



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“PATRONES DE FLUJO Y  
DISTORSION EN BAÑOS DE  
TEMPLE CON MODIFICADORES”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO  
DE:**

**INGENIERO QUÍMICO  
METALÚRGICO**

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

**CESAR ALAMO VALDEZ**



**MEXICO, D.F.**

**2008**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

Jurado asignado:

Presidente: Prof. BERNARDO FABIAN CAMPILLO ILLANES  
Vocal: Prof. JOSÉ BERNARDO HERNÁNDEZ MORALES  
Secretario: Prof. OSCAR JESUS RENDON GOMEZ  
1er Suplente: Prof. MARCO AURELIO RAMIREZ ARGAEZ  
2do Suplente: Prof. BALBINA OJEDA RAMIREZ

Sitio donde se desarrolló el tema:

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

Asesor del tema:

---

Dr. José Bernardo Hernández Morales

Supervisor técnico:

---

M. en C. Héctor Javier Vergara Hernández

Sustentante:

---

César Alamo Valdéz

# Agradecimientos

A mi segunda casa, la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme el conocimiento necesario para enfrentar y superar retos personales.

A todos aquellos profesores que fueron partícipes en mi formación académica, en especial a mi tutor de carrera el M. en C. Antonio Huerta Cerdán por sus sabios consejos, amistad y apoyo incondicional, a mi asesor de Tesis el Dr. José Bernardo Hernández Morales por su asesoría y constante apoyo, a los Profesores Luz María Silva Sevilla, Edgar Onofre Bustamante, Reyes Ventura Becerril por sus enseñanzas y sobre todo por su valiosa amistad y finalmente y no por eso menos importante al Ing. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco y al Profesor Guillermo Fausto Salas Banuet por haberme impulsado con sus enseñanzas a aprender cada vez más del enorme mundo que tiene el estudio de la metalurgia.

Asimismo, al Técnico Genaro Guerrero por su apoyo en la captura de metalografías.

A mis padres Javier Alamo Pérez y Cándida Valdez Ramírez por haberme inspirado día con día con su amor, cariño y sobretodo lecciones de vida. Asimismo por darme una educación que sin su apoyo jamás hubiera sido posible.

A mis hermanos Verónica, José Luis y Javier por su incesante apoyo y grata hermandad.

A mi novia Gabriela López Pila por su confianza y paciencia.

A mis amigos del Bachillerato Héctor Hernández Juárez, José Ricardo Morales Guerrero, Ernesto Hernández Posadas, José Isidoro Hernández Santos y Francisco Cárdenas Escamilla por demostrarme que su amistad es para toda la vida.

A mis amigos de Licenciatura Josué Mauricio Becerril González, Luis Rodrigo Palomera González, Juan Manuel Julián de la Cruz, Israel Orta Sánchez, José

## AGRADECIMIENTOS

---

Antonio Maya Cornejo, Leonardo Luna Lira, Juan Manuel Hernández López, Marcos Hugo Martell Ávila, Juan Ramón González López, Adair Jiménez Nieto, Mónica Ávila García y Victoria Laura Lucero Valencia Álvarez por su amistad, compañerismo y gratas vivencias.

Al padrino de generación, profesor y amigo M. en C. Héctor Javier Vergara Hernández por su confianza y amistad.

Muy en especial a mi compañero y gran amigo Benjamín Beltrán Fragoso por su amistad, enseñanzas y enorme apoyo para la realización de este trabajo.

Agradezco al proyecto financiado por DGAPA-UNAM referencia PAPIIT IN6803 por el apoyo económico brindado durante la realización de este trabajo.

Asimismo agradezco al Dr. Roberto Zenit Camacho (Instituto de Investigación en Materiales, UNAM) y al Ing. Ignacio Cuevas Güitrón (Facultad de Ingeniería, UNAM) por su apoyo en la realización de las mediciones en PIV y distorsión, respectivamente.

## **Dedicatorias**

Este trabajo está dedicado a las personas que me lo han dado todo, es decir, vida, valores morales, educación y principalmente amor, cariño, paciencia y comprensión, mis padres.

A ellos les dedico este escrito que es el fruto de sus incesantes esfuerzos.

Asimismo, le dedico este trabajo a todos mis compañeros de la Facultad de Química (Conjunto D) por su compañerismo e inolvidables momentos.

# Índice de contenido

Índice de figuras .....	iii
Índice de tablas .....	v
<b>Capítulo 1</b>	
<b>Introducción</b> .....	1
<b>Capítulo 2</b>	
<b>Antecedentes</b> .....	3
2.1 Distorsión en temple de aceros .....	3
2.2 Templabilidad en aceros .....	7
2.3 Mecanismos de transferencia de calor en temple .....	8
2.3.1 Etapa A1 .....	9
2.3.2 Etapa A .....	9
2.3.3 Etapa B .....	10
2.3.4 Etapa C .....	10
2.4 Medios de enfriamiento .....	11
2.5 Curvas de enfriamiento .....	13
2.6 Diagramas de transformación .....	14
2.6.1 Diagramas de Temperatura-Tiempo-Transformación (TTT) .....	15
2.6.2 Diagramas de Enfriamiento Continuo (CCT) .....	16
2.7 Tanques de temple .....	16
2.7.1 Efecto de la agitación .....	18
2.7.2 Efecto de la temperatura y de la calidad de la superficie de la pieza .....	20
2.8 Modelos físicos .....	20
2.9 Velocimetría por imágenes de partículas .....	21
2.10 Simulación matemática .....	23
<b>Capítulo 3</b>	
<b>Procedimiento experimental</b> .....	24
3.1 Equipo experimental .....	24
3.2 Experimentos en frío .....	28
3.3 Condiciones operativas manejadas en los experimentos en frío .....	29
3.4 Visualización del patrón de flujo .....	31
3.5 Caracterización del flujo de fluidos .....	32
3.6 Composición química del acero .....	33

# ÍNDICE DE CONTENIDO

---

3.7 Experimentos en caliente .....	34
3.8 Condiciones operativas en los experimentos en caliente ...	36
3.9 Medición de dureza .....	37
3.10 Caracterización de la distorsión .....	37
3.11 Evidencia metalográfica .....	38
<b>Capítulo 4</b>	
<b>Resultados y Discusión</b> .....	40
4.1 Visualización del patrón de flujo .....	40
4.2 Caracterización del flujo de fluidos .....	42
4.3 Experimentos en caliente .....	50
4.4 Medición de dureza .....	51
4.5 Evidencia metalográfica .....	53
4.6 Relación Diagrama CCT-Curva de enfriamiento .....	53
4.7 Relación % C-Dureza-% Martensita .....	54
4.8 Distorsión .....	55
<b>Capítulo 5</b>	
<b>Conclusiones</b> .....	65
<b>Capítulo 6</b>	
<b>Bibliografía</b> .....	66



## Índice de figuras

<b>Figura 2.1.</b>	Diagrama Ishawaka que muestra algunos de los factores que deberían ser considerados cuando se presentan problemas de distorsión .....	4
<b>Figura 2.2.</b>	Comparación de esfuerzos de transformación para tres temple diferentes .....	6
<b>Figura 2.3.</b>	Mecanismos de enfriamiento y transferencia de calor en un proceso de temple .....	8
<b>Figura 2.4.</b>	Campo térmico y mecanismos de enfriamiento presentes en la periferia de un engrane inmerso en un líquido volátil durante el temple .....	11
<b>Figura 2.5.</b>	Varias representaciones de datos de una curva de enfriamiento .....	13
<b>Figura 2.6.</b>	Diagrama TTT para una acero 1045/1050 .....	15
<b>Figura 2.7.</b>	Diagrama CCT para un acero 1039-1046 .....	16
<b>Figura 2.8.</b>	Tanque de temple con sistema de agitación con propela confinada y flujo direccionado .....	18
<b>Figura 2.9.</b>	Esquema de funcionamiento de la técnica PIV .....	22
<b>Figura 3.1.</b>	Modelo físico de tanque de temple y equipo complementario empleado en esta investigación .....	25
<b>Figura 3.2.</b>	Modelo físico empleado en esta investigación: a) zonas del modelo y b) dimensiones .....	26
<b>Figura 3.3.</b>	Arreglo de persianas: a) Dispositivo ya armado; b) dimensiones de las placas para sujetar a las persianas y c) dimensiones (cm) de cada persiana .....	27
<b>Figura 3.4.</b>	Colocación de las aspas de la propela en el modelo físico ..,	27
<b>Figura 3.5.</b>	Sistema de referencia para el ángulo de las persianas .....	28
<b>Figura 3.6.</b>	Representación esquemática del arreglo experimental para un impulso de trazador al tanque de temple .....	31
<b>Figura 3.7.</b>	Esquema del equipo de prueba para las mediciones con PIV	32
<b>Figura 3.8.</b>	a) Horno de resistencias con la probeta en su interior calentándose a la temperatura de austenización. b) horno de resistencias abierto para introducir la probeta al baño de temple .....	35
<b>Figura 3.9.</b>	Geometría de la probeta de acero al carbono AISI 1045 .....	36
<b>Figura 3.10.</b>	Posicionamiento de la probeta para caracterizar la distorsión	37
<b>Figura 3.11.</b>	Dispositivo utilizado para la medición de la distorsión en el plano z .....	38
<b>Figura 3.12.</b>	Probeta seccionada mostrando el lugar donde se obtuvieron las metalografías .....	39
<b>Figura 4.1.</b>	Fotografías del modelo físico de tanque de temple durante la ejecución de las pruebas con colorante, con un arreglo de modificadores de flujo de 135°, 45° y varias frecuencias .....	41

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>Figura 4.2.</b>	Fotografías del modelo físico de tanque de temple durante la ejecución de las pruebas con colorante, con un arreglo de modificadores de flujo de 90°, 90° y varias frecuencias .....	42
<b>Figura 4.3.</b>	Patrones de flujo en el experimento 22 .....	43
<b>Figura 4.4.</b>	Mapa de líneas de corriente del experimento 22 .....	44
<b>Figura 4.5.</b>	Mapa de vectores de velocidad en las pruebas: (a) 1 y (b) 5 .....	45
<b>Figura 4.6.</b>	Mapa de vectores de velocidad en las pruebas: (a) 6 y (b) 10 .....	46
<b>Figura 4.7.</b>	Mapa de vectores de velocidad en las pruebas: (a) 11 y (b) 15 .....	46
<b>Figura 4.8.</b>	Mapa de vectores de velocidad en las pruebas: (a) 16 y (b) 20 .....	47
<b>Figura 4.9.</b>	Mapa de vectores de velocidad en las pruebas: (a) 21 y (b) 25 .....	48
<b>Figura 4.10.</b>	Mapa de vectores de velocidad en las pruebas: (a) 26 y (b) 30 .....	48
<b>Figura 4.11.</b>	Patrones de flujo en el experimento 25 .....	49
<b>Figura 4.12.</b>	Patrones de flujo en el experimento 5 .....	49
<b>Figura 4.13.</b>	Patrones de flujo en el experimento 30 .....	50
<b>Figura 4.14.</b>	Ciclo de calentamiento-enfriamiento en la Probeta 2 .....	50
<b>Figura 4.15.</b>	Curva de enfriamiento de la probeta 2 .....	51
<b>Figura 4.16.</b>	Perfil de durezas en las probetas 2,3 y 12 de los experimentos en caliente .....	52
<b>Figura 4.17.</b>	Metalografías y dureza mostrando el efecto del temple en tres posiciones distintas de la probeta 3 .....	53
<b>Figura 4.18.</b>	Curva de enfriamiento de la probeta 2 sobrepuesta al diagrama CCT para una cero AISI 1045 .....	54
<b>Figura 4.19.</b>	Relación entre contenido de carbono y dureza máxima .....	55
<b>Figura 4.20.</b>	Relación entre contenido de carbono y porcentaje de martensita con dureza Rockwell C .....	55
<b>Figura 4.21.</b>	Posiciones tomadas para la probeta 3 en la medición de distorsión .....	56
<b>Figura 4.22.</b>	Perfil de desplazamiento en la probeta 3 .....	57
<b>Figura 4.23.</b>	Perfil de desplazamiento en la probeta 2 .....	58
<b>Figura 4.24.</b>	Perfil de desplazamiento en la probeta 12 .....	59
<b>Figura 4.25.</b>	Modelado de 1/4 de la pieza mediante elemento finito .....	62
<b>Figura 4.26.</b>	Modo de flexión típica y definición de curvatura .....	62
<b>Figura 4.27.</b>	Curvatura de flexión durante el temple para agua quieta .....	62
<b>Figura 4.28.</b>	Distribución de temperaturas en la sección transversal de especímenes durante el temple en agua quieta .....	63
<b>Figura 4.29.</b>	Distribución de deformación axial plástica durante el temple en agua quieta .....	63
<b>Figura 4.30.</b>	Distribución de fracción volumen de martensita en la sección transversal de especímenes durante el temple en agua quieta .....	63
<b>Figura 4.31.</b>	Distribución de esfuerzos axiales en la sección transversal durante el temple en agua quieta .....	63

## Índice de tablas

<b>Tabla 2.1.</b>	Severidad de temple (H) para varios medios de temple .....	12
<b>Tabla 3.1.</b>	Condiciones experimentales para el primer arreglo de persianas (Pruebas A) .....	29
<b>Tabla 3.2.</b>	Condiciones experimentales para el primer arreglo de persianas (Pruebas B) .....	29
<b>Tabla 3.3.</b>	Condiciones experimentales para el primer arreglo de persianas (Pruebas C) .....	30
<b>Tabla 3.4.</b>	Condiciones experimentales para el primer arreglo de persianas (Pruebas D) .....	30
<b>Tabla 3.5.</b>	Condiciones experimentales para el primer arreglo de persianas (Pruebas E) .....	30
<b>Tabla 3.6.</b>	Condiciones experimentales para el primer arreglo de persianas (Pruebas F) .....	31
<b>Tabla 3.7.</b>	Condiciones de operación del equipo de PIV .....	33
<b>Tabla 3.8.</b>	Composición química del acero utilizado (determinada por espectrometría de emisión óptica) .....	33
<b>Tabla 3.9.</b>	Composición química nominal de un acero AISI 1045 .....	34
<b>Tabla 3.10.</b>	Condiciones de proceso para los experimentos en caliente ...	36

# Capítulo 1. Introducción

Los tratamientos térmicos tienen por objeto mejorar las propiedades mecánicas, principalmente, de piezas manufacturadas y consisten de ciclos controlados de calentamiento y enfriamiento. De esta forma se modifica la distribución microestructural de las piezas y, por ende, sus propiedades. Sin embargo, si los parámetros del proceso no se controlan es posible producir distorsión en las piezas templadas.

Existen varios tipos de tratamiento térmico. En particular, el temple de aceros tiene por objetivo endurecer y aumentar la resistencia de los mismos. Para ello, se calienta el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la temperatura crítica superior y se enfría rápidamente en un medio conveniente, ya sea agua, aceite, etc. Así, una planta de tratamientos térmicos utiliza tanques de temple, conteniendo algún tipo de líquido, en donde serán sumergidas las piezas dentro de canastillas especiales.

El temple en tanques con agitación es comúnmente utilizado en procesos de manufactura de componentes de acero. Los medios para proveer agitación son propelas marinas y bombas centrífugas, entre otros. Los tanques de temple generalmente cuentan con deflectores para modificar el patrón de flujo del medio de enfriamiento y, de esta manera, reducir el grado de distorsión ocasionada durante el temple.

En este trabajo de investigación se tomó como referencia a los tanques de temple de la planta de tratamientos térmicos TREMEC, ubicada en la ciudad de Querétaro, para generar información fundamental acerca de la relación patrones de flujo-distorsión. Esta empresa realiza la manufactura de componentes de acero (engranes y otras partes para la transmisión de automóviles), en tanques de

temple con agitación impulsada por propelas marinas y su principal problema es la distorsión generada durante el temple.

El objetivo de este proyecto es establecer el impacto que tienen diversos patrones de flujo sobre la distorsión en una probeta templada en un baño de temple agitado por propela confinada. Para esto se implementó la metodología siguiente: 1) diseño y construcción de un modelo físico; 2) experimentos en frío con técnicas de visualización con colorante y de estímulo–respuesta; 3) experimentos en frío con diversos arreglos de modificadores de flujo (sin y con carga) y análisis vía técnicas de velocimetría (PIV, por sus siglas en inglés, Particle Image Velocimetry); 4) experimentos en caliente, utilizando una probeta de acero AISI 1045, con ranura (para acrecentar la distorsión), para patrones de flujo seleccionados; 5) medición de distorsión residual en cada probeta (expresada en términos de desplazamiento [mm]). Además, para ayudar a explicar los resultados, se determinaron la distribución microestructural y de dureza residuales y se midió la respuesta térmica durante el temple.

Al término de la experimentación e interpretación de resultados, se pudo observar una clara relación entre los patrones de flujo y la distorsión obtenida en cada una de las probetas. Esto se explica en función de que los patrones de flujo generados en la zona de trabajo, correspondientes a diversos arreglos de las persianas y velocidad de rotación de la propela, definieron la evolución de los gradientes térmicos y de transformación de fase y por lo tanto el grado y forma en que se distorsionaron las probetas.

## Capítulo 2. Antecedentes

### 2.1 Distorsión en temple de aceros

Los tratamientos térmicos son operaciones que involucran ciclos de calentamiento y enfriamiento controlados, para obtener microestructuras específicas y así combinaciones de propiedades mecánicas.

En particular, el temple es un tratamiento térmico que consiste en austenizar un acero total o parcialmente, es decir, mantener a la pieza de acero a una temperatura tal que se encuentre dentro de la zona de la fase austenítica por un tiempo dado y luego enfriarla rápidamente para que no se lleve a cabo la transformación de austenita a perlita, ferrita o bainita y, de esta manera, obtener una fracción significativa de martensita en la estructura (en general no menor del 50%). Es posible acelerar el enfriamiento desde la región de austenita y controlar la transformación de ésta en bainita o martensita para obtener propiedades mecánicas tales como resistencia mecánica y dureza. La máxima dureza posible después de un tratamiento de temple está en función del contenido de carbono, los elementos aleantes presentes y el medio de enfriamiento [1]. Dentro de la amplia variedad de medios de temple se encuentran: agua, aceite, salmuera, soluciones cáusticas, soluciones poliméricas, sales fundidas, metales fundidos, gases y neblina para temple [3].

Los tratamientos térmicos, cuando no se han optimizado y controlado, causan problemas tales como distribución inadecuada de esfuerzos residuales, distorsión e incluso agrietamiento, y hasta fractura. Durante el tratamiento térmico, los esfuerzos residuales térmico y de transformación pueden causar cedencia (flujo plástico), con lo que se genera distorsión permanente del componente [2].

La distorsión en tamaño es el resultado de un cambio no uniforme en volumen generado por cambios en la microestructura durante el tratamiento térmico, u

ocasionados por procesos de maquinado, entre otros. La distorsión en forma es denominada cambio angular y se observa más claramente en componentes asimétricos que simétricos. La distorsión en forma es causada por la suma de efectos de la no uniformidad en el calentamiento y enfriamiento durante el tratamiento térmico, carburización no simétrica, esfuerzos residuales presentes en el componente antes del tratamiento térmico, esfuerzos ocasionados por deformación plástica, no uniformidad en la agitación durante el tratamiento térmico ó no uniformidad en la circulación del medio de enfriamiento, entre otras [2].

La distorsión o cambios dimensionales pueden atribuirse a numerosos factores introducidos dentro del componente durante o incluso después del tratamiento térmico como se muestra en la Figura 2.1 [2].

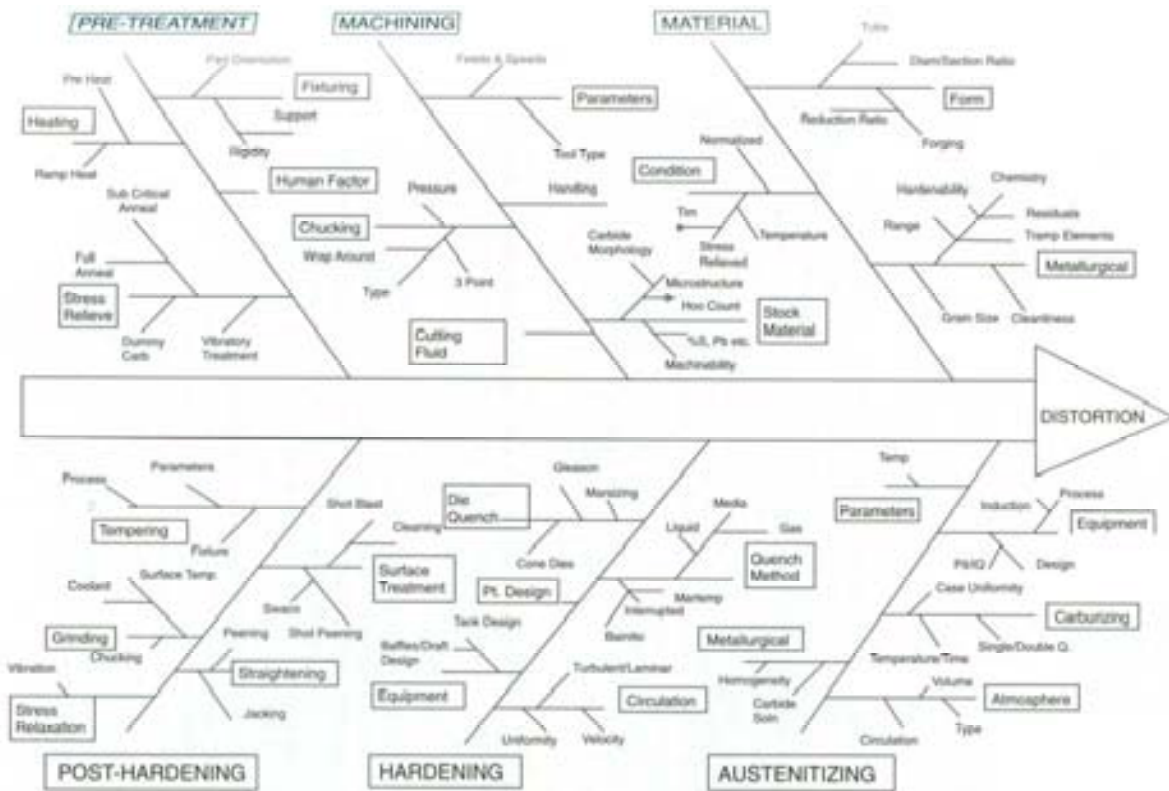


Figura 2.1 Diagrama Ishikawa que muestra algunos de los factores que deberían ser considerados cuando se presentan problemas de distorsión [2].

El diagrama Ishawaka en el caso particular del tratamiento en baños de temple reduce significativamente los factores que afectan la distorsión en componentes. Sin embargo, sigue habiendo una gran cantidad de factores que marcan la posibilidad de producir distorsión.

Por ejemplo, en orden de riesgo de provocar distorsión, inicialmente se encuentran aquellos factores relacionados con el endurecimiento como: diseño del tanque, diseño de persianas, medio de enfriamiento, método de temple y tipo de agitación. Posteriormente se encuentran aquellos factores referidos al material, como son, forma, composición química y tamaño de grano. De igual importancia a este último, están aquellos relacionados a la austenización, siendo estos la temperatura, diseño del horno y proceso de calentamiento.

La Figura 2.2 ilustra tres diferentes ejemplos de la evolución de los esfuerzos internos (en el centro y en la superficie de la pieza) durante enfriamientos acompañados por transformación de fase [4]. Si una parte se calienta uniformemente y luego se temple, la superficie exterior inicialmente se contrae, mientras que el centro permanece relativamente caliente. Este proceso pone a la superficie exterior en tensión y al interior en compresión. Si no ocurre transformación de fase, esta situación eventualmente se invierte (cuando el enfriamiento en la superficie es significativo).



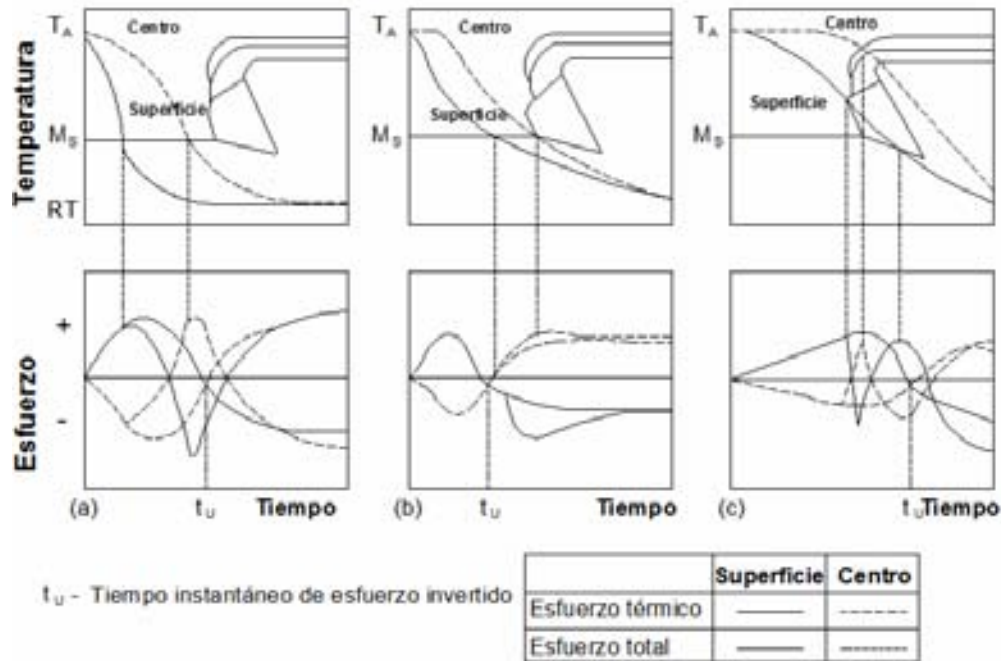


Figura 2.2 Comparación de esfuerzos de transformación para tres temple diferentes [4].

La Figura 2.2(a) ilustra el caso en el que se producen las transformaciones de fase en la superficie y en el núcleo antes del cambio de signo de los esfuerzos térmicos. Por encima de la temperatura de transformación ( $M_S$ ), los esfuerzos que se producen son térmicos. Durante el enfriamiento, los esfuerzos en el núcleo superan el límite de cedencia y entonces se produce la deformación plástica. Subsecuentemente, la transformación martensítica en el centro proporciona un componente sustancial de esfuerzo debido a incrementos en volumen provenientes de la transformación martensítica. Esto hace que el núcleo entre en compresión y la superficie en tensión al mismo tiempo. En contraste, en la Figura 2.2 (b) se muestra el caso en el que la transformación de fase comienza después del cambio de signo de los esfuerzos térmicos. La transformación inducida por aumento de volumen de la capa superficial agrega esfuerzos compresivos a la superficie. Dado que las tensiones están en equilibrio, hay un incremento en los esfuerzos tensiles en el centro. Por otra parte, la Figura 2.2(c) ilustra el caso donde la transformación del centro comienza más tarde y termina de transformar

primero la superficie. Durante el proceso de enfriamiento, el signo de los esfuerzos cambia en tres ocasiones.

## 2.2 Templabilidad en aceros

La templabilidad se refiere a la capacidad del acero para ser transformado parcial o completamente de austenita a martensita a una profundidad dada, bajo ciertas condiciones de enfriamiento predefinidas [3]. Esta definición refleja la naturaleza empírica de la templabilidad del acero, por lo que se han realizado distintos experimentos para medir o describir la templabilidad de varias clases de acero. Entre los experimentos más importantes están el cálculo de templabilidad en términos del diámetro crítico ideal y el ensayo Jominy [3].

Se denomina “*diámetro crítico ideal*” ( $D_i$ ) de un acero, al diámetro (expresado en pulgadas) del mayor redondo de ese acero en cuyo centro se consigue una estructura del 50% de martensita, después de ser enfriado desde la temperatura de temple en un medio de enfriamiento teórico, cuya capacidad de absorción de calor fuese infinita [5].

El procedimiento general para calcular la templabilidad de un acero es el de determinar el tamaño de grano ASTM y composición química del acero, para posteriormente introducir el porcentaje de cada elemento aleante en un ecuación empírica cuya base es el múltiplo de diversos factores multiplicativos de aleación [3].

El ensayo Jominy (ASTM A 255) es el procedimiento más ampliamente utilizado para evaluar la templabilidad de aceros. En este ensayo, una barra cilíndrica de 100 mm (4 in) de largo por 25.4 mm (1 in) de diámetro es austenizada a la temperatura apropiada para la aleación por un lapso aproximado de treinta minutos y al final enfriada rápidamente por medio de un chorro de agua a 27°C que impacta solamente en su base [3][5]. Este proceso provee valores de dureza

asociados con varias posiciones de la barra, que representan diferentes rapidezces de enfriamiento.

### 2.3 Mecanismos de transferencia de calor en temple [1]

La rapidez de enfriamiento de una pieza de trabajo es determinada principalmente por la rapidez de enfriamiento superficial, la cual se caracteriza (para medios volátiles) por tres distintas etapas (en orden de mayor a menor temperatura superficial): 1) etapa de enfriamiento en presencia de capa de vapor (Etapa A), 2) etapa de enfriamiento con ebullición nucleada (Etapa B) y 3) etapa de enfriamiento por convección sin ebullición (Etapa C). En la Figura 2.3 se ilustran estas etapas y su impacto sobre la curva de enfriamiento y, por lo tanto, la curva de rapidez de enfriamiento (primera derivada de la rapidez de enfriamiento) [1].

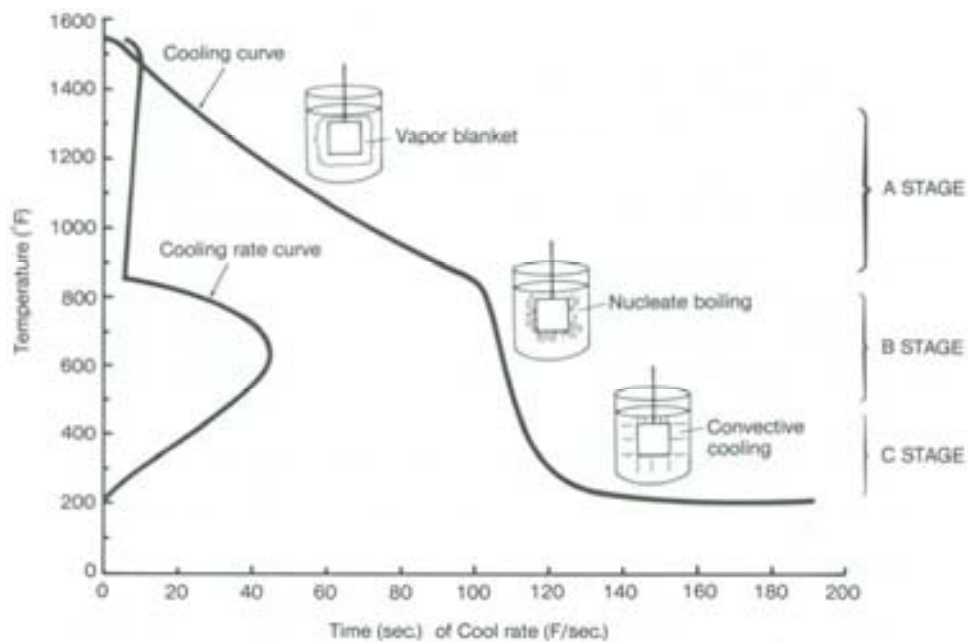


Figura 2.3. Mecanismos de enfriamiento y transferencia de calor en un proceso de temple [1].

### 2.3.1 Etapa A1

Esta etapa se caracteriza por la formación de burbujas de vapor que preceden al establecimiento de una capa de vapor; se conoce como “etapa de contacto inicial con el líquido”. La etapa A1 tarda cerca de 0.1 seg. (tiempos más largos se presentan en líquidos cuyas temperaturas son más altas y piezas de trabajo con secciones transversales más grandes) y no es realmente importante para la evaluación de las características de transferencia de calor. Se detecta únicamente cuando se cuenta con un equipo extremadamente sensible y no se detecta cuando el medio de temple es viscoso o contiene gases no disueltos, o cuando el baño de temple es operado a temperaturas cercanas al punto de ebullición del líquido [6].

### 2.3.2 Etapa A

Se caracteriza por la formación de una ininterrumpida capa de vapor que rodea a la superficie de la pieza. Esto ocurre cuando el líquido se pone en contacto con la pieza de trabajo caliente por lo que se vaporiza inmediatamente, originando la formación de una capa de vapor alrededor de la pieza.

El calor total perdido es aquel necesario para vaporizar al líquido más una pequeña cantidad de calor perdido por radiación a través de la capa de vapor. El enfriamiento en esta etapa ocurre por conducción y radiación a través de la película de vapor y por lo tanto es relativamente lento, ya que el vapor actúa como un aislante. Esta etapa no es detectable en soluciones acuosas frías de solutos no volátiles (aprox. 5% de concentración), tales como cloruro de sodio, cloruro de potasio, cloruro de litio, hidróxido de sodio o ácido sulfúrico. Las curvas de enfriamiento para estas soluciones inician casi inmediatamente con la etapa B. Para optimizar las propiedades físicas usualmente se trata de minimizar el tiempo de permanencia en la etapa A [6].

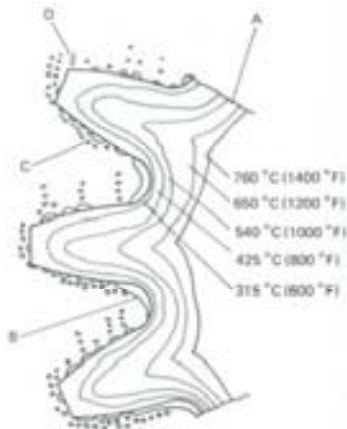
### 2.3.3 Etapa B

Esta etapa produce las más altas rapidezces de transferencia de calor. Inicia cuando el líquido penetra la capa de vapor y hace contacto con la pieza de trabajo, induciendo una disminución de la temperatura superficial del metal y de la capa de vapor hasta provocar que la capa de vapor se colapse; este es el fin de la fase de la capa de vapor. El calor se transfiere rápidamente durante esta etapa porque el líquido de enfriamiento reemplaza continuamente a la capa de vapor que tiende a formarse en la superficie de la pieza de trabajo. Este calor es removido como calor de vaporización. El punto de ebullición del medio de temple determina el término de esta etapa. El tamaño y la forma de las burbujas de vapor controlan la duración de la etapa B, además de la rapidez de enfriamiento desarrollada dentro de ésta. Para obtener altas propiedades mecánicas, como dureza y resistencia a la tracción, la rapidez de enfriamiento en la etapa B debe ser maximizada. Para líquidos de alto calor de vaporización, como el agua, éste es un proceso especialmente rápido [6].

### 2.3.4 Etapa C

La rapidez de enfriamiento en esta etapa es más lenta que la desarrollada en la etapa B. La etapa C comienza cuando la rapidez de flujo de enfriamiento medio es tal que el líquido no alcanza el punto de ebullición cuando pasa sobre la pieza de trabajo. La acción de ebullición cesa y la superficie de la pieza entra en contacto completamente con el medio de enfriamiento. Este modo de enfriamiento es más lento que la etapa B y se lleva a cabo por mecanismos de conducción y convección. Para minimizar grietas, esfuerzos residuales y propensión a la distorsión, se debe mantener a un mínimo la rapidez de enfriamiento de la etapa C.

Cuando la geometría es compleja pueden ocurrir otros eventos. Por ejemplo, en la Figura 2.4 se muestra el campo térmico, junto con los eventos que lo definen, para el temple de un engrane inmerso en un líquido volátil. Como puede apreciarse, es posible que varias de las etapas de transferencia de calor ocurran simultáneamente en una pieza [6].



**Figura 2.4 Campo térmico y mecanismos de enfriamiento presentes en la periferia de un engrane inmerso en un líquido volátil durante el temple. A) campo térmico en el núcleo caliente del engrane; B) capa de vapor debida al enorme gradiente térmico y pobre agitación; C) burbujas de vapor (atrapadas) condensadas lentamente; D) burbujas de vapor escapando y condensando [7].**

## 2.4 Medios de enfriamiento

Un medio de enfriamiento es aquel fluido (líquido o gas) que tiene como propósito el extraer energía térmica de una pieza a una rapidez de transferencia de calor especificada, para así obtener la dureza, resistencia y tenacidad requeridas. Simultáneamente, el medio de enfriamiento debería minimizar la distorsión y los esfuerzos residuales de tensión, incrementando la uniformidad del temple en la superficie total de la pieza [1].

La selección de un medio de temple depende de la templabilidad de la aleación en particular, el espesor y forma de la pieza de trabajo, además de las rapidezces de enfriamiento necesarias para obtener la microestructura deseada [7]. Muchos y variados medios de enfriamiento se han utilizado para el proceso de temple. Los más comunes son agua, aceites, salmuera (acuosa), soluciones cáusticas

(acuosas), soluciones poliméricas, sales fundidas, metales fundidos, aire, y en algunos casos, gases (inmóviles o en movimiento) y neblina para temple [7].

La capacidad de un medio de enfriamiento para endurecer una pieza específica depende de las características de enfriamiento del medio de temple. Así, la efectividad de un medio de temple dado es referida al parámetro “*severidad de temple*”. Esta medida de enfriamiento o poder de enfriamiento es identificado por la letra “*H*”, y se determina experimentalmente templando una serie de barras cilíndricas de una acero dado [8]. En la Tabla 2.1 se muestran los valores de *H* para los medios de temple comúnmente utilizados. Puede notarse de la tabla que el incremento en severidad (*H*) sigue el siguiente patrón ascendente: aire-aceite-agua-salmuera. También se aprecia que la severidad depende del grado de agitación del medio de temple.

**Tabla 2.1. Severidad de temple (H) para varios medios de temple [8].**

	Aire	Aceite	Agua	Salmuera
Sin circulación del fluido o agitación de pieza de trabajo	0.02	0.25 a 0.30	0.9 a 1.0	2
Circulación ligera	-----	0.30 a 0.35	1.0 a 1.1	2 a 2.2
Circulación moderada	-----	0.35 a 0.40	1.2 a 1.3	-----
Buena circulación	-----	0.4 a 0.5	1.4 a 1.5	-----
Circulación fuerte	0.05	0.5 a 0.8	1.6 a 2.0	-----
Circulación violenta	-----	0.8 a 1.1	4	5

En particular, el agua ha sido el medio de temple original para prácticas comerciales y sigue siendo utilizado por su bajo costo, fácil obtención, carácter no contaminante y a que en muchos casos no se pretende volver a utilizar. Una desventaja del agua es que siempre hay riesgo de producir distorsión y/o agrietamiento de la pieza de trabajo debido a que produce altas rapidezces de enfriamiento. Otra desventaja es que usando sólo agua se puede extender la etapa de capa de vapor.

## 2.5 Curvas de enfriamiento

Una curva de enfriamiento muestra la relación entre el tiempo y la temperatura durante el enfriamiento de un material [9]. La forma de una curva de enfriamiento es un indicativo de los diversos mecanismos de enfriamiento que ocurren durante el proceso de temple (etapas A, B y C) [1].

Las curvas de enfriamiento son relativamente fáciles de obtener experimentalmente usando un aparato que consiste de una probeta instrumentada y un sistema de adquisición de datos.

De las mediciones de las curvas de enfriamiento, es posible calcular la curva de rapidez de enfriamiento alcanzada en un componente como una función del tiempo o como una función de la temperatura (ver Figura 2.5) [1].

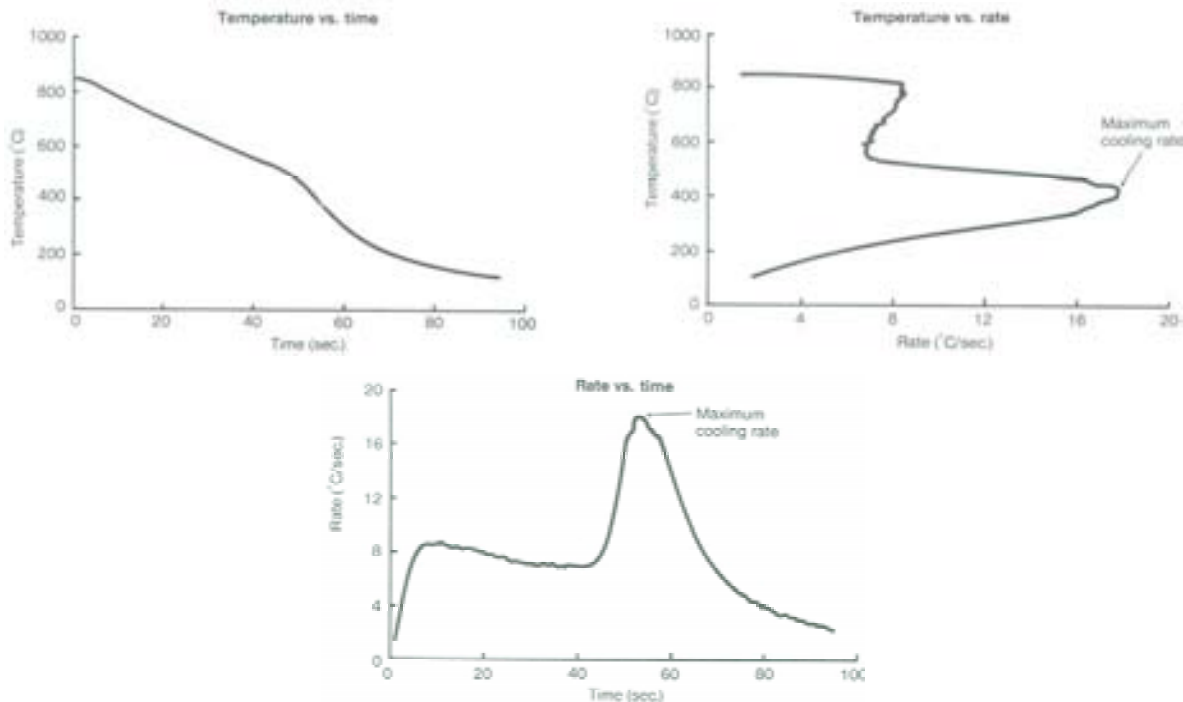


Figura 2.5 Varias representaciones de datos de una curva de enfriamiento [1].



La información de las curvas de enfriamiento puede ser trasladada a rapidezces de enfriamiento (primera derivada de la curva de enfriamiento) si se desea. Mediante curvas de enfriamiento se pueden derivar las condiciones del medio de temple bajo las cuales se está desarrollando la prueba [1].

Muchos datos de transformación metalúrgica se presentan en términos de la rapidez de enfriamiento necesaria para obtener una microestructura específica; estas rapidezces pueden ser descritas por las rapidezces de enfriamiento obtenidas del análisis de las curvas de enfriamiento del medio de temple [1].

Las curvas de enfriamiento son particularmente sensibles a factores que afectan la capacidad del medio de enfriamiento para extraer calor, incluyendo tipo de medio de temple y temperatura y agitación del baño [1].

Las curvas de enfriamiento son ampliamente utilizadas por su interacción con los diagramas TTT y CCT. Las curvas de enfriamiento de un componente pueden sobreponerse a cualquier diagrama TTT determinar el tiempo en el que comienza y finaliza una transformación de fase. Así también, puede sobreponerse a cualquier diagrama CCT para determinar el resultado microestructural obtenido asociado a la rapidez de enfriamiento a alguna temperatura especificada.

## **2.6 Diagramas de transformación**

Son diagramas donde se describen los procesos de transformaciones de fase en función de dos variables: la temperatura y el tiempo. En el caso de los aceros se trata de cuantificar la evolución de las transformaciones de fase de la austenita, y pueden ocurrir bajo condiciones isotérmicas o de enfriamiento continuo. Este tipo de diagramas están diseñados para mostrar principalmente la respuesta microestructural asociada al tipo y rapidez de enfriamiento en un tratamiento térmico.

### 2.6.1 Diagramas de Temperatura-Tiempo-Transformación (TTT)

En la Figura 2.6 se muestra un diagrama TTT para el acero 1045/1050. Estos diagramas son construidos bajo condiciones isotérmicas (ver Figura 2.6). Las curvas de transformación se generan calentando inicialmente a la temperatura apropiada para la aleación, se transfieren las muestras a un baño de sales o plomo, se mantienen por ciertos periodos de tiempo y finalmente se templen en agua. La microestructura de cada muestra después del temple es examinada para determinar el punto en el tiempo donde la transformación a ferrita, perlita, o bainita comenzaron y la rapidez a la cual la transformación progresó con respecto al tiempo. El inicio de la transformación en las curvas TTT se define generalmente como el tiempo requerido para producir 0.1% de transformación a la temperatura específica mantenida [3]. En los diagramas TTT aparecen fases metaestables que no aparecen en los diagramas de equilibrio.

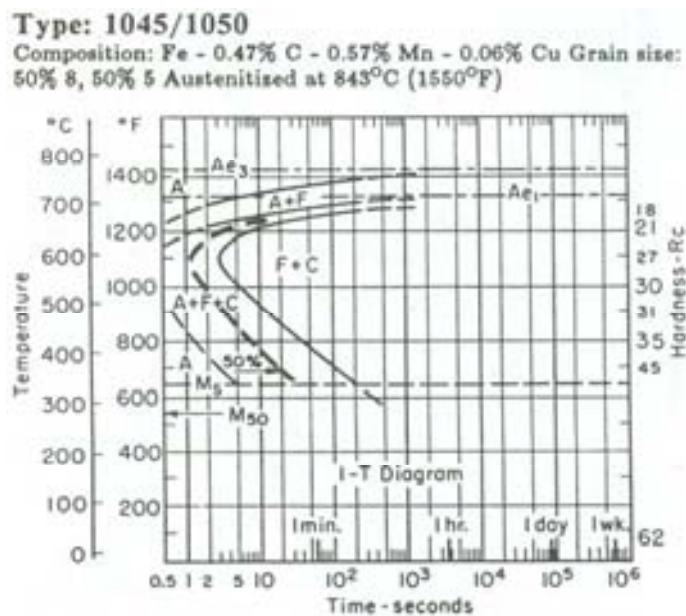


Figura 2.6 Diagrama TTT para una acero 1045/1050 [10].

### 2.6.2 Diagramas de enfriamiento continuo (CCT)

Este tipo de diagramas se construyen a partir de enfriamientos no interrumpidos, examinando el resultado microestructural para determinar las fases asociadas con rapidezces de enfriamiento específicas [3]. Los diagramas muestran la proporción aproximada de las fases presentes de la microestructura obtenida por enfriamiento continuo (ver Figura 2.7) [11].

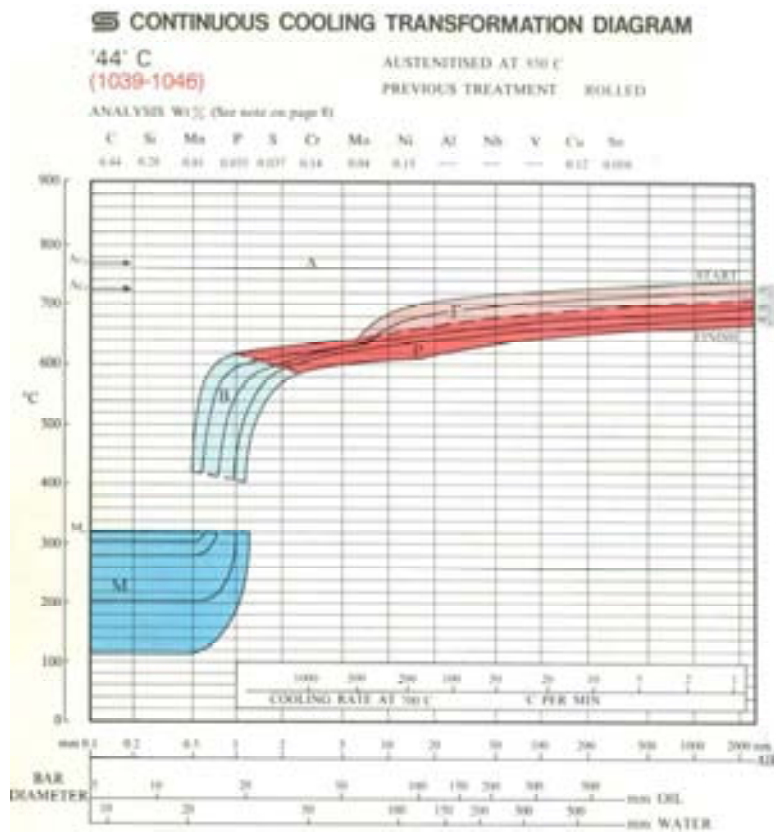


Figura 2.7. Diagrama CCT para un acero 1039-1046 [11].

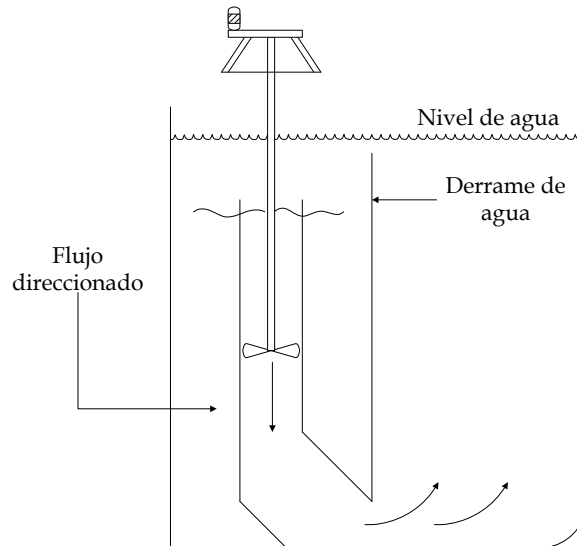
### 2.7 Tanques de temple

Los tanques de temple se utilizan para contener al medio de enfriamiento que extrae la energía térmica de la pieza. Suelen tener mecanismos para homogeneizar la temperatura del baño. Para diseñar un tanque de temple se

toman factores como el peso del acero a templear por hora, el tamaño y la forma de la parte, el espesor de la sección, el grado del acero y las propiedades requeridas [1].

Los tanques de temple se clasifican de acuerdo a la forma empleada para agitar al fluido que contienen en:

- *Agitación por propelas.* Este método es empleado para direccionar flujo alrededor de la carga durante el temple a través de propelas impulsadas por motores eléctricos.
- *Agitación con bombas centrífugas.* Se utilizan bombas centrífugas para direccionar el flujo alrededor de la carga durante el temple. Además, el medio de enfriamiento debe circular a través de un intercambiador de calor para controlar la temperatura durante el tratamiento.
- *Agitación con boquillas sumergidas.* Consiste en la inyección del medio de temple mediante boquillas sumergidas en el interior del tanque. El líquido generalmente es bombeado por la boquilla usando una bomba centrífuga.
- *Agitación con tubo de corriente de aire.* Se deriva de la agitación con propela y se utiliza para sistemas de temple poco profundos, donde este tubo actúa direccionando el flujo de fluido (aire-agua) hacia las esquinas redondeadas y/o baffles (modificadores de flujo), mamparas y un vertedero (Fig. 2.8). El derrame en el vertedero se utiliza para asegurar que la cabeza de la propela sea mantenida arriba del impulsor para evitar la cavitación.
- *Agitación Mecánica.* Este método suministra agitación durante el temple por medio del movimiento oscilatorio de un tubo hueco para proveer agitación durante el temple.



**Fig. 2.8. Tanque de temple con sistema de agitación con propela confinada y flujo direccionado [1].**

Para asegurar que el tanque de temple funcione correctamente se toman en consideración las siguientes variables de diseño:

- ❖ Tamaño del tanque
- ❖ Agitación
- ❖ Diseño de los conductos para sistemas continuos
- ❖ Intercambio de calor para el control de la temperatura de temple
  - Depende del área superficial de las partes
  - Se incrementa con la rapidez de flujo
  - Se incrementa con la reducción en el diámetro hidráulico
  - Se incrementa con el decremento de la viscosidad
- ❖ Filtración

### **2.7.1 Efecto de la agitación [1]**

La agitación producida por el movimiento del medio de temple tiene una influencia significativa en las características de transferencia de calor del líquido de temple. Causa una perturbación mecánica de la capa de vapor en la etapa A y produce

burbujas más pequeñas y separadas durante la etapa B. Rompe o separa mecánicamente geles y sólidos y produce una transferencia de calor más rápida en la Etapa C. Además de los efectos descritos arriba, la agitación circula líquido de enfriamiento que reemplaza al líquido que se ha calentado alrededor de la pieza de trabajo durante el temple.

Dentro del diseño de un sistema de templado se ha encontrado que el efecto que tiene la agitación sobre la uniformidad en el temple puede tener un mayor impacto que la temperatura del baño. Se ha determinado que al incrementar la agitación se incrementa la dureza y uniformidad de ésta en los aceros, provocando con esto mejoras en las características y propiedades mecánicas de la pieza.

La agitación de agua o aceite mediante el uso de propelas en procesos comerciales de temple ha mostrado reducción en la distorsión y el agrietamiento. Esto muestra indirectamente que la rapidez de agitación está íntimamente relacionada con el grado o severidad de temple; sin embargo, debe tomarse en cuenta que dicha severidad en el temple es una variable dependiente de factores como el tamaño del tanque, viscosidad del medio de temple y tipo de agitadores.

Las ventajas de utilizar un sistema manejando una propela son el bajo costo, la facilidad para construirlo, la facilidad para modificar la velocidad del flujo en el interior del baño de temple y la creación de un patrón de flujo alrededor del metal enfriado que es reproducible, por lo que aplicado a cualquier tamaño de sistemas de temple con propiedades de flujo similares, permite la construcción de una curva de calibración de velocidad de flujo lineal contra velocidad rotacional de la propela.

### **2.7.2 Efecto de la temperatura del medio de enfriamiento y de la calidad de la superficie de la pieza [1]**

La temperatura del medio de temple afecta a la capacidad de éste para extraer calor de la pieza de trabajo. Al disminuir la temperatura del medio de temple, la extracción de calor es más rápida. La rapidez específica de extracción de calor depende de las características del medio de temple utilizado. En general, para líquidos volátiles, entre más alta sea la temperatura del baño más se prolonga la duración de la etapa A. Los aceites son más fluidos (esto es, disminuye su viscosidad) a altas temperaturas por lo que las rapidezces de enfriamiento se incrementan. Además, al tener altas temperaturas en el medio de temple decrece la rapidez de transferencia de calor en la etapa C.

El cambio más notable en la capacidad para transferir calor proviene de la rápida oxidación superficial de la pieza de trabajo a altas temperaturas. Esta puede incrementar o disminuir la capacidad de transferencia de calor, dependiendo del espesor del óxido desarrollado y de la rugosidad de la capa de óxido.

## **2.8 Modelos físicos**

Un modelo físico es una representación a escala de un sistema real, llamado prototipo. Para su construcción generalmente se hace uso de materiales y equipos distintos al del original, con el fin de economizar costos y de realizar mediciones que en una planta o incluso en el laboratorio serían prácticamente imposibles de realizar.

Existen tres tipos de modelos físicos:

1. *Modelos físicos rigurosos.* Son construidos observando criterios de similitud [12] entre el modelo y el prototipo, de manera que los resultados de los

experimentos efectuados en el modelo físico son útiles (mediante un escalamiento apropiado) para describir el comportamiento del sistema real.

2. *Modelos físicos aproximados.* Se utilizan para el estudio de los fenómenos físicos relevantes que ocurren en el sistema real, generalmente con el fin de obtener información para la construcción de un modelo matemático.
3. *Modelos físicos cualitativos.* Son utilizados para llevar a cabo experimentos cuando es necesario obtener un entendimiento cualitativo de cómo los parámetros clave del proceso se relacionan entre sí [12].

Los modelos físicos permiten analizar procesos reales, siempre y cuando se cumplan ciertas condiciones ideales de similitud entre el prototipo y el modelo físico. Existen cuatro tipos de criterios de similitud entre los modelos físicos y los prototipos: similitud geométrica, similitud cinética, similitud dinámica y similitud térmica [13,14].

La similitud geométrica consiste en que el prototipo y el modelo físico tengan una relación única entre las dimensiones físicas de uno y otro, es decir, ambos deben tener la misma geometría y la misma relación entre longitudes características; a esta relación se le conoce comúnmente como factor de escala. La similitud cinemática representa a la similitud del movimiento. Por su parte, la similitud dinámica representa la equivalencia de las fuerzas (gravitacionales, de inercia, etc.) entre el modelo físico y el prototipo. La similitud térmica existe cuando hay equivalencia de los gradientes de temperatura y de los mecanismos de transformación de energía entre el prototipo y el modelo [11].

## **2.9 Velocimetría por imágenes de partículas**

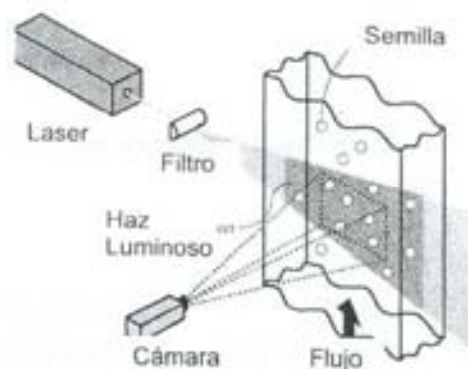
Una de las técnicas de velocimetría más utilizadas hoy en día es la técnica denominada PIV (por sus siglas en inglés: *Particle Image Velocimetry*). Esta técnica utiliza un haz de luz intermitente que ilumina un área del campo de flujo



para monitorear el movimiento de las partículas (trazador) en un fluido translúcido, para determinar la velocidad de una partícula. Las partículas viajan con el flujo debido a su menor densidad, permitiendo medir fácilmente la velocidad del fluido. Las partículas utilizadas suelen ser esferas de vidrio recubiertas de plata, poliamidas, etc., del orden de  $10\ \mu\text{m}$  de diámetro o ligeramente mayores, las cuáles reflejan el haz incidente. Una cámara de alta velocidad se encarga de tomar fotografías del campo en cada intermitencia, obteniendo así una gran cantidad de imágenes del movimiento de cada partícula, con las cuales un *software ad-hoc* analiza y determina la velocidad y dirección de cada partícula mediante análisis estadístico [15].

PIV utiliza un láser que envía y recibe señales ópticas por medio de un fotomultiplicador y a través de un procesador electrónico convierte la frecuencia de dispersión en señales análogas o digitales proporcionales a la velocidad de flujo de las partículas. Esta técnica puede generar además mapas vectoriales, mapas escalares, líneas de corriente de flujo y mapas de vorticidad, ente otras.

El esquema de funcionamiento de la técnica de PIV, se ilustra en la Figura 2.9.



**Figura 2.9 Esquema de funcionamiento de la técnica PIV [15].**

Como se mencionó, esta técnica requiere de un medio translúcido, por lo que es muy utilizada para caracterizar campos de velocidad en modelos físicos (en los que se utiliza comúnmente agua).

### 2.10 Simulación matemática

Conforme la tecnología avanza es posible aplicar simulaciones matemáticas que ayuden al entendimiento de los procesos metalúrgicos. En el campo de tanques de temple con agitación se han logrado implementar códigos computacionales de dinámica de fluidos (CFD, por sus siglas en inglés Computational Fluid Dynamics) disponibles comercialmente para resolver las ecuaciones de conservación de momentum que gobiernan el flujo de fluidos y así predecir el campo de velocidades en la zona de trabajo [15, 16]. Cabe mencionar que la característica turbulenta del flujo en este tipo de tanques no permite la obtención de soluciones analíticas cerradas.

La distorsión durante el temple involucra numerosos factores, tales como propiedades y características térmicas, plásticas y de transformación de fase del material. Así mismo, las propiedades del medio de enfriamiento y la interface medio de temple/pieza son también muy significativas y difíciles de caracterizar o cuantificar. Sin embargo, este proceso puede ser simulado exitosamente, mediante modelación matemática y computacional proveyendo los datos de entrada necesarios.

## Capítulo 3. Procedimiento experimental

En este capítulo se describen las metodologías, instrumentos y condiciones de trabajo empleadas en el trabajo experimental. Los experimentos se dividen en dos rubros: 1) experimentos en frío (a temperatura ambiente) y 2) experimentos en caliente (desde la temperatura de austenización).

*Experimentos en frío:* Involucran a todas aquellas pruebas realizadas a temperatura ambiente y con una barra de acrílico, de 10 mm de diámetro, para simular a la probeta; pueden, entonces, clasificarse como experimentos de modelación física. A través de este tipo de experimentación se lograron obtener los patrones de flujo para cada condición experimental estudiada.

*Experimentos a alta temperatura:* Engloban a aquellas pruebas en las que las probetas de acero se calentaron hasta la temperatura de austenización, para posteriormente sumergirlas en el baño de temple. Con estos experimentos se obtuvieron curvas de enfriamiento y se produjo distorsión (intencional) de las probetas. También se determinó la microestructura final y se midieron durezas residuales.

### 3.1 Equipo experimental

Se utilizó un modelo físico de un tanque de temple con agitación, fabricado con acrílico a una escala geométrica de 1:10 (excepto por la profundidad), tomando como referencia los tanques de temple que utiliza la empresa de tratamientos térmicos TREMEC ubicada en el estado de Querétaro. Dado que la profundidad del modelo es mucho menor que la del prototipo, el modelo puede ser considerado como distorsionado. Se diseñó de esta manera para simplificar el patrón de flujo producido por el sistema de agitación.

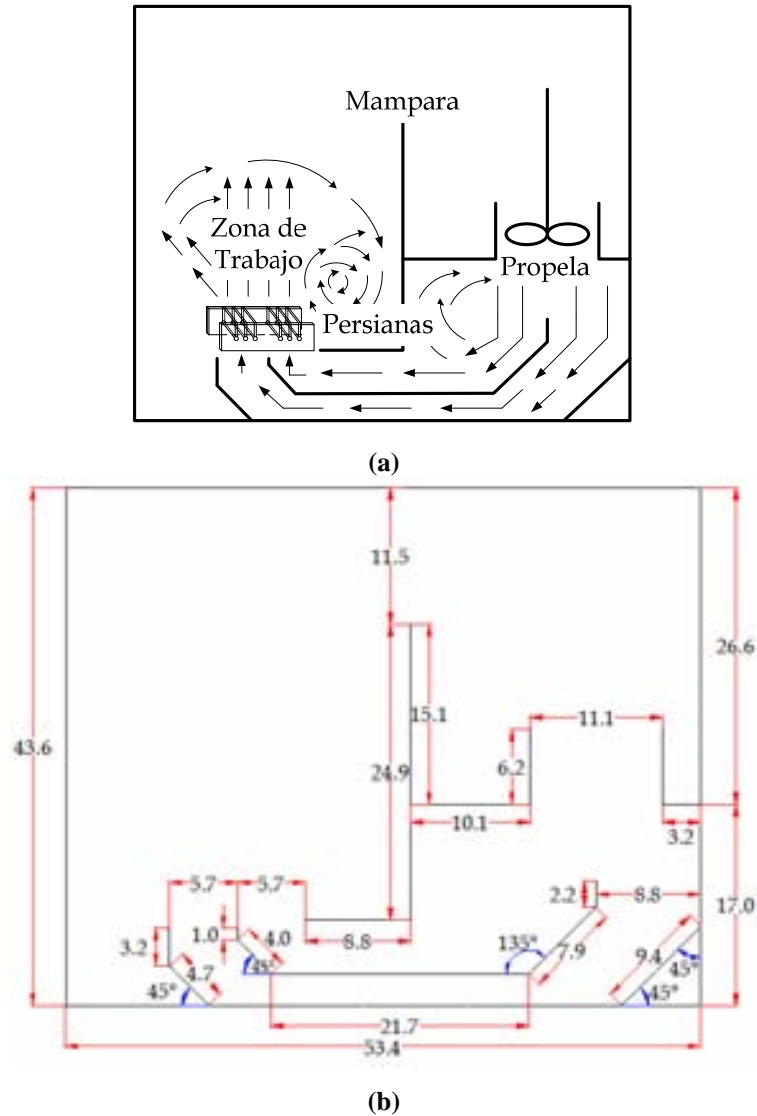
Además del modelo físico, el equipo experimental cuenta con una propela y un motor eléctrico conectado a una fuente de alimentación de voltaje de 120 V, un gato (para ajustar la posición vertical del modelo físico con respecto a la propela) y una estructura metálica que sujeta la lanza a la que se fija la probeta para el tratamiento térmico (ver Figura 3.1) [15].

Cabe señalar que para los experimentos en frío o en caliente se agregan además otros dispositivos, dado que las condiciones de trabajo en cada uno de los dos tipos de experimentos requieren de mediciones totalmente diferentes.



**Figura 3.1. Modelo físico de tanque de temple y equipo complementario empleado en esta investigación. (1) Modelo físico, (2) propela, (3) motor de la propela, (4) juego de persianas, (5) gato y (6) estructura metálica [15].**

Las dimensiones del modelo fueron fijadas de acuerdo al factor de escala 1:10 y se muestran en la Fig. 3.2. En el interior del modelo físico existe una mampara a 24.4 cm del extremo izquierdo (visto de izquierda a derecha). Esta mampara se utilizó también como referencia para el llenado del modelo con el medio de temple (3 cm arriba del tope superior de la mampara para todos los experimentos).

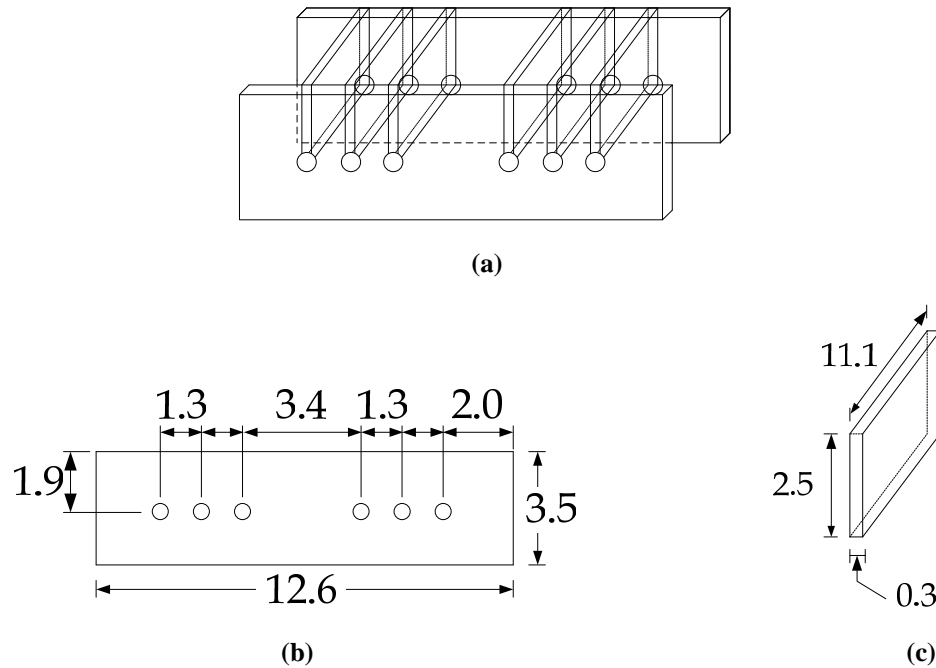


*Nota: Todas las distancias se reportan en cm.*

**Figura 3.2. Modelo físico empleado en esta investigación: a) zonas del modelo y b) dimensiones.**

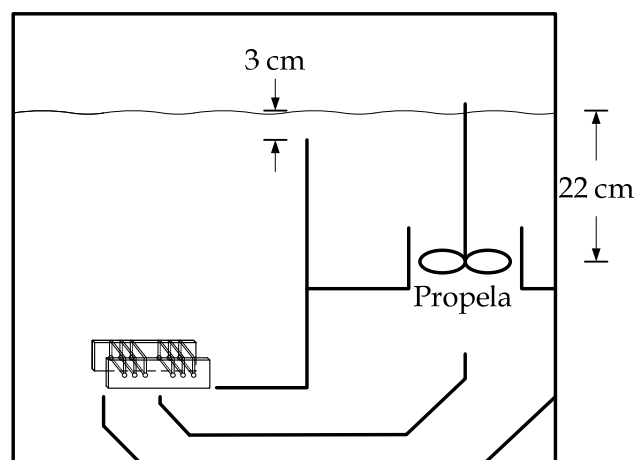
La agitación fue producida con un motor de 1 Hp de potencia, operado a 120 V (marca SIEMENS), conectado a una propela marina con un agitador de 10 cm de diámetro; las aspas de la propela se colocaron a una distancia de 22 cm por debajo del nivel del agua, como se señala en la Figura 3.3. El medio de temple se impulsa hacia la zona de trabajo a través de dos conductos que lo acarrearán hacia un dispositivo de dos series de

persianas, que a su vez modifican el patrón de flujo, produciendo al que impactará a la probeta, la cual se coloca en la zona de trabajo. El arreglo de persianas se muestra en la Figura 3.3.



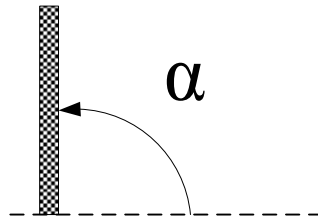
**Figura 3.3. Arreglo de persianas: a) Dispositivo ya armado; b) dimensiones de las placas para sujetar a las persianas y c) dimensiones (cm) de cada persiana.**

En el interior del modelo fueron posicionadas dos series de tres persianas (126 mm x 35 mm x 3 mm) fabricadas con acrílico, en la zona del vertedero (ver Figura 3.4).



**Figura 3.4. Colocación de las aspas de la propela en el modelo físico.**

Cada una de las persianas podía moverse libremente a cualquier ángulo deseado. Sin embargo, para reducir el número de variables de proceso fueron seleccionados sólo tres ángulos preferenciales ( $45^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$ ), referidos al plano horizontal como se muestra en la Figura 3.5.



**Figura 3.5. Sistema de referencia para el ángulo de las persianas.**

Tanto para la experimentación en frío como en caliente se utilizó agua como medio de temple por las ventajas que ofrece para realizar la experimentación: es abundante, tiene bajo costo, es de fácil manejo y permite visualizar claramente los patrones de flujo que se presentan en cada una de las pruebas al utilizar trazadores (colorantes). Cabe señalar que en la planta de tratamientos térmicos se utilizan aceites especiales como medio de temple, que tienen propiedades físicas que difieren de las del agua.

### **3.2 Experimentos en frío**

Se llevaron a cabo dos tipos de experimentos dentro de esta clasificación: el primero consta de experimentos en los que podían visualizarse con facilidad los patrones de flujo por medio del uso de trazadores visuales y el segundo hizo uso de una herramienta moderna (PIV: Particle Image Velocimetry) utilizada para medir campos de velocidad; estos dos tipos de experimentos serán descritos a continuación. Cabe mencionar que, para este trabajo, no era necesario el determinar cuantitativamente a los patrones de flujo; sin embargo, esta información se obtuvo como un paso previo para validar un ejercicio de modelación matemática.

### 3.3 Condiciones operativas manejadas en los experimentos en frío

Incluyendo duplicados, se realizaron aproximadamente 30 experimentos en frío para determinar las condiciones operativas relevantes para diseñar los experimentos en caliente. Las variables independientes fueron la velocidad de rotación de la propela y la posición de las persianas. Las condiciones experimentales específicas se muestran en las Tablas 3.1 a 3.6.

**Tabla 3.1. Condiciones experimentales para el primer arreglo de persianas (Pruebas A)**

Prueba	Velocidad de rotación de la propela (Hz)	Posición de Persianas	
1	30		
2	25		
3	20		
4	15		
5	10		

**Tabla 3.2. Condiciones experimentales para el primer arreglo de persianas (Pruebas B)**

Prueba	Velocidad de Rotación de la Propela (Hz)	Posición de Persianas	
6	30		\\ \\
7	25		\\ \\
8	20		\\ \\
9	15		\\ \\
10	10		\\ \\



**Tabla 3.3. Condiciones experimentales para el primer arreglo de persianas (Pruebas C)**

Prueba	Velocidad de Rotación de la Propela (Hz)	Posición de Persianas	
11	30		///
12	25		///
13	20		///
14	15		///
15	10		///

**Tabla 3.4. Condiciones experimentales para el primer arreglo de persianas (Pruebas D)**

Prueba	Velocidad de Rotación de la Propela (Hz)	Posición de Persianas	
16	30	\\ \\	
17	25	\\ \\	
18	20	\\ \\	
19	15	\\ \\	
20	10	\\ \\	

**Tabla 3.5. Condiciones experimentales para el primer arreglo de persianas (Pruebas E)**

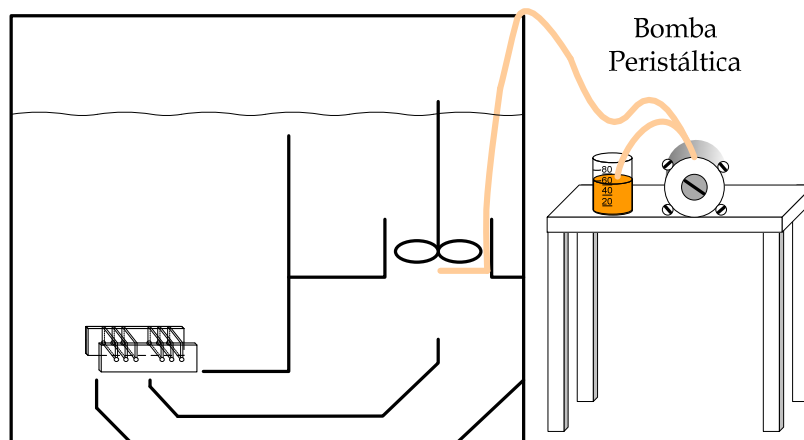
Prueba	Velocidad de Rotación de la Propela (Hz)	Posición de Persianas	
21	30	///	
22	25	///	
23	20	///	
24	15	///	
25	10	///	

**Tabla 3.6. Condiciones experimentales para el primer arreglo de persianas (Pruebas F)**

Prueba	Velocidad de Rotación de la Propela (Hz)	Posición de Persianas	
26	30	///	\\
27	25	///	\\
28	20	///	\\
29	15	///	\\
30	10	///	\\

### 3.4 Visualización del patrón de flujo

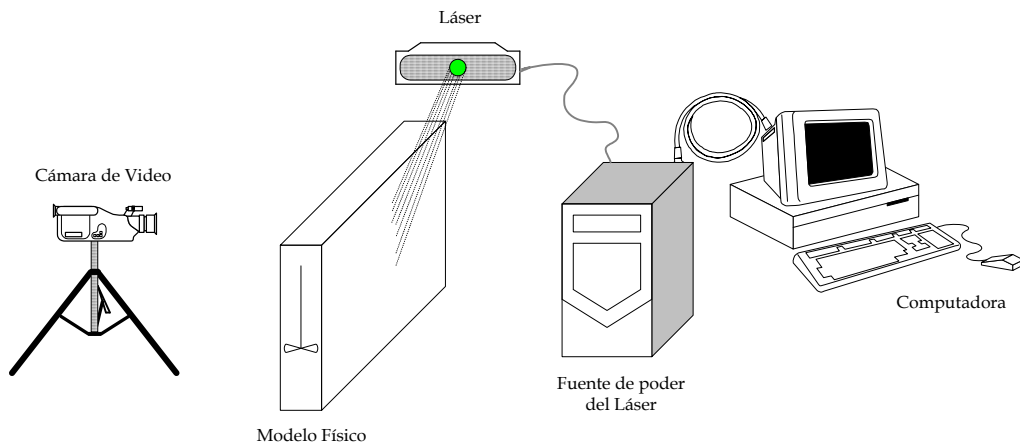
El objetivo principal en estos experimentos era visualizar, mediante una técnica simple aunque cualitativa, el patrón de flujo en cada prueba. Los experimentos se realizaron introduciendo una pulsación de trazador al sistema, inyectando el trazador justamente en la parte central e inferior de las aspas de la propela a través de un tubo capilar conectado a su vez a una bomba peristáltica (MasterFlex, marca Cole-Parmer, frecuencia de 6–600 rpm para un rango de inyección del fluido de 1.3 a 130 mL/min), la cual permite controlar el flujo del trazador (ver Figura 3.6). Se utilizó un flujo de 90 mL/min de colorante (de origen vegetal, rojo 40, con una concentración de 35 g/L en agua).



**Figura 3.6 Representación esquemática del arreglo experimental para un impulso de trazador al tanque de temple.**

### 3.5 Caracterización del flujo de fluidos

Para caracterizar con mayor precisión al flujo de fluidos en el modelo físico del baño de temple se utilizó la técnica de PIV, que permite medir los campos de velocidad de un fluido en movimiento. Para ello se utilizó un equipo de Velocímetro Láser Doppler (LDV) compuesto por una cámara de video (Kodak MegaPlus ES1.0/Type 16 (30 Hz)), un láser con su fuente de poder (NewWare Gemini, with HiSence camera), microesferas de vidrio recubiertas de plata y una computadora con el *software* Flow Manager instalado para la adquisición de datos. El *software* puede también realizar cálculos estadísticos para determinar cantidades tales como: vorticidad, norma del vector velocidad y líneas de corriente, entre otros. A partir de los resultados obtenidos se intentará comprender a mayor detalle el efecto que tienen todos los parámetros asociados a dicho experimento sobre la distorsión de la(s) pieza(s) templada(s) en el modelo físico. El montaje de los dispositivos utilizados para la experimentación en frío se muestra en la Fig. 3.7.



**Fig. 3.7 Esquema del equipo de prueba para las mediciones con PIV.**

Las condiciones de operación utilizadas para el equipo de PIV se resumen en la Tabla 3.7.

**Tabla 3.7 Condiciones de operación del equipo de PIV**

No. de fotografías por parpadeo del flash del láser	25
No. de parpadeos del flash del láser	1
Tiempo entre pulsaciones	2500 $\mu s$
Pulsos de luz por graduación	2
Duración de cada pulso	0.01 $\mu s$
Tiempo entre graduaciones	125 ms
Verificación de impulsos	1
Tiempo entre parpadeos del flash del láser	1000 $\mu s$

### 3.6 Composición química del acero

Para el estudio experimental del tratamiento de temple se utilizaron probetas cilíndricas de acero grado AISI 1045 (nominal) de 100 mm de longitud por 10 mm de diámetro. La composición del acero se determinó a través de un análisis por espectrometría de emisión óptica (ver Tabla 3.8). De estos resultados se comprueba que, en lo general, se trata de un acero AISI 1045. Sin embargo, su contenido de Mn es superior al 1.0 % que es el estándar para la clasificación AISI de un acero al carbono, aunque puede aceptar hasta un contenido máximo de 1.65%. Para mostrar que la composición química de la pieza de trabajo corresponde verdaderamente a un acero AISI 1045, en la Tabla 3.9 se muestran los valores de composición para dicho acero, según ASM [17].

**Tabla 3.8 Composición química del acero utilizado (determinada por espectrometría de emisión óptica).**

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% Ni	% Al	% Co	% Cu	% Fe
0.45	0.23	1.31	0.021	0.018	0.036	0.034	0.020	0.038	0.005	0.024	97.8

**Tabla 3.9 Composición química nominal de un acero AISI 1045.**

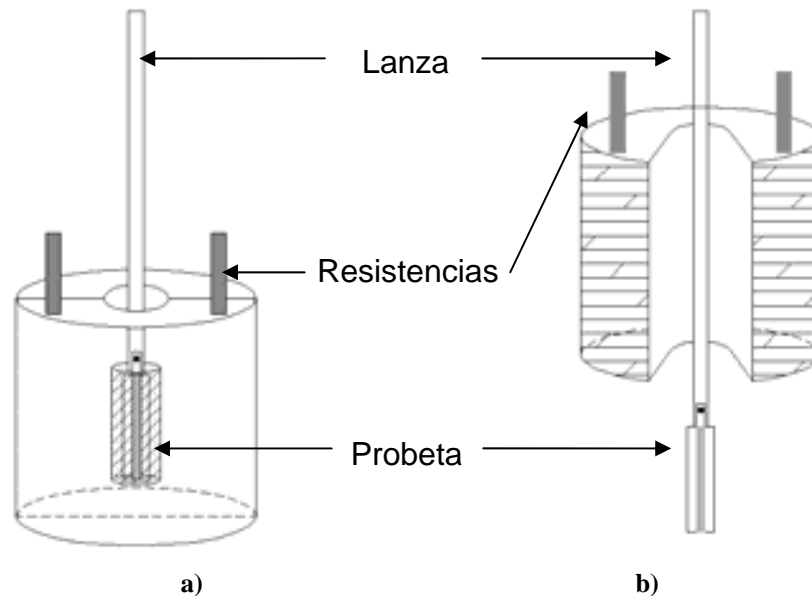
% C	% Si <sub>MAX</sub>	% Mn	% P <sub>MAX</sub>	% S <sub>MAX</sub>	% Cu <sub>MAX</sub>
0.45-0.50	0.60	0.60-0.90	0.040	0.050	0.024

### 3.7 Experimentos en caliente

Para este tipo de pruebas se tomaron como base los resultados de la caracterización de flujo de fluidos. Fue necesario utilizar un horno de resistencia eléctrica, además del equipo descrito inicialmente. Adicionalmente se implementó un tubo que contendría en su interior a la probeta inmersa en virutas de grafito para evitar la decarburización inherente al proceso de calentamiento, que podría conducir a interpretaciones erróneas de los resultados.

Es preciso resaltar que la utilización del tubo con virutas de carbón fue implementada debido a que, para evitar la decarburización, se intentó inicialmente cobrizar a la probeta. Sin embargo, el resultado no fue satisfactorio pues la capa de cobre no era lo suficientemente uniforme y además, con el calentamiento, se desprendía con relativa facilidad. Como alternativa se propuso un recubrimiento a través del pavonado a la probeta pero el resultado continuó siendo el mismo pues a pesar de que en este caso la capa que recubría a la probeta era uniforme, el espesor de éste era demasiado pequeño, por lo que impedía cumplir el propósito original. Finalmente, la opción de calentar a la probeta inmersa en las virutas de carbón logró cumplir su función de diseño.

En el interior del horno fueron colocadas cada una de las probetas de acero al carbono AISI 1045 sujetas por una flecha de acero inoxidable y calentadas hasta la temperatura de austenización (850 °C). Para asegurar la uniformidad térmica y microestructural en toda la probeta se estableció un periodo de permanencia de la probeta dentro del horno de 10 minutos. El esquema del horno, así como su funcionamiento se muestra en la Figura 3.8 [14].



**Figura 3.8. a) Horno de resistencias con la probeta en su interior calentándose a la temperatura de austenización; b) horno de resistencias abierto para introducir la probeta al baño de temple.**

Durante el lapso de calentamiento se tomó un registro de la temperatura en el interior de la probeta minuto a minuto, utilizando un termopar tipo *K* localizado aproximadamente a un tercio de la altura de la probeta. Luego de alcanzar la temperatura de austenización se retiró el horno y se realizó el temple en el modelo físico con agua a temperatura ambiente como medio de temple y diversas condiciones de flujo (ver Tabla 3.10).

El registro de la historia térmica del enfriamiento como función del tiempo durante el temple se obtuvo utilizando una tarjeta de adquisición de datos marca *IOTECH* modelo *Temp Scan/1100* controlada por un equipo de cómputo marca *HYUNDAI* con procesador *Cyrix Instead* con 32MB RAM y el software *Chart View*, lo que en conjunto permitió registrar datos de temperatura a intervalos de 0.05 segundos. El proceso de temple en cada experimento fue, además, grabado usando una cámara de video colocada normal al plano de interés.

La probeta empleada fue maquinada con una ranura a lo largo del plano axial para favorecer la distorsión. La geometría de la probeta se muestra en la Figura 3.9.

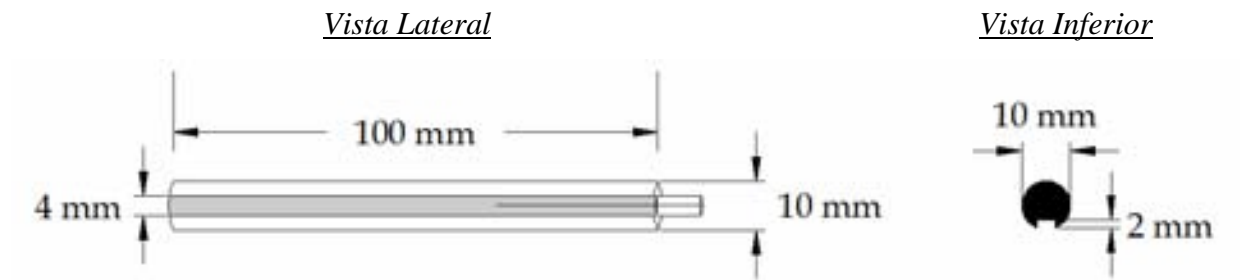


Figura 3.9 Geometría de la probeta de acero al carbono AISI 1045.

### 3.8 Condiciones operativas en los experimentos en caliente

Los experimentos seleccionados para realizarse en caliente son los experimentos 25, 5 y 30, los cuales están asociados a las Probetas 12, 2 y 3 respectivamente (ver Tabla 3.10).

Tabla 3.10. Condiciones de proceso para los experimentos en caliente.

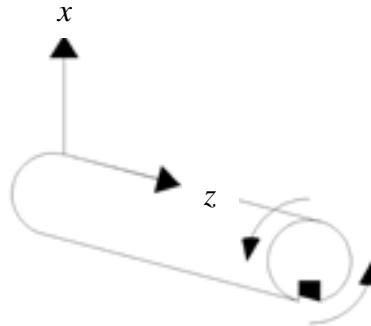
Experimento (realizado en frío)	Número de Probeta	Posición de Probeta y Persianas	Velocidad de Rotación de la Propela (Hz)
5	2		10
30	3		10
25	12		10

### 3.9 Medición de dureza

Se midió el perfil de dureza a lo largo del eje z para cada una de las probetas utilizando un durómetro MACROMET Hardness Tester. Cada medición fue tomada a 1/16 de separación de un punto a otro; se utilizó la escala Rockwell C, aplicando una carga de 150 kg y utilizando un indentador de cono de diamante.

### 3.10 Caracterización de la distorsión

La distorsión en cada experimento de temple fue caracterizada midiendo la deformación a lo largo de la probeta (eje x de la Figura 3.10). Los puntos seleccionados para la medición de distorsión fueron aquellos localizados cada 90°, tomando como referencia la sección de la probeta donde se mostraba la ranura. Habiendo sido tomadas las lecturas de distorsión en cada parte seleccionada se fue girando la probeta en contra de las manecillas del reloj hasta llegar al siguiente punto de medición, como se muestra en la Figura 3.10.



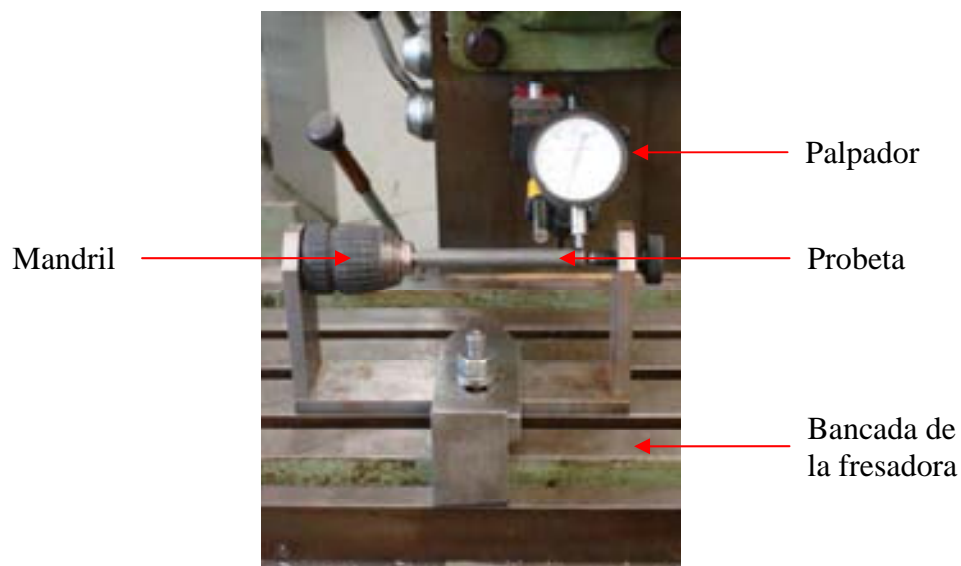
**Figura 3.10** Posicionamiento de la probeta para caracterizar la distorsión.

Las mediciones fueron realizadas con un palpador (Starret, graduación 0.0005”), a lo largo de la probeta (eje x de la Figura 3.10) tomando un registro de los valores obtenidos en la dirección z. Para sujetar a la probeta durante las mediciones de distorsión, se construyó el dispositivo mostrado en la Figura 3.11. El vástago de la probeta fue introducido en el mandril del taladro (con la cara ranurada hacia abajo) y



prensado lentamente para asegurar que el vástago de la probeta permaneciera siempre perpendicular al mandril del taladro. Finalmente se fijó el dispositivo en la bancada de una fresadora para obtener valores precisos de distorsión a lo largo de la dirección z.

Para todas las corridas se tomó como referencia el lado del vástago de la probeta para comenzar a hacer las mediciones. Los valores de distorsión a lo largo de la probeta fueron tomados pulgada a pulgada hasta barrer completamente a la probeta. Se obtuvo un total de 5 puntos de medición en cada posición de la probeta.

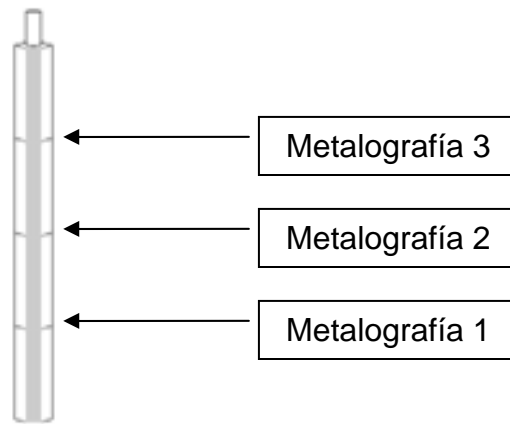


**Figura 3.11** Dispositivo utilizado para la medición de la distorsión en el plano z.

### 3.11 Evidencia metalográfica

Para complementar las mediciones de dureza, y después de haber medido la distorsión residual de las probetas de los ensayos en caliente, se cortó cada una de esas probetas en 4 secciones iguales (ver Figura 3.12), que se prepararon metalográficamente para tomar metalografías. Cada una de las piezas fueron montadas en baquelita, seguido de un esmerilado o desbaste al agua con lijas abrasivas (240, 320, 400, 500 y 600 consecutivamente), inmediatamente después un pulido grueso y pulido fino con alúmina (0.3 para pulido grueso y 0.1/0.05 para pulido fino) como abrasivo y para terminar un

ataque químico con Nital 3, para luego ser observadas con un microscopio óptico (OLYMPUS).



**Figura 3.12. Probeta seccionada mostrando el lugar donde se obtuvieron las metalografías.**

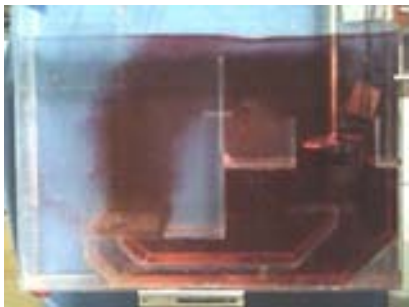
## Capítulo 4. Resultados y Discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en los experimentos realizados. Los resultados se basan principalmente en la visualización y caracterización de patrones de flujo, así como la caracterización de distorsión en probetas a las que se les aplicó el tratamiento térmico en el baño de temple.

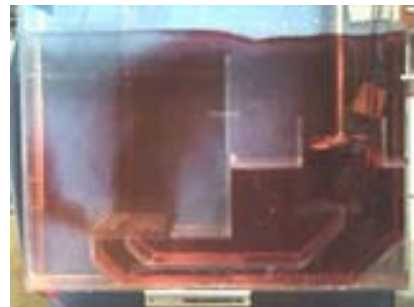
### 4.1 Visualización del patrón de flujo

Se efectuaron pruebas con 90 mL/min como flujo de entrada de trazador, empleando el trazador visual con una entrada en impulso. Estas pruebas fueron realizadas con dos arreglos de persianas (135°, 45° y 90°, 90°) a velocidades de rotación de la propela de 10, 15, 20, 25 y 30 Hz.

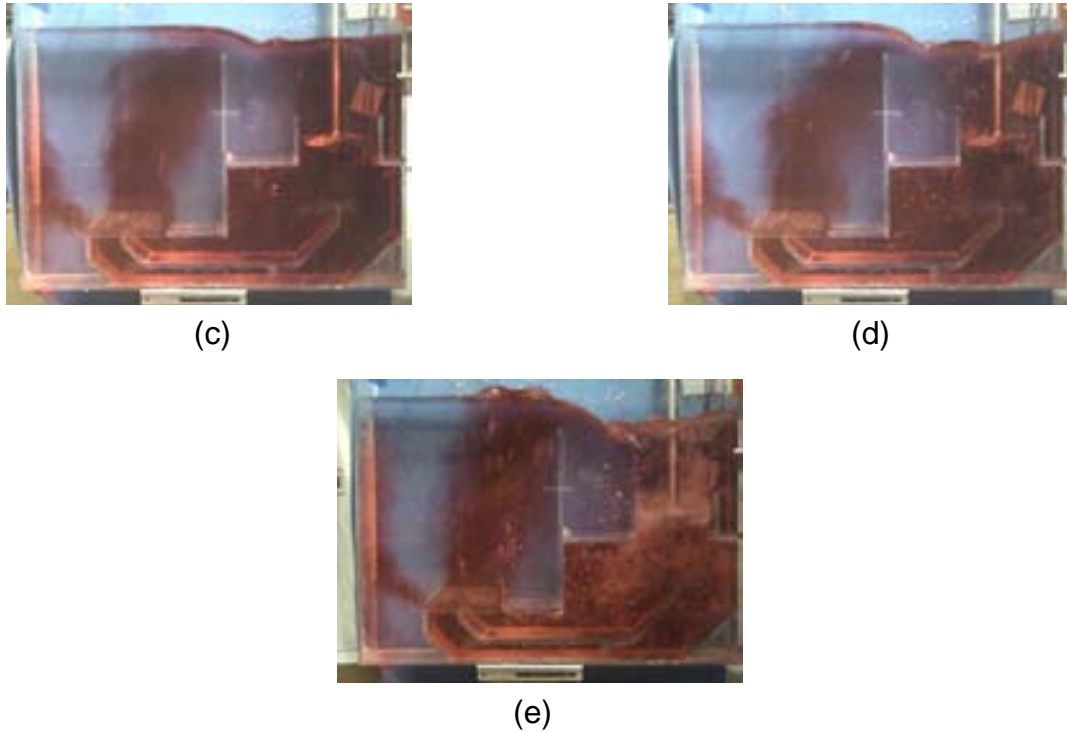
En el primer caso, el arreglo de persianas se encuentra a 135°, 45° (ver Figura 4.1). Los resultados muestran que el patrón de flujo cambia sensiblemente al aumentar la velocidad de rotación de la propela. Además, es evidente que la cantidad de burbujas va en aumento conforme la velocidad de rotación de la propela aumenta, especialmente para velocidades altas.



(a)



(b)



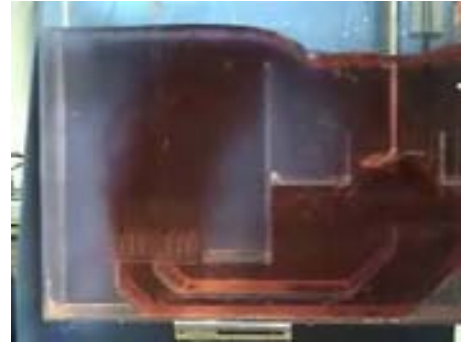
**Figura 4.1.** Fotografías del modelo físico de tanque de temple durante la ejecución de las pruebas con colorante, con un arreglo de modificadores de flujo de  $135^\circ$ ,  $45^\circ$  y varias frecuencias. (a) 10 Hz, (b) 15 Hz, (c) 20 Hz, (d) 25 Hz, (e) 30 Hz.

En el segundo caso en el que el arreglo de persianas es de  $90^\circ$ ,  $90^\circ$  (ver figura 4.2), los resultados muestran que a velocidades de rotación de la propela de 10, 15 y 25 Hz, respectivamente, el flujo de corriente de agua en la zona de trabajo es más uniforme.

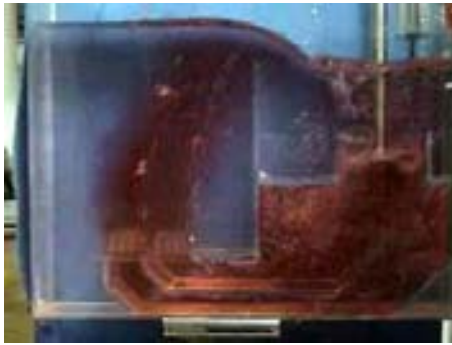




(c)



(d)



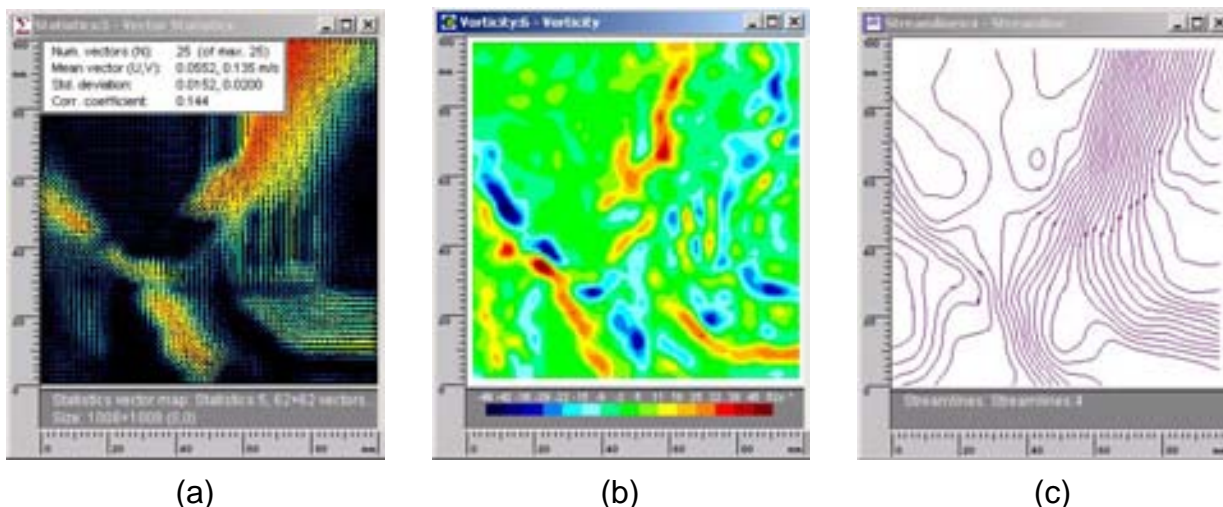
(e)

Figura 4.2. Fotografías del modelo físico de tanque de temple durante la ejecución de las pruebas con colorante, con un arreglo de modificadores de flujo de  $90^\circ$ ,  $90^\circ$  y varias frecuencias. (a) 10 Hz, (b) 15 Hz, (c) 20 Hz, (d) 25 Hz, (e) 30 Hz.

## 4.2 Caracterización del flujo de fluidos

Las imágenes adquiridas durante la caracterización de los experimentos de flujo de fluidos fueron analizadas con el software Flow Manager para obtener los campos de velocidades en 2 dimensiones. Se obtuvieron tres tipos de representaciones gráficas: 1) mapa del vector de velocidades, 2) contorno de velocidad (escalares) y 3) líneas de corriente de flujo.

Como ejemplo, estos tipos de mapas se muestran en la Figura 4.3 para el experimento 22.



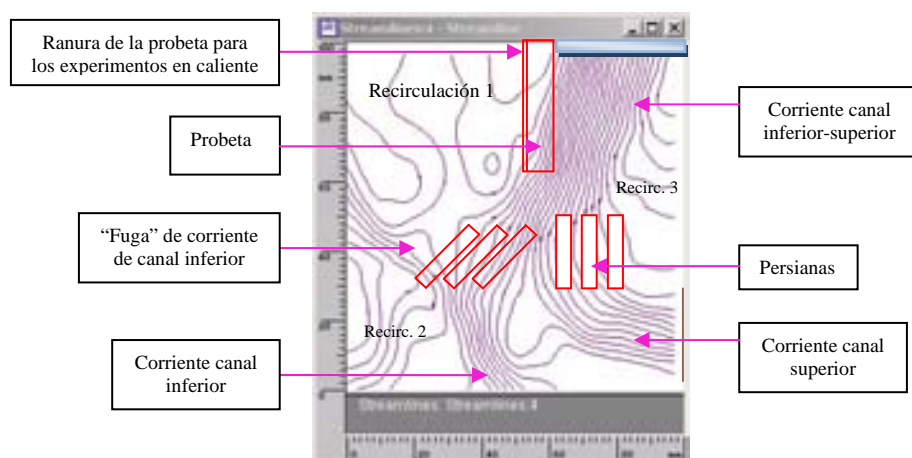
**Figura 4.3. Patrones de flujo en el experimento 22: (a) mapa de vectores de velocidad, (b) contornos de vorticidad, (c) líneas de corriente.**

El mapa de velocidades (Figura 4.3 (a)) muestra al campo de velocidades como un mapa de vectores, donde los vectores en tonalidad roja representan altas velocidades, mientras que los vectores en tonalidad oscura representan velocidades muy bajas. Este tipo de gráficas representan tanto la magnitud como la dirección del vector velocidad. Por otra parte, el mapa de contorno de vorticidad (Figura 4.3 (b)) muestra la magnitud de la vorticidad (que es un vector ortogonal al plano que contiene al flujo del fluido en el caso de flujo 2D [18]); esta cantidad caracteriza a la rotación local del fluido. En la Figura 4.3 (b) las tonalidades rojas denotan vorticidades altas mientras que las tonalidades en colores pastel (por ejemplo, verde o azul) indican vorticidades bajas. En cambio, las líneas de corriente de flujo mostradas en la Figura 4.3 (c) muestran líneas curvas paralelas a la dirección del flujo que representan el patrón seguido por el flujo de partículas imaginarias en el fluido. En las regiones donde las líneas son más cerradas, los gradientes de velocidad son más grandes.

Los resultados en la Figura 4.3 (a) y (b) muestran que el arreglo de persianas en un ángulo de  $45^\circ$  modifica el flujo produciendo una corriente de agua que corre precisamente a un ángulo de  $45^\circ$ . Las persianas llevadas a  $90^\circ$  (del lado derecho del arreglo de persianas) producen una corriente de más baja intensidad que se une a la corriente más grande. La gráfica de las líneas de corriente indica que ocurre una

fuerte recirculación en el interior del modelo. Debido al alto momentum asociado al flujo de agua del canal inferior, se observa una fuerte “fuga” a la izquierda del mapa de velocidad (ver Figura 4.4).

Los resultados de la Figura 4.3 (c) muestran que la corriente de agua proveniente del canal inferior prácticamente se pierde al desfogar en la parte lateral izquierda del tanque de temple pero ayuda en una pequeña fracción a la corriente del canal superior a impactar a la probeta. Dicha imagen muestra que la mezcla de corrientes de flujo produce altas vorticidades al costado derecho de la probeta pues se notan tonalidades rojas más oscuras y se corrobora observando que hasta antes de unirse las corrientes de flujo las tonalidades eran rojas menos oscuras.

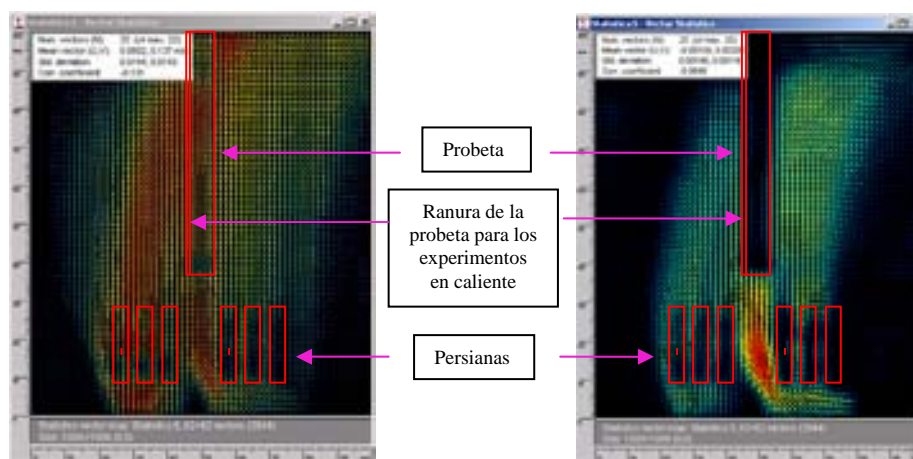


**Figura 4.4. Mapa de líneas de corriente del experimento 22 donde se muestra la interacción entre las corrientes principales (canal inferior y superior) y las corrientes de recirculación. También se muestra a la probeta posicionada en la zona de trabajo.**

Para mostrar el efecto de la velocidad de rotación de la propela se utilizarán solamente los mapas de vectores de velocidad. Además, para la discusión se eligieron sólo los casos extremos, es decir, velocidades de rotación de la propela de 10 y 30 Hz.

En el caso del arreglo de persianas llevadas a  $90^\circ$ ,  $90^\circ$  (ver Figura 4.5) se aprecia que cuando se tiene una velocidad de rotación de la propela de 30 Hz se produce una

corriente de flujo de mayor intensidad en el lado izquierdo de la probeta, mientras que cuando se aplica una velocidad de rotación de la propela de 10 Hz las corrientes de flujo en ambos lados son parecidos.



**Figura 4.5. Mapa de vectores de velocidad en las pruebas: (a) 1 y (b) 5**

**Nota: Las áreas oscuras en la zona de trabajo que interrumpen el flujo de corriente corresponden a la probeta y a las persianas, cuyos contornos se señalan con líneas rojas.**

En el caso del arreglo de persianas llevadas a  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  (ver Figura 4.6), cuando se tiene una velocidad de rotación de la propela de 30 Hz se produce una corriente de flujo de mediana intensidad en ambos canales que afecta únicamente a la parte izquierda de la probeta, mientras que cuando se aplica una velocidad de rotación de la propela de 10 Hz la corriente de flujo proveniente del canal inferior disminuye y la corriente proveniente del canal superior aumenta y circula principalmente por la parte izquierda de la probeta.



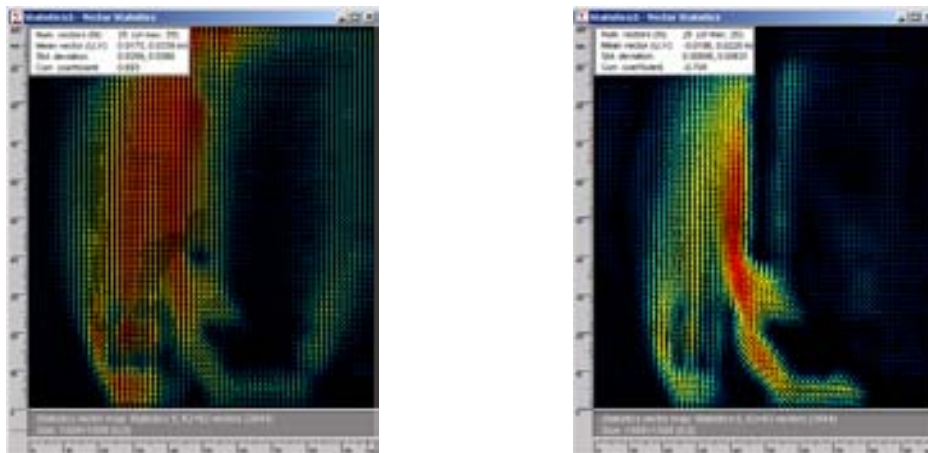


Figura 4.6. Mapa de vectores de velocidad para las pruebas: (a) 6 y (b) 10.

En el caso del arreglo de persianas llevadas a  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  (ver Figura 4.7), se tiene que cuando se maneja una velocidad de rotación de la propela de 30 Hz se produce una corriente de flujo de alta intensidad en la parte izquierda de la probeta, mientras que cuando se aplica una velocidad de rotación de la propela de 10 Hz se produce una corriente de flujo de alta intensidad del lado derecho de la probeta.

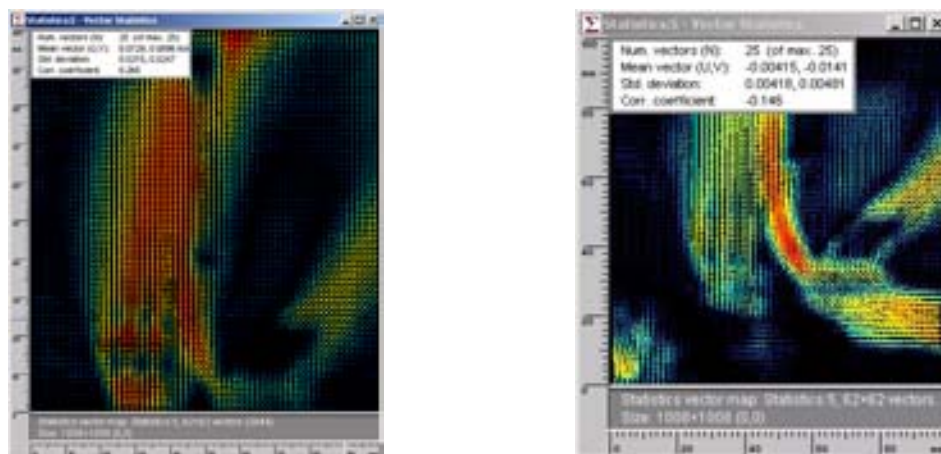
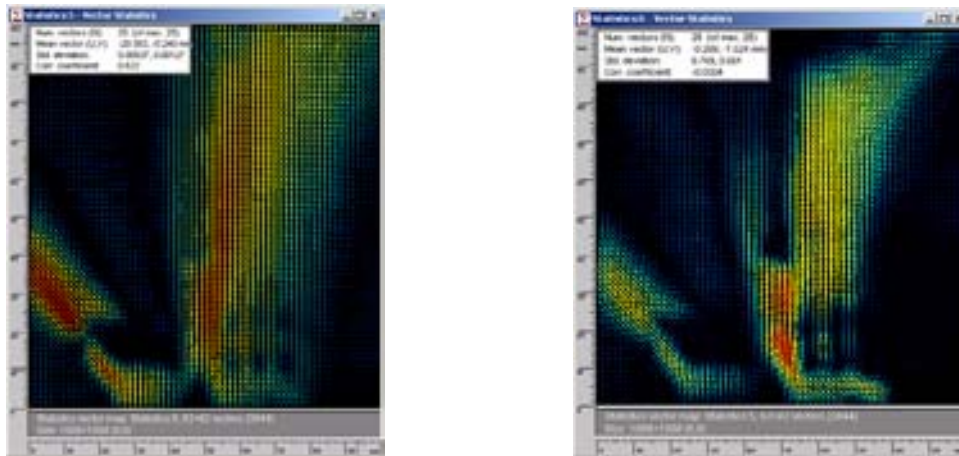


Figura 4.7. Mapa de vectores de velocidad en las pruebas: (a) 11 y (b) 15.

En el caso del arreglo de persianas llevadas a  $135^\circ$ ,  $90^\circ$  (ver Figura 4.8), las imágenes muestran que cuando se maneja una velocidad de rotación de la propela de 30 Hz se produce una corriente de flujo de alta intensidad proveniente del canal inferior que choca y se pierde al chocar con la pared izquierda del modelo físico y una corriente de

mediana intensidad proveniente del canal superior que se une a la corriente de recirculación para generar una corriente de más alta intensidad que impacta a la probeta en su lado derecho. Mientras que cuando se aplica una velocidad de rotación de la propela de 10 Hz se produce una corriente de flujo de muy baja intensidad proveniente del canal inferior y que se pierde al chocar con la pared izquierda del modelo físico, así también como una corriente de flujo de entre mediana y alta intensidad proveniente del canal superior, y que impacta a la base de la probeta.



**Figura 4.8.** Mapa de vectores de velocidad en las pruebas: (a) 16 y (b) 20.

En el caso del arreglo de persianas colocadas a  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  (ver Figura 4.9), las imágenes muestran que cuando se maneja una velocidad de rotación de la propela de 30 Hz se produce una corriente de flujo de mediana intensidad proveniente del canal inferior que se pierde al dirigirse hacia la pared izquierda del modelo físico y una corriente de baja intensidad proveniente del canal superior que se une a la corriente de recirculación y genera una corriente de alta intensidad que impacta a la probeta en su lado derecho. Por otra parte, cuando se aplica una velocidad de rotación de la propela de 10 Hz se produce una corriente de flujo de muy baja intensidad proveniente del canal inferior y que se divide en dos subcorrientes, la primera sigue el ángulo del arreglo de persianas y la otra a  $135^\circ$ , así también una corriente de flujo de alta intensidad proveniente del canal superior que impacta directamente a la base y lado derecho de la probeta.

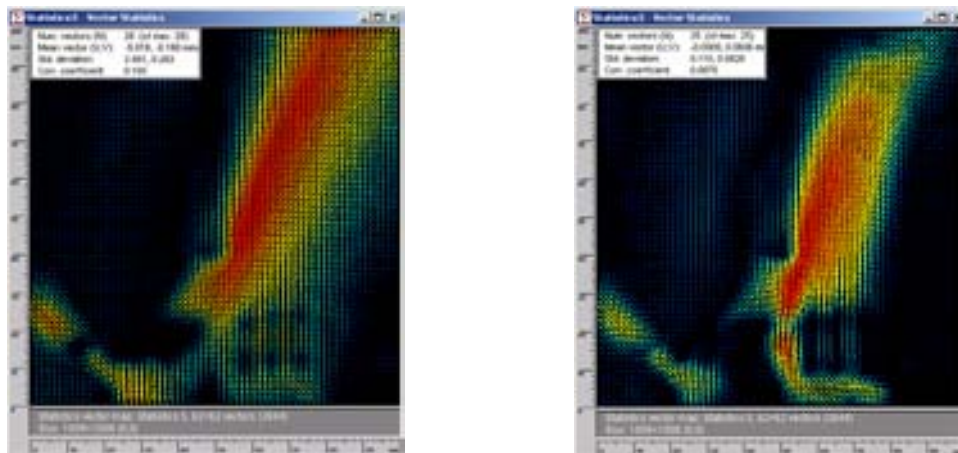


Figura 4.9. Mapa de vectores de velocidad en las pruebas: (a) 21 y (b) 25.

En el caso del arreglo de persianas llevadas a  $45^\circ$ ,  $45^\circ$  (ver Figura 4.10), las imágenes muestran que las corrientes de flujo que impactan a la probeta presentan mayor homogeneidad en comparación a las pruebas anteriores con la diferencia de que cuando se utiliza una velocidad de rotación de la propela de 30 Hz, las corrientes flujo que rodean a la probeta son de mediana intensidad, mientras que para la velocidad de rotación de la propela de 10 Hz las corrientes de flujo son de alta intensidad.

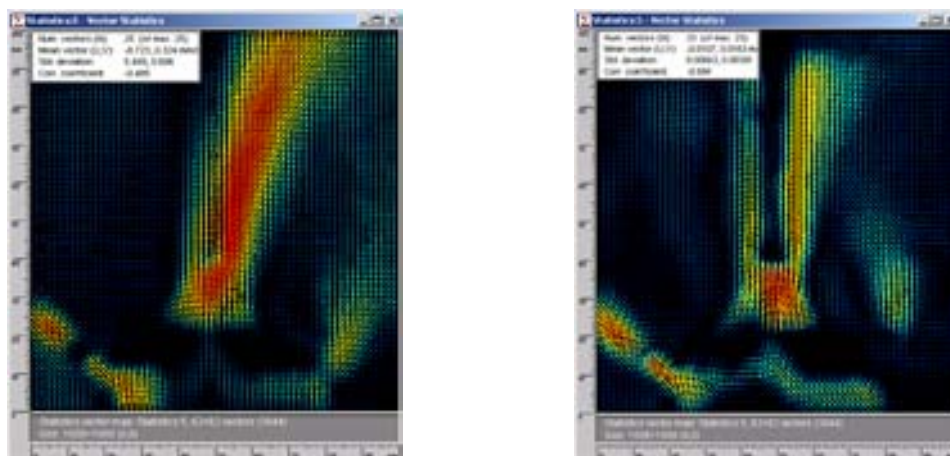


Figura 4.10. Mapa de vectores de velocidad en las pruebas: (a) 26 y (b) 30.

Después de haber analizado los patrones de flujo resultantes de las posibles combinaciones de las variables de proceso estudiadas, se seleccionaron 3 patrones de flujo (experimentos 25, 5 y 30, mostrados en las Figuras 4.11 a 4.13) para realizar los experimentos en caliente. La hipótesis de trabajo es que estos patrones son

suficientemente distintos entre sí como para marcar posibles diferencias en la distorsión residual de las probetas de acero AISI 1045.

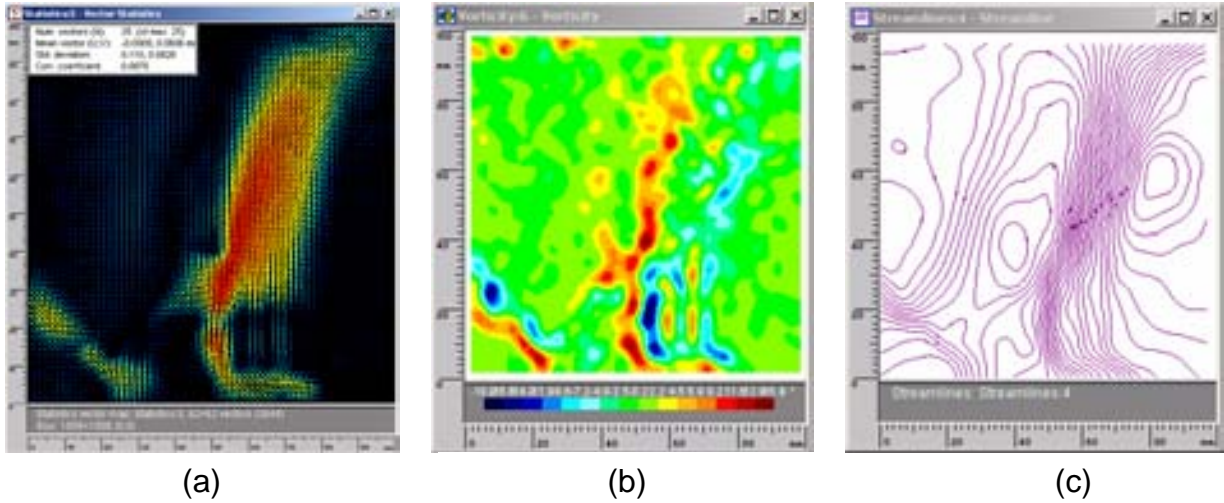


Figura 4.11. Patrones de flujo en el experimento 25: (a) mapa de vectores de velocidad, (b) contornos de vorticidad, (c) líneas de corriente.

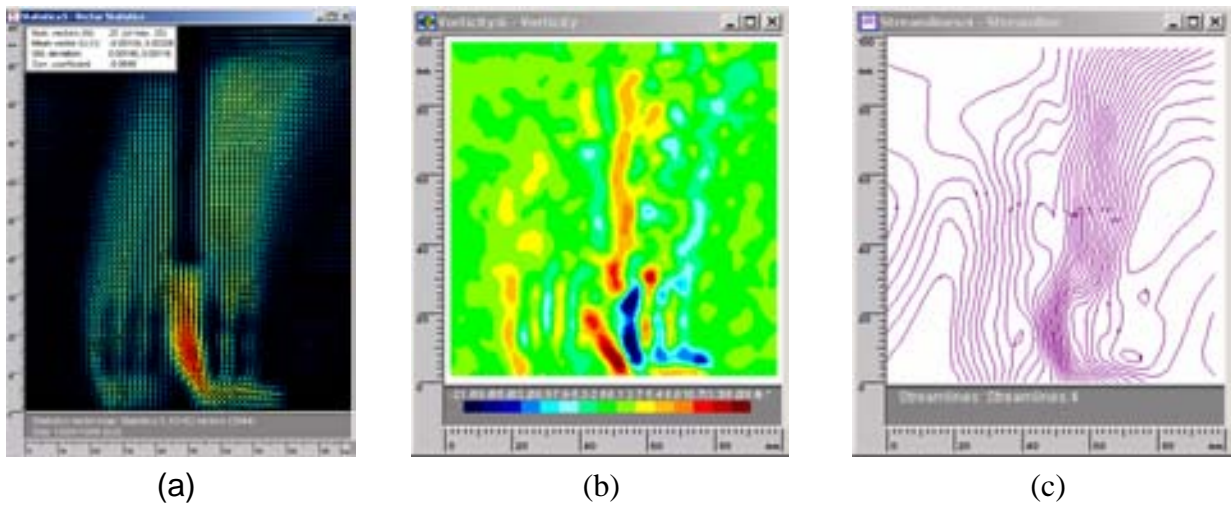
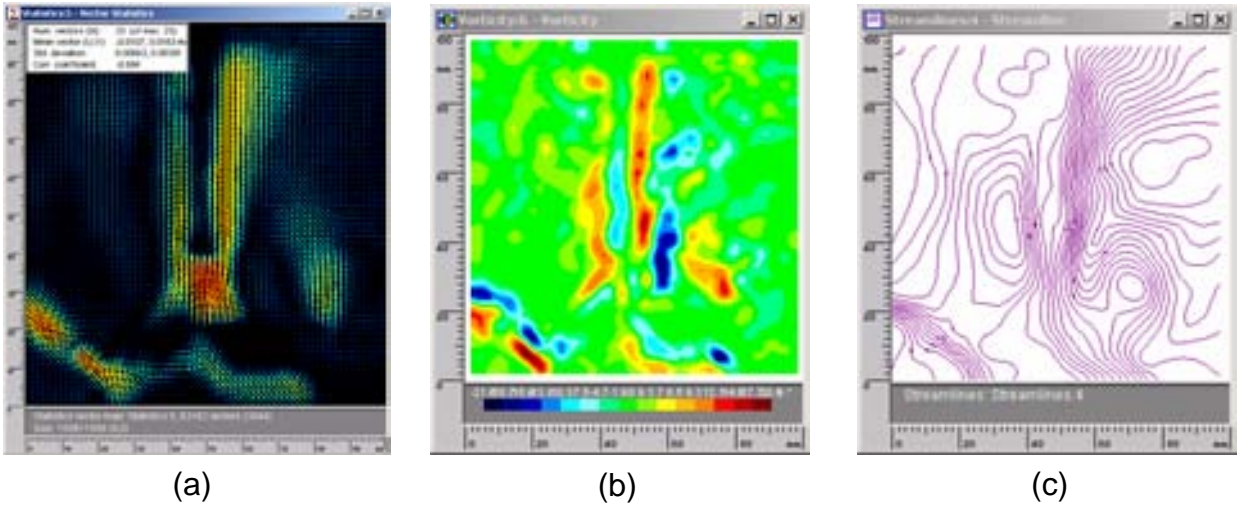


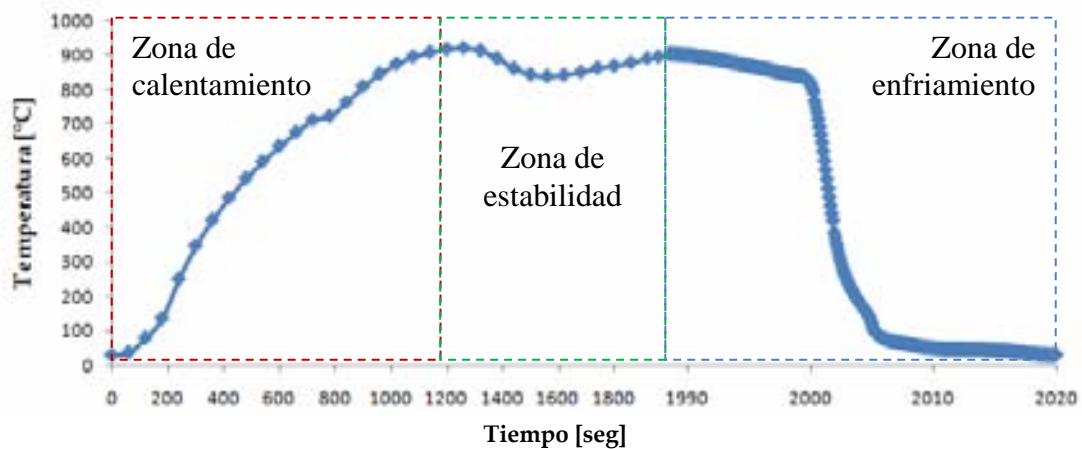
Figura 4.12. Patrones de flujo en el experimento 5: (a) mapa de vectores de velocidad, (b) contornos de vorticidad, (c) líneas de corriente.



**Figura 4.13. Patrones de flujo en el experimento 30:**  
 (a) mapa de vectores de velocidad, (b) contornos de vorticidad, (c) líneas de corriente.

### 4.3 Experimentos en caliente

Los experimentos en caliente (ver Tabla 3.10) se realizaron bajo las condiciones de operación de los experimentos 25, 5 y 30. Las probetas utilizadas se marcaron como Probetas 12, 2 y 3 respectivamente. En la Figura 4.14 se muestra el ciclo de calentamiento-enfriamiento seguido en la probeta 2 desde el momento en el que se introduce la probeta en el horno de resistencias, seguido por su estabilización a la temperatura de austenización y finalmente su enfriamiento en el baño de temple.



**Figura 4.14. Ciclo de calentamiento-enfriamiento en la Probeta 2.**

En la Figura 4.15 se muestra la curva de enfriamiento (evolución de la temperatura con respecto al tiempo) de la probeta 2, templada en el baño de temple a las condiciones de trabajo arriba mencionadas. Inicialmente, la pieza se enfría a baja rapidez, probablemente debido a la presencia de una capa de vapor; posteriormente, se observa un enfriamiento rápido característico de ebullición nucleada. Un poco antes de llegar a los 200 °C se observa un cambio de pendiente, que está asociado con la transformación martensítica ( $M_s = 320$  °C). Puede verse además que alrededor de los 150 °C hay un cambio de pendiente pronunciado, debido a que se introdujo agua al interior del barreno e hizo contacto con el termopar. En resumen, no se observó evidencia de transformaciones difusionales.

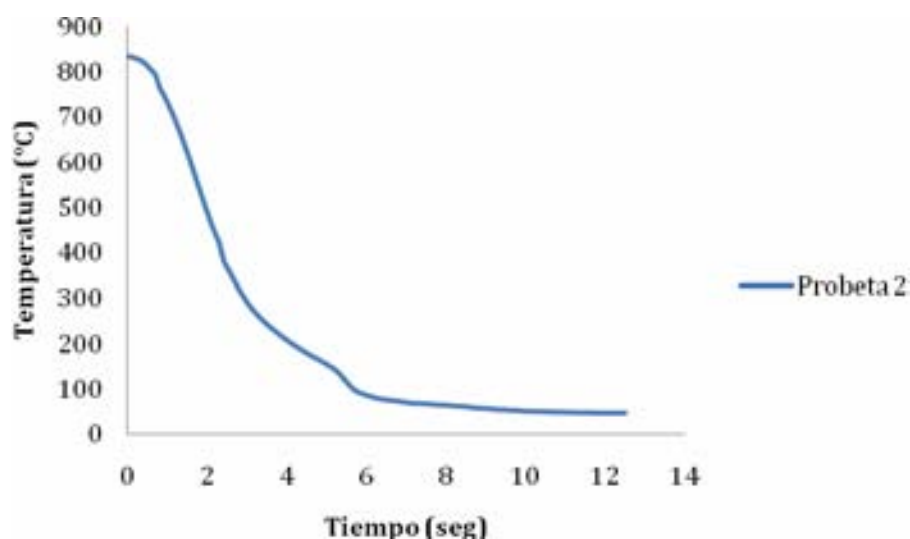


Figura 4.15 Curva de enfriamiento de la probeta 2.

#### 4.4 Medición de dureza

Los resultados de dureza medidos a las 3 probetas se muestran en la Figura 4.16, mostrando claramente un rango de durezas que va de los 56 a los 62 Rockwell C en la mayor parte de la probeta.

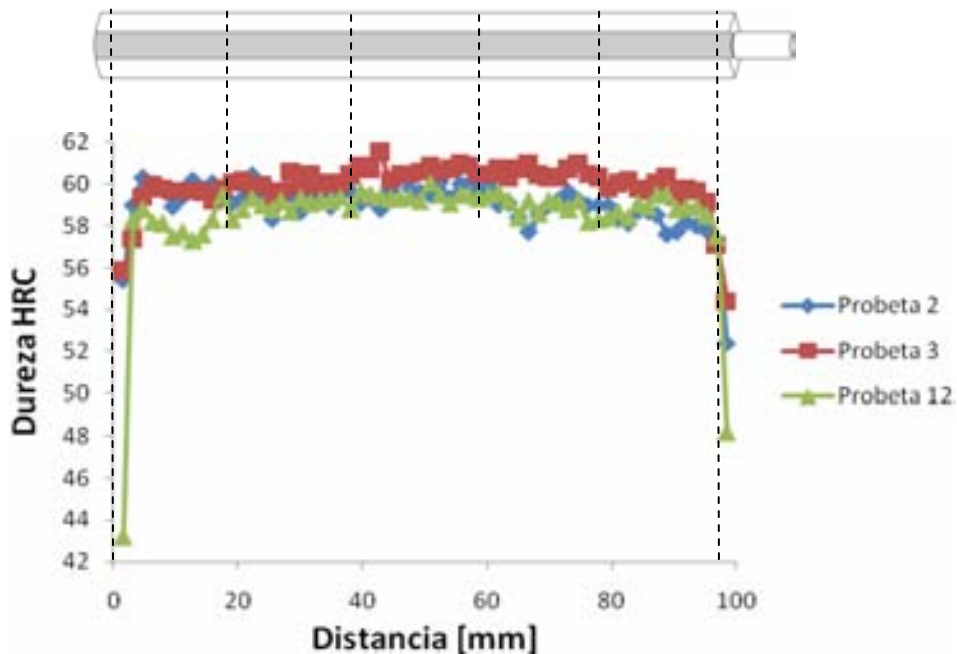


Figura 4.16. Perfil de durezas en las probetas 2,3 y 12 de los experimentos en caliente.

Es claro que la Probeta 12 presenta en su base un valor de dureza relativamente bajo (43 HRC) comparado con los de las otras dos probetas. Esto se debe a que el patrón de flujo provoca que el medio de temple impacte a la probeta con poca fuerza en la base (ver Figura 4.11) pues el flujo de agua proveniente del canal superior es prácticamente el único que la impacta (lateralmente), mientras que el flujo de agua del canal inferior es direccionado más hacia el cuerpo de la probeta que a la base de la misma. En contraposición con la probeta 12, el flujo de agua en las probetas 2 y 3 es más homogéneo impactando tanto al cuerpo de la probeta como a su punta, por ende no hay valores de dureza tan bajos en la base de la probeta. Finalmente, es de esperarse que en los puntos más cercanos al vástago (para los tres casos) se tengan valores bajos de dureza, pues es ahí donde el flujo de agua impacta hasta el final.

#### 4.5 Evidencia Metalográfica

Las metalografías obtenidas en la probeta 3 se muestran en la Figura 4.17, donde se detalla la posición exacta de la probeta donde fueron obtenidas, así como el valor de dureza asociado a esa posición.

Debido a la alta severidad que produjo el tratamiento de temple se obtuvieron microestructuras y valores de dureza similares. En cada una de las metalografías se puede observar la presencia de martensita en su totalidad, además el valor de dureza correspondiente corrobora el tipo de microestructura obtenida.

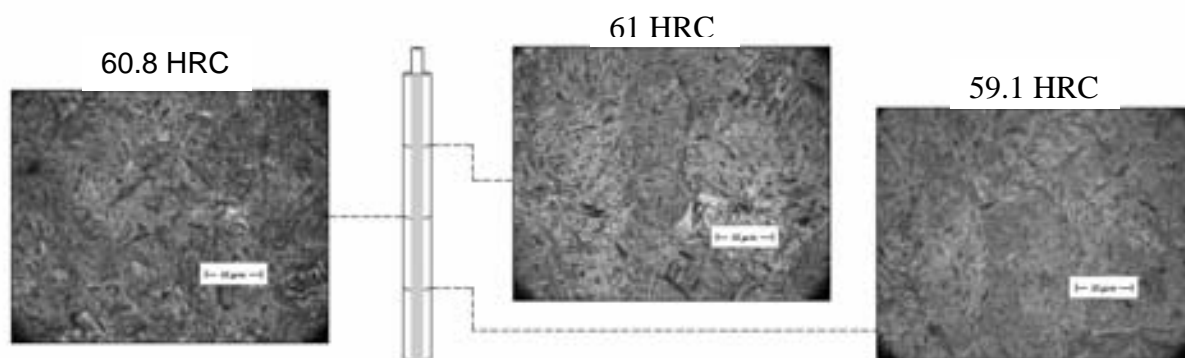


Figura 4.17. Metalografías y dureza mostrando el efecto del temple en tres posiciones distintas de la probeta 3.

#### 4.6 Relación Diagrama CCT – Curva de Enfriamiento

En la Figura 4.18 puede apreciarse la curva de enfriamiento de la probeta 2 sobrepuesta al diagrama CCT para una acero AISI 1045. Ésta imagen muestra que la curva de enfriamiento toca la línea de transformación bainítica; podría deducirse que se formaría hasta un 10 % de bainita, aproximadamente. Sin embargo el diagrama CCT empleado muestra un contenido de Mn muy inferior al del material utilizado en este estudio, por lo que la línea de transformación bainítica realmente se encuentra ligeramente desplazada hacia la derecha. Con lo que se entiende entonces que se tiene una mezcla de fases martensita-bainita. La proporción hasta este punto es desconocida.



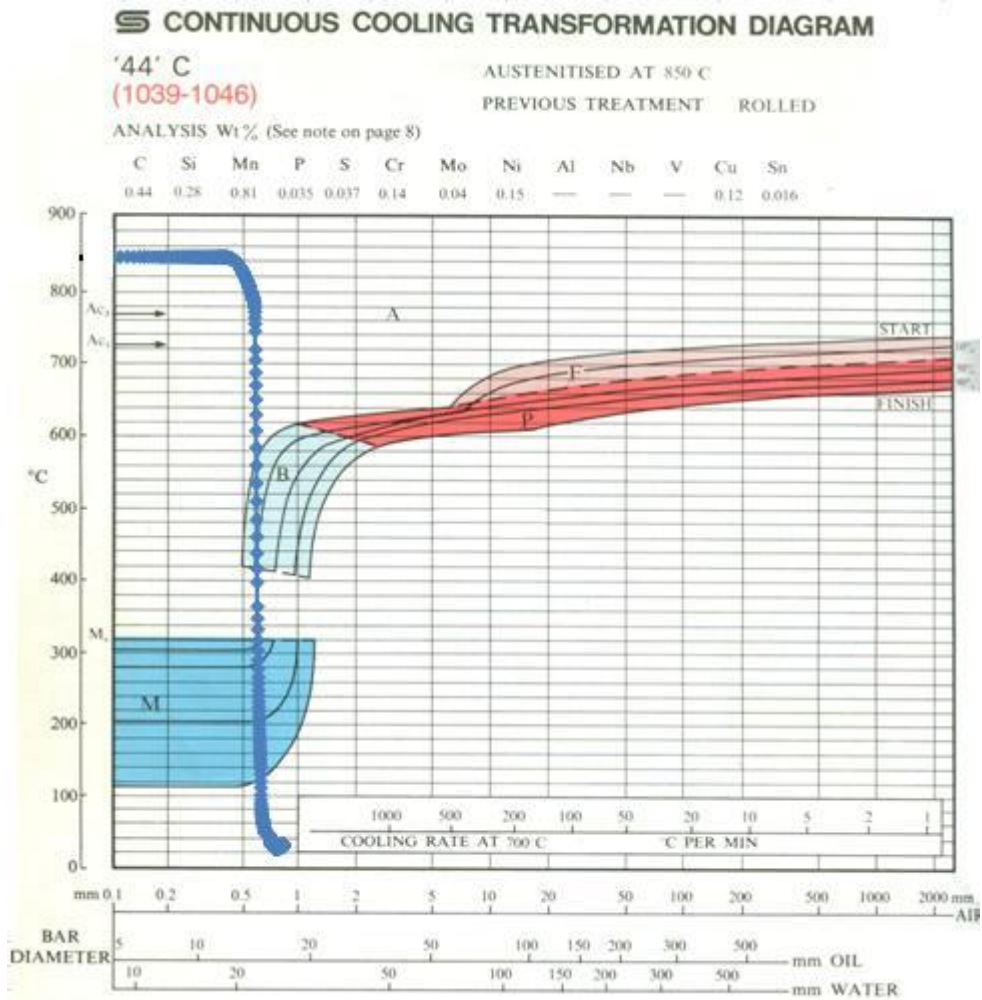


Figura 4.18. Curva de enfriamiento de la probeta 2 sobrepuesta al diagrama CCT para una cero AISI 1045 [11].

#### 4.7 Relación % C–Dureza-% Martensita

De acuerdo a los valores de dureza obtenidos (56 a 62 HRC) y con la ayuda de las Figuras 4.19 y 4.20 se deduce que el temple aplicado a las probetas permitió formar martensita entre un 90 y 100 % y por ende arrojar valores altos de dureza.

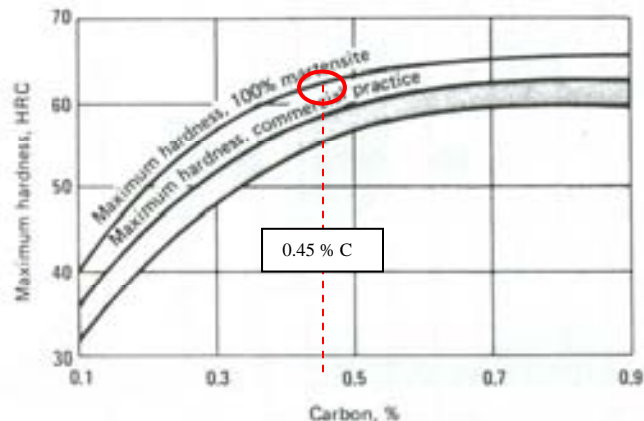


Figura 4.19. Relación entre contenido de carbono y dureza máxima [19].

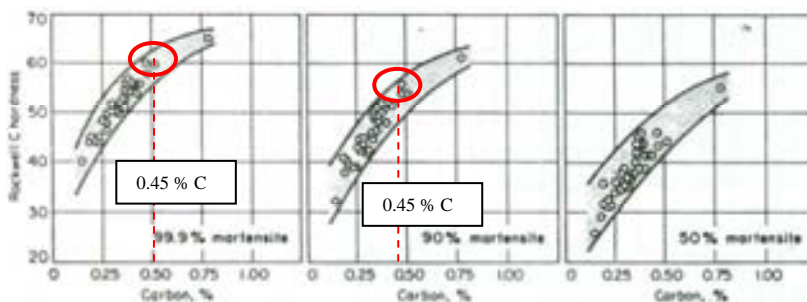
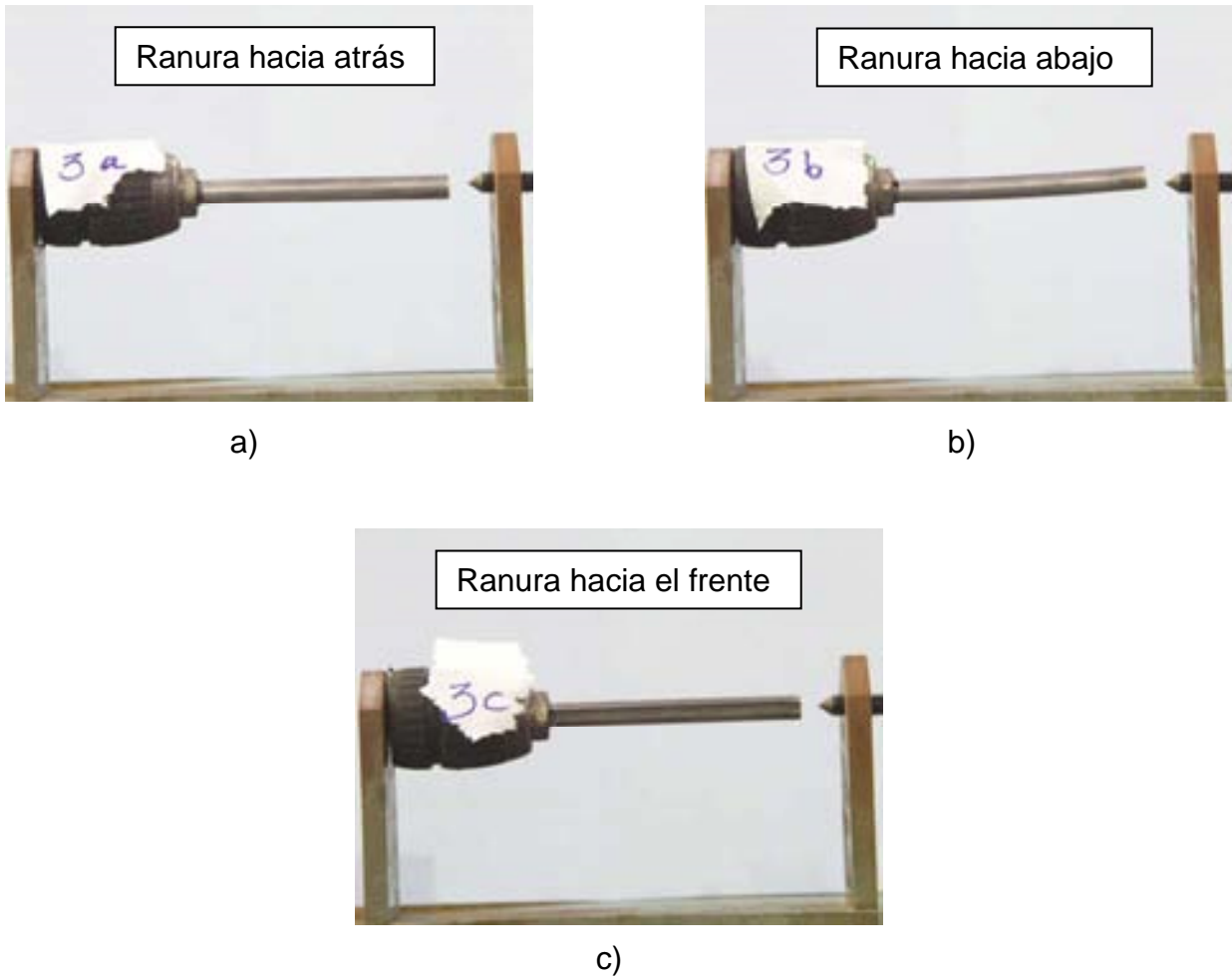


Figura 4.20. Relación entre contenido de carbono y porcentaje de martensita con dureza Rockwell C [20].

#### 4.8 Distorsión

La medición de la distorsión se realizó de tal forma que se caracterizara el desplazamiento al final del temple para cada una de las probetas en 3 diferentes posiciones, que se muestran en la Figura 4.21 (para la probeta 3). Es importante señalar que en dicha figura se maneja la terminología a, b, c para describir a la posición (con respecto a la ranura) en la que fue colocada la probeta para su medición. De las fotografías se puede apreciar una deformación convexa positiva en el plano de la ranura de la probeta, lo cual se muestra en la Figura 4.21 (b).



**Figura 4.21. Posiciones tomadas para la probeta 3 en la medición de distorsión: a) Ranura hacia atrás, b) Ranura hacia adelante y c) Ranura hacia el frente.**

Los valores correspondientes a las mediciones de distorsión para cada una de las probetas se muestran gráficamente en las Figuras 4.22 a 4.24. Para hacer más evidentes los resultados de distorsión obtenidos en las tres diferentes posiciones en que se colocó la probeta, se fijaron los ejes de las abscisas y ordenada al origen a las mismas unidades en cada una de las gráficas de las figuras arriba mencionadas.

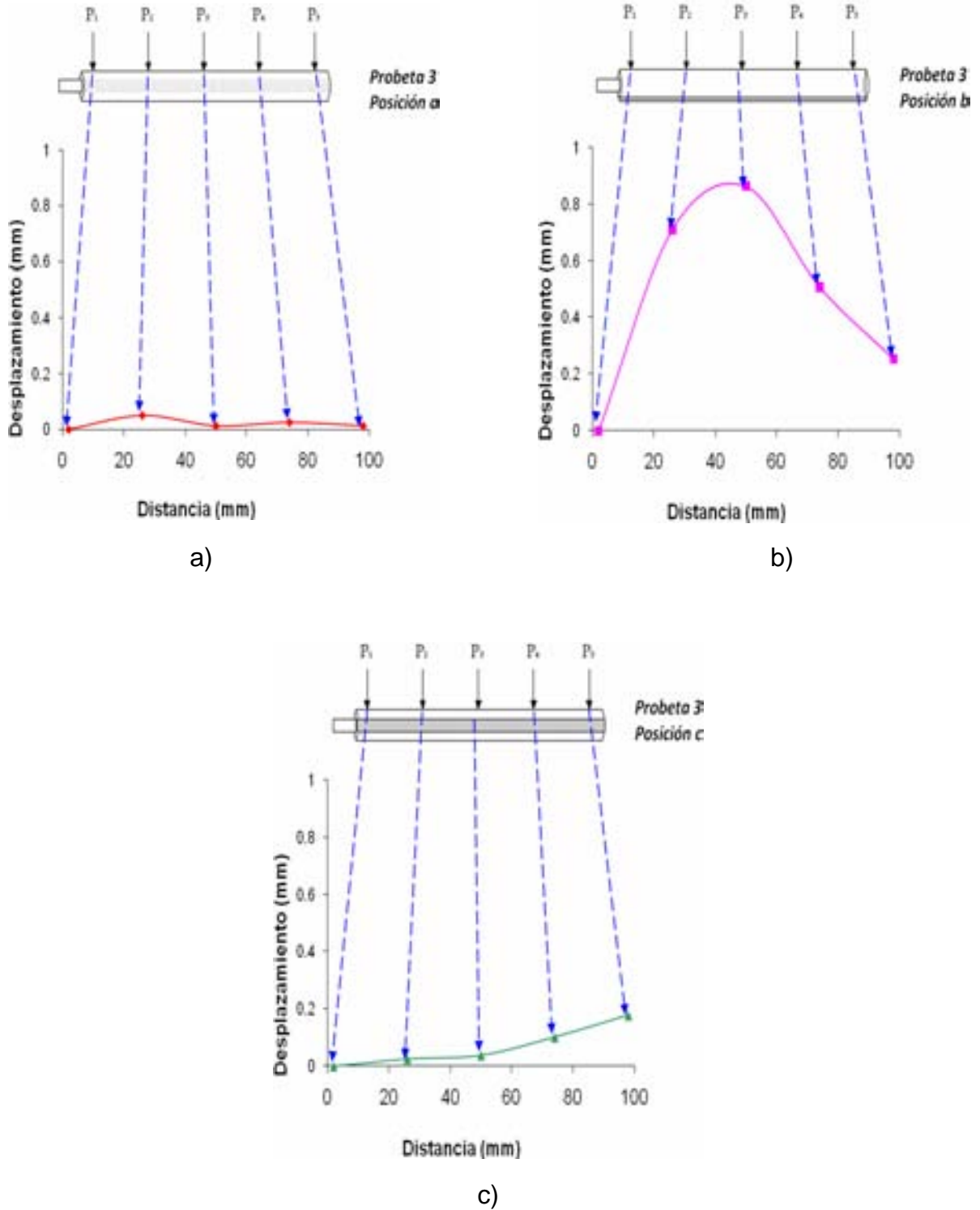


Figura 4.22. Perfil de desplazamiento en la probeta 3 para: a) posición a, b) posición b y c) posición c.

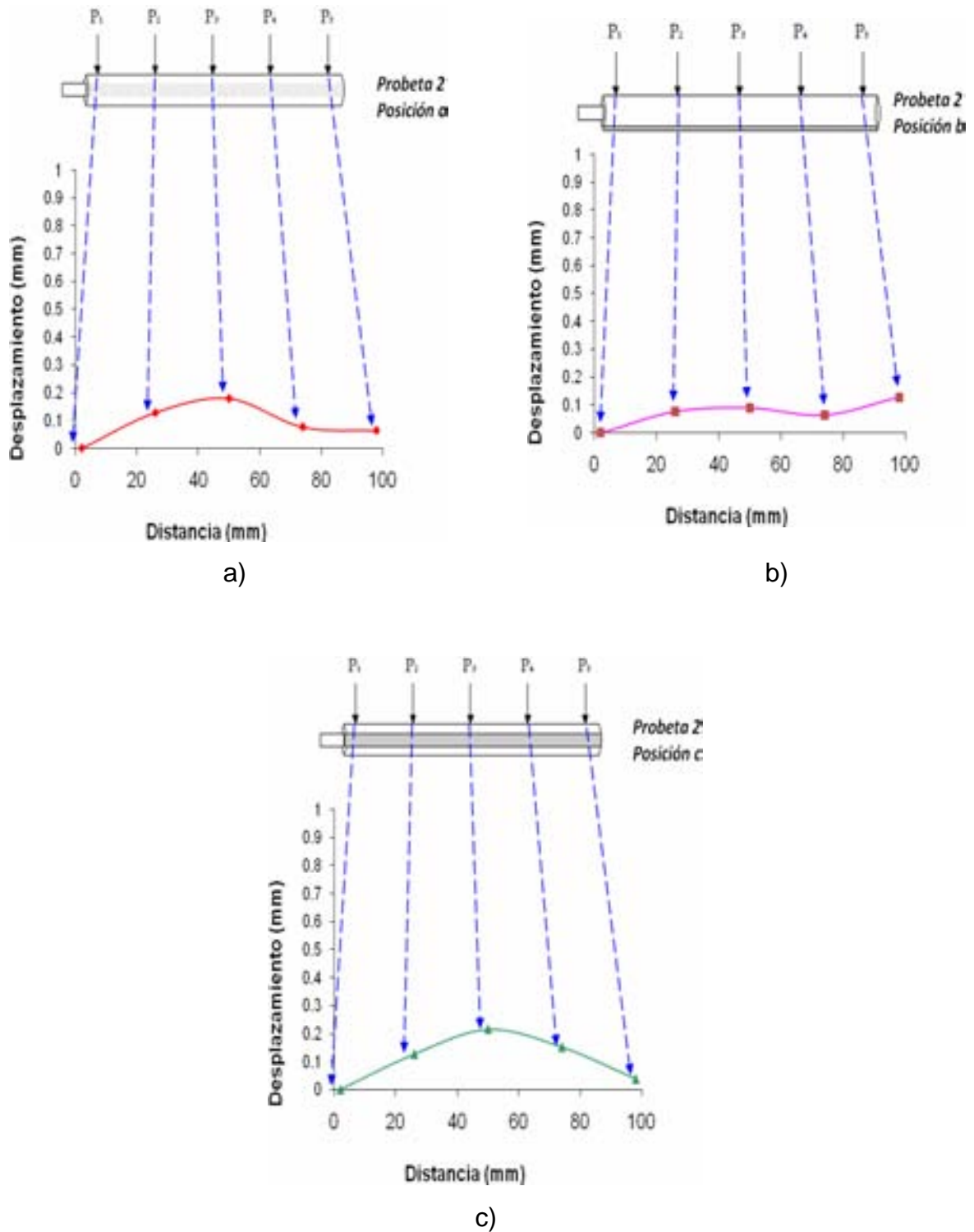
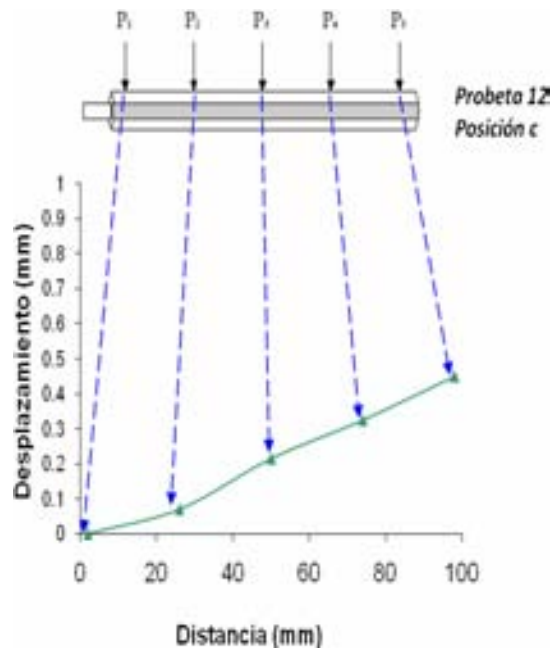
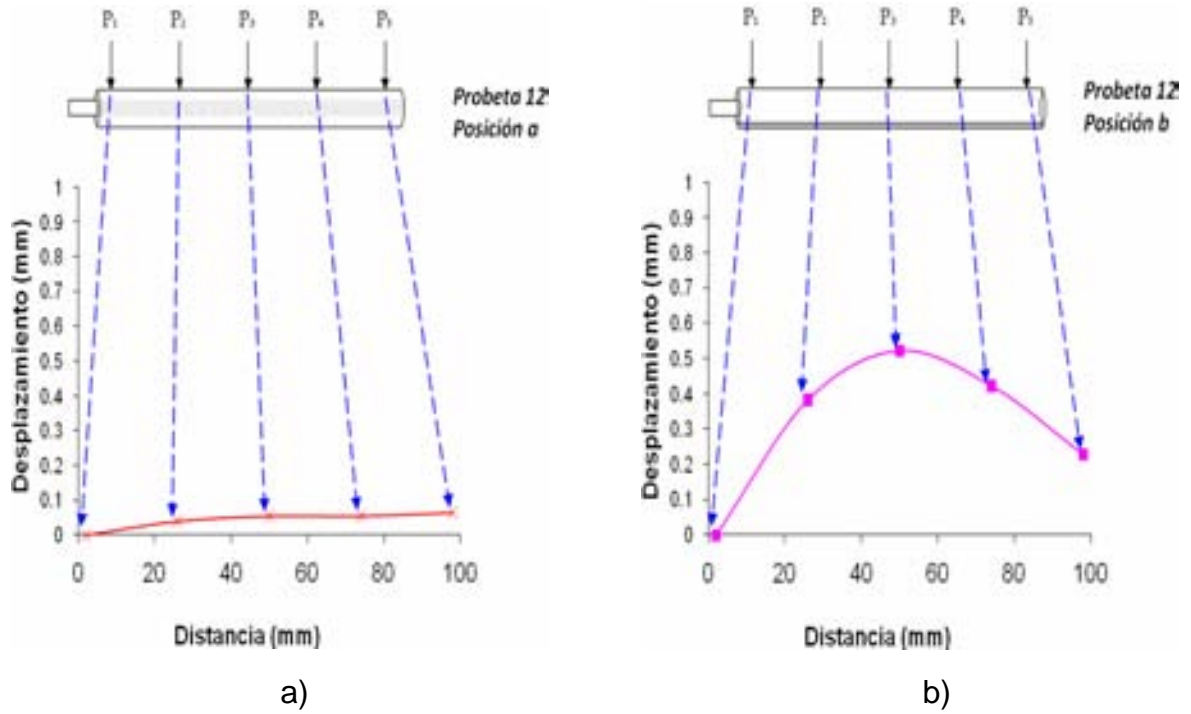


Figura 4.23. Perfil de desplazamiento en la probeta 2 para: a) posición a, b) posición b y c) posición c



c)

Figura 4.24. Perfil de desplazamiento en la probeto 12 para: a) posición a, b) posición b y c) posición c.

Puede notarse que en todas las gráficas de medición de desplazamiento la primera medición es cero debido a que ese fue el punto de referencia para las siguientes mediciones. Los resultados experimentales mostraron que la distorsión fue afectada principalmente por el patrón de flujo en la zona de trabajo del modelo del tanque temple.

De las gráficas de desplazamiento arriba descritas puede observarse que, para el caso del tratamiento de temple para la probeta 3, se presenta distorsión casi nula en la posición 1, mientras que para la posición 2 la distorsión es significativa (con mayor distorsión en el centro de la probeta) y para el caso de la posición 3 se muestra una pequeña distorsión en la base de la probeta. Por otra parte, en el caso de la probeta 2 se muestran bajos niveles de distorsión en las tres posiciones, siendo menos homogéneo en el caso de la posición 3. Por otra parte, para la probeta 12 se presenta distorsión prácticamente nula en el caso de la posición 1, mediana distorsión en la posición 2 (mostrando mayor distorsión en el centro de la probeta) y mediana distorsión en la posición 3 yendo en aumento y siendo directamente proporcional a la distancia del inicio de la medición del primer punto (extremo donde se encuentra el vástago) hasta la base de la probeta.

Los patrones de flujo en el tanque de temple para el enfriamiento de las probetas 12 y 3 (ver Figuras 4.11 y 4.13) son similares. En estos dos experimentos la corriente de flujo que impacta en mayor medida es aquella localizada al costado derecho de la probeta (con respecto a su posición en el tanque de temple), es decir, al lado opuesto de la ranura. Esto provocaría un mayor enfriamiento en ese lado; sin embargo debe también considerarse que los cantos de la ranura tienen poca masa, por lo que se enfrían rápidamente. Si éste último efecto es más importante, entonces se observará una deformación convexa positiva en la *posición b* para estos dos casos, tal como se observa en las Figuras 4.22 (b) y 4.24 (b), *posición b* en las mediciones de distorsión. Para la *posición a* de estas probetas (ver Figuras 4.22 (a) y 4.24 (a)) puede notarse que no hay una corriente de flujo con suficiente fuerza y que impacte a esa superficie de la probeta perpendicularmente, por lo que no se enfría tan rápidamente

y, en consecuencia, no se flexiona. Para la *posición c* (ver Figuras 4.22 (c) y 4.24 (c)) se observa muy poca distorsión, confinada a la base de la probeta. Esto es resultado de que es ahí donde se unen dos corrientes de flujo provenientes de los canales y por ende llevan mayor fuerza al momento de impactar a la probeta, con el consecuente incremento en la rapidez de enfriamiento.

En cuando al patrón de flujo impuesto durante el temple de la probeta 2 (ver Figura 4.12), puede observarse que la corriente que impacta a la probeta de mayor fuerza, lo hace en la base de la misma y es una mezcla de dos corrientes de flujo provenientes de los canales inferior y superior. A los lados de la probeta, las corrientes son de mucho menor velocidad que en los dos casos anteriores. Para esta probeta, el perfil de desplazamiento es distinto al de las probetas anteriores (en particular, no se observa la curvatura convexa positiva). Además, el máximo desplazamiento residual es menor (0.2 mm) comparado con el de las probetas 3 y 12 (0.8 y 0.5 mm, respectivamente).

Los resultados de distorsión obtenidos se pueden explicar a través de trabajos realizados anteriormente, como es el caso de Arimoto *et al.* [21], quienes investigaron el mecanismo de distorsión durante el temple de piezas de acero 1045 ranuradas a lo largo del eje z. Las dimensiones de la probeta manejadas en esta tesis y en el trabajo citado son las mismas. Sin embargo, en ese trabajo el medio de temple estaba **quieto**.

Arimoto *et al.* realizaron un modelado por elemento finito (ver Figura 4.25) para estudiar la evolución de los campos térmico, microestructural y de esfuerzos. La forma en que la probeta se flexionó en los experimentos de ese trabajo muestra una deformación convexa positiva (ver Figura 4.26) en el plano de la ranura [21].



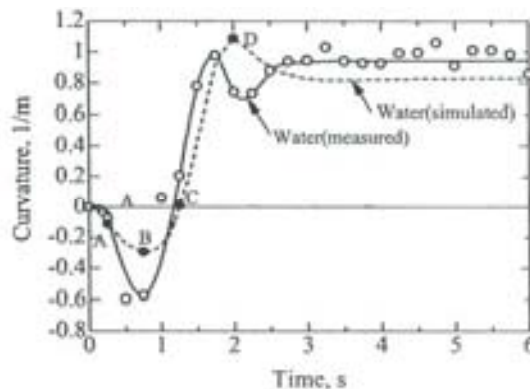


**Figura 4.25. Modelado de 1/4 de la pieza mediante elemento finito [21].**



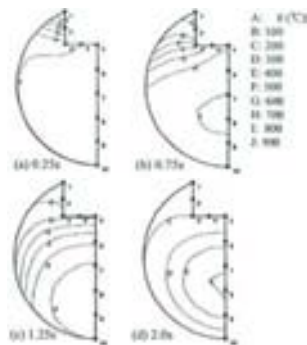
**Figura 4.26. Modo de flexión típica y definición de curvatura [21].**

Sus predicciones de evolución de la distorsión (ver Figura 4.27) muestran una curvatura negativa en un inicio y después toma valores positivos, posteriormente un ligero descenso seguido de un ligero ascenso, para terminar en un estado de estabilidad dimensional. La curvatura negativa inicial se debe a que va ocurriendo el enfriamiento desde la temperatura de austenización, sin embargo se llega a un punto de inflexión donde la curvatura cambia de dirección debido a que comienza a transformarse la austenita en martensita y de la misma forma se llega al segundo punto de inflexión, marcando el final de la transformación. Es decir, se presenta una lucha de expansión-contracción dentro de la probeta. La expansión se da para aquellas partes de la probeta que aún no han terminado de transformarse, mientras que la contracción se presenta en aquellas partes de la probeta que ya acabaron de transformar y que experimentan un cambio negativo de volumen.

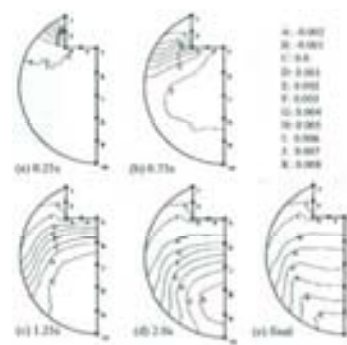


**Figura 4.27. Curvatura de flexión durante el temple para agua quieta [21].**

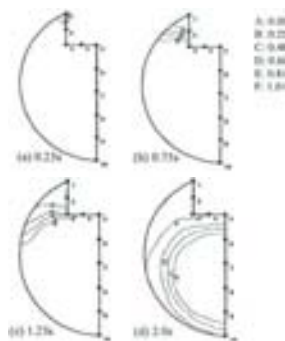
Las Figuras 4.28 a 4.31 muestran de manera visual lo explicado arriba, marcando el efecto que tiene el enfriamiento sobre la superficie ranurada (Figura 4.28), el patrón de transformación seguido durante el enfriamiento (Figura 4.30), y las variaciones de distribución de deformación axial plástica y distribución de esfuerzos axiales (Figura 4.29 y 4.31).



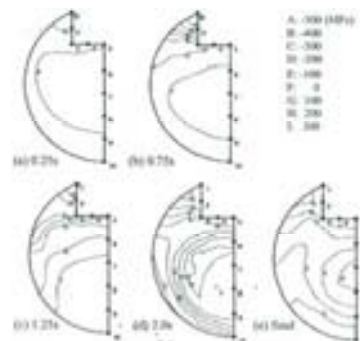
**Figura 4.28. Distribución de temperaturas en la sección transversal de especímenes durante el temple en agua quieta [21].**



**Figura 4.29. Distribución de deformación axial plástica durante el temple en agua quieta [21].**



**Figura 4.30. Distribución de fracción volumen de martensita en la sección transversal de especímenes durante el temple en agua quieta [21].**



**Figura 4.31. Distribución de esfuerzos axiales en la sección transversal durante el temple en agua quieta [21].**

El patrón seguido por los contornos en cada gráfica de distribución de temperatura, fracción de volumen de martensita, así como deformaciones y esfuerzos axiales muestra que el enfriamiento de la probeta comienza en las partes más cercanas a la

ranura, por lo que la transformación martensítica también ocurre primero en esa zona. En consecuencia la distribución de deformaciones y esfuerzos axiales presentan los valores más altos en esa misma zona y se propagan en menor medida al lado opuesto a la ranura (región central).

La diferencia ente el trabajo de Arimoto *et al.* y el presente radica en que ellos utilizaron agua quieta para la realización de sus experimentos mientras que en este trabajo experimental se utilizaron las variables agitación/posición de persianas para poder direccionar al flujo de agua. Sin embargo, la secuencia de eventos debe ser similar, una vez que se han detectado las áreas de mayor enfriamiento.

En resumen, los experimentos realizados corroboraron la dependencia que tiene la distorsión con los patrones de flujo generados con los distintos arreglos de persianas y velocidades de rotación de la propela. Además el tratamiento de temple produjo porcentajes significativos de transformación martensítica (90-95%).

## Capítulo 5. Conclusiones

En la actualidad, el temple en baños con agitación es muy común en procesos de manufactura de piezas de acero, siendo la distorsión el principal factor adverso al término de su procesamiento.

Dado lo anterior, en este trabajo experimental se buscó establecer el impacto que tienen los patrones de flujo sobre la distorsión en una probeta templada en un baño de temple agitado por una propela confinada.

De este trabajo se obtuvieron las conclusiones siguientes:

1. Cambiando la orientación de las persianas se modifica el patrón de flujo, produciendo corrientes paralelas a las persianas. Estas corrientes pueden o no mezclarse. Siempre se observó una corriente “parásita” a la izquierda de la zona de trabajo.
2. La velocidad de rotación de la propela modifica también al patrón de flujo, provocando un mayor flujo en el canal inferior cuando ésta se incrementa y de manera inversa se genera un mayor flujo en el canal superior cuando la velocidad de rotación de la propela disminuye.
3. Las metalografías y valores de dureza confirmaron la presencia de martensita en un rango de 90 a 99%.
4. Los resultados de distorsión muestran una clara interrelación con el patrón de flujo presente en el baño de temple.
5. Con base a resultados de modelación matemática publicadas en la literatura es posible afirmar que los patrones de flujo generados en la zona de trabajo definen la evolución de los gradientes térmicos y de transformación de fase producidos en el interior de la probeta.

## Capítulo 6. Bibliografía

1. G.E. Totten, C. E. Bates y N. A. Clinton: "*Handbook of Quenchants and Quenching Technology*", ASM Internacional, U.S.A., 1993, pp. 69-72.
2. A. K. Sinha. "*Physical Metallurgy Handbook*", Editorial McGraw-Hill, U.S.A. 2004, pp. 17.1-17.38.
3. Davis, J. R., Davidson G. M., Lampman S. R., Zorc T.B., Daquila, J. L., Ronke, A. W., Henniger K. L. "*Heat Treating*", ASM Handbook, Vol. 4, USA, 1991, 1a ed., pp. 80-83.
4. T. Ericsson y B. Hildenwall. "*Thermal and transformational stresses*", Sagamore Army Mater. Res. Conf., 28th, Proc., 1981, pp.19-38.
5. J. Apraiz Barreiro. "*Tratamientos Térmicos de los aceros*", Editorial Dossat, 8° ed., España, 1974.
6. H. E. Boyer. "*Quenching and Control of Distortion*", ASM International, 1988, pp. 12-15.
7. Davis, J. R., Davidson G. M., Lampman S. R., Zorc T.B., Daquila, J. L., Ronke, A. W., Henniger K. L. "*Heat Treating*", ASM Handbook, Vol. 4, USA, 1991, 1a ed., pp. 88.
8. G. Krauss. "*Principles of Heat Treatment of Steel*", ASM, Metals Park, 1980, pp. 141-143.
9. C. R. Brooks. "*Principles of The Heat Treatment of Plain Carbon and Low Alloys Steels*", ASM International, Materials Park, 1996, pp. 472.
10. G.F. Vander Voort. "*Atlas of Time-Temperature Diagrams for Irons and Steels*", ASM International, Metals Park, 1991, pp. 14.
11. M. Aktins. "*Atlas of Continuous Cooling Transformation for Engineering Steels*", British Steel Corp., ASM, Metals Park, 1980, pp. 9-23.
12. J. Szekely, J. W. Evans y J. K. Brimacombe. "*The Mathematical and Physical Metals Processing Operations*", Wiley Interscience and John Wiley and Sons, U.S.A. (1988).
13. R.I.L. Guthrie, "*Engineering in Process Metallurgy*", Clarendon Press, Oxford, 1992, pp.158-159.

14. J. Szekely, "*Fluid Flow Phenomena in Metals Processing*", Academic Press, 1979, pp. 408.
15. B. Beltrán Fragoso. "*Modelación Matemática y Computacional del Flujo de Fluidos en un Tanque de Temple*", Tesis de Maestría, UNAM, Facultad de Química, 2008.
16. A. R. Galicia Sainz. "*Modelación Física de los Efectos Térmicos sobre el Flujo de Acero Líquido en un Distribuidor de Colada Continua de Forma Compleja*", Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, 2003.
17. American Society for Metals, "*Metals Handbook Properties and Selection of Metals*", USA, 1961, Vol. 1, pp. 62.
18. <http://www.student.math.uwaterloo.ca/~amat361/Fluid%20Mechanics/topics/vorticity.htm>, consultada el día de 7 de abril de 2008.
19. J.J. Kubbs, H.E. Boyer y P. M. Unterweiser. "*Heat Treater's Guide: Standard Practices and Procedures for Steel*", ASM, Metals Park, Ohio, 1982, pp. 20.
20. H. E. Boyer. "*Quenching and Control of Distortion*", ASM International, 1988, pp. 117-122.
21. K. Arimoto, H. Kim, M. Narazaki, D. Lambert y W.T. Tu. "*Mechanism of Quench Distortion on Steel Shaft with Keyway*", Proc. of the 21<sup>st</sup> ASM Heat Treating Society Conference, p.p. 1-8, ASM International, Materials Park, Ohio, 2002.