberado por la transformación martensítica.



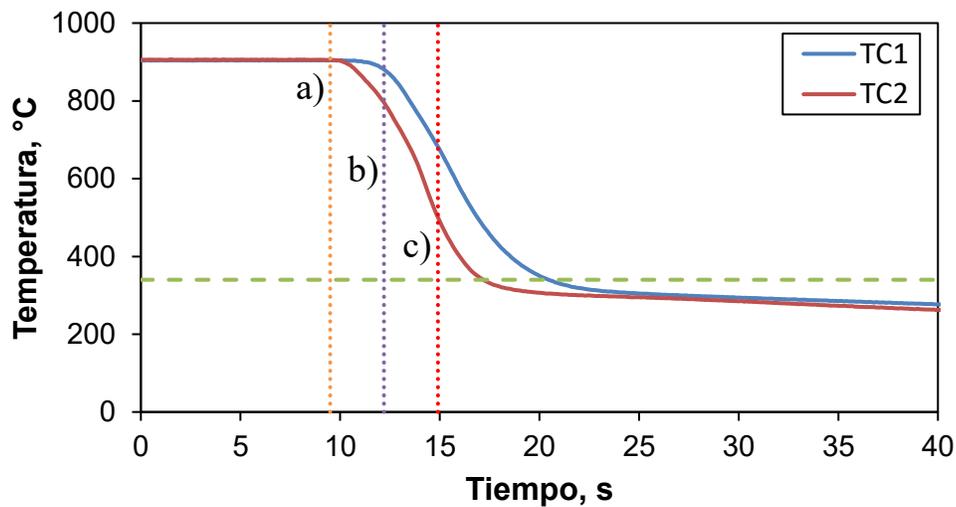
**Figura 4.22** Respuestas térmicas durante el temple interrumpido de una probeta tipo B, con un flujo de 20 LPM. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms.

En la Figura 4.23 se observan imágenes obtenidas del video de la prueba de temple interrumpido a 20 LPM; cada imagen corresponde a un tiempo indicado por las líneas punteadas en la Figura 4.22: (a) la probeta llega a la posición de prueba, se observa una ligera capa de vapor y burbujas envolventes sobre la pieza; (b) tiempo intermedio del temple interrumpido, la capa de vapor se rompe, se observa la presencia de burbujas y el óxido que se desprende; (c) la probeta se retira del medio de enfriamiento para interrumpir el temple. Esta etapa es la de enfriamiento más lento. Es evidente que, durante el calentamiento, se formó una capa de óxido gruesa e irregular.



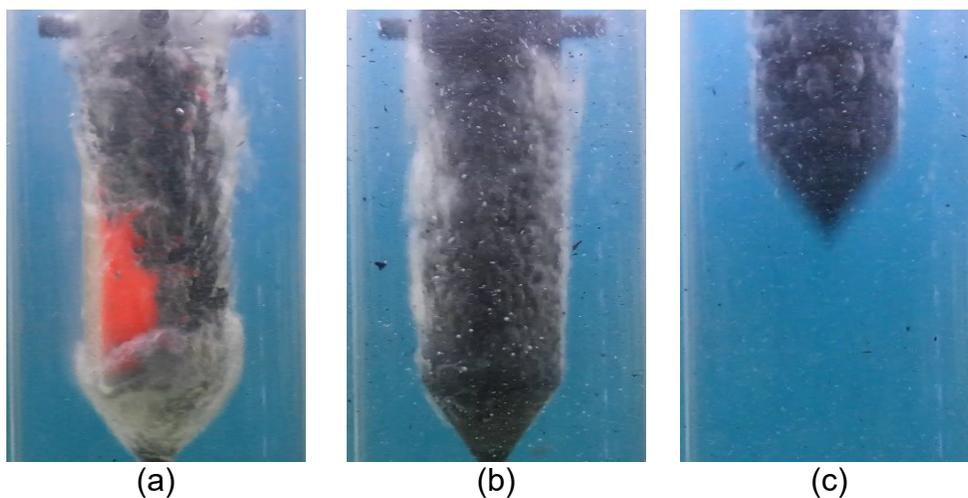
**Figura 4.23** Imágenes obtenidas del video del temple interrumpido de una probeta tipo B, temperatura de austenización de 900 °C, flujo 20 LPM: a) 9.8s, b) 13.3s y c) 16.5 s (referirse a la Figura 4.21).

En la Figura 4.24 se muestran las repuestas térmicas durante el temple interrumpido de una probeta tipo B del acero modelo, enfriada con un flujo de agua de 60 LPM. Al igual que en la Figura 4.22, no se observa recalcancia debido a la transformación martensítica. La respuesta térmica del termopar de la sub-superficie (TC2) muestra un comportamiento lineal al inicio del enfriamiento, que está asociado con la presencia de una capa de vapor alrededor de la probeta.



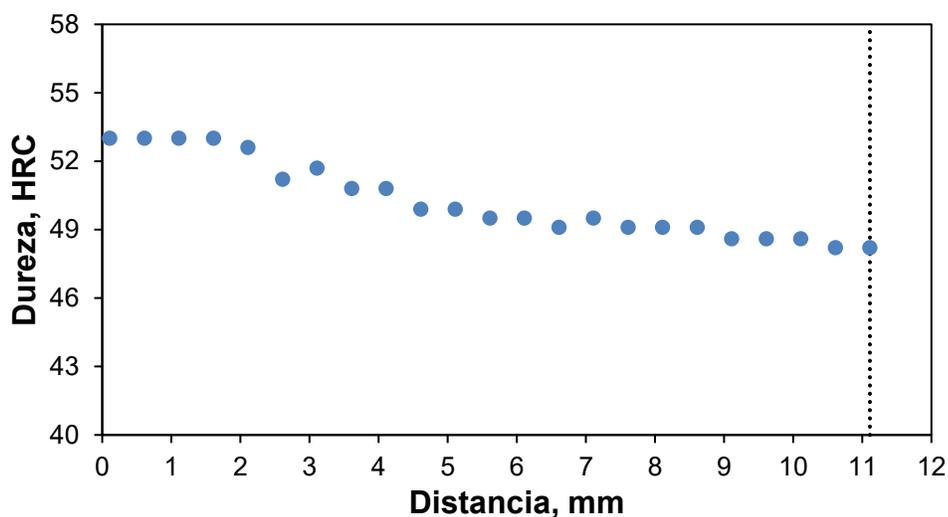
**Figura 4.24** Respuestas térmicas durante el temple interrumpido de una probeta tipo B con agua a 60 °C y flujo de 60 LPM. La línea punteada corresponde a la temperatura de Ms.

En la Figura 4.25 se observan las imágenes obtenidas del video de la prueba de temple interrumpido a 60 LPM, a los tiempos que se indican con líneas en la Figura 4.24; (a) la probeta llega a la posición de prueba, se observa una capa de vapor gruesa aunque poco regular y burbujas sobre la pieza; (b) tiempo intermedio del temple interrumpido, la capa de vapor ya no es estable, rompiéndose, se observa la presencia de burbujas y oxido desprendido; (c) la probeta se retira del medio de enfriamiento para interrumpir el temple.

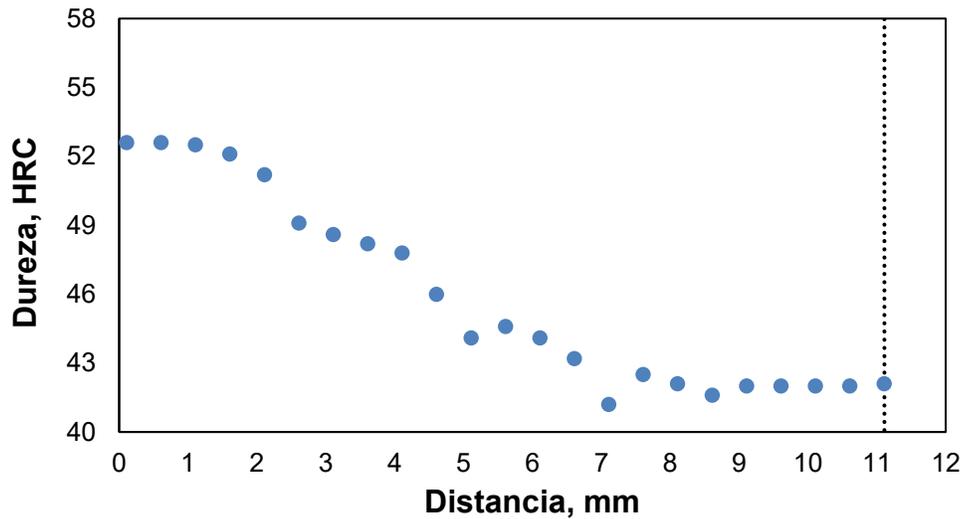


**Figura 4.25** Imágenes obtenidas del video del temple interrumpido de una probeta tipo B, temperatura de austenización de 900 °C, flujo 60 LPM: a) 9.5 s, b) 12.2 s y c) 14.9 s, (referirse a la Figura 4.24).

Para complementar las observaciones metalográficas se obtuvieron perfiles de microdureza Vickers en cada muestra después del tratamiento térmico, desde la orilla hacia el centro. Los resultados se muestran en las Figura 4.26 y 4.27 para el temple interrumpido con flujo de 20 y 60 LPM, respectivamente. Como puede verse, en ambos casos existe un perfil definido de microdureza. Además, se alcanzó una dureza alta en la superficie y se observa una zona de dureza constante cercana a la superficie. Esta zona correspondería al anillo martensítico.

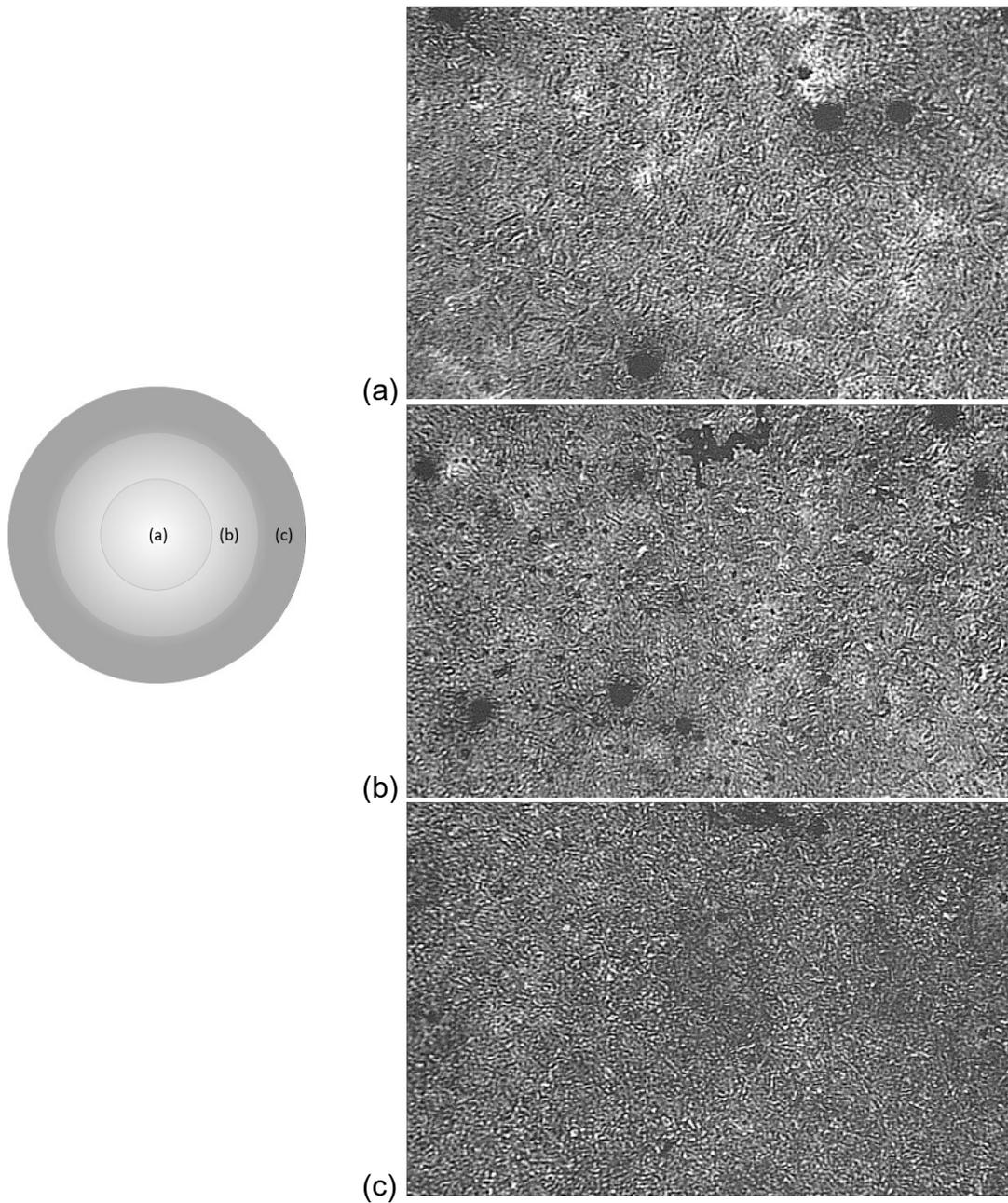


**Figura 4.26** Perfil final de dureza (HRC) del temple interrumpido de una probeta tipo B con agua fluyendo a 20 LPM. La distancia está medida desde la superficie. La línea vertical marca el centro geométrico de la probeta.

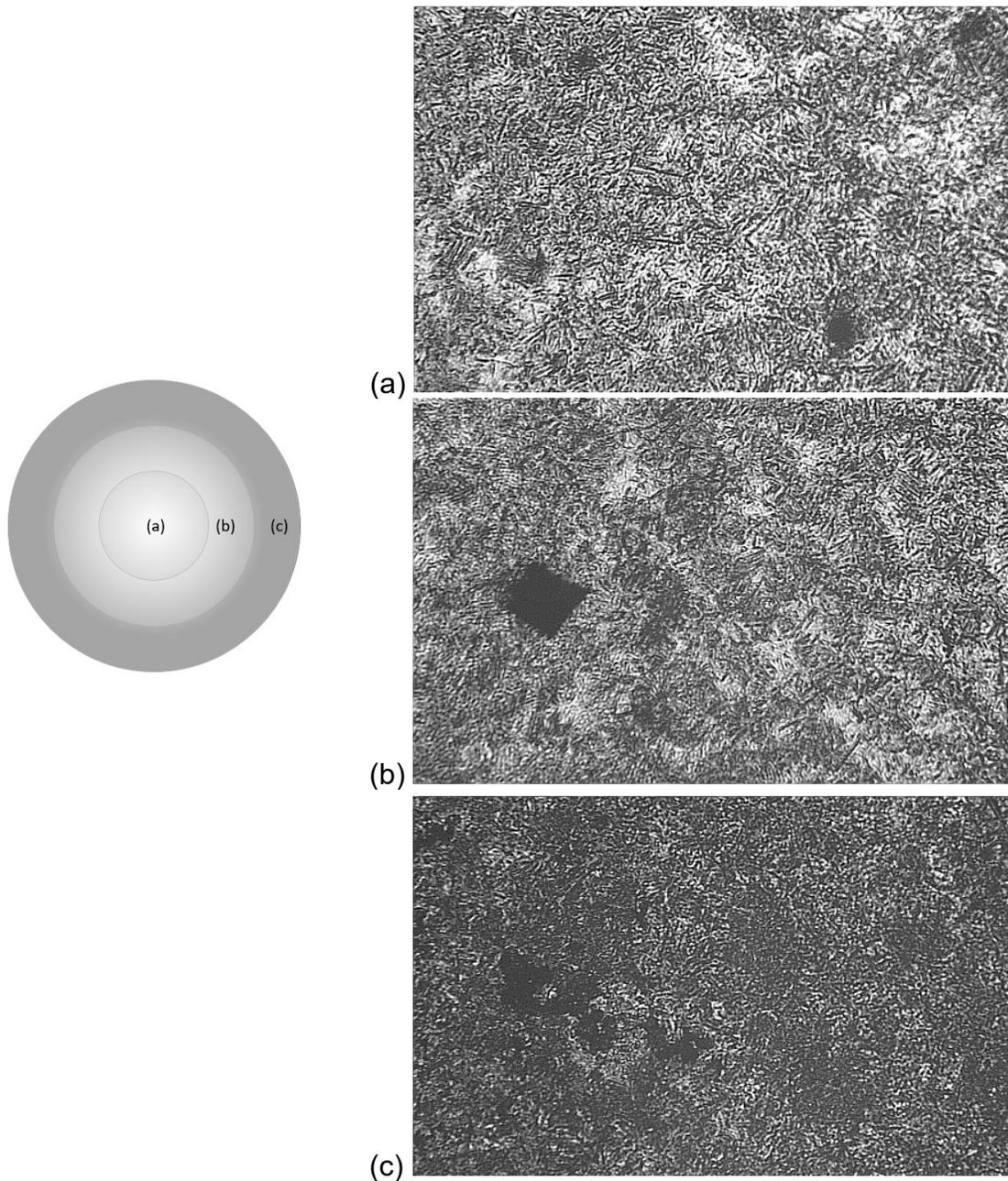


**Figura 4.27** Perfil final de dureza (HRC) del temple interrumpido de una probeta tipo B con agua fluyendo a 60 LPM. La distancia está medida desde la superficie. La línea vertical marca el centro geométrico de la probeta.

En las Figuras 4.28 y 4.29 se muestran microestructuras para la superficie, la zona de transición y el núcleo de la probeta, junto con una representación esquemática de estas zonas en la probeta, marcando las posiciones donde se tomaron las fotomicrografías (a 10X). Se puede observar una estructura gruesa, intermedia y fina conforme se aleja del centro hacia la orilla de la probeta. Esta diferencia entre las microestructuras es más evidente en la Figura 4.29, que corresponde a un temple realizado con un nivel de flujo alto (60 LPM).



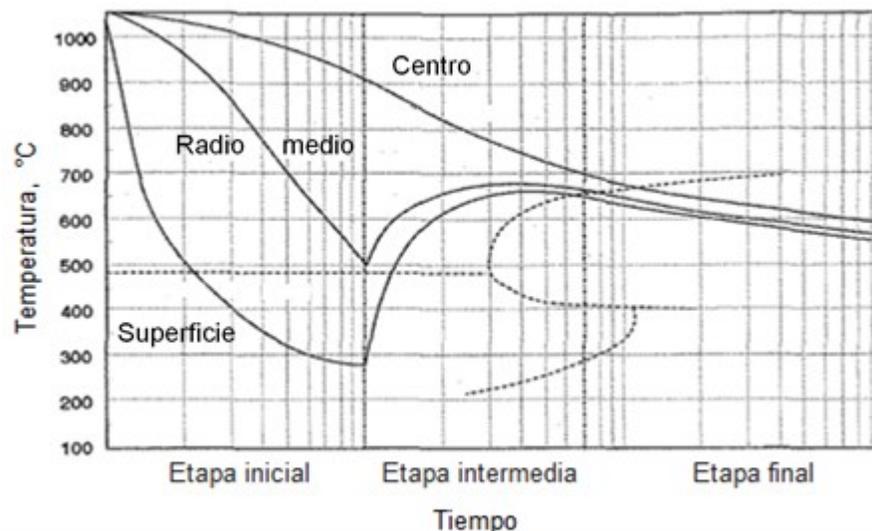
**Figura 4.28** Fotomicrografías del temple interrumpido con 20LPM, a 10X. A la izquierda se muestra una representación esquemática de la distribución microestructural; a) microestructura bainítica, b) fase intermedia se observa una microestructura más fina, c) anillo martensítico.



**Figura 4.29** Fotomicrografías del temple interrumpido con 60 LPM, a 10X. A la izquierda se muestra una representación esquemática de la distribución microestructural; a) microestructura bainítica, b) fase intermedia se observa una microestructura más fina, c) anillo martensítico.

## 5 Discusión de resultados

De los resultados del ensayo Jominy estándar se pudo comprobar que el acero seleccionado tiene una templabilidad conveniente para los fines de este estudio. Cuando se realizó el ensayo Jominy interrumpido (ver Figura 4.4), se observó que efectivamente se pueden recalentar algunas zonas de la probeta Jominy debido al cambio de medio de temple, lo que indica que la martensita formada en la base de la probeta puede revenirse, la disminución de la dureza entre el Jominy estándar y el interrumpido (ver Figura 4.6) también es muestra de esto. Se observa que el comportamiento de la gráfica en la Figura 4.4 es similar al reportado en la literatura para el proceso *Quenched and Tempered Bar (QTB)* [16], ver Figura 5.1.

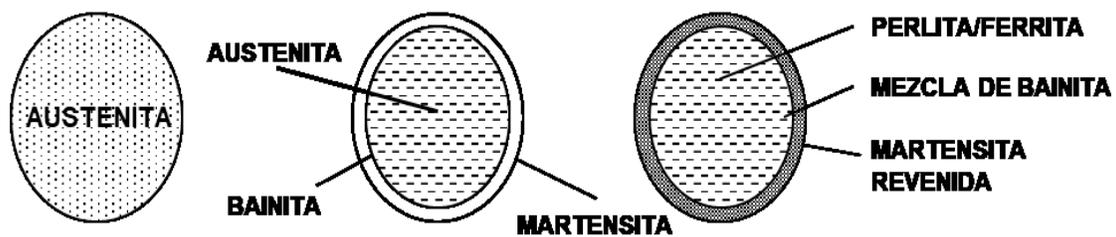


**Figura 5.1** Curvas de enfriamiento representativas del proceso QTB [16].

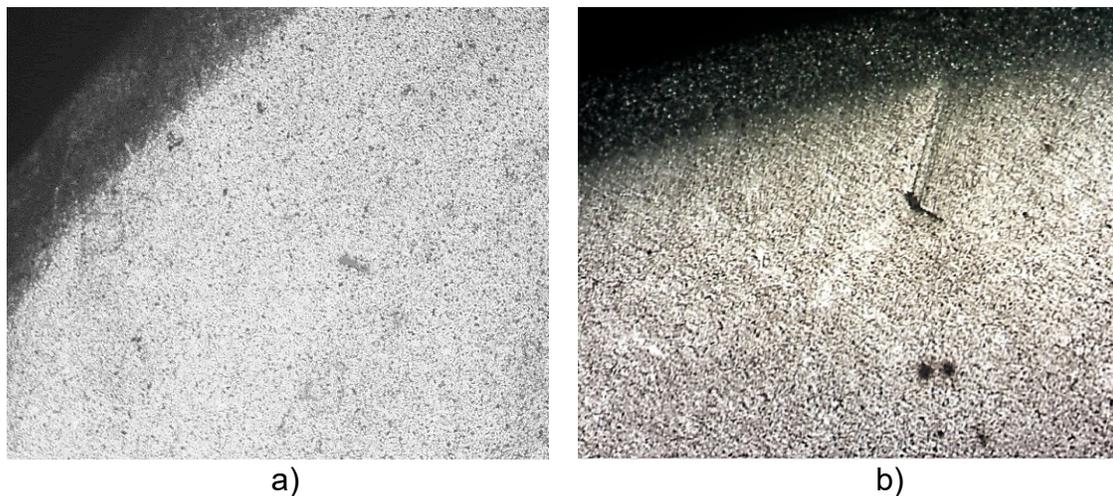
Las pruebas con las probetas cilíndricas de punta cónica fabricadas con el acero inoxidable permitieron conocer la inercia térmica de una probeta de esas dimensiones. Se observó que si se interrumpía el temple a una temperatura muy cercana a  $M_s$  (340 °C), la inercia térmica provocaba que ambas curvas cruzaran  $M_s$ ; de esta manera se obtendría una microestructura completamente

martensítica, mientras que si se interrumpía cuando TC2 (termopar cercano a la superficie) marcaba una temperatura de 500 °C aproximadamente, solo este termopar cruzaba Ms mientras que el centro permanecía por arriba de la misma y se obtendría la distribución microestructural deseada, la información obtenida de estas pruebas ayudó a establecer la técnica del temple interrumpido.

El temple interrumpido de probetas tipo A, fabricadas con el acero modelo, produjo una distribución microestructural semejante a la que se observa en la planta (ver Figuras 5.2 y 5.3), es decir, un anillo externo de martensita y un centro de bainita/perlita, con lo que se alcanzó el objetivo de este proyecto. Ahora se cuenta con resultados experimentales que permitirán validar un modelo matemático termo-estructural del proceso *QTB* que se utiliza en la planta de Gerdau Corsa, previo a trabajar con el proceso en planta.

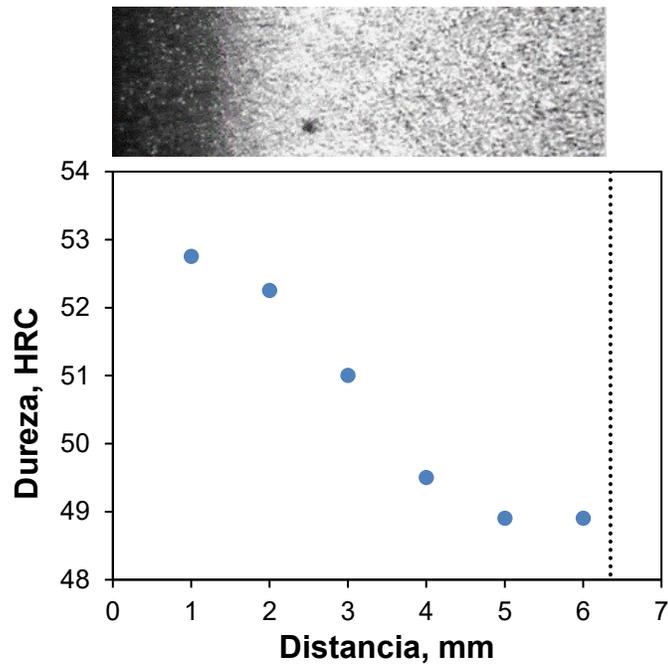


**Figura 5.2** Distribución microestructural (esquemática) resultado del proceso QTB [16]



**Figura 5.3** Microestructura obtenida; a) en la planta [17] y b) en el laboratorio.

En la Figura 5.4 se observa la microestructura y el perfil de dureza después del temple interrumpido de la probeta tipo A. El perfil de dureza coincide con el anillo martensítico en la superficie, la zona de transición y la zona del centro.

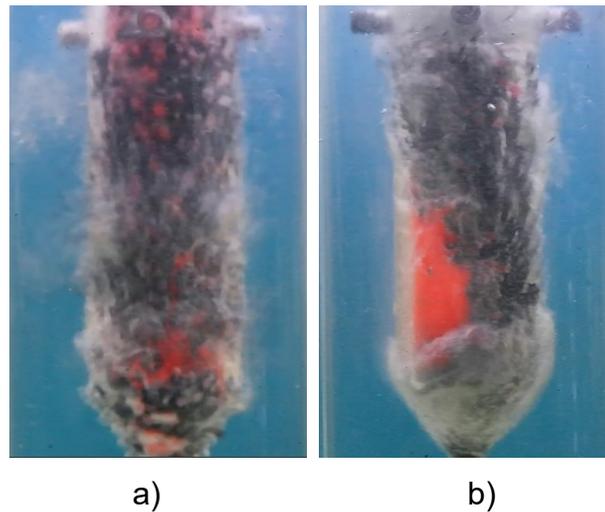


**Figura 5.4** Microestructura (arriba) y perfil de dureza (abajo) de una probeta tipo A, después del temple interrumpido.

Finalmente, el temple interrumpido de probetas tipo B, se realizó con la misma técnica que las probetas tipo A. Se estudió el efecto del diámetro de la probeta y del nivel de flujo del medio de temple en la distribución microestructural; más específicamente, en el espesor del anillo martensítico que se forma y en la dureza.

Los temples interrumpidos realizados a 20 LPM y 60 LPM con la probeta tipo B, no presentan el mismo comportamiento que el observado en las probetas tipo A, a pesar de que este se realizó siguiendo la misma técnica; en el caso de las probetas tipo B ambas curvas cruzan  $M_s$ , a pesar de eso la distribución microestructural presenta un anillo de martensita.

En la Figura 4.23 y 4.25 se aprecian imágenes de la probeta durante el temple interrumpido para los dos valores de flujo volumétrico estudiados. Se puede observar que la capa de vapor que se forma en ambas probetas es muy diferente, en el temple a 60 LPM la capa es más gruesa y estable mientras que en el temple a 20 LPM apenas se aprecia la capa de vapor; esto puede deberse a la capa de óxido que se forma en la superficie ya que esta no es homogénea (ver Figura 5.5) y es una variable que no se pudo controlar.

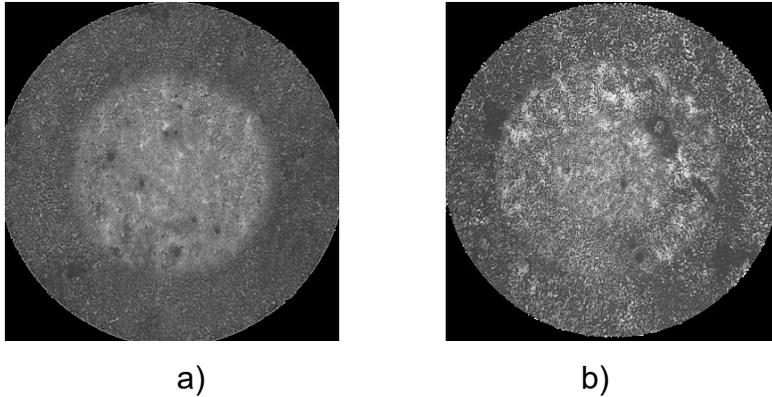


**Figura 5.5** Probeta tipo B de acero AISI 9840 al inicio del temple;  
a) 20 LPM, b) 60 LPM

En las Figuras 4.28 y 4.29 se muestra la distribución microestructural final para cada temple interrumpido de la probeta tipo B. Se observa una estructura gruesa en el centro de las probetas, mientras que en la orilla se observa una microestructura martensítica más fina.

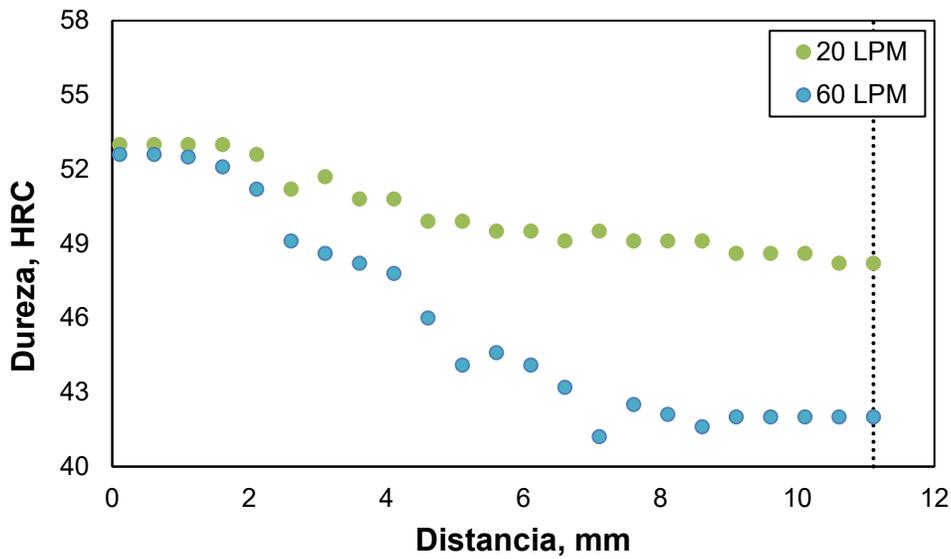
En la Figura 5.6 se puede observar la distribución en la superficie de cada probeta con temple interrumpido, a diferentes niveles de flujo de medio de temple; bajo (20 LPM) y alto (60 LPM). Es posible apreciar el anillo martensítico que se genera cerca de la superficie en ambas probetas. En el temple interrumpido a 20 LPM el anillo martensítico es poco definido, mientras que la probeta con temple

interrumpido y flujo volumétrico de 60 LPM presenta un anillo más delgado y mejor definido. Ambos anillos son razonablemente simétricos.



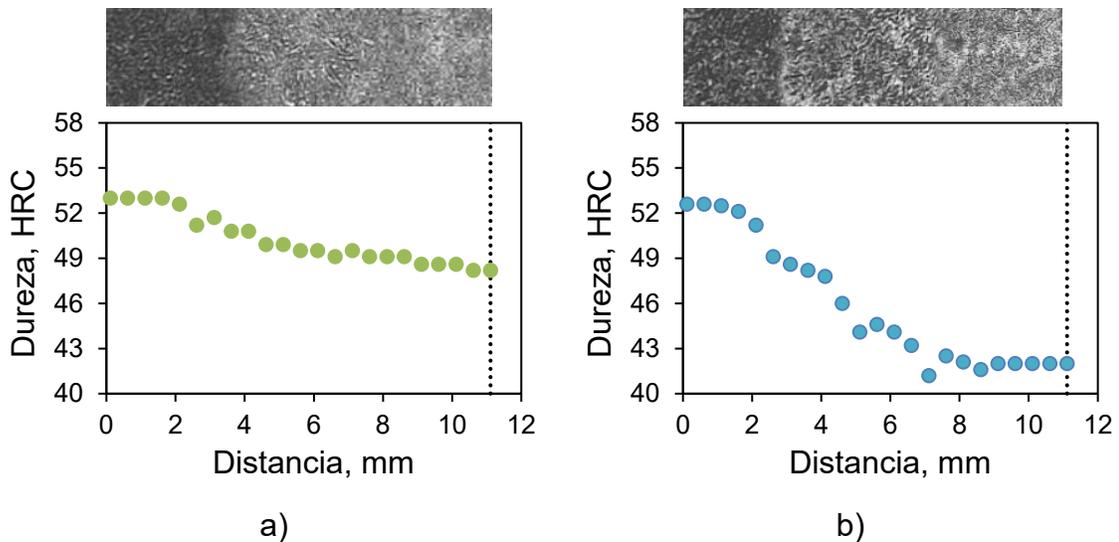
**Figura 5.6** Imágenes de probetas tipo B fabricadas con el acero modelo AISI 9840 a) temple interrumpido (20 LPM), b) temple interrumpido (60 LPM). Ataque con Nital3, magnificación 5X.

Los perfiles de microdureza correspondientes se muestran en la Figura 5.7. Se observa que en el temple interrumpido con flujo de 20 LPM, hay poca disminución en la dureza del centro a la orilla, también se puede apreciar que el espesor del anillo martensítico, (según los valores de microdureza) es aproximadamente de 2 mm, mientras que en el temple interrumpido con flujo de 60 LPM, la disminución de dureza es mayor y el espesor del anillo martensítico es aproximadamente de 1.5 mm. Esto concuerda con la macroestructura observada. Por otra parte, la máxima dureza para ambas curvas es de aproximadamente de 53 HRC, que es idéntica con el ensayo Jominy estándar reportado. De aquí se puede concluir que, en los ensayos de laboratorio realizados con la probeta tipo B, no se logró revenir a la martensita superficial.



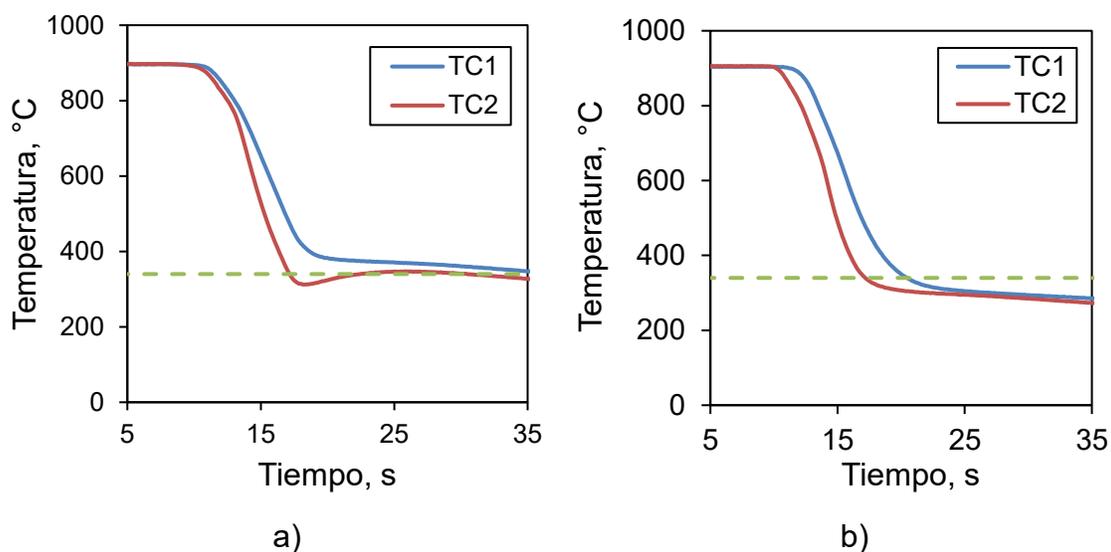
**Figura 5.7** Perfil final de microdureza en una probeta tipo B, temple interrumpido a 20 LPM (puntos verdes) temple interrumpido a 60 LPM, (puntos azules). La línea vertical marca el borde de la probeta.

Figura 5.8 presenta la comparación de la microestructura y dureza del centro a la superficie obtenida en las probetas tipo B de los temples interrumpidos. Se puede apreciar que el grosor del anillo martensítico coincide con las durezas medidas.



**Figura 5.8** Microestructura (arriba) y perfil de dureza (abajo) de una probeta tipo B después del temple interrumpido con flujo de medio de temple; a) 20 LPM, b) 60 LPM

En la Figura 5.9 se comparan las respuestas térmicas de una probeta tipo A y una tipo B, fabricadas con el acero modelo AISI 9840, obtenidas de un temple interrumpido. En la curva de la probeta tipo A se observa que, al interrumpir el temple, se observa éste presenta un recalentamiento atribuido al cambio de medio de temple; en contraste, esto no se aprecia en la curva obtenida con la probeta tipo B, a pesar de que ambos temples se realizaron siguiendo la misma técnica.



**Figura 5.9** Curva de enfriamiento durante el temple interrumpido: a) probeta tipo A de acero AISI 9840 con flujo de agua de 70 LPM y b) probeta tipo B de acero AISI 9840 con flujo de 60 LPM.

## 6 Conclusiones

- Mediante la combinación del acero modelo propuesto y la técnica de enfriamiento se pudo generar un anillo externo de martensita y un centro de productos de transformaciones difusionales. Sin embargo la martensita no pudo auto-revenirse.
- Debido al balance de calor, no se aprecia recalcancia a temperaturas cercanas a  $M_s$  de este acero durante el temple interrumpido. El incremento en la temperatura que se observa en las curvas de enfriamiento no es debido al cambio de fase sino a la respuesta del sistema al cambio súbito de medio de enfriamiento.
- Para las probetas tipo B la disminución de dureza de la orilla al centro fue mayor (11 HRC) a un nivel de flujo alto.
- Para las probetas tipo B el anillo martensítico es más delgado y mejor definido cuando se usó flujo alto (60 LPM) en comparación al anillo obtenido con flujo bajo (20 LPM).

## 7 Referencias

1. Metals Handbook (1991), ASM, Materials Park, OH, Vol. 4, ISBN 0-87170-379-3. pp. 33-35,
2. B. Hernández-Morales (2013), "Characterization of Heat Transfer during Quenching", En ASM Handbook, "Steel Heat Treating Fundamentals and Processes", J.L. Dossett y G.E. Totten, eds., ASM International, Materials Park, OH, Vol. 4A, pp. 158-175
3. J. Apráiz Barreiro. (2002) "Tratamientos térmicos de los aceros", Editorial Dosselt, S. A., 10a Edición, Madrid (España), ISBN 84-95312-56-5. pp.178-181
4. M. A. Grossman, (1972) "Principles of heat treatment", American Society for Metals, Materials Park, OH, 5a edición, pp. 241-244
5. M. A. Grossman, (1972) "Principles of heat treatment", American Society for Metals, Materials Park, OH, 5a edición, pp. 191-195
6. ASTM A255-02. (2002) "Standard Test Method for Determining Hardenability of Steel", ASTM International, West Conshohocken, PA, [www.astm.org](http://www.astm.org). Consultada el 12/04/2017.
7. Shubbakom. (2014), "Hardenability and Jominy Tests" <https://shubbakom.wordpress.com/2014/03/21/hardenability-and-jominy-test/>, Consultada el 14/04/2017.

8. M. Atkins. (1980), "Atlas of Continuous Cooling Transformation Diagrams for Engineering Steels", ASTM International, West Conshohocken, PA., pp. 138
9. Acer Barg, Manual técnico, [www.acerbarg.com](http://www.acerbarg.com), pp. 10-12.  
Consultada el 2/05/2017.
10. Silvia Hernández. (2006), "El modelo animal en las investigaciones biomédicas", *BIOMEDICINA*, Vol. 2 (3), ISSN: 1510-9747. pp. 252-256.
11. All Metals & Forge Group. "Alloy Steel AISI 9840",  
<http://www.steelforge.com/alloy-steel-aisi-9840/>,  
Consultada el 17/06/02017.
12. H. Javier Vergara Hernández y B. Hernández Morales. (2009), "A novel probe design to study boiling phenomena during forced convective quenching". *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 33, No. 5, pp. 797-807
13. V.S.R. Murthy. (2005), "Structure and Properties of Engineering Materials". McGraw-Hill, segunda reimpresión, New Delhi, ISBN 0-07-048287-X. pp. 226
14. E.I. García Durán y A. García García. (2015), "Análisis de curvas de enfriamiento aplicado al ensayo Jominy". Reporte de estancia intersemestral, Ciudad de México, UNAM, Facultad de Química.
15. R. Cruces Reséndez. (2015), "Análisis Inverso del Flujo de Calor en 2D para Ensayos de Temple de Probetas a Escala Laboratorio". Tesis de Maestría. Ciudad de México, UNAM, Facultad de Química.

16. Jacob Selzer. (Agosto 2012), "Quenched and Tempered Bar", *Iron & Steel Technology*, Vol. 9, No. 8, pp. 120-126.
  
17. J. Díaz Chávez. (2016), "Análisis del efecto de los parámetros de operación sobre las propiedades mecánicas de varilla de 3/8 de pulgada, grado 42". Reporte de la Asignatura "Proyecto". Ciudad de México, UNAM, Facultad de Química.