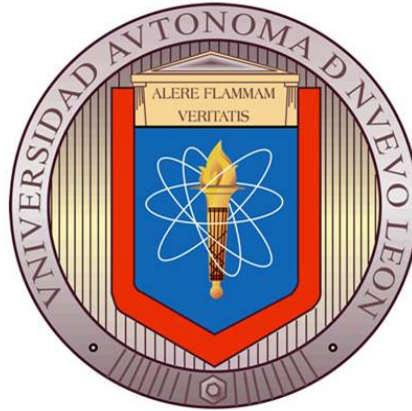


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**TRATAMIENTO TÉRMICO DE ANILLOS DE
ACERO AISI 4140**

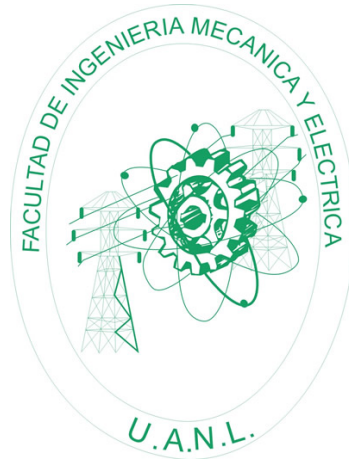
Carlos Eduardo Márquez de la Torre

Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L.

Septiembre 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**TRATAMIENTO TÉRMICO DE ANILLOS DE
ACERO AISI 4140**

Carlos Eduardo Márquez de la Torre

Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L.

Septiembre 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “Tratamiento Térmico en Anillos de Acero AISI 4140” realizada por el alumno CARLOS EDUARDO MÁRQUEZ DE LA TORRE, matrícula 1537610, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

El comité de la Tesis

Dr. Alberto J. Pérez Unzueta
Asesor

Dr. Rafael Colás Ortíz
Co-Asesor

Dr. Hugo Guajardo Martínez
Co-Asesor

Vo. Bo.
Dr. Moisés Hinojosa Rivera
División de Estudios de Posgrado

Resumen

La manufactura de anillos rolados de acero AISI-SAE 4140 implica varios retos tecnológicos, entre ellos el tratamiento térmico que genere las propiedades mecánicas requeridas aunadas a una estabilidad dimensional. La falta de entendimiento en las bases y prácticas de templado pueden resultar en durezas inadecuadas, distorsión excesiva o rechazo de componentes costosos. Los resultados de este trabajo muestran que las propiedades de la transferencia de calor son afectadas fuertemente por los distintos parámetros de temple, como son la heterogeneidad en el campo de velocidades de agitación, y la influencia de la degradación del medio de temple en el coeficiente de transferencia de calor. Utilizando simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD), se pudo demostrar el impacto del diseño del tanque, la configuración y operación de los agitadores en las curvas de enfriamiento de los anillos templados.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mi tutor y asesor el Dr. Alberto Pérez, que con toda su paciencia, apoyo y útiles consejos hicieron posible este trabajo; además que con toda su inspiración y entusiasmo he encontrado un modelo de persona digna, cordial y con gusto por ayudar a los demás, de la cual he aprendido mucho.

También me gustaría agradecer a mis revisores de tesis, por sus observaciones, comentarios y sugerencias.

Estoy en deuda con mis amigos y compañeros de posgrado, ya que han sido un valioso apoyo para mi desarrollo como estudiante dentro de la facultad.

Estoy agradecido con las asistentes y secretarias de la FIME, especialmente con Julia Martínez Garza por su inmensa ayuda y paciencia.

Le doy gracias a FRISA Forjados por permitirme desarrollar el presente trabajo de investigación dentro de sus instalaciones. A todo el personal que labora en esta empresa, y que representa muy bien sus valores. Especialmente le agradezco a Jorge Cárdenas por siempre haber confiado y creído en mí.

Por último, y más importante, le agradezco a mis padres por su confianza, enseñanza, apoyo y amor incondicional. A ellos les dedico esta tesis.

*Este trabajo es dedicado con toda mi gratitud,
respeto y admiración a mis padres.*

Índice general

1	Introducción	1
1.1	Revisión de la literatura	7
1.1.1	Cálculo del coeficiente de transferencia de calor	9
1.2	Objetivo, justificación, planteamiento, hipótesis, limitaciones	11
1.3	Distribución de la investigación	13
2	Antecedentes teóricos	15
2.1	Metalurgia del acero AISI 4140	16
2.1.1	Diagrama CCT y características	16
2.1.2	Propiedades físicas del material	18
2.2	Proceso de rolado de anillos	21
2.3	Etapas en el temple	22
2.3.1	Etapas A, formación de capa de vapor.	23
2.3.2	Etapas B, ebullición nucleada	28
2.3.3	Etapas C, fase convectiva	31
2.4	Temple como proceso de transferencia de calor	36
2.4.1	Estado de transferencia de calor inestable	36
2.4.2	Transferencia de calor durante el temple	38
2.4.3	Determinación del coeficiente de transferencia de calor usando análisis inverso	39
2.5	Análisis de las curvas de enfriamiento	42
2.5.1	Efecto de los parámetros de temple en las curvas de enfriamiento	43
3	Trabajo experimental I (Agitación)	48
3.1	Introducción	48
3.1.1	Sistema de medición	49
3.2	Procedimiento	51
3.3	Plan experimental y resultados	53

3.3.1	Doble álabe	56
3.3.2	Triple álabe	57
3.3.3	Arreglo de n -agitadores	59
3.3.4	Resumen de resultados	64
4	Dinámica de Fluidos Computacional	69
4.1	Introducción	69
4.1.1	Un agitador	71
4.1.2	n -agitadores	75
4.1.3	Enfriamiento de un anillo	76
5	Trabajo experimental II (Templado)	83
5.1	Introducción	84
5.2	Sistema de temple	84
5.2.1	Horno	86
5.2.2	Tanque	86
5.2.3	Termopar	86
5.2.4	Sistema de adquisición de datos	87
5.2.5	Probeta	88
5.3	Procedimiento y preparación de probetas	88
5.4	Análisis de datos	90
5.5	Plan experimental	90
5.5.1	Diferente condición de polímero	90
5.5.2	Diferente material	91
5.5.3	Caso de estudio: Pieza de dimensiones mayores	91
6	Resultados y discusión	93
6.1	Agitación	94
6.1.1	Agitación individual	94
6.1.2	Arreglo de n -agitadores	95
6.2	Modelación por Dinámica de Fluidos Computacional	96
6.3	Predicción de las propiedades del acero AISI 4140	97
6.4	Cálculo de razón de enfriamiento y HTC para distintas condiciones de polímero en probetas de Inconel [®] 600	100
6.5	Curvas de enfriamiento del Caso de estudio: acero AISI 4140	108

7 Conclusiones y trabajo a futuro	114
7.1 Agitación	114
7.2 Modelación computacional	115
7.3 Temple	116
7.4 Conclusión general	116
7.5 Sugerencias para trabajo futuro	117
Índice de figuras	127
Índice de tablas	128

Capítulo 1

Introducción

Contenido

1.1	Revisión de la literatura	7
1.1.1	Cálculo del coeficiente de transferencia de calor	9
1.2	Objetivo, justificación, planteamiento, hipótesis, limitaciones	11
1.3	Distribución de la investigación	13

La característica sobresaliente de los aceros, la cual los convierte en materiales de ingeniería exitosos, es la habilidad de ajustar sus propiedades mecánicas en un amplio rango a través del uso de tratamientos térmicos controlados.

Las estructuras de acero con bajas propiedades mecánicas son producidas cuando el acero es calentado a la temperatura de austenización y enfriado lentamente. Este tratamiento produce una estructura que posee un bajo nivel de esfuerzos residuales. Sin embargo, las altas propiedades mecánicas deseadas, se logran por medio de un enfriamiento rápido para formar la estructura metaestable llamada martensita [2]. Las condiciones de enfriamiento son entonces no uniformes y esto conduce a la evolución

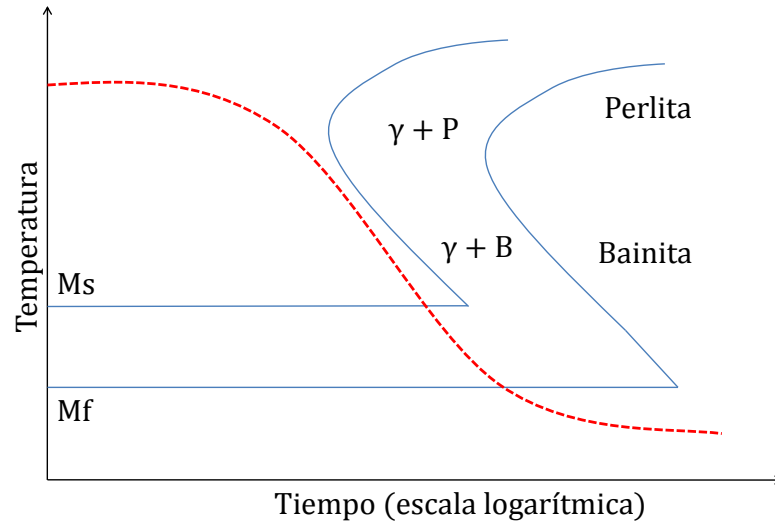


Figura 1.1: Diagrama TTT. Curva en rojo representa el enfriamiento crítico para máxima dureza [1].

de esfuerzos residuales, los cuales pueden ser perjudiciales para el componente.

Con el fin de lograr una estructura martensítica, es necesario evitar la formación de constituyentes menos duros en el acero (perlita y bainita). Estas reacciones pueden ser representadas en un diagrama de transformación de fases ó diagrama de transformación, tiempo, temperatura (TTT), como el que se muestra en la figura 1.1.

Para una composición dada de acero y una condición de tratamiento térmico, existe una velocidad de enfriamiento crítica en la cual la mayoría de austenita es transformada en martensita.

La austenita comienza a transformarse a la temperatura M_s y la transformación

termina a la temperatura M_f . La temperatura M_s decrece con el incremento de contenido de carbono en el acero [3], ver figura 1.2

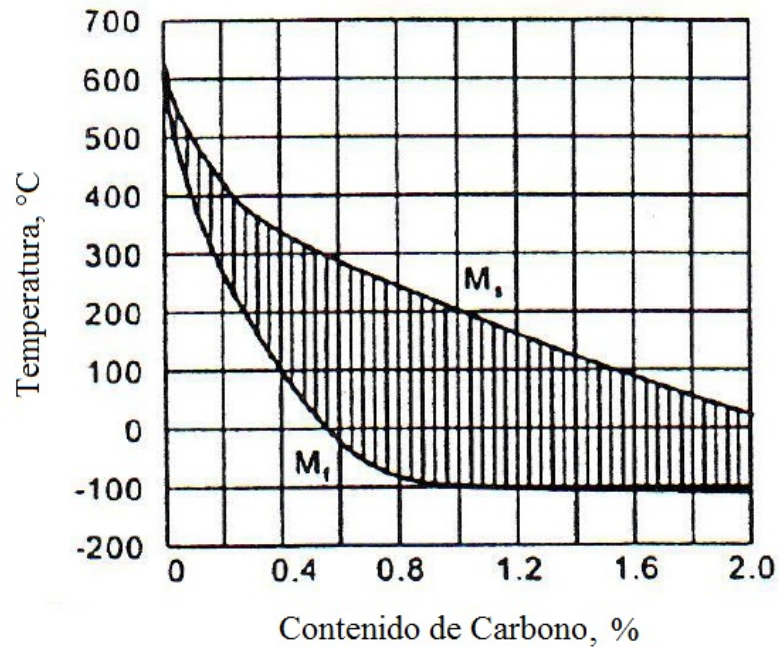


Figura 1.2: Temperatura M_s como función del contenido de carbono.

Sin embargo, en la práctica, cuando algún componente de acero es templado, la superficie se enfría mucho más rápido que el centro. Esto significa que la superficie podría enfriarse a la velocidad de la temperatura crítica y por lo tanto ser endurecida totalmente, mientras que el centro se enfría mucho más lento y forma estructuras menos duras como perlita y bainita (figura 1.3).

Para facilitar un completo endurecimiento del componente, este puede ser alcanzado por uno de los siguientes métodos [1]:

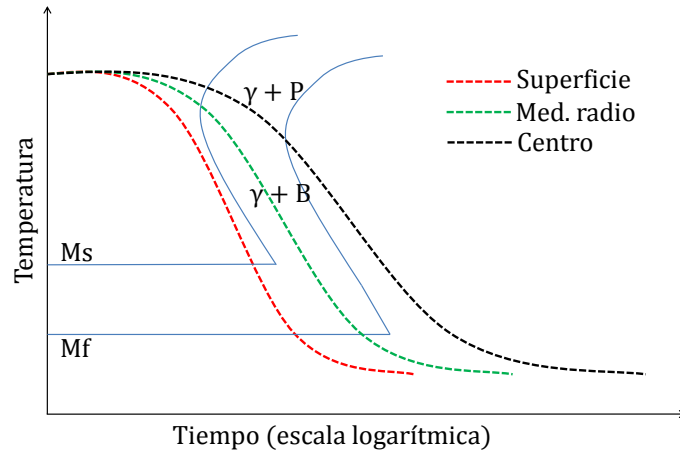


Figura 1.3: Efecto del espesor de la pieza.

- Incrementando la templabilidad del acero por medio de la adición de elementos de aleación. Esto puede causar un retraso en la transformación ya que provoca un desplazamiento hacia la derecha del diagrama TTT, permitiendo un tiempo mayor para la transformación de austenita a martensita (ver figura 1.4). Esto reduce el tiempo para alcanzar la temperatura crítica de transformación produciendo componentes con un máximo de dureza. Sin embargo, los elementos aleantes pueden ser caros y no tan beneficiosos para otros procesos (*e.g.*, maquinado, forjado, etc.)
- Incrementando la velocidad del temple para que de ese modo la razón de enfriamiento en el centro de la pieza exceda la velocidad crítica de enfriamiento. Esto puede ser logrado, por ejemplo, cambiando de un aceite de baja velocidad de temple a uno de alta, por medio del uso de soluciones acuosas de polímeros de temple, o incluso por soluciones de agua con sal.

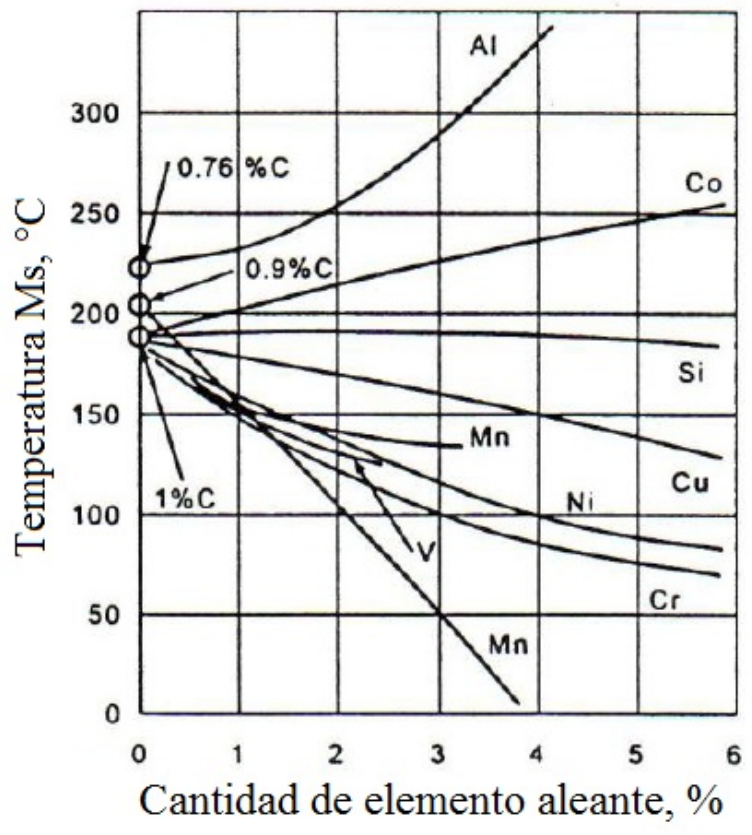


Figura 1.4: Efecto en la transformación martensítica de algunos elementos aleantes a 1% de C.

La optimización del proceso de temple usualmente requiere la selección de razones de enfriamiento suficientemente rápidas para permitir la microestructura martensítica deseada a la profundidad requerida, pero lo suficientemente lenta para minimizar los esfuerzos residuales y distorsión. La intensidad del temple puede ser modificada de acuerdo a la variación del tipo del medio temple, su concentración ¹, temperatura y velocidad de agitación [3–6].

El templado es un paso importante en la producción de muchas partes mecánicas de acero; y es frecuentemente la manera más económica de lograr alta resistencia y dureza. Un control inadecuado del templado puede causar distorsión o incluso agrietamiento. Cuando esto sucede a componentes que ya han sido procesados previamente, invariablemente se traducirá en una merma de dinero [5,6]. De hecho, la imposibilidad de reproducir resultados por un temple descontrolado es una de las causas de mayor rechazo de componentes, pérdida de producción y necesidad de retrabajar las piezas [7,8].

El control de la fabricación del acero, la manufactura, y el procesamiento de éste por tratamientos térmicos están siendo continuamente investigados y aplicados. Esto puede ser logrado con el desarrollo de modelos matemáticos basados en la física de los materiales y su interacción con el entorno en cuestión [9]. Con el fin de utilizar estos modelos, el valor de las variables físicas relacionadas al fenómeno que es representado deben de ser conocidas. El coeficiente de transferencia de calor del medio de enfriamiento junto con la conductividad térmica del acero son los factores más importantes dentro del contexto del temple [10].

¹Por ejemplo en el caso de los polímeros solubles.

Los gradientes de temperatura durante el enfriamiento pueden conducir a gradientes microestructurales, y esfuerzos residuales en los componentes de acero.

1.1. Revisión de la literatura

La principal función de un medio de temple es controlar la velocidad de enfriamiento de un acero, generando una combinación deseada de propiedades mecánicas y esfuerzos residuales.

El análisis de las curvas de enfriamiento es la herramienta más ampliamente usada en la selección de medios de temple apropiados para el tratamiento térmico de piezas de acero. La técnica evalúa la capacidad de enfriamiento del medio de temple de acuerdo a la medición de la respuesta térmica de una probeta instrumentada con termopares [11].

Las probetas son usualmente construidas de materiales que no exhiben transformaciones alotrópicas durante el temple, como el Inconel[®] 600 [12–14], plata [12,15] o acero inoxidable 304 [16,17], para permitir que los resultados sean interpretados sin las señales de transformaciones exotérmicas. Además, el uso de estos materiales elimina el riesgo de agrietar la probeta, especialmente cuando se usa un medio con muy elevada severidad de temple.

Pero por otro lado, existe una gran variedad de probetas con diferentes tamaños,

Tabla 1.1: Comparación de probetas estándar.

Variable	ISO 9950:1995(E) (Internacional)	AFNOR NFT-60778 (Francia)	JIS K 2242 (Japón)	ZBE 45003-88 (China)
Material	Inconel [®] 600	Plata, 99.999 %	Plata, 99.99 %	Plata, 99.96 %
Dimensiones (<i>mm</i>)	12.5 × 60	16 × 48	10 × 30	10 × 30
Temperatura (°C)	850 ± 5	800 ± 5	810 ± 5	810 ± 5

formas, composición y se han desarrollado diferentes estrategias en el análisis de datos, las cuales han sido usadas para el estudio de las curvas de enfriamiento con diferentes grados de éxito [18–21]. A pesar de los intentos de estandarizar las probetas (ver tabla 1.1), existen diferentes reportes [22, 23] donde se resalta la importancia del uso de materiales específicos, como es el caso del AISI 4140 para el análisis del comportamiento de dicho material ante determinados parámetros de temple.

Tagaya y Tamura desarrollaron la especificación industrial JIS K 2242 [24, 25] para el registro de la razón de enfriamiento utilizando una probeta cilíndrica de plata ensamblada con un termopar para determinar el cambio de temperatura con respecto al tiempo durante el enfriamiento. La probeta cilíndrica de plata fue adoptada por JIS debido a su alta conductividad, la ausencia de transformaciones de fase, y resistencia a la oxidación. Esto significa que tiene una alta sensibilidad y una excelente reproducibilidad de resultados. Sin embargo, su alta conductividad térmica es muy diferente a la del acero. Además tiene un alto costo de manufactura, y es difícil de preparar la superficie para el ensamble del termopar, debido a que la plata es

mecánicamente débil.

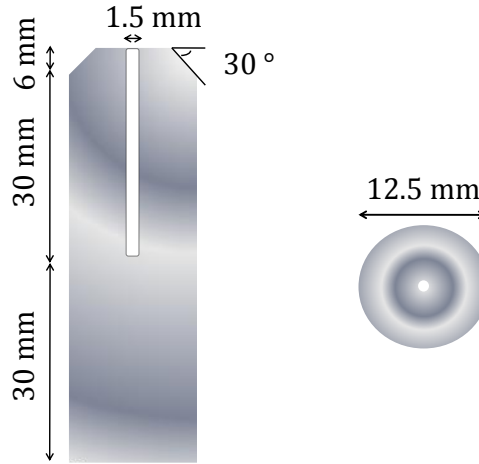


Figura 1.5: Dimensiones de probeta ISO.

La probeta que actualmente cuenta con mayor aceptación como estándar es la de Inconel[®] 600, de 12.5 *mm* de diámetro y 60 *mm* de altura. Esta probeta está especificada en el método ISO 9950:1995(E) (ver figura 1.5) [26,27], y es principalmente usada debido a sus propiedades mecánicas. Sin embargo su sensibilidad es menor que la probeta de plata [12–14].

1.1.1. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor

Templar un acero dentro de un medio líquido involucra un proceso complejo de transferencia de calor. La extracción de calor de una ocurre a través de varios mecanismos de transferencia y en distintos rangos de temperatura; las etapas son: formación de una película de vapor, ebullición nucleada, y finalmente enfriamiento

por convección.

En investigaciones previas, los coeficientes de transferencia de calor han sido tratados usualmente como constantes, en realidad, los coeficientes son funciones no lineales de la temperatura y de las fracciones volumétricas de las fases [28]. Existen intentos de evaluar los coeficientes como una función de la temperatura para los aceros durante el curso del temple, y en estos se demuestra que es posible encontrar dichos coeficientes con probetas de diferentes geometrías [11].

La estimación del coeficiente de transferencia de calor es complicado por el calor latente que es liberado durante las transformaciones de fase. Además, dicho coeficiente durante el proceso de templado no depende únicamente de la templabilidad del acero sino que también de factores inherentes de la misma pieza como sus dimensiones y las condiciones de la superficie. Por consiguiente, una estimación de los coeficientes a través de los datos obtenidos en la curva de razón de enfriamiento es con frecuencia recomendada. Debido a la dificultad de medir directamente la razón de enfriamiento en la superficie de una probeta templada, se vuelve muy importante el método de cálculo inverso para resolver este problema [29], el cual se describe en la sección 2.4.3.

Muchas técnicas han sido desarrolladas para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor mediante el método del análisis inverso a partir de los datos experimentales. Los parámetros de entrada para este análisis son, la geometría de la probeta, las propiedades del material, y el historial de la temperatura medida.

1.2. Objetivo, justificación, planteamiento, hipótesis, limitaciones

Objetivo Determinar la razón de enfriamiento y el coeficiente de transferencia de calor en función de las condiciones y propiedades del proceso de templado, como son el tipo de agitación, degradación y contaminación del medio de enfriamiento en condiciones industriales.

Objetivos particulares:

- Determinar los conos de flujo en la agitación, así como sus velocidades promedio para modelos similares de agitadores con álabes de distinto ángulo.
- Evaluar el desempeño en los agitadores de triple álabe mediante la colocación de un accesorio diseñado para reducir pérdidas por recirculación y componentes radiales y tangenciales de la velocidad en el flujo.
- Trazar mapas de velocidades para distintas profundidades dentro de un tanque de temple experimental con arreglos de varios agitadores del mismo modelo.
- Investigar y entender cómo el sistema de temple afecta los perfiles de uniformidad en la transferencia de calor por medio de simulación de dinámica de fluidos (CFD).
- Evaluar mediante un modelo de CFD un rediseño del sistema de temple que reduzca los gradientes de temperatura durante el enfriamiento mediante la optimización de la homogeneidad de los chorros de agitación.

- Estudiar la modificación de las velocidades de enfriamiento y uniformidad térmica debido a la degradación de las soluciones acuosas utilizadas como medio de temple.
- Investigar y discutir un diseño de probeta útil para determinar un coeficiente de transferencia de calor en función de la temperatura, usando los datos de las curvas de enfriamiento.

Justificación El presente estudio forma parte de un proyecto general de colaboración entre la empresa FRISA Forjados Operaciones S.A. de C.V. y la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León que busca la innovación en los procesos productivos para la elaboración de anillos rolados que permita el posicionamiento de la industria nacional como líder mundial en forja.

Planteamiento Se plantea realizar la investigación seleccionado el acero AISI 4140 usado en la fabricación de anillos para determinar ciertos parámetros óptimos en el proceso de templado.

Hipótesis Las variaciones en los parámetros del medio de temple tendrán efecto en la velocidad de enfriamiento y homogeneidad de la transferencia de calor en piezas de acero, particularmente en anillos de gran dimensión.

Limitaciones El tema de tratamientos térmicos de metales y aleaciones, y en particular de aceros, es un tema muy amplio. El presente estudio se limita al parámetro de agitación y condición de una solución de polímero al realizar el temple del acero AISI 4140.

1.3. Distribución de la investigación

El Capítulo 1 es una introducción y revisión de la literatura relevante. La revisión de la literatura se enfoca en el análisis de las curvas de enfriamiento como una herramienta para evaluar la capacidad de enfriamiento y los tipos de probetas disponibles.

El Capítulo 2 trata sobre el proceso de temple, sus etapas y los mecanismos de transferencia de calor durante estas fases, además de los parámetros que afectan a este mecanismo. Comenzando con la literatura relevante y mostrando las posibilidades para desarrollar modelos. Este Capítulo también describe las propiedades físicas (calor específico y conductividad térmica) como función de la temperatura.

El Capítulo 3 es una descripción del procedimiento experimental usado para realizar las mediciones de agitación, así como los resultados arrojados por dicha metodología.

En el Capítulo 4 se muestra el trabajo realizado a través del uso de ANSYS[®] FLUENT[®] como herramienta para la modelación de la dinámica de fluidos y transferencia de calor.

En el Capítulo 5 se describe la metodología usada para el temple de probetas, además incluye una descripción del sistema usado para templar y adquirir los datos.

En el Capítulo 6 se muestran los resultados del trabajo experimental de temple y su discusión. Los resultados ilustran cómo el método inverso es usado para calcular el coeficiente de transferencia de calor (HTC) usando los datos de las curvas de enfriamiento. Los resultados además ilustran el efecto del tipo de medio de temple, y la velocidad de agitación en la razón de enfriamiento.

El Capítulo 7 incluye las conclusiones, recomendaciones y sugerencias para el trabajo futuro.

Capítulo 2

Antecedentes teóricos

Contenido

2.1	Metalurgia del acero AISI 4140	16
2.1.1	Diagrama CCT y características	16
2.1.2	Propiedades físicas del material	18
2.2	Proceso de rolado de anillos	21
2.3	Etapas en el temple	22
2.3.1	Etapa A, formación de capa de vapor.	23
2.3.2	Etapa B, ebullición nucleada	28
2.3.3	Etapa C, fase convectiva	31
2.4	Temple como proceso de transferencia de calor	36
2.4.1	Estado de transferencia de calor inestable	36
2.4.2	Transferencia de calor durante el temple	38
2.4.3	Determinación del coeficiente de transferencia de calor usando análisis inverso	39
2.5	Análisis de las curvas de enfriamiento	42
2.5.1	Efecto de los parámetros de temple en las curvas de enfriamiento	43

2.1. Metalurgia del acero AISI 4140

2.1.1. Diagrama CCT y características

Los aceros pueden ser clasificados como aceros al carbono, aceros baja aleación, aceros aleados grado maquinaria, aceros para herramientas, aceros inoxidables y aceros para aplicaciones especiales. En cuanto a su contenido de carbono, los aceros pueden ser clasificados como bajo carbono ($\%C < 0.20$), medio carbono ($0.20 < \%C < 0.60$) y alto carbono ($\%C > 0.60$).

El acero AISI-SAE 4140 tiene una composición química nominal de 0.38 a 0.43 % de C, 0.75 a 1.00 % de Mn, 0.15 a 0.35 % de Si, 0.80 a 1.10 % de Cr, 0.15 a 0.25 % de Mo, 0.035 % máx. de P y 0.040 % máx. de S (porcentajes en peso).

El acero 4140 es un acero aleado grado maquinaria. El contenido de cromo y molibdeno incrementa la resistencia a la tensión, templabilidad, tenacidad y resistencia al desgaste.

El 4140 es uno de los aceros aleados de medio carbono más usados, siendo relativamente de bajo costo, considerando la alta templabilidad que ofrece. El 4140 totalmente endurecido posee rangos de 543-634 HBN, dependiendo de la cantidad precisa de carbono [30].

La figura 2.1 muestra el diagrama de Transformación en Enfriamiento Continuo

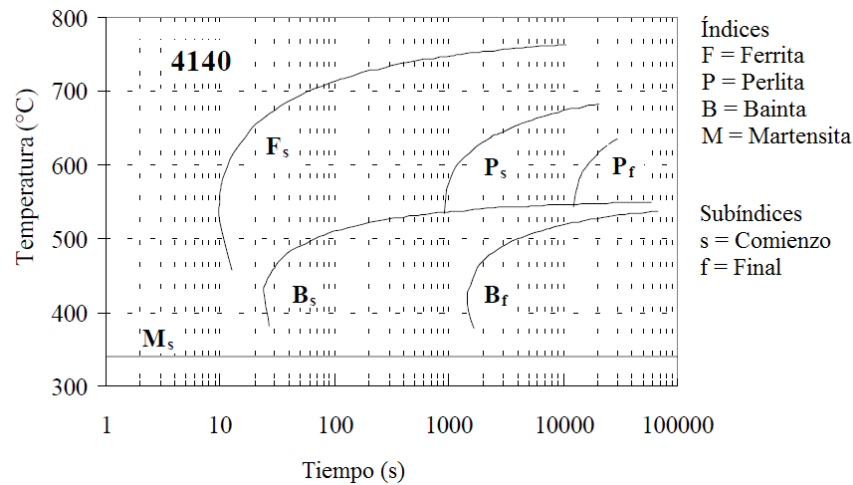


Figura 2.1: Diagrama CCT del acero AISI 4140 [31].

Tabla 2.1: Propiedades mecánicas del 4140 normalizado y recocido [32].

AISI No.	Tratamiento	Punto de cedencia (MPa)	Esfuerzo último (MPa)	Elongación %	Reducción en área %	Dureza HBN	Resistencia al impacto Kg·m
4140	Normalizado	650	1020	17.7	46.8	302	2.3
	Recocido	420	650	25.7	56.9	197	5.5

(CCT, por sus siglas en inglés) del acero AISI 4140, el cual indica la transformación de fases desde austenita a martensita, perlita o bainita dependiendo de la curva de enfriamiento que se logre en el temple. Este diagrama es importante debido a que una curva de enfriamiento teórica puede ser superpuesta en él y predecir la respuesta que se tendrá con determinado tratamiento térmico. Algunas de las propiedades mecánicas del acero AISI 4140 normalizado y recocido se muestran en la tabla 2.1. La tabla 2.2 muestra las propiedades después de templado y revenido a diferentes temperaturas.

Tabla 2.2: Propiedades mecánicas del 4140 templado y revenido [32].

AISI No.	Temperatura revenido °C	Punto de cedencia (MPa)	Esfuerzo último (MPa)	Elongación %	Reducción en área %	Dureza HBN
	200	1647	1771	8	38	510
	310	1434	1551	9	43	445
4140	420	1137	1247	13	49	370
	530	834	951	18	58	285
	650	655	758	22	63	230

Después de un periodo de austenizado y un temple efectivo, se produce la estructura martensítica, la cual consiste de paquetes de unidades finas alineadas paralelamente unas con otras. La orientación de las unidades dentro de un paquete son limitadas, y frecuentemente grandes volúmenes poseen una misma dirección [33].

2.1.2. Propiedades físicas del material

La conductividad térmica (k) y el calor específico (C_p) necesitan ser expresados como funciones de la temperatura durante el proceso de temple, a fin de obtener estos valores con una precisión confiable durante los cálculos.

La densidad (ρ) también está en función de la temperatura pero se ha asumido como una constante ($7853 \text{ Kg}/m^3$) debido a que la variación de volumen a causa de

la dilatación durante el temple es pequeña [34].

Calor específico

Un material sólido, cuando es calentado, experimenta un incremento en la temperatura, significando que ha absorbido cierta cantidad de energía. El calor específico C_p es una propiedad que indica la habilidad de cierto material a absorber calor del medio que lo rodea; esto representa la cantidad de energía requerida para producir un incremento de la temperatura en una unidad (Kelvin o grado Celsius) [22]. En términos matemáticos, el calor específico se expresa como:

$$C_p = \frac{dQ}{dT} \quad (2.1)$$

Donde dQ es la energía requerida para producir un cambio de temperatura dT . El calor específico representa la cantidad de calor requerido por unidad de masa para elevar la temperatura en un grado Celsius.

Los datos de calor específico para el acero AISI 4140 cuya transformación sigue el diagrama de fase **Fe-Fe₃C** pueden ser obtenidos de la ASM (*American Society for Metals*) [35], los cuales pueden ser ajustados en una ecuación polinomial [22] para cubrir el rango completo de temperatura (ver figura 2.2), $C_p = -5 \times 10^{-5}T^2 + 0.2575T + 429.47$ con unidades: J/Kg·K. De forma alterna pueden ser usadas dos

líneas rectas con pendiente ligeramente diferente para cubrir el rango completo de variación de temperatura [22]. La ecuación usada para temperaturas por debajo de los $375\text{ }^{\circ}\text{C}$ es $C_p = 0.23T + 432.75$ y para aquellas temperaturas por encima de los $375\text{ }^{\circ}\text{C}$ es $C_p = 0.21T + 440.25$.

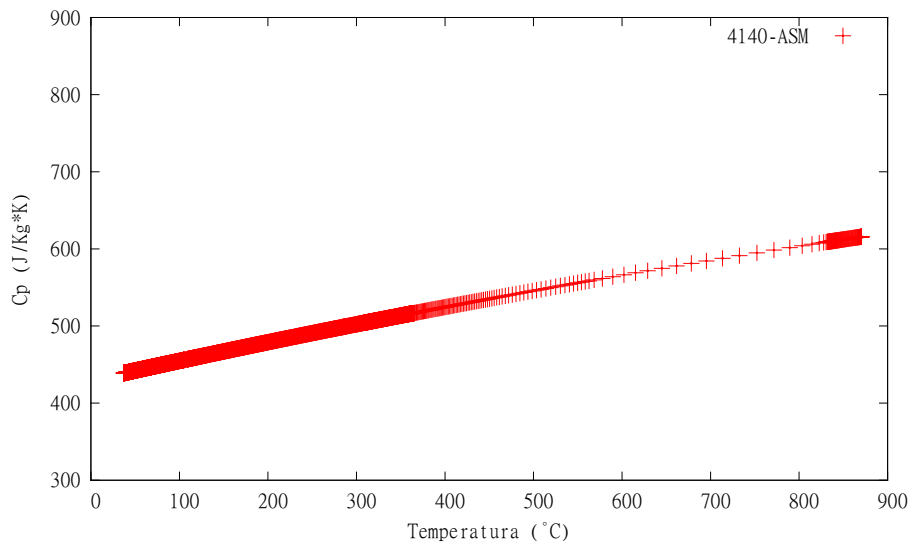


Figura 2.2: Calor específico de un acero 4140 (según la ec. de la ASM [35]).

Conductividad térmica

La conducción térmica es el fenómeno en el cual el calor es transportado desde una región de alta temperatura a una de menor. La conductividad térmica es una medida de la razón a la que el material transmite el calor. Es definida en términos de la primera ley de Fick [36]:

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

donde,

q = Flujo de calor por unidad de tiempo por unidad de área, (W/m^2).

k = Conductividad térmica ($W/m \cdot K$).

$\frac{dT}{dx}$ = Gradiente de temperatura a través del medio conductor (K/m).

2.2. Proceso de rolado de anillos

El proceso de rolado de anillos comúnmente sigue los pasos que se ilustran en la figura 2.3. Primero la materia prima es cortada en base a las dimensiones finales del anillo. Usualmente, las superficies no son maquinadas. La materia prima que ha sido cortada entra a un horno hasta que alcance una temperatura homogénea. Una vez que la pieza ha sido calentada, se prensa y a este proceso se le conoce como preformado. Este paso es seguido por el punzonado, y perforado que consiste en hacer un orificio al centro de la pieza, quedando finalmente con la forma de una “dona”. Esta forma es necesaria para el rolado ya que en el orificio realizado entra el mandril, el cual da las dimensiones de los diámetros de la pieza.

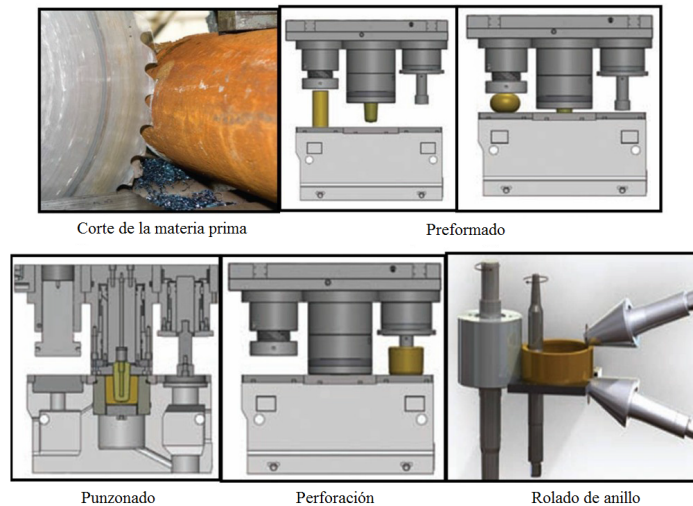


Figura 2.3: Proceso de manufactura de anillos [Ajax Ring, 2011]

2.3. Etapas en el temple

El temple se refiere al proceso de enfriar partes de acero desde el punto de austenización (típicamente dentro de un rango de 815 °C a 870 °C para aceros grados maquinaria) lo suficientemente rápido para formar martensita y evitar la formación de fases más suaves como la bainita, perlita y ferrita. La martensita, es una fase metaestable con una estructura sobresaturada en carbono, por lo que deforma a la estructura cúbica centrada en el cuerpo formando una estructura tetragonal [34]. El proceso de temple es entonces definido por la extracción de calor. La función principal del medio de temple es controlar la rapidez con la que se extrae calor de la pieza para controlar sus propiedades mecánicas, como: dureza, resistencia a la tensión y ductilidad. El medio de temple debe además, minimizar la distorsión generada por los esfuerzos residuales asegurando la uniformidad en toda la pieza.

Los métodos para determinar la efectividad en los medios de temple pueden ser divididos en dos categorías: mecánicos y térmicos. Los procedimientos mecánicos usualmente emplean mediciones de dureza en la superficie de las partes templadas, con el objetivo de determinar la profundidad de la formación de martensita, midiendo de forma indirecta la efectividad del medio aplicado. En cambio los procedimientos térmicos involucran la medición del tiempo requerido para enfriar entre temperaturas específicas, determinando la razón de enfriamiento en una muestra estándar [15].

El estudio del desempeño del temple por medio del análisis de las curvas de enfriamiento es cada vez más utilizado y quizá el método más informativo desde el punto de vista de caracterización del medio de temple. La curva de enfriamiento producida cuando un componente, inicialmente muy por encima de la temperatura de ebullición del medio de temple, es introducido al líquido, es mucho más compleja de lo que sugiere la ley de enfriamiento de Newton. La transferencia de calor es controlada por diferentes mecanismos [32], tal como se muestra en la figura 2.4, donde se puede observar que existen diferentes etapas en el enfriamiento. La máxima transferencia de calor ocurre durante la ebullición nucleada (Etapa B).

2.3.1. Etapa A, formación de capa de vapor.

La primera fase o etapa A de enfriamiento es caracterizada por la formación de una película de vapor alrededor de la pieza, cuando la pieza caliente de acero se encuentra con el líquido comienza la formación de burbujas en la interfase caliente. Inicialmente, la nucleación y tasas de crecimiento de las burbujas son tan rápidas

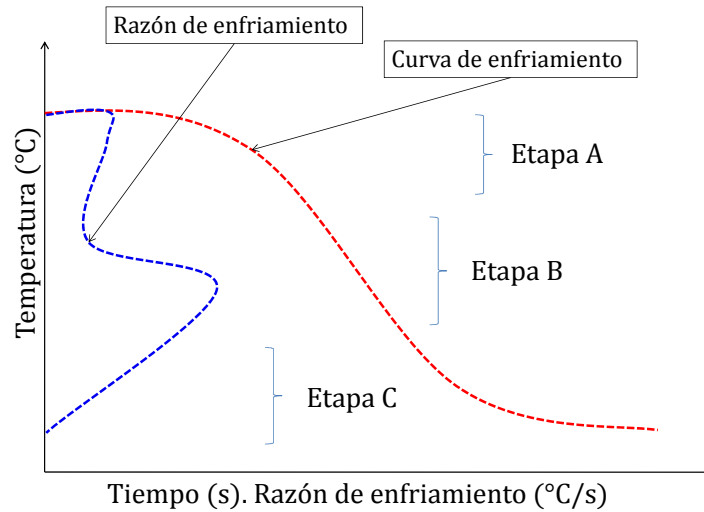


Figura 2.4: Mecanismo de enfriamiento.

que la superficie de acero es cubierta con una capa continua de vapor.

La capa de vapor se mantiene mientras el suministro de calor proveniente del interior de la pieza hacia la superficie excede la cantidad de calor necesaria para evaporar el medio. Un enfriamiento relativamente lento ocurre durante este periodo, a causa de que el vapor actúa como un aislante y el enfriamiento ocurre principalmente por radiación a través de la película de vapor. La temperatura a la cual la capa de vapor es totalmente mantenida es llamada la temperatura característica del líquido, también conocida como la temperatura de Leidenfrost [15, 34].

La etapa de la película de vapor usualmente no se presenta en piezas templadas en soluciones acuosas que contienen más del 5% en peso de algún material iónico como

cloruro de potasio, cloruro de litio, hidróxido de sodio, o ácido sulfúrico. Cuando los cristales de las sales se depositan en la superficie del metal por precipitación desde la fase de vapor y son calentados a alta temperatura, éstos se expanden bruscamente en forma de pequeñas explosiones, rompiendo así la película de vapor y facilitando el contacto con líquido fresco y la nucleación de más burbujas de vapor. Como resultado, la duración de la fase de la película de vapor es acortada o algunas veces esta etapa no se presenta y es remplazada por la etapa B o de ebullición nucleada. Y de manera inversa, la transferencia de calor en gases como el aire o gases inertes ocurre exclusivamente por un mecanismo de capa de vapor [32].

Modelo de transferencia de calor

El coeficiente de transferencia de calor durante la fase de película de vapor es generalmente expresada como la suma del coeficiente convectivo h_c , y un coeficiente de radiación efectiva (fh_r), donde f es una constante. El coeficiente de transferencia de calor tiene diferentes expresiones dependiendo de la geometría y orientación de la pieza templada. Para el caso de la película de vapor en *placas horizontales*, Colver *et al* [37] han propuesto un modelo con un alto grado de compatibilidad con resultados experimentales en cuatro líquidos orgánicos. Para el mínimo flujo de calor en la capa de vapor, el coeficiente de calor convectivo puede ser calculado usando la ecuación 2.3:

$$h_c = 0.425 \left\{ \frac{(k_G)^3 H'_{fg} \rho_G g (\rho_L - \rho_G)}{\mu_G (T_w - T_{sat}) [g_c \sigma / g (\rho_L \rho_G)]^{1/2}} \right\} \quad (2.3)$$

esta ecuación también puede ser expresada de la forma generalizada:

$$(Nu_B)_f = 0.425(Ra_B^*)^{1/4} \left[\frac{H'_{fg}}{C_{pG}(T_w - T_{sat})} \right]_f^{1/4} \quad (2.4)$$

donde,

$$(Nu_B) = \frac{h_c B}{k_G}$$

$$(Ra_B^*) = Gr_B^* Pr_G = \left[\frac{B^3 \rho_G (\rho_L - \rho_G)}{\mu_G^2} \right] \left(\frac{C_{pG} \mu_G}{k_G} \right)$$

$$B = \text{Longitud de referencia de Laplace} = \left[\frac{g_c \sigma}{g(\rho_L - \rho_G)} \right]^{1/2}$$

y el subíndice f significa que las propiedades físicas del vapor son evaluadas a la presión ρ_L y la temperatura T_f . Para la capa de vapor en *cilindros horizontales*, Colver *et al* [37] sugieren la siguiente correlación,

$$(Nu_B)_f = 0.369 \left[\frac{Ra_B^*}{(T_r)^2} \right]_f^{0.267} \left[\frac{H'_{fg}}{C_{pG}(T_w - T_{sat})} \right]_f^{0.267} \quad (2.5)$$

la cual está basada en sus estudios de metano, etano, propano y *n*-butano en la superficie de un cilindro horizontal de 20.574 *mm* de diámetro por 101.6 de largo. Para la película de vapor en una *superficie vertical*, Bomley [38] recomienda una ecuación muy similar a la ec. 2.5, con un cambio en la longitud característica *D* y *L* es la distancia vertical desde la base. Hsu y Westwater [39] modificaron la correlación considerando la frontera por encima de la superficie caliente y su transición de un flujo laminar a uno turbulento. La correlación se vuelve:

$$(Nu_L)_f = 0.943(Ra_L^*)^{1/2} \left\{ \frac{H_{fg}[1 + 0.34C_{pG}(T_w - T_{sat})/H_{fg}]^2}{C_{pG}(T_w - T_{sat})} \right\}^{1/2} \quad (2.6)$$

Las ecuaciones 2.4, 2.5 y 2.6 pueden ser combinadas y simplificadas de la siguiente forma:

$$(Nu_L)_f = M(Ra)_L^m \left[\frac{AH'_{fg}}{C_{pG}(T_w - T_{sat})} \right]^n \quad (2.7)$$

donde *M*, *A*, *L* y *n* son parámetros. De la ecuación 2.7 y la definición de número *Ra*, se puede ver que la transferencia de calor puede ser afectada por factores tales como la viscosidad, tensión superficial, la densidad de la capa de vapor y el líquido, el calor latente y el calor específico. Si estas propiedades son conocidas, entonces el coeficiente de transferencia de calor en la fase de la capa de vapor puede ser calculado. Entre ellos el coeficiente de transferencia de calor es proporcional al recíproco de la viscosidad del medio de temple.

2.3.2. Etapa B, ebullición nucleada

Las razones de enfriamiento ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$) más altas ocurren en la etapa B o también llamada fase de ebullición nucleada. Mientras el acero se enfría, la razón de nucleación y crecimiento de burbujas de vapor se vuelve más pequeña, y, cuando una región de vapor se rompe desde la superficie sometida a las fuerzas boyantes del líquido, fluido fresco reemplaza al anterior líquido desplazado. Este líquido frío y fresco es calentado al punto de ebullición y el vapor es formado nuevamente; una vez alcanzado cierto tamaño, esta burbuja se libera. El proceso es repetido porque en esta etapa el líquido más frío es constantemente puesto en contacto con la superficie caliente y evaporado, el acero es enfriado más rápidamente y la más alta extracción de calor es lograda [32].

Modelo de transferencia de calor

Con la progresiva disminución de la temperatura, la película de vapor cede y son formadas numerosas burbujas, en ese momento da lugar a que el medio de temple tenga contacto directo con la pieza caliente. El líquido que se encuentra cerca de la superficie es calentado rápidamente y tiende a evaporarse. Las burbujas transportan el calor latente y la transferencia de calor es muy alta.

El calor removido de la superficie caliente por medio de la ebullición del líquido es asumido que sigue los siguientes mecanismos:

- El calor es absorbido por un microcapa de evaporación (q_{ME}).
- La energía calorífica es consumida en la reformación de la capa térmica (q_R).
- El calor es transferido por convección natural turbulenta (q_{NC}) .

El flujo de calor obtenido por los tres mecanismos anteriores es [40]:

$$q_{tot} = \frac{q_{ME}t_g + q_R t_w}{t_g + t_w} + q_{NC} \quad (2.8)$$

El flujo de calor asociado con la evaporación de la microcapa está dado por [41]:

$$q_{ME} = \frac{\gamma\phi\sqrt{\pi}}{10} B^2 Ar^{0.27} Ja(\alpha_l)^{3/2} \cdot \sqrt{t_g} \rho_i H_{fg} \left(\frac{N}{A} \right) \quad (2.9)$$

donde $\left(\frac{N}{A} \right)$ es la densidad de nucleación ,

$$\gamma = \sqrt{\frac{k_s \rho_s C_{ps}}{k_l \rho_l C_{ps}}}, \quad (2.10)$$

$$\phi = \left[1 - \left(\frac{D_d}{D} \right)^2 \right] \quad (2.11)$$

y D_d es el diámetro del área seca debajo de la burbuja.

$$Ja = \frac{C_p \rho_L (T_w - T_b)}{H_{(fg)} \rho_G},$$

$$Ar = \left(\frac{g}{\nu_l^2} \right) \cdot \left(\frac{\sigma}{\rho_l g} \right)^{3/2}$$

El calor asociado con la reformación de la frontera térmica es [41]:

$$q_{NC} = 2 \sqrt{\frac{k_i \rho_i C_{pl}}{\pi t_w}} \left[\left(\frac{N}{A} \cdot a \right) \right] \cdot (T_w - T_{sat}) \quad (2.12)$$

Usando el coeficiente de transferencia de calor estimado en convección natural turbulenta de McAdams [42], el flujo de calor puede ser estimado:

$$q_{NC} = \frac{0.14 k_i}{l} (Gr \cdot Pr)^{1/3} \left[1 - \left(\frac{N}{A} \right) \cdot a \right] \cdot (T_w - T_{sat}) \quad (2.13)$$

De las ecuaciones 2.8, 2.9, 2.12 y 2.13, se puede decir que la viscosidad cinética, densidad, calor específico, calor latente, la temperatura entre la pieza caliente y el medio de temple, tensión superficial y conductividad térmica son valores que juegan un papel importante en el cálculo del flujo de calor. Además el flujo de calor es

proporcional a $(1/\nu)^n$, lo cual indica que el flujo de calor incrementa cuando la viscosidad cinética decrece.

2.3.3. Etapa C, fase convectiva

La etapa C involucra el enfriamiento del líquido y comienza cuando la temperatura de la superficie del acero alcanza el punto donde la convección del líquido es suficiente para evitar la ebullición. Por debajo de esta temperatura, la ebullición se detiene y el enfriamiento se llevará a cabo por conducción y convección dentro del medio de temple, y nuevamente la razón de enfriamiento decrece. La razón de enfriamiento en esta fase depende de la viscosidad del medio de temple. Si todos los demás factores se mantienen en las mismas condiciones, la razón de enfriamiento decrece cuando la viscosidad incrementa.

Usualmente y de manera óptima los procesos de temple requieren tener razones de enfriamiento máximos en la fase A y B para evitar la región de transformación perlítica y una razón menor en C debido a que la tendencia al agrietamiento es más probable que ocurra donde la estructura martensítica es formada [34].

Modelo de transferencia de calor

Churchill [43] sugiere una correlación de convección que es aplicable a una variedad de flujos con convección natural para los cuales la principal fuerza boyante se

dirige de manera tangencial a la superficie. La correlación es dada por:

$$\overline{Nu}_L = \left(a + 0.001b(GrPr)_L^{1/6} \right)^2 \quad (2.14)$$

donde

$$b = \frac{1.17}{\left[1 + (0.5/Pr)^{9/16} \right]^{8/27}},$$

$$Gr_x = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)}{\nu^2} \cdot x^3,$$

$$Pr_L = \frac{C_p\nu}{k_L}$$

El parámetro empírico a varía para diferentes geometrías [43].

En la fase de convección, la ecuación 2.14 muestra que la transferencia de calor puede ser relacionada con la viscosidad cinética, el calor específico, la conductividad térmica, el coeficiente de expansión térmica, la diferencia de temperatura entre la parte metálica caliente y el líquido, y también a la distancia del borde de la frontera en la capa formada a la superficie x .

Las tablas 2.3 y 2.4 muestran la definición de todas las variables que se presentan en las ecuaciones de transferencia de calor.

Tabla 2.3: Nomenclatura de índices.

a	Área de la burbuja sobre la superficie caliente
A	Área de la superficie caliente
Ar	Número de Arquímedes
B	Constante
C_p	Calor específico a temperatura cte.
D	Diámetro instantáneo de la burbuja
D_b	Diámetro de la burbuja desprendida
D_d	Diámetro del área seca debajo de la burbuja
G	Razón volumétrica de flujo
g	Gravedad
g_c	Razón de conversión
Gr	Número de Grashof
h	Coefficiente de transferencia de calor
H_{fg}	Calor latente de evaporación
Ja	Número de Jacob
K, k	Conductividad térmica
N	Número de sitios activos de nucleación
P	Presión externa
Pr	Número de Prandtl
q, q''	Flujo de calor
R_a	Rugosidad
t_g	Tiempo de crecimiento de burbuja
t_w	Tiempo en crecer una nueva burbuja
T	Temperatura
T_w	Temperatura de la pared
T_b	Temperatura de ebullición
V	Velocidad
Δp	Caida de presión
α	Difusividad térmica
γ	Parámetro
δ	Grosor de la frontera térmica
μ	Viscosidad
λ	Calor latente
ν	Viscosidad cinética
ρ	Densidad
σ	Tensión superficial
ϕ	Parámetro

Tabla 2.4: Nomenclatura de subíndices y superíndices.

Subíndices	
*	Parámetro adimensional
<i>crit</i>	Valor crítico
<i>l</i>	Líquido
<i>sat</i>	Saturación
<i>tot</i>	Total
<i>v</i>	Vapor
<i>w</i>	Pared
<i>s</i>	Sólido
Superíndices	
<i>f</i>	Líquido saturado
<i>fg</i>	Cambio de fase, de líquido a vapor
<i>g, G</i>	Refiere a condición de gas o vapor

2.4. Temple como proceso de transferencia de calor

2.4.1. Estado de transferencia de calor inestable

La transferencia de calor es variable cuando en un sistema dado la temperatura en algún punto particular de dicho sistema cambia en el tiempo.

Los fenómenos transitorios ocurren frecuentemente en los procesos industriales, como es el templado de metales. En estas aplicaciones, la transferencia de calor es un proceso dependiente del tiempo.

Los problemas transitorios son formulados de acuerdo a un sistema de análisis de multivariantes. La transferencia de calor convectiva a través de las fronteras es importante en la formulación y solución de los problemas de conducción. La forma adimensional de las condiciones de frontera nos lleva al número de Biot (B_i), el cual relaciona la transferencia de calor por conducción dentro de un cuerpo y la transferencia de calor por convección en la superficie de dicho cuerpo [44].

$$B_i = \frac{R_{cond}}{R_{conv}} = \frac{h \left(\frac{V}{A_s} \right)}{k} = \frac{hL_c}{k} \quad (2.15)$$

- h = Coeficiente de transferencia de calor ($\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$).
- k = Conductividad térmica de la pieza templada ($\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$).
- L_c = Longitud de la pieza (m).
- A_S = El área de la superficie de la pieza (m^2).
- V = Volumen de la pieza (m^3).

Cuando la resistencia interna es despreciable (o cuando la conductividad es grande), $k/L_c \rightarrow \infty$ y $B_i \rightarrow 0$ es el caso que a una L pequeña o k grande, y permite la omisión de la variación espacial de la temperatura en sentido perpendicular a la frontera.

Cuando las resistencias internas y externas (o conductividades) son comparables, la condición general de frontera no puede ser simplificada y el problema tiene que ser resuelto en términos de esta condición.

El cálculo de los coeficientes de transferencia de calor mediante el uso del modelo hace posible la estimación de la cantidad de tiempo que le toma a un sistema alcanzar las condiciones estables [44, 45].

2.4.2. Transferencia de calor durante el temple

La disipación de calor de las piezas durante el templado puede ser matemáticamente descrita en términos de la interfase efectiva del coeficiente de transferencia de calor.

El medio de temple debe proporcionar una alta transferencia de calor para producir la velocidad de enfriamiento que minimice la transformación de austenita a ferrita o perlita y producir la cantidad deseada de martensita.

El coeficiente de transferencia de calor está dado por [45]:

$$h = \frac{q}{A(T_S - T_\infty)} \quad (2.16)$$

donde,

q = Flujo de calor de la pieza hacia el medio.

A = Área de la pieza.

T_S = La temperatura de la superficie de la pieza.

T_∞ = La temperatura del medio.

La interfase del coeficiente de calor bajo condiciones de interés puede ser deter-

minada registrando la curva de enfriamiento usando un termopar localizado en el centro geométrico de alguna probeta con dimensiones particulares. La razón de enfriamiento puede ser determinada sobre un rango de temperatura particular a fin de estimar el coeficiente de transferencia de calor.

La ventaja de conocer o determinar experimentalmente la interfase producida por un medio de temple específico bajo condiciones bien conocidas es que estos valores pueden ser usados con confianza en elemento finito, o en diferencias finitas en transferencia de calor; para modelar el comportamiento de las piezas o componentes que de hecho no estén instrumentados.

2.4.3. Determinación del coeficiente de transferencia de calor usando análisis inverso

El problema inverso es definido como aquél donde el objetivo buscado o el valor a ser determinado no es estimable directamente por experimentos y las conclusiones concernientes a estas características son elaboradas siguiendo la medición de parámetros de manera indirecta. Los procesos del efecto pueden ser determinados por los cambios de temperatura localizados en el centro geométrico de la probeta, donde las dimensiones de la probeta pueden ser usadas en la teoría del modelo agrupado de capacitancia [46, 47].

El historial medido de temperatura es usado como un valor de entrada para el modelo inverso de conducción de calor a fin de estimar el coeficiente de calor en la

interfase de metal y medio de temple.

Modelo agrupado de capacitancia

En el proceso de temple, la transferencia de calor es dinámica. Cuando las propiedades térmicas del objeto de investigación y las condiciones térmicas de su superficie son tales que la temperatura interior del cuerpo varía uniformemente en el tiempo; y el cuerpo a cualquier instante de tiempo es isotérmico, el método agrupado de capacitancia es un análisis conveniente, simple y preciso. Si la parte está inmersa en $t = 0$ en el medio enfriante con $T_\infty < T_i$, la temperatura dentro del cuerpo T_i decrece suave y monótonamente, para eventualmente alcanzar el equilibrio al valor de la temperatura T_∞ .

El calor es transferido dentro del cuerpo por conducción; y desde la superficie de la pieza hacia el fluido circundante por convección. Si la resistencia térmica del cuerpo es pequeña comparada con la del fluido ($B_i \leq 0.1$), entonces el campo de temperaturas instantáneas dentro del cuerpo es uniforme, y los gradientes de temperatura interna son despreciablemente pequeños. La ecuación del balance de energía entonces toma la forma particular [45]:

$$E_{out} = E_{st} \quad (2.17)$$

E_{st} = Cambio de energía térmica almacenada en el sólido. La ecuación que describe este proceso es:

$$E_{st} = \rho V C_p(T) \frac{dT}{dt} \quad (2.18)$$

E_{out} = Energía térmica transferida entre la pieza y los alrededores del fluido. La ecuación usada para describir este mecanismo es:

$$E_{out} = h A_S (T_S - T_\infty) \quad (2.19)$$

esto significa:

$$h A_S (T_S - T_\infty) = \rho V C_p(T) \frac{dT}{dt} \quad (2.20)$$

donde,

T_S = Temperatura de la superficie de la pieza ($^{\circ}\text{C}$).

T_∞ = Temperatura del medio de temple ($^{\circ}\text{C}$).

ρ = Densidad del material (Kg/m^3).

$C_p(T)$ = Calor específico ($\text{J}/\text{Kg } ^{\circ}\text{C}$).

T = Temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Resolviendo la ecuación 2.20:

$$h = \frac{\rho V C_p(T) \frac{dT}{dt}}{A_S (T_S - T_\infty)} \quad (2.21)$$

Aplicación del método agrupado de capacitancia

La razón entre la resistencia interna (conductividad) y la externa (convectiva), es decir, el intercambio de calor entre el sólido y el fluido puede ser denotado por el número de Biot.

Esta cantidad juega un papel importante en la evaluación del proceso de conducción de calor interna con las condiciones de convección de la superficie, y eso puede ser usado para validar el método para un caso particular. Esencialmente, $B_i \leq 0.1$ significa que la conducción térmica del cuerpo es mucho menor que la debida a la convección.

Por lo tanto, puede ser usado con seguridad. De este tipo de análisis se pueden esperar estimaciones dentro de un rango con 5% de error [48, 49].

2.5. Análisis de las curvas de enfriamiento

La manera más útil de describir con precisión el complejo mecanismo de temple es obteniendo una curva de enfriamiento para el medio de temple bajo condiciones controladas. El análisis de la curva resultante puede conducirnos a la obtención de los datos de la transferencia de calor en función de la temperatura [27].

Los parámetros obtenidos para las curvas de enfriamiento son:

- La razón de enfriamiento máxima (\dot{T}_{max}):
Usualmente es deseable que la \dot{T}_{max} ocurra en el rango de temperatura donde se encuentra la región de transformación de la ferrita y perlita, si es que la máxima dureza es deseada, ya que esto asegura llegar a la transformación martensítica.
- La razón de enfriamiento alrededor de 300 °C (\dot{T}_{Ms}):
La razón de enfriamiento en esta región es donde ocurre la transformación de austenita a martensita debe ser minimizada para reducir las posibilidades de agrietamiento y distorsión [4].

2.5.1. Efecto de los parámetros de temple en las curvas de enfriamiento

Varios factores pueden afectar el potencial de extracción de calor del medio de temple, incluyendo:

Medio de temple

El propósito del medio temple es controlar la transferencia de calor de la pieza de metal. El tipo de medio usado tiene un efecto muy importante en la razón de enfriamiento. Muchos materiales y soluciones han sido usados como medios de temple

para los aceros. Las razones de enfriamiento más altas se han obtenido usando agua o salmuera. Menos drásticas han sido a través del uso de polímeros diluidos en agua, aceite y algunas sales. Obteniendo los menores enfriamientos en el aire, atmosferas de gases inertes o vacio [1,18].

Temperatura del medio

La temperatura del medio de temple afecta su capacidad de extracción de calor. Sin embargo, no siempre es cierto que un medio de temple más frío dará tasas de extracción más rápidas. El agua pierde su capacidad de enfriar conforme se acerca a su punto de ebullición, pero este no es el caso del aceite, el cual va perdiendo viscosidad conforme la temperatura se incrementa. La reducida viscosidad del aceite compensa cualquier habilidad de temple que se haya visto reducida a causa del incremento de temperatura.

Incrementar la temperatura de la pieza tiene relativamente poco efecto en su habilidad para transferir calor hacia el medio de temple debido a la gran diferencia de temperatura con el medio de temple. El cambio más notable en la habilidad de transferir calor quizá provenga de la mayor oxidación en la pieza a altas temperaturas; esto puede incrementar o decrementar la capacidad de transferencia de calor, esto dependerá del espesor de la capa de óxido formada [4,27].

Agitación

La agitación o la circulación forzada del medio de temple tienen una muy marcada influencia en la transferencia de calor. Ambos causan un rompimiento mecánico de la película de vapor en la etapa A, y produce burbujas más pequeñas promoviendo además la separación más frecuente de estas durante la etapa B. Puede romper mecánicamente o desalojar geles y sólidos de la superficie de la pieza, facilitando así la transferencia de calor durante la etapa C. La agitación además hace circular el líquido fresco para reemplazar el líquido caliente que rodea a la pieza. La agitación también puede ser realizada por el movimiento de las piezas dentro del medio, a través del bombeo para la recirculación o por la agitación mecánica del fluido [4,50].

Concentración y degradación de polímeros de temple

La función principal de un polímero de temple es lograr optimizar la uniformidad en la transferencia de calor en un proceso de templado. Para los polímeros de temple, esto se logra por la formación y subsiguiente ruptura y remoción de una película de aislante que se forma alrededor del metal caliente al momento de la inmersión en el medio.

Al momento de templar una pieza, se forma en todo el contorno caliente una película de polímero que controla la transferencia de calor. La transferencia de calor de la película es dependiente del espesor (función de la concentración) y de la viscosi-

dad (función del tipo del polímero y de la temperatura del líquido). El momento de la formación, ruptura y remoción depende de la resistencia de la película de polímero, y la agitación (dirección y magnitud) [51].

Uno de los problemas es la falta de uniformidad de la transferencia de calor debido a los contaminantes insolubles, como son los depósitos de lodo, los aceites de corte, y aceites hidráulicos. Las gotas de aceite rompen la película uniforme de polímero, produciendo gradientes térmicos indeseables en la superficie de la pieza templada.

Los contaminantes solubles como sales también pueden estar presentes. Las fuentes de sales incluyen arrastres de piezas, agua de reposición de la tina, y productos de corrosión. Los iones metálicos como el calcio, magnesio y el hierro pueden ser adicionados al sistema por dilución subsecuente al proceso. La contaminación de sal acelera la velocidad de enfriamiento.

Algunos contaminantes solubles, a menudo en concentraciones de ppm, causan la formación de espuma e incrementa el aire atrapado durante la agitación.

La degradación del polímero, en la que se produce una reducción en el peso molecular, puede ocurrir por dos procesos físicos. Degradación mecánica que puede encontrarse cuando un polímero con peso molecular alto ($>50,000uma$) se somete a una alta agitación, como los temples por aspersión. La segunda es la degradación térmica donde todos los polímeros son susceptibles [52].

Los polímeros también pueden ser degradados por procesos biológicos, principalmente causado por bacterias y hongos. La degradación biológica es minimizada por la agitación diaria del fluido. Incluso es frecuente agregar bactericidas y/o fungicidas para reducir esta fuente de degradación.

Capítulo 3

Trabajo experimental I (Agitación)

Contenido

3.1	Introducción	48
3.1.1	Sistema de medición	49
3.2	Procedimiento	51
3.3	Plan experimental y resultados	53
3.3.1	Doble álabe	56
3.3.2	Triple álabe	57
3.3.3	Arreglo de n -agitadores	59
3.3.4	Resumen de resultados	64

3.1. Introducción

La severidad del temple es dependiente de la agitación [50]. Por lo tanto, la magnitud y turbulencia del flujo alrededor de la pieza poseen una importancia crítica para la uniformidad de la transferencia de calor a través del proceso térmico [53].

El volumen del tanque y la velocidad del fluido son algunos factores que determinan los resultados del templado. El campo de velocidades dentro del tanque es un factor central que determina el coeficiente de transferencia de calor a través del proceso convectivo de enfriamiento [54].

Con el objetivo investigar y entender como el diseño del tanque de temple afecta la uniformidad del fluido se ha realizado la determinación de las velocidades promedio de diferentes modelos de agitadores, también se ha estudiado el efecto de la colocación del accesorio llamado “*jetring*” en los agitadores, cuya finalidad es reducir las pérdidas de caudal debidas a recirculación y componentes radiales y tangenciales de velocidad.

3.1.1. Sistema de medición

El anemómetro es un aparato destinado a medir la velocidad relativa de un flujo. La mayoría de los anemómetros están diseñados para medir la velocidad del viento, sin embargo otros están diseñados para medir velocidades en flujos líquidos.

Existen diferentes tipos de anemómetros, y estos se diferencian en el proceso físico en que se basan para hacer la medición, algunos de ellos usan:

- La variación de velocidad de rotación de una hélice.

- La fuerza que se obtiene al enfrentar una superficie al movimiento del fluido.
- La diferencia de temperatura entre dos filamentos metálicos calentados por igual, uno sometido a un flujo y otro en calma.
- Métodos ultrasónicos.
- Métodos láser.

Anemómetro de hélice

Para hacer las mediciones del presente estudio se ha utilizado un anemómetro de hélice. En este tipo de anemómetros, la hélice se encuentra conectada a un pequeño generador eléctrico, cuyo voltaje generado es proporcional a la velocidad de rotación de la hélice. Este voltaje se mide en un voltímetro, donde la escala ha sido calibrada para dar lecturas de velocidad.

En la figura 3.1 se muestra una imagen del equipo utilizado para la adquisición de las lecturas de velocidad.



Figura 3.1: Pantalla y hélice del anemómetro.

3.2. Procedimiento

Una vez ubicado y en funcionamiento el modelo de agitador de interés se procedió a sumergir a diferentes profundidades el anemómetro de hélice en la misma dirección del eje vertical centrado en el agitador, como muestra la figura 3.2. Para cada punto (marcado con \times en la figura) se ha registrado la lectura de al menos diez mediciones del flujo axial, reportando la media aritmética. También se reporta la lectura de las mediciones de ejes paralelos a la vertical con desplazamientos laterales.

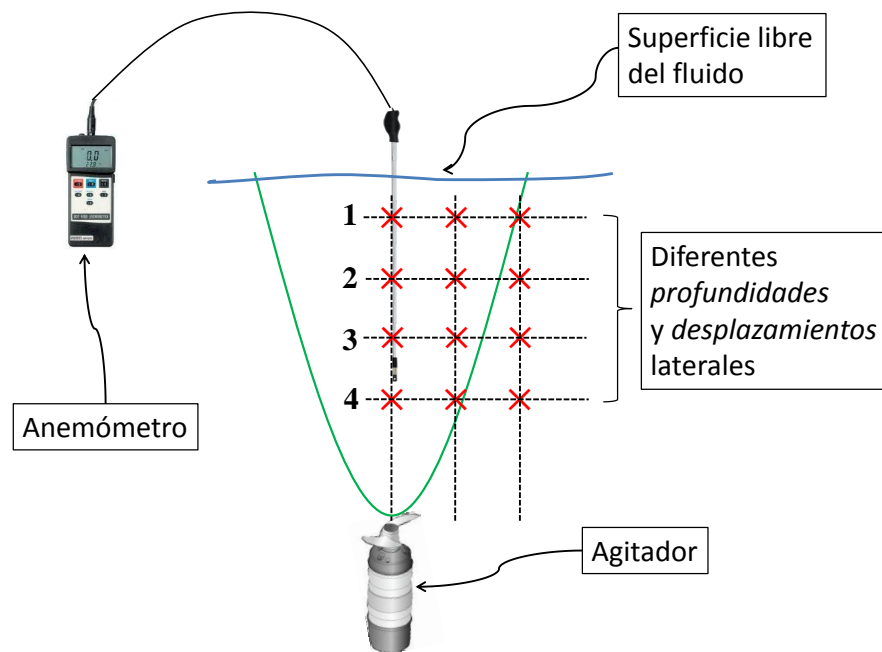


Figura 3.2: Representación esquemática de mediciones con anemómetro.

3.3. Plan experimental y resultados

Exordio

El sistema de agitación de los tanques bajo estudio consiste de agitadores axiales, que son dispositivos que al girar alrededor de un eje producen una fuerza propulsora a través de sus hélices.

Las hélices se fabrican cambiando el ángulo de incidencia de forma decreciente desde el eje (mayor ángulo) hasta el extremo libre (menor ángulo). Al girar a mayor velocidad en el punto circunferencial, que en la parte más cercana al eje, es necesario compensar esta diferencia para producir una fuerza uniforme. La solución consiste en disminuir este ángulo desde el centro hacia los extremos, de una forma progresiva, y así la menor velocidad pero mayor ángulo en el centro de la hélice se va igualando con una mayor velocidad pero menor ángulo hacia los extremos. Cada álabe está formado por un conjunto de perfiles hidrodinámicos que van cambiando progresivamente su ángulo de incidencia desde la raíz hasta el extremo (figura 3.3).

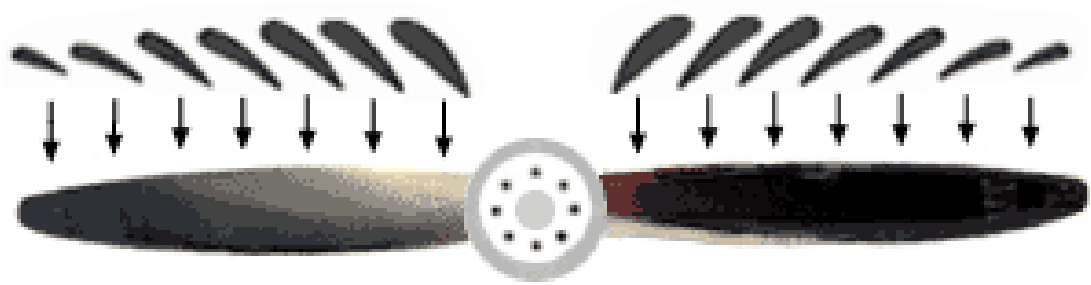


Figura 3.3: Perfiles y ángulos de incidencia en una hélice.

Mientras sea menor el ángulo de la hélice, se encuentra con una menor resistencia del medio, por lo que puede girar más libre y rápidamente, permitiendo un mejor desarrollo de la potencia del motor. Por otro lado, cuando el ángulo es mayor, encuentra una mayor resistencia, lo que conlleva a menor velocidad angular en la hélice y un desarrollo de potencia menor, sin embargo esta condición mueve una cantidad mayor de volumen.

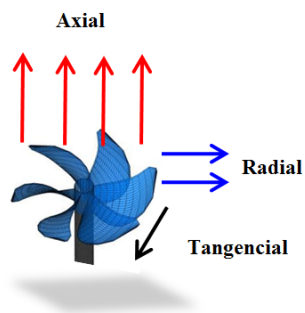


Figura 3.4: Componentes de velocidad; en **rojo** axial, **azul** radial, y **negro** tangencial.

La velocidad del flujo inducida por un agitador posee tres componentes (ver figura 3.4), longitudinal (o axial), radial, y rotacional (o tangencial); siendo la primera la de mayor magnitud.

3.3.1. Doble álabe

Ángulos de 7° y 13°

A continuación se muestra esquemáticamente en la figura 3.5 la distribución de velocidades en dirección vertical de un par de agitadores actuando de manera independiente.

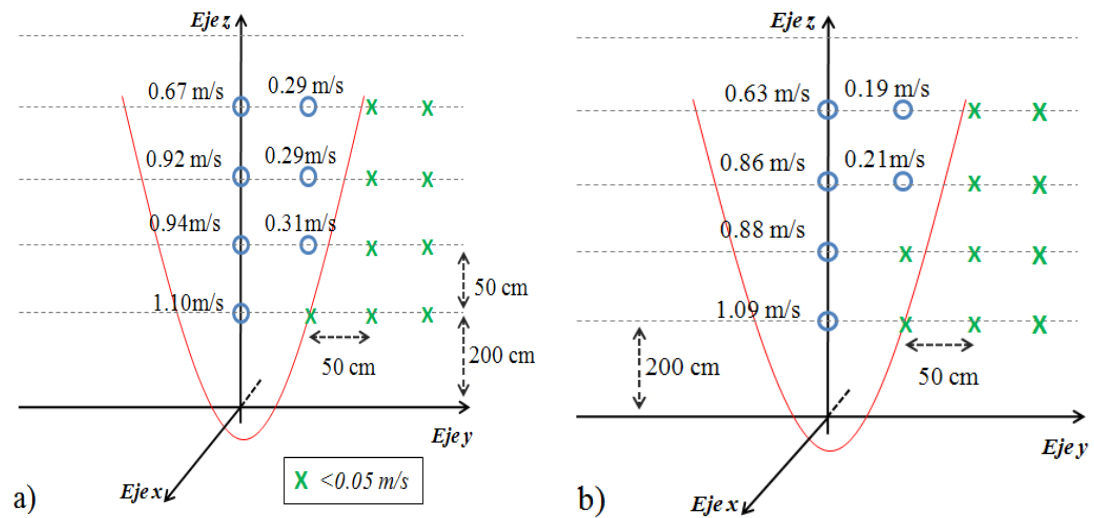


Figura 3.5: Medición de vel. del flujo inducido por hélices con ángulos de a) 7° y b) 13° .

3.3.2. Triple álabe

Con y sin *jetring*

El fluido desplazado por un agitador es principalmente en dirección axial, pero también es cierto que existe la influencia (en su mayoría) del flujo radial. El *jetring* (ver figura 3.6) reduce las pérdidas debidas a este cambio de dirección, así como las mermas por recirculación.

También el *jetring* permite incrementar la eficiencia (del consumo de energía eléctrica) en agua (10-15%), ver figura 3.6, e incluso más en medios de mayor viscosidad [55].

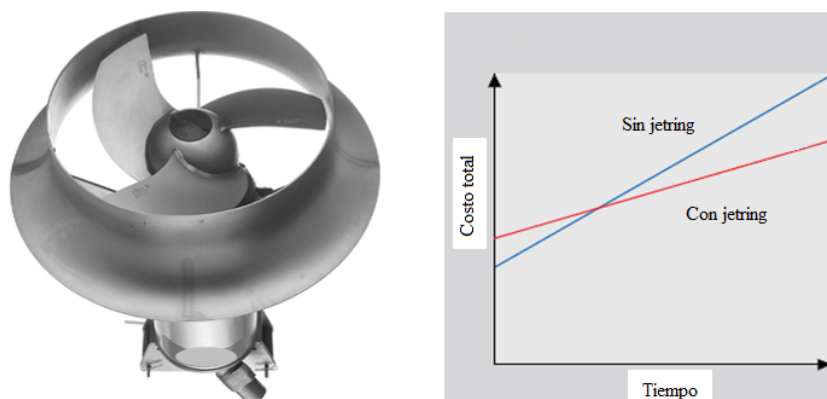


Figura 3.6: Hélice triple con *jetring* y gráfica comparativa de su uso.

Con y sin *jetring*

A continuación se muestra esquemáticamente en la figura 3.7 la distribución de velocidades en dirección vertical de un par de agitadores actuando de manera independiente. El ángulo de las hélices en este tipo de agitador se mantuvo de 25° .

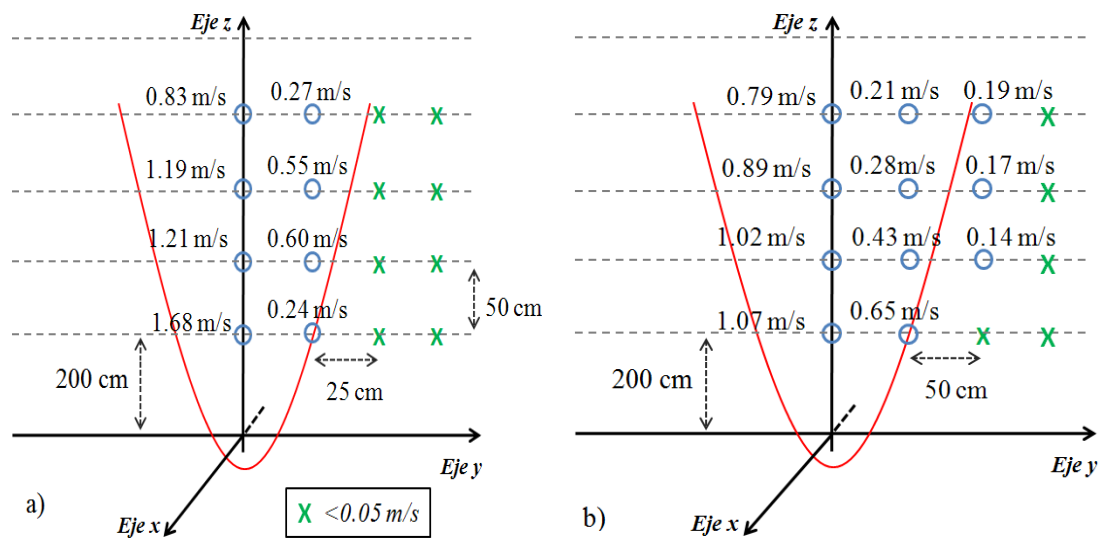


Figura 3.7: Medición de vel. del flujo inducido por hélices triples con (a) y sin *jetring* (b).

3.3.3. Arreglo de n -agitadores

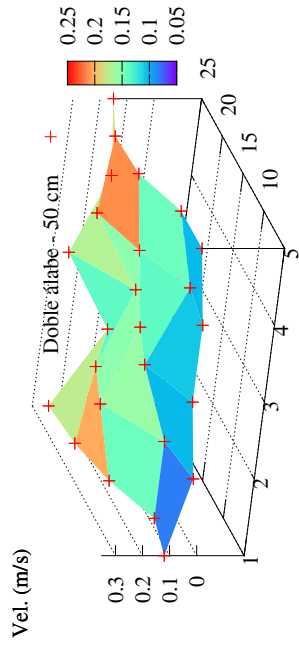
En secciones anteriores hemos visto como influye la posición de la medición en la distribución de velocidades para distintos tipos de agitadores, incluso el cambio de estas distribuciones debido al uso del *jetring* para el caso de hélices con triple álabe.

La presente sección muestra los resultados de las mediciones de agitación para configuraciones de más de un agitador. La metodología es la misma que se ha planteado anteriormente en la sección 3.2, con la diferencia de que en este caso, con más agitadores, se ha trazado una matriz cuadrada de puntos equidistantes en los que se sumerge el anemómetro a distancias de 50 *cm*, 100 *cm* y 150 *cm* medidos desde la superficie libre del fluido, siendo un total de 25 puntos para cada profundidad. Con esto, el objetivo es desarrollar un entendimiento del campo de velocidades para un arreglo de varios agitadores, ya que invariablemente existirá una interacción entre los flujos individuales modificando totalmente la dinámica de flujos.

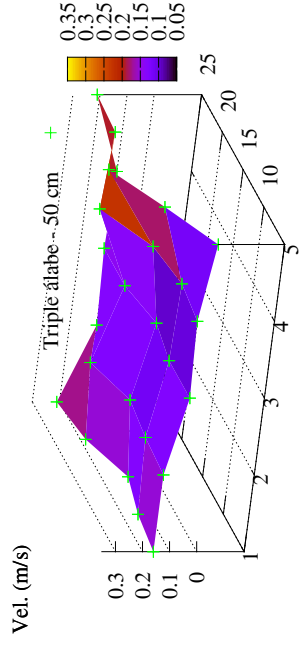
En las figuras 3.8, 3.9 y 3.10 se muestran las gráficas comparativas de las matrices de puntos obtenidas a través de las mediciones de agitación para las distancias (desde la superficie libre) de 50 *cm*, 100 *cm* y 150 *cm* respectivamente. El primer cuadro (a), muestra la magnitud de la agitación (*m/s*) del arreglo de agitadores con hélice de doble álabe, el cuadro (b) es similar, mostrando la gráfica del caso de hélices con triple álabe, el cuadro (c) muestra las dos superficies superpuestas en el mismo marco de referencia para hacer evidente las diferencias, y por último el cuadro (d) muestra con detalle la mediciones punto a punto de la agitación. La fila de datos

1-5 representa el ancho el tanque, la fila 6-10 representa los datos en un posición posterior a los primeros, y así hasta llegar a la fila 20-25 que es la parte posterior del tanque.

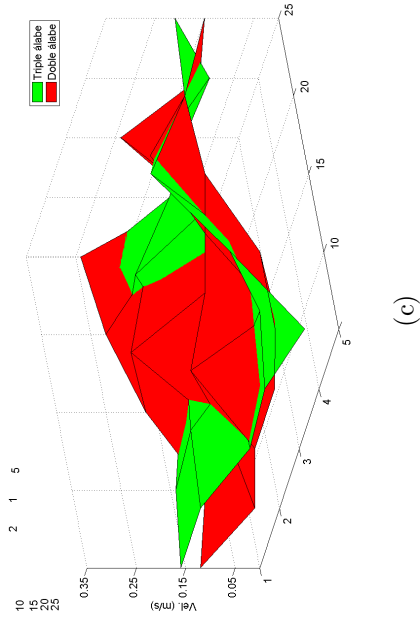
A 50 cm de la superficie libre del fluido



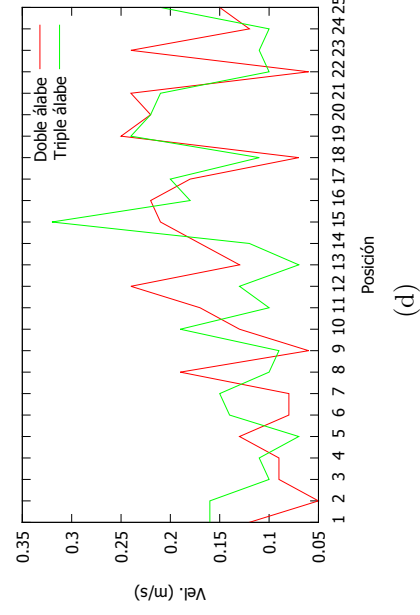
(a)



(b)



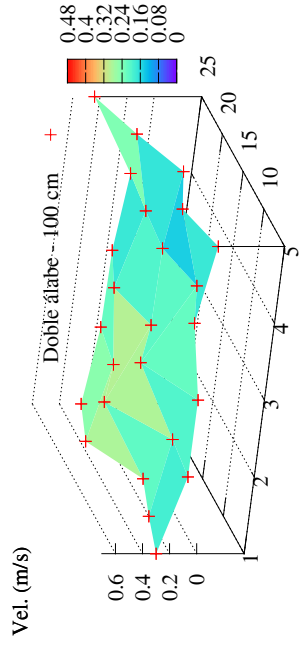
(c)



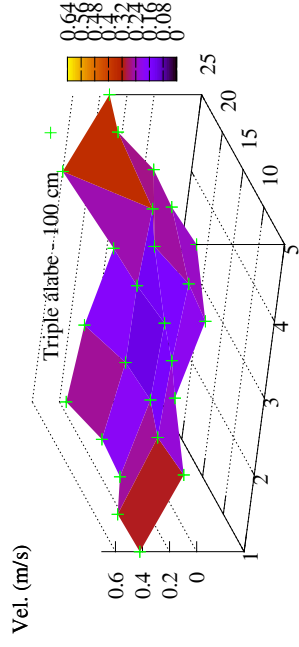
(d)

Figura 3.8: Comparativa de velocidades entre doble y triple álabes (sin jetring) por posición medida.

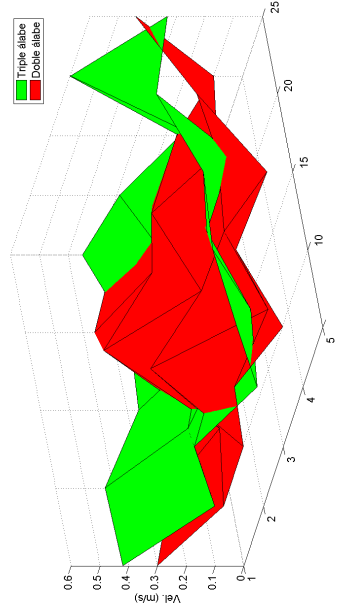
A 100 cm de la superficie libre del fluido



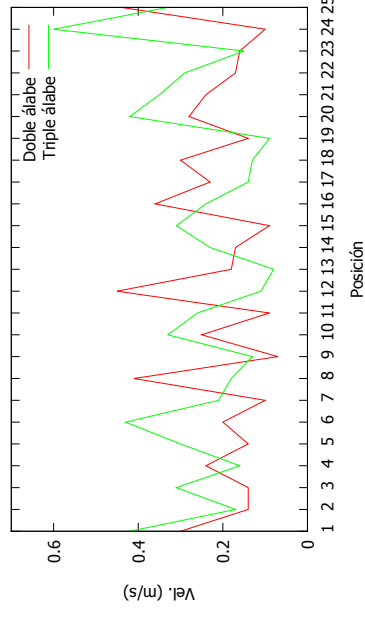
(a)



(b)



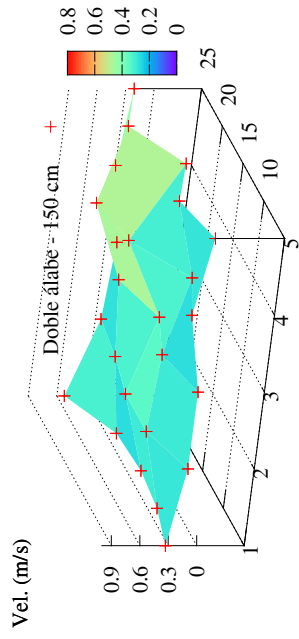
(c)



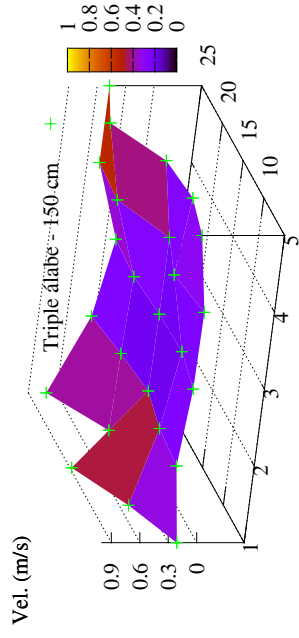
(d)

Figura 3.9: Comparativa de velocidades entre doble y triple álabes (sin jetring) por posición medida.

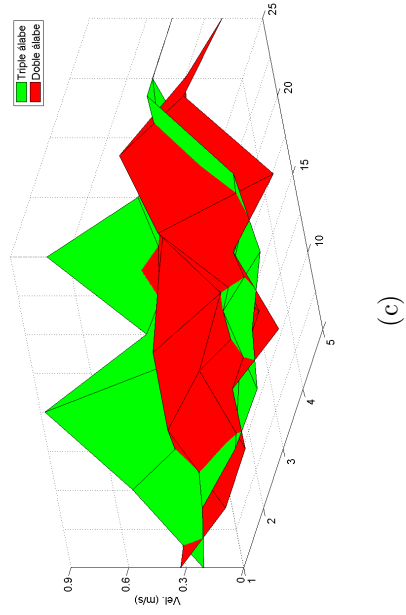
A 150 cm de la superficie libre del fluido



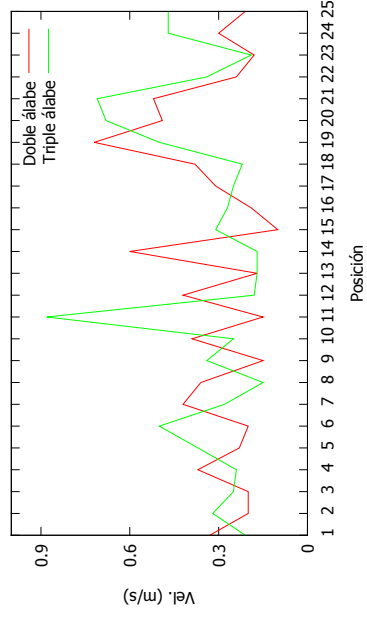
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.10: Comparativa de velocidades entre doble y triple álabe (sin jetring) por posición medida.

3.3.4. Resumen de resultados de agitación

La medición del flujo inducido por hélices dobles de diferente ángulo (figura 3.5) arroja como resultado que el caso donde el ángulo es de 7° , la distribución de velocidades es mayor en comparación al de 13° . La razón (como se explica en el exordio) es que la hélice de 13° al tener un ángulo mayor, encuentra una mayor resistencia del medio a fluir, y este efecto se ve reflejado en una menor magnitud de las mediciones de velocidad.

En el caso del uso del *jetring* como podemos ver en la figura comparativa 3.7, su uso incrementa la eficiencia del agitador en la dirección del flujo principal. La magnitud de las velocidades en esta dirección es evidentemente mayor al caso donde no se usa el accesorio. Sin embargo, al verse minimizadas las componentes de velocidad radial y tangencial la amplitud del chorro en el plano horizontal se ve afectada, siendo reducida.

En las figuras 3.11 y 3.12 se muestra un resumen estadístico de las velocidades de agitación. Por medio de la prueba de Anderson-Darling se rechaza la hipótesis de normalidad en los datos para la totalidad de puntos en ambos casos, doble y triple álabe. En la tabla 3.1 se muestra con detalle las medias aritméticas y desviaciones estándar para cada profundidad y caso; aquí el subíndice «*d*» indica *doble* álabe y «*t*» *triple* álabe.

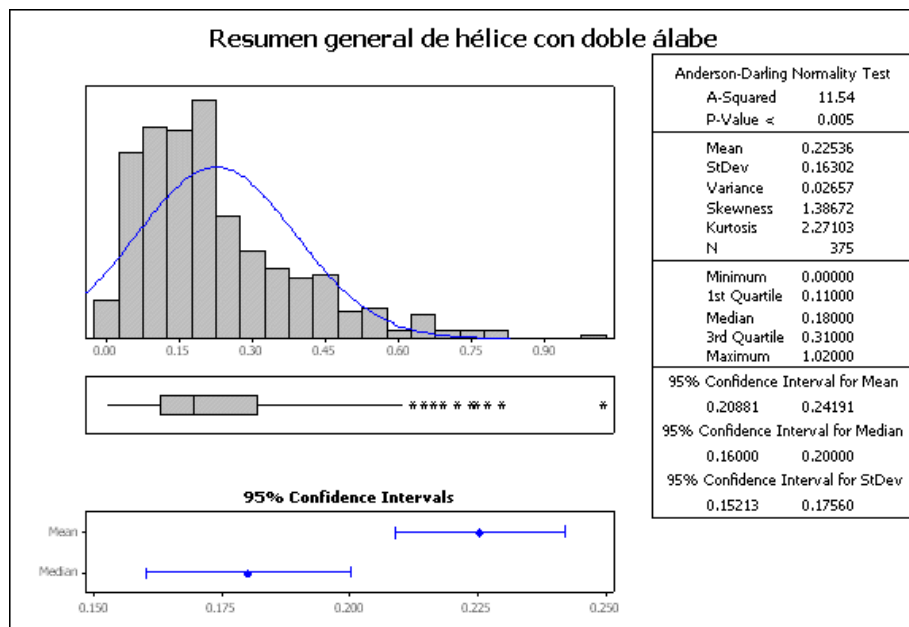


Figura 3.11: Resumen estadístico de agitación con hélice de doble álabe.

Los resultados muestran que la velocidad promedio del flujo inducido por agitadores de doble álabe es de 0.22 m/s , en cambio, los de triple álabe es de 0.25 m/s , esto significa una diferencia del 11.2%. De tomar en cuenta la referencia [56], este último caso es más adecuado para asegurar una mejor remoción de calor en la pieza a templar y asegurar así el tratamiento térmico a aplicar.

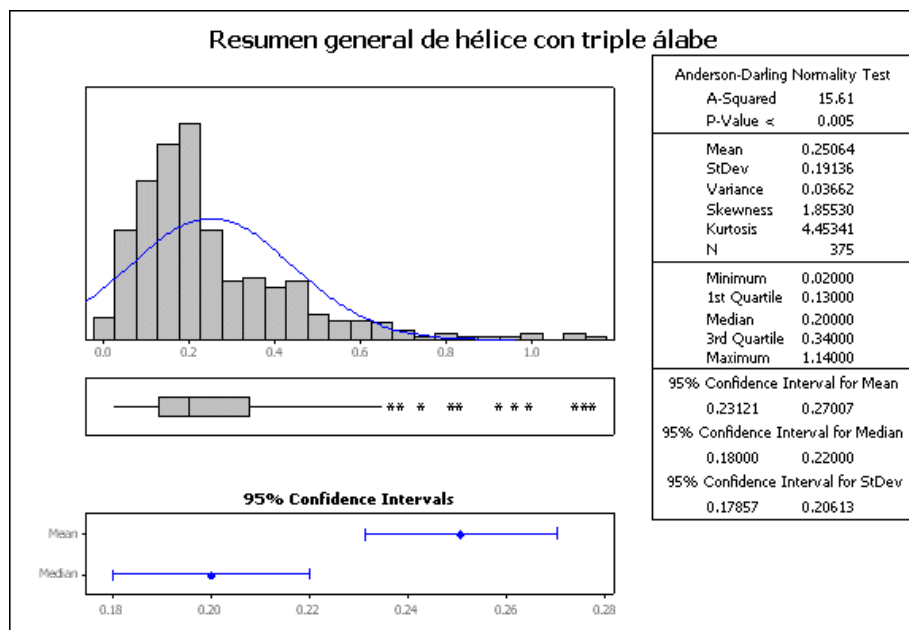


Figura 3.12: Resumen estadístico de agitación con hélice de triple álabes.

Tabla 3.1: Media aritmética y desviación estándar de agitación.

Distancia (<i>cm</i>)	\bar{x}_d (<i>m/s</i>)	\bar{x}_t (<i>m/s</i>)	σ_d (<i>m/s</i>)	σ_t (<i>m/s</i>)
50	0.1471	0.1477	0.1001	0.0944
100	0.2154	0.2547	0.0207	0.1665
150	0.3135	0.3494	0.1877	0.2308

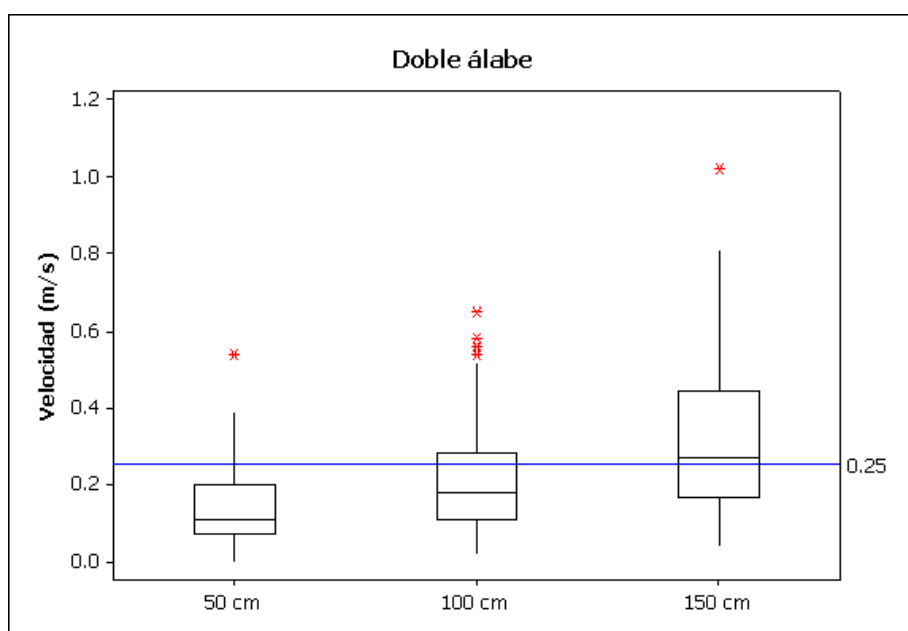


Figura 3.13: Diagrama de caja para mediciones con hélice de doble álabe.

Los diagramas de caja mostrados en las figuras 3.13 y 3.14 son representaciones gráficas de los valores estadísticos mencionados en los párrafos anteriores. En estos, se muestran los datos mínimos y máximos, cuartiles y puntos atípicos. Son herramientas muy útiles de comparación entre grupos de datos. En secciones anteriores se ha mostrado la diferencia entre el uso de diferentes tipos de agitadores, en cambio aquí, mediante diagramas de caja, se muestra como varía la velocidad conforme el punto de medición se aleja de la fuente impulsora de fluido. Se ha incluido el valor de 0.25

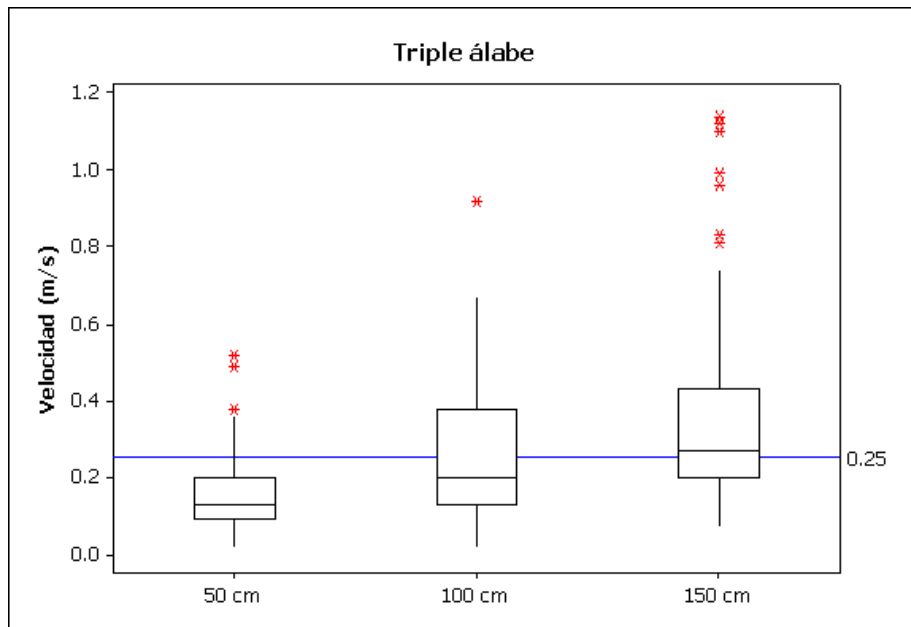


Figura 3.14: Diagrama de caja para mediciones con hélice de triple álabes.

m/s (línea horizontal) como referencia de valor crítico mínimo de velocidad para el caso del temple de acero tipo 4140. En estos gráficos se observa que el valor mínimo crítico es superado por el valor medio de la velocidad, solamente en las posiciones de 150 cm de profundidad.

Capítulo 4

Dinámica de Fluidos Computacional

Contenido

4.1	Introducción	69
4.1.1	Un agitador	71
4.1.2	n -agitadores	75
4.1.3	Enfriamiento de un anillo	76

4.1. Introducción

Aunado al Trabajo Experimental I (Capítulo 3) concerniente a la agitación y de medición de velocidades, se incluye un estudio de la dinámica de fluidos por métodos computacionales (CFD, por sus siglas en inglés). Lo cual constituye un método de modelación cada vez más usado como herramienta para estudiar la uniformidad de los fluidos en tanques de enfriamiento.

Se decidió usar CFD para conocer a fondo el comportamiento del medio de temple y la forma en que afecta a la piezas.

El flujo isotérmico y turbulento del agua dentro de un tanque de temple ha sido modelado por medio de CFD. Los propósitos son, primero: desarrollar y fomentar un entendimiento del campo de velocidades del flujo existente dentro del tanque, y segundo: proveer un panorama diferente de conceptos vinculados al diseño que permitan la evolución de los tanques de temple.

Incropera y Dewitt [57] sugieren que la mayor parte del enfriamiento durante el temple, ocurre después de la desaparición de la película de vapor. La temperatura de Leidenfrost es la temperatura en la cual la capa de vapor colapsa permitiendo que el líquido se mantenga en contacto directo con la pieza. En particular, para el caso de baños a baja temperatura, la temperatura de Leidenfrost puede ser influenciada fuertemente por la velocidad del fluido [58].

Un modelo matemático que analice y prediga todos los efectos que controlan el proceso de temple sería muy demandante, computacionalmente hablando. Un modelo completo requeriría soluciones simultáneas para tres ecuaciones de momento, conservación de masa, parámetros de turbulencia, balance de energía, fenómeno de ebullición, así como modelos de transformación de fases del acero. El enfriamiento de piezas es dependiente del tiempo, por lo tanto un modelo completo tendrá que ser además transitorio. Con el fin de hacer el CFD manejable, algunas simplificaciones fueron tomadas, por ejemplo se ha tomado al líquido como un medio incompresible, estable, e isotérmico.

El CFD se realizó sobre una plataforma ANSYS[®], utilizando el programa ANSYS FLUENT[®] 13.0 [59]. Las condiciones físicas utilizadas corresponden a un tanque prototipo.

4.1.1. Un agitador

Vectores de velocidad

En la figura 4.1 se representa el flujo de un agitador a través de un mapa de vectores, la escala indica la magnitud de la velocidad (m/s) en ese punto, y se muestra a la izquierda de la figura.

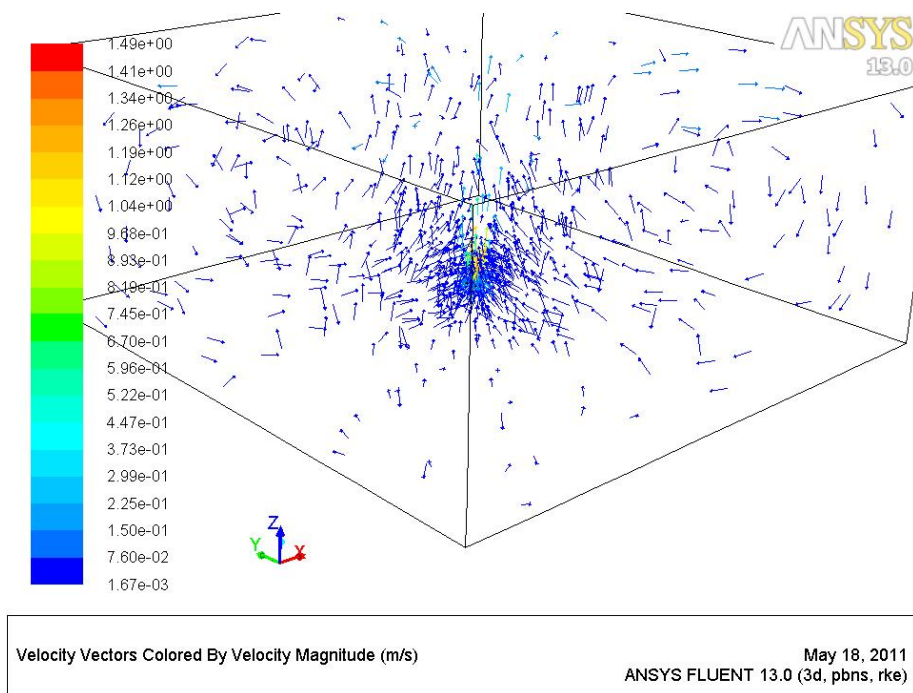


Figura 4.1: Campo de velocidades tridimensional.

Planos de contornos

Se puede observar de la figura 4.2 que el fluido que sale del agitador¹ forma un fuerte chorro en la parte inferior del tanque, y este va decreciendo conforme se acerca a la superficie libre del fluido.

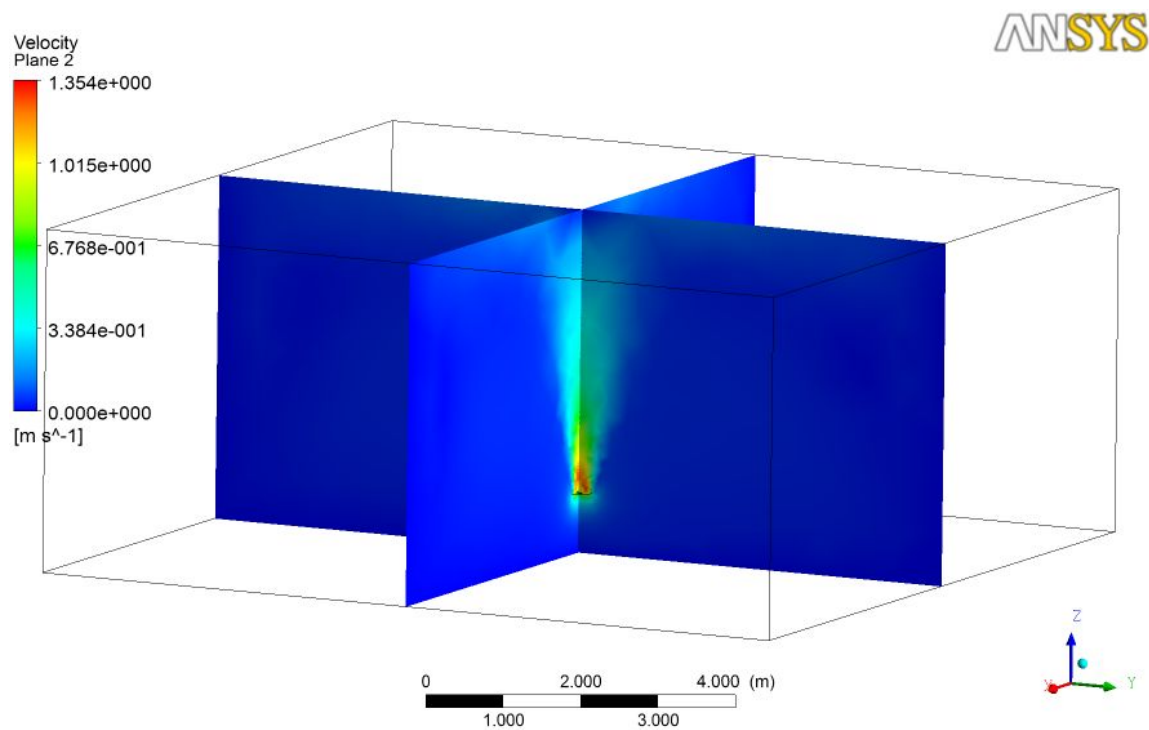


Figura 4.2: Contornos de velocidad mostrados en planos verticales.

¹Superficie representativa de las condiciones de frontera.

Trayectorias

Además, la trayectoria del flujo es dibujada según la magnitud de velocidad, figura 4.3. Se puede observar una leve recirculación de las trayectorias.

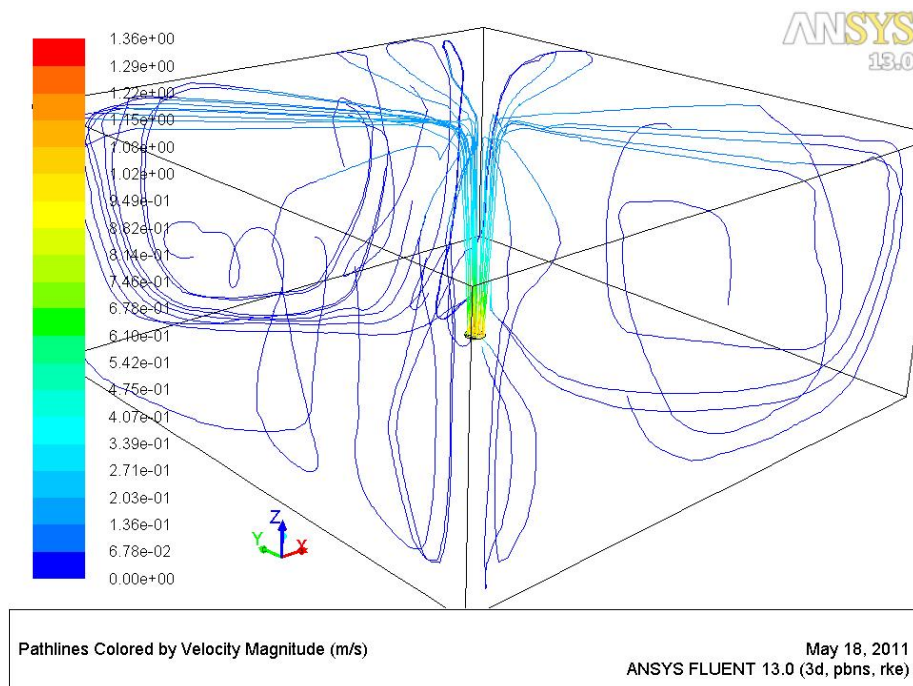


Figura 4.3: Contornos de velocidad mostrados en planos verticales.

4.1.2. *n*-agitadores

Trayectorias y volumen

La figura 4.4 muestra las trayectorias de los flujos de varios agitadores y se ve claramente que la dinámica de fluidos cambia totalmente al existir la interacción de flujos vecinos. La figura 4.5 es el resultado de una simulación transitoria de 41 agitadores con condiciones de fronteras idénticas.

Debido a la interferencia que se da entre los esfuerzos cortantes sobre el medio y combinado con la recirculación se observa una agitación más caótica que en el caso de un sólo agitador.

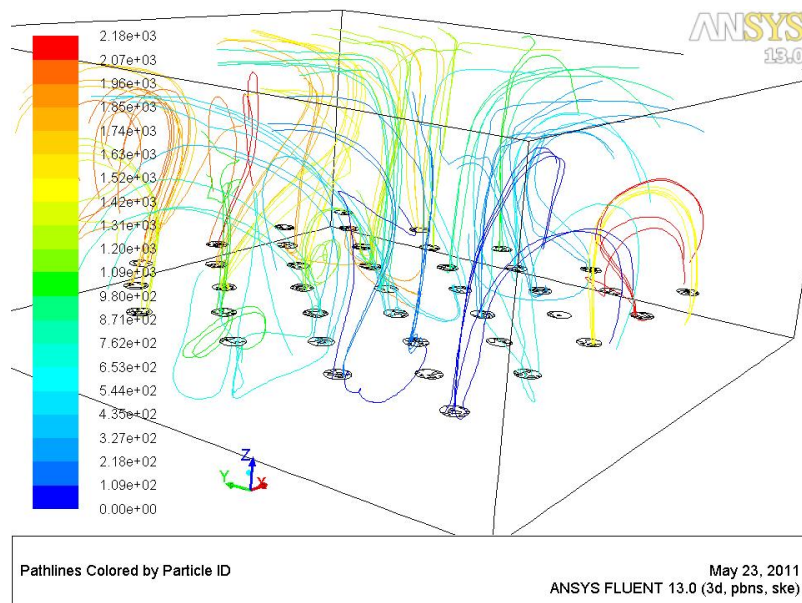


Figura 4.4: Trayectoria de flujos debido a 41 agitadores.

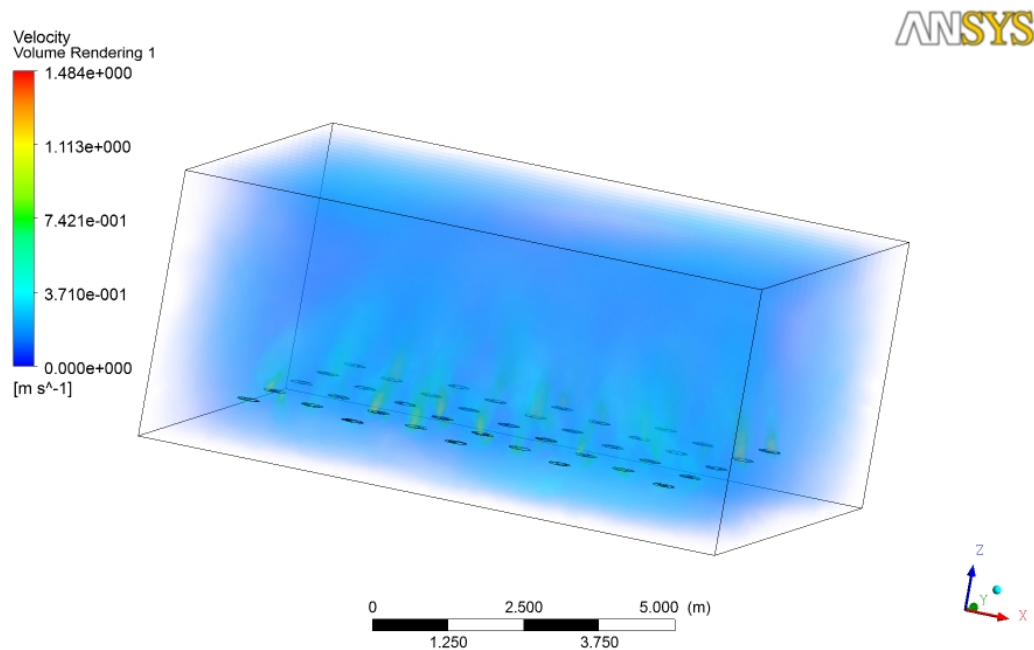


Figura 4.5: Simulación del volumen completo.

4.1.3. Enfriamiento de un anillo

El campo de velocidades dentro del tanque es un factor central que determina la transferencia de calor a través del proceso convectivo de enfriamiento.

Dos modelos de agitación han sido simulados para un sistema de temple en un tanque de forma rectangular. Para analizar el comportamiento se ha considerado un sistema de agitación en el fondo del tanque y el otro por medio de una agitación principalmente lateral en un intento de homogenizar el enfriamiento sobre la geometría de la pieza a templar. En esta simulación se ha evaluado la velocidad del flujo, sus

trayectorias y flujo del calor desde la pieza hacia el medio de temple.

Agitación inferior

Se simuló la dinámica de fluidos y transferencia de calor en un tanque con un sistema de agitación inferior, la pieza sujeta al temple es un anillo cuya temperatura inicial es de 850 °C, mientras que la del medio (agua) es de 25 °C. La figura 4.6 muestra la dinámica de los chorros simulados, y el grupo de gráficos de la figura 4.7 muestra la evolución del enfriamiento en dicho anillo. En esta figura se observa el gradiente de temperaturas a lo largo del perfil del anillo, debido a la posición geométrica del mismo sobre la dirección del eje principal del flujo del medio de temple.

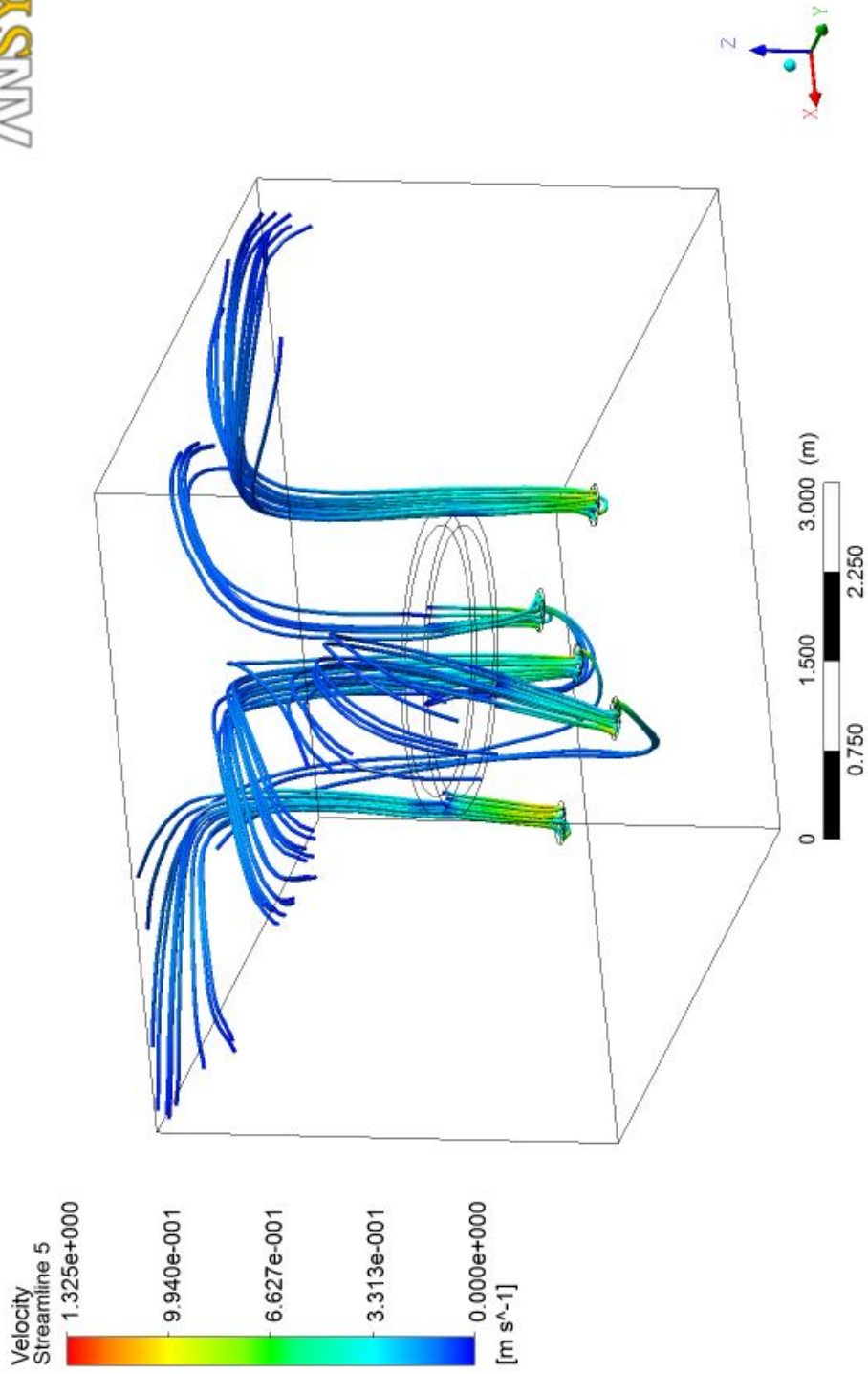


Figura 4.6: Trayectorias coloreadas según la magnitud de la velocidad.

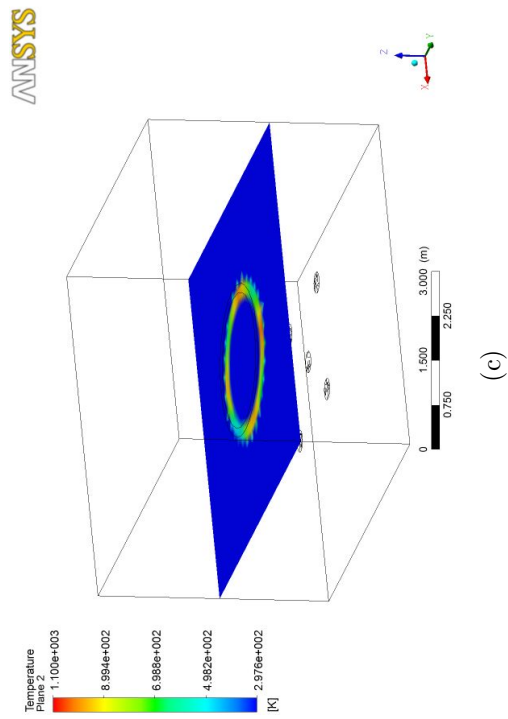
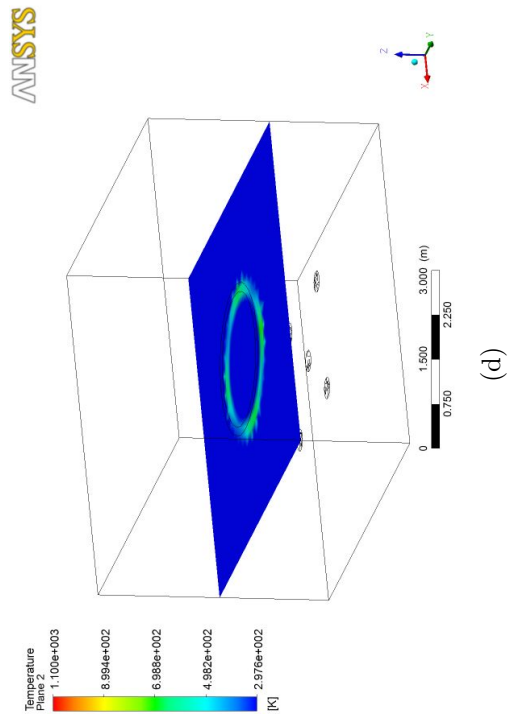
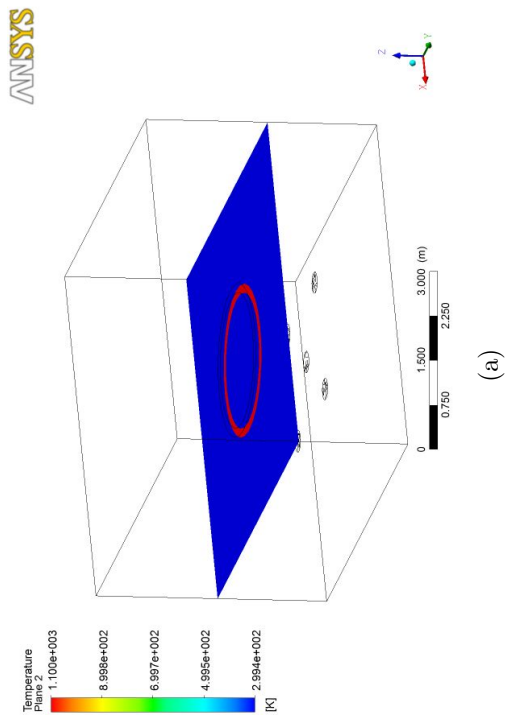
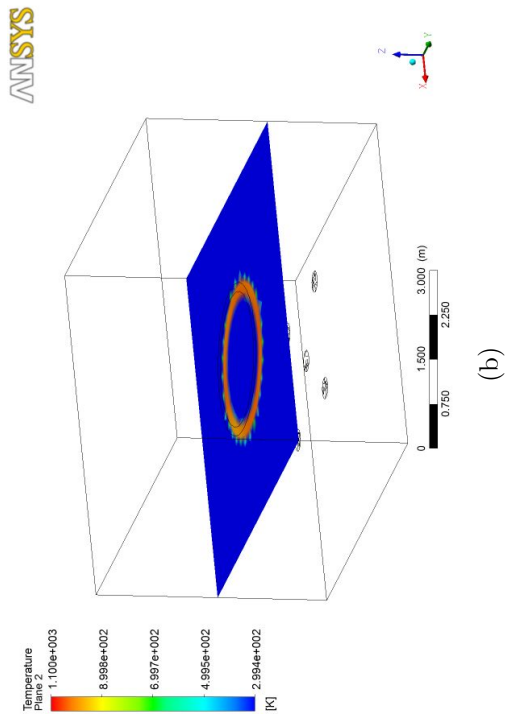


Figura 4.7: Simulación del enfriamiento de un anillo, a la izq. se muestra la escala de temperatura en K .

Agitación lateral

En la figura 4.8 se propone un rediseño del sistema de agitación que cuenta con el mismo tipo y número de agitadores, a diferencia del caso anterior aquí se han colocado cuatro agitadores en posición lateral y únicamente se ha conservado el agitador central del fondo. Este rediseño muestra una dinámica de fluidos totalmente diferente a la de agitación inferior. Se puede observar en el plano medio del tanque un mapa de velocidades del flujo cuya dirección y ángulo de los chorros de agitación es tal que permite el envolvimiento de la pieza en una distribución menos heterogénea de velocidades; también es posible ver como a lo largo de la circunferencia aparecen vectores de velocidad tangentes a la geometría del anillo.

El grupo de gráficos de la figura 4.9 muestra como la evolución en el flujo de calor del anillo hacia el medio de temple es más homogéneo a lo largo de todo el transitorio.

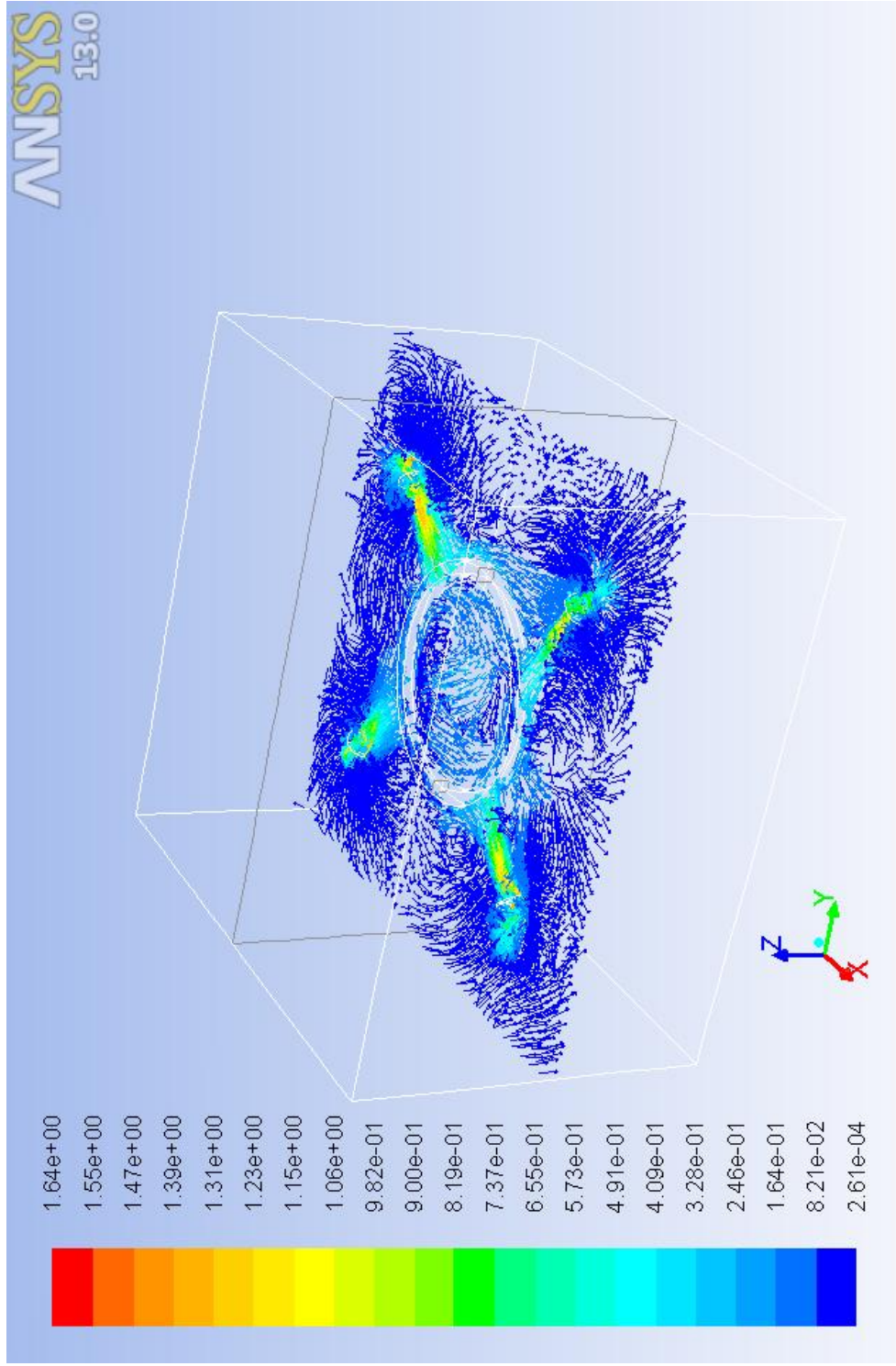


Figura 4.8: Mapa de vectores de velocidad sobre un plano medio del tanque.

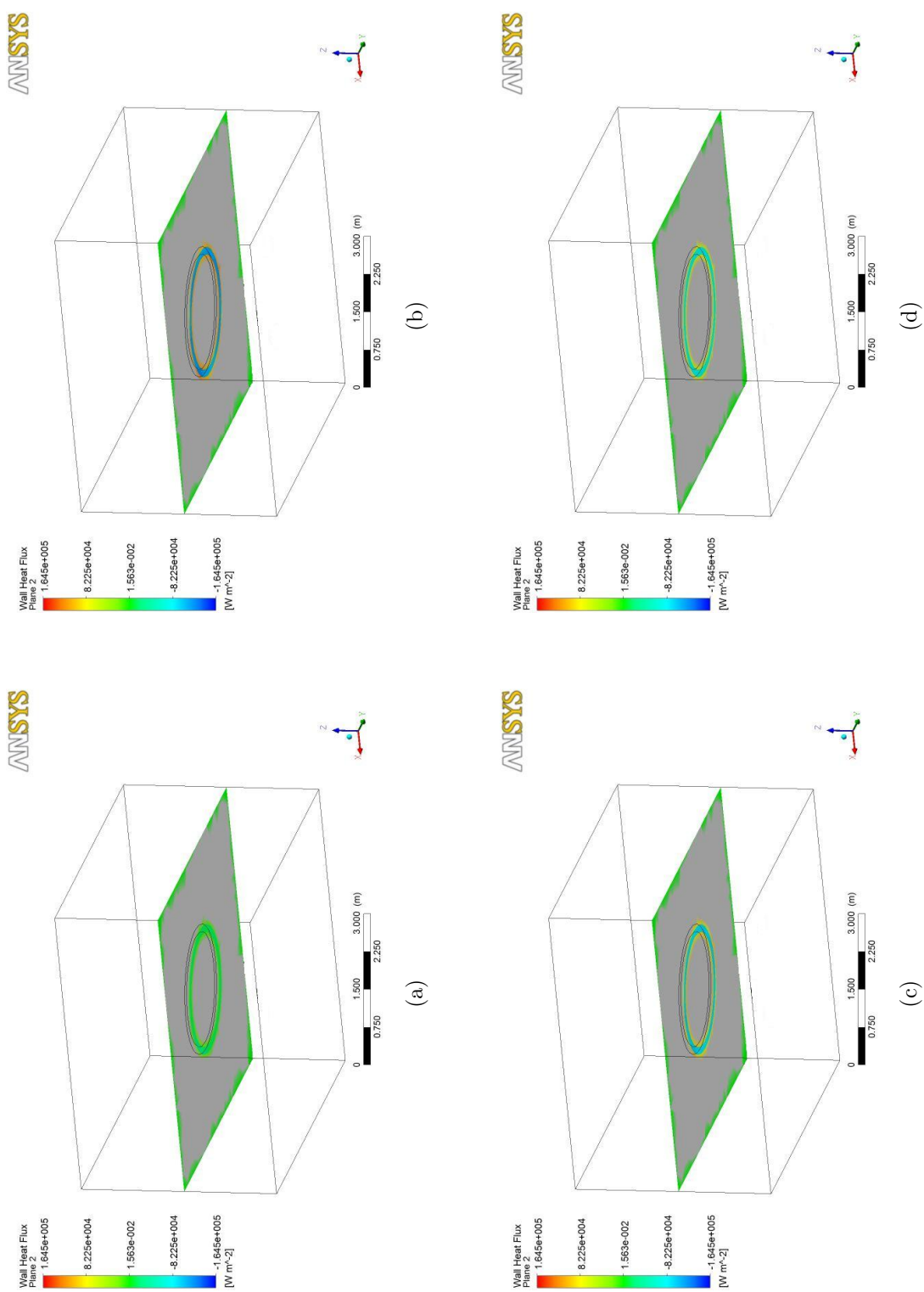


Figura 4.9: Simulación del enfriamiento de un anillo, a la izq. se muestra la escala de temperatura en K .

Capítulo 5

Trabajo experimental II (Templado)

Contenido

5.1	Introducción	84
5.2	Sistema de temple	84
5.2.1	Horno	86
5.2.2	Tanque	86
5.2.3	Termopar	86
5.2.4	Sistema de adquisición de datos	87
5.2.5	Probeta	88
5.3	Procedimiento y preparación de probetas	88
5.4	Análisis de datos	90
5.5	Plan experimental	90
5.5.1	Diferente condición de polímero	90
5.5.2	Diferente material	91
5.5.3	Caso de estudio: Pieza de dimensiones mayores	91

5.1. Introducción

En el presente Capítulo, la preparación de la probeta y el sistema de temple usados para generar los datos necesarios (razón de enfriamiento) serán descritos. Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor es necesario el registro del historial de temperatura de la muestra. Los detalles experimentales como el método para analizar los datos registrados serán explicados también.

En la figura 5.1 se pueden observar los detalles del trabajo experimental como un diagrama de flujo, mostrando los factores considerados y resumiendo las condiciones de la prueba.

5.2. Sistema de temple

Algunos investigadores previamente han utilizado diferentes probetas para predecir el coeficiente de transferencia de calor (como se ha discutido en el Capítulo 1), pero las probetas de dimensiones mayores a los principales estándares (presentados en la sección 1.1) no son frecuentemente usadas por la dificultad en el control mismo de la pieza al ser colocada dentro del horno y su transferencia hacia el tanque de temple, debido a que su volumen y peso es mucho mayor.

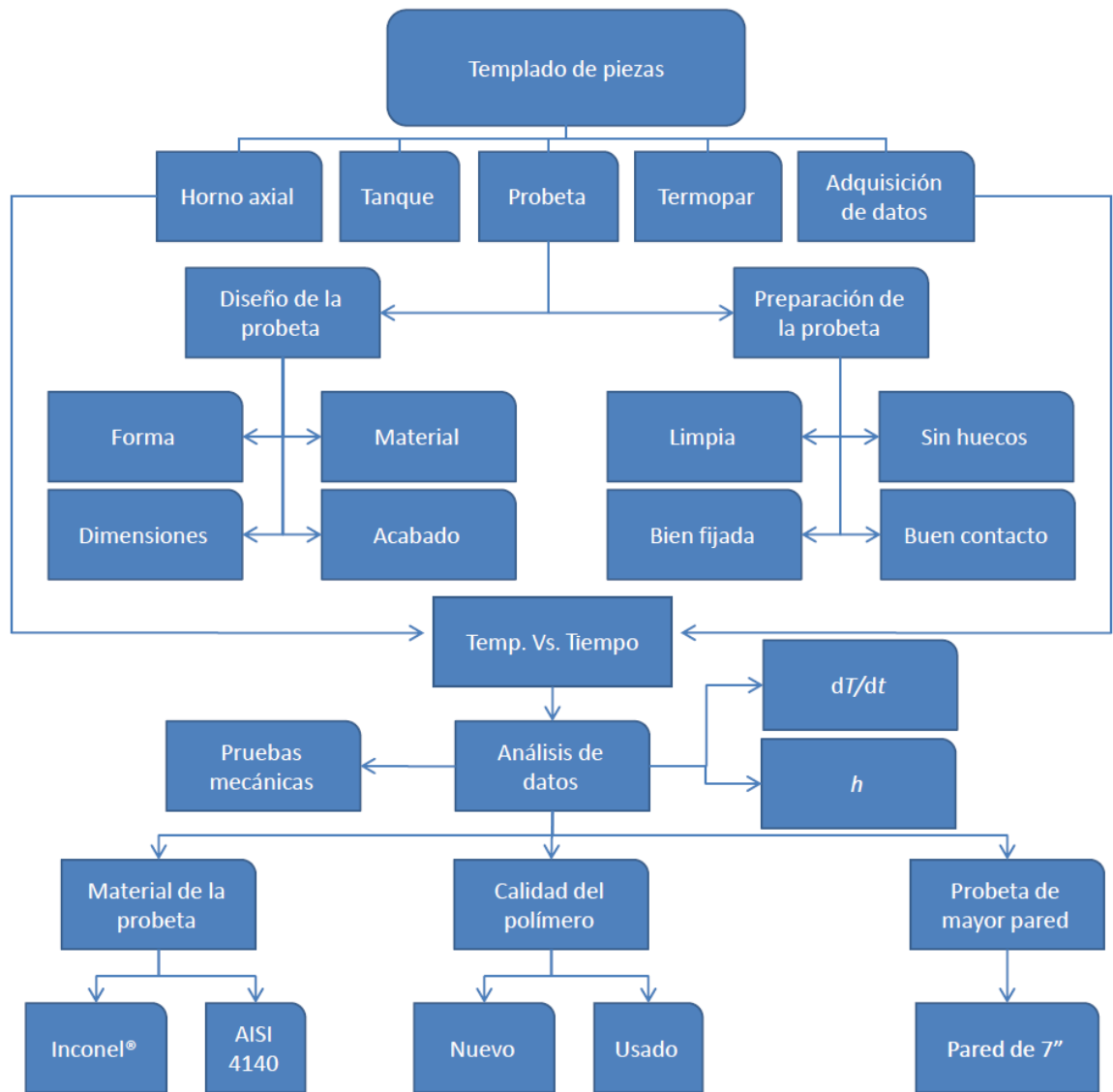


Figura 5.1: Diagrama de flujo para el trabajo experimental.

El arreglo experimental consiste en un sistema de adquisición de datos, un horno, un recipiente para contener el medio de temple y termopares tipo K. Esto permite obtener la lectura de la temperatura en el lugar que se coloque dentro de la probeta.

5.2.1. Horno

Mufla de laboratorio de resistencias eléctricas con máxima capacidad de operación de ≈ 1125 ° C; y una uniformidad promedio de temperatura de ± 8 ° C.

5.2.2. Tanque

Un recipiente de acrílico de 20 litros es usado como tanque de temple. El tamaño del tanque es suficiente para asegurarse de que no exista un cambio significativo de temperatura durante el proceso de temple.

5.2.3. Termopar

Un termopar tipo K, de 1.59 *mm* ó (1/16") de diámetro, y 3 *m* de largo fue usado para registrar los datos de la temperatura. El termopar fue insertado en el centro geométrico de la probeta a través de un orificio en la parte superior de ésta,

ver figura 5.2.

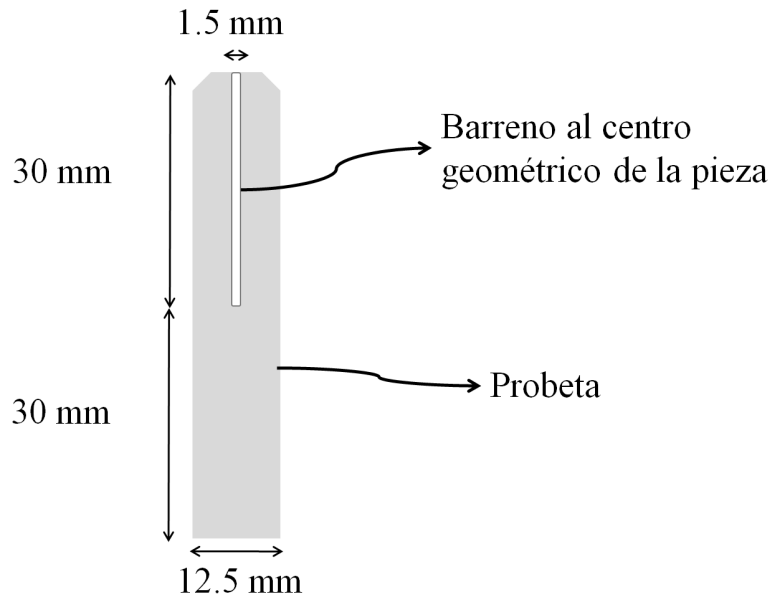


Figura 5.2: Esquema de probeta barrenada.

5.2.4. Sistema de adquisición de datos

Se utilizó un sistema de adquisición de datos comercial Eurhotherm, con capacidad de 48 canales y una máxima resolución de 8 datos por segundo.

5.2.5. Probeta

Materiales

Las probetas fueron fabricadas en acero AISI 4140 y en Inconel[®] 600 para poder caracterizar sus diferentes velocidades de enfriamiento así como coeficientes de transferencia de calor y para asegurar que el acoplamiento del flujo de calor y las transformaciones de microestructura pueden ser obtenidos.

Acabado superficial

El acabado de la superficie en todas las probetas es rectificado, a fin de evitar algún efecto adicional debido a la rugosidad de la superficie, ver figura 5.3. La rugosidad Ra del acabado fue de $0.5 \mu m$

5.3. Procedimiento y preparación de probetas

1. La probeta fue limpiada antes del temple para evitar la contaminación en la superficie de contacto y asegurarse de tener una buena lectura de la temperatura.



Figura 5.3: Fotografía de probetas maquinadas.

2. Una vez que se ha insertado el termopar se ha usado pasta de alúmina para sellar la parte superior de la probeta para evitar posibles filtraciones de la solución. Ya que estas podrían provocar una lectura errónea en el termopar.
3. La temperatura del horno fue puesta a 850 °C y mantenida por 60 minutos.
4. La probeta es retirada del horno y sumergida en el taque.
5. El sistema de adquisición de datos es apagado una vez que la probeta ha alcanzado la temperatura del medio de temple.
6. Se retira la probeta y se extrae el termopar.

5.4. Análisis de datos

En cada experimento, los datos fueron registrados a través del sistema de medición mencionado anteriormente (subsección 5.2.4). Los datos también fueron usados para calcular la razón de enfriamiento en función de la temperatura. Y la razón de enfriamiento es usada como un dato de entrada para estimar el coeficiente de transferencia de calor en la interface metal y medio de temple.

5.5. Plan experimental

5.5.1. Diferente condición de polímero

Las pruebas de temple fueron realizadas para dos diferentes condiciones de la solución de polímero. La primera como solución fresca, es decir sin haberse usado previamente, al 8% de volumen de polímero en agua. La segunda con una solución al 8% de volumen, con un uso previo de 168 horas proveniente del tanque de temple.

5.5.2. Diferente material

Fueron usados dos materiales distintos; acero AISI 4140 e Inconel[®] 600 para determinar el efecto que tiene el medio de temple sobre ellos y analizar sus curvas y velocidades de enfriamiento, además de realizar micrografías y pruebas mecánicas sobre el acero.

5.5.3. Caso de estudio: Pieza de dimensiones mayores

Finalmente, se ha instrumentado una pieza de acero AISI 4140 de mucho mayor volumen con 5 termopares, enumerados del 1 al 5 (como se muestra en la figura 5.4) con la finalidad de analizar las curvas de enfriamiento en piezas de mayores dimensiones. Este caso resulta de mucho interés ya que será muy significativa la diferencia de las razones de enfriamiento entre la parte central de la pieza y las proximidades de la superficie, generando gradientes de temperatura y diferentes porcentajes de transformación en la pieza.

Se han estudiado un total de cuatro probetas del mismo material y se obtuvieron las curvas de enfriamiento y la razón de cambio. Aunado al análisis de los datos de enfriamiento, se han realizado pruebas mecánicas de dureza, tensión e impacto, así como micrografías y macroataques.

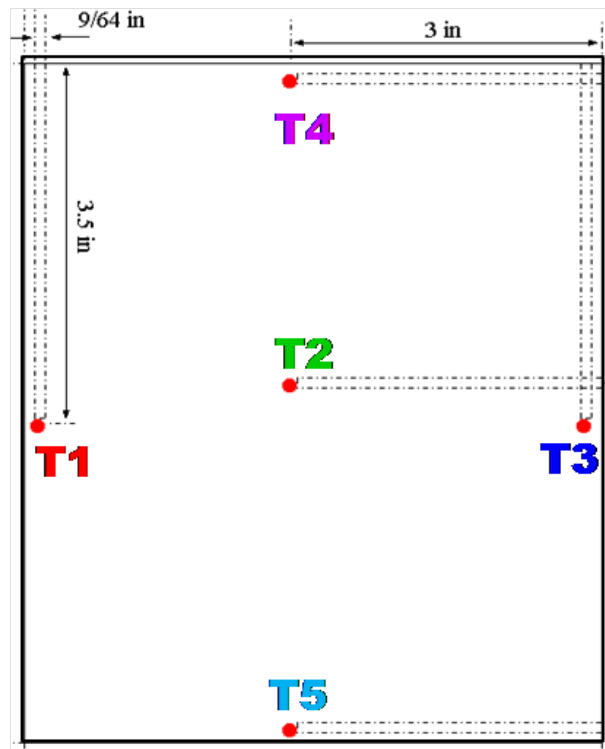


Figura 5.4: Posición de los termopares tipo K.

Capítulo 6

Resultados y discusión

Contenido

6.1	Agitación	94
6.1.1	Agitación individual	94
6.1.2	Arreglo de n -agitadores	95
6.2	Modelación por Dinámica de Fluidos Computacional	96
6.3	Predicción de las propiedades del acero AISI 4140	97
6.4	Cálculo de razón de enfriamiento y HTC para distintas condiciones de polímero en probetas de Inconel[®] 600	100
6.5	Curvas de enfriamiento del Caso de estudio: acero AISI 4140	108

6.1. Agitación

6.1.1. Agitación individual

Como ya fue mencionado en el capítulo 3, sección 3.3, los principales resultados obtenidos en las mediciones de los vectores de velocidad del fluido se han presentado en las figuras 3.5. Se encontró que los agitadores con ángulos de 7° son ligeramente más eficientes que los agitadores con ángulo de 13° , en lo que respecta a la velocidad del fluido en dirección vertical. Esto se debe a que a menor ángulo de empuje encuentra menor resistencia y el empuje del fluido es más eficiente. Es preciso hacer notar que esto es válido en un flujo continuo, para agitadores trabajando en forma independiente y sin obstáculos de flujo; ya que de esa manera fueron efectuadas las pruebas.

Por su parte, en la figura 3.7 se representa el efecto de la instalación de un *jetring* para mejorar la eficiencia del flujo producido. Comparando las dos mediciones se observa un incremento de velocidad de hasta 57% en la medición correspondiente a los 2 metros de profundidad con respecto a la superficie libre del fluido, que es el punto medido más cercano a la fuente de agitación. De manera similar, las mediciones cerca a la superficie muestran mayores velocidades cuando se usa el *jetring*, aunque esta diferencia se va haciendo menor, alcanzando así, sólo un 5%.

Lo anterior da la pauta a recomendar ampliamente el uso de los *jetrings* dentro

de los tanques de temple en los que se desea una agitación eficiente.

6.1.2. Arreglo de n -agitadores

Una vez que se tienen diferentes agitadores trabajando en forma conjunta, las figuras 3.8, 3.9 y 3.10 nos muestran los perfiles de velocidad del fluido en arreglos de agitadores de 2 y 3 álabes para alturas de 50, 100 y 150 *cm*, respectivamente. En estas figuras se observa la contribución negativa a la velocidad del flujo, cuando los agitadores (41 en este caso) están trabajando conjuntamente. Lo anterior se debe al efecto de interferencia entre los vectores de velocidad.

La amortiguación parcial de los vectores es más notoria en las secciones más cercanas a la superficie del fluido, mientras cerca del agitador, la interferencia es menor. Lo anterior se explica por la naturaleza geométrica del cono de agitación descrita en la sección 3.3.

Finalmente, en las figuras 3.11 a 3.14 se detalla el resumen estadístico de las diferentes pruebas de agitación realizadas. En estas figuras, se indica gráficamente que el arreglo de agitadores con tres álabes tiene una velocidad promedio de 0.25 *m/s* comparado con los de dos álabes que tienen una velocidad de 0.22 *m/s*. Teniendo una diferencia de 13.63 %.

6.2. Modelación por Dinámica de Fluidos Computacional

Con los resultados obtenidos en la sección 3.3, se pudo lograr con éxito la modelación computacional del flujo dentro de línea de temple en condiciones sin carga para un sólo agitador, ver las figuras 4.1 a 4.2 . En estas figuras se representa en forma esquemática el campo de velocidades tridimensional y las trayectorias que sigue el flujo.

En las figuras 4.4 y 4.5 se muestra los mismos resultados de campo de velocidades y trayectorias para el caso en que está funcionando simultáneamente los 41 agitadores.

Finalmente, en la figura 4.6 se representan las trayectorias del fluido cuando se encuentra con un obtáculo, en este caso un anillo a ser enfriado y en la figura 4.7 se representa la simulación del proceso de enfriamiento de dicho anillo. Las figuras 4.8 y 4.9 representan el caso de agitación lateral. A partir de esta modelación se puede obtener la mejor distribución de agitadores y se puede predecir el enfriamiento de las piezas a templar.

De esta modelación se puede observar claramente que el posicionamiento de agitadores laterales, contribuirán positivamente en un enfriamiento de la pieza, ver la figura 4.9.

6.3. Predicción de las propiedades del acero AISI 4140

Es posible predecir las propiedades de algunas aleaciones de aceros mediante el uso de diferentes programas, tal como el SteCal[®] 3.0 [60], el cual predice las propiedades por medio de la entrada de condiciones frontera tales como temperatura y velocidad de enfriamiento; los cálculos para nuestro caso se enfocaron en el acero 4140. La tabla 6.1 resume algunos de los datos proporcionados por dicho programa. Además la figura 6.1 muestra el diagrama CCT.

Tabla 6.1: Datos calculados del diagrama CCT.

Data for Heat Treatments:

Critical temperatures:

Lower: A1 = 744 °C

Upper: A3 = 779 °C

Pearlite formation:

Data for T = 669 °C:

Start at: 35 s

50% transf. in: 85 s

Martensite formation:

Ms = 314 °C

M10 = 304 °C ; M50 = 249 °C

M90 = 104 °C ; M99 = -106 °C

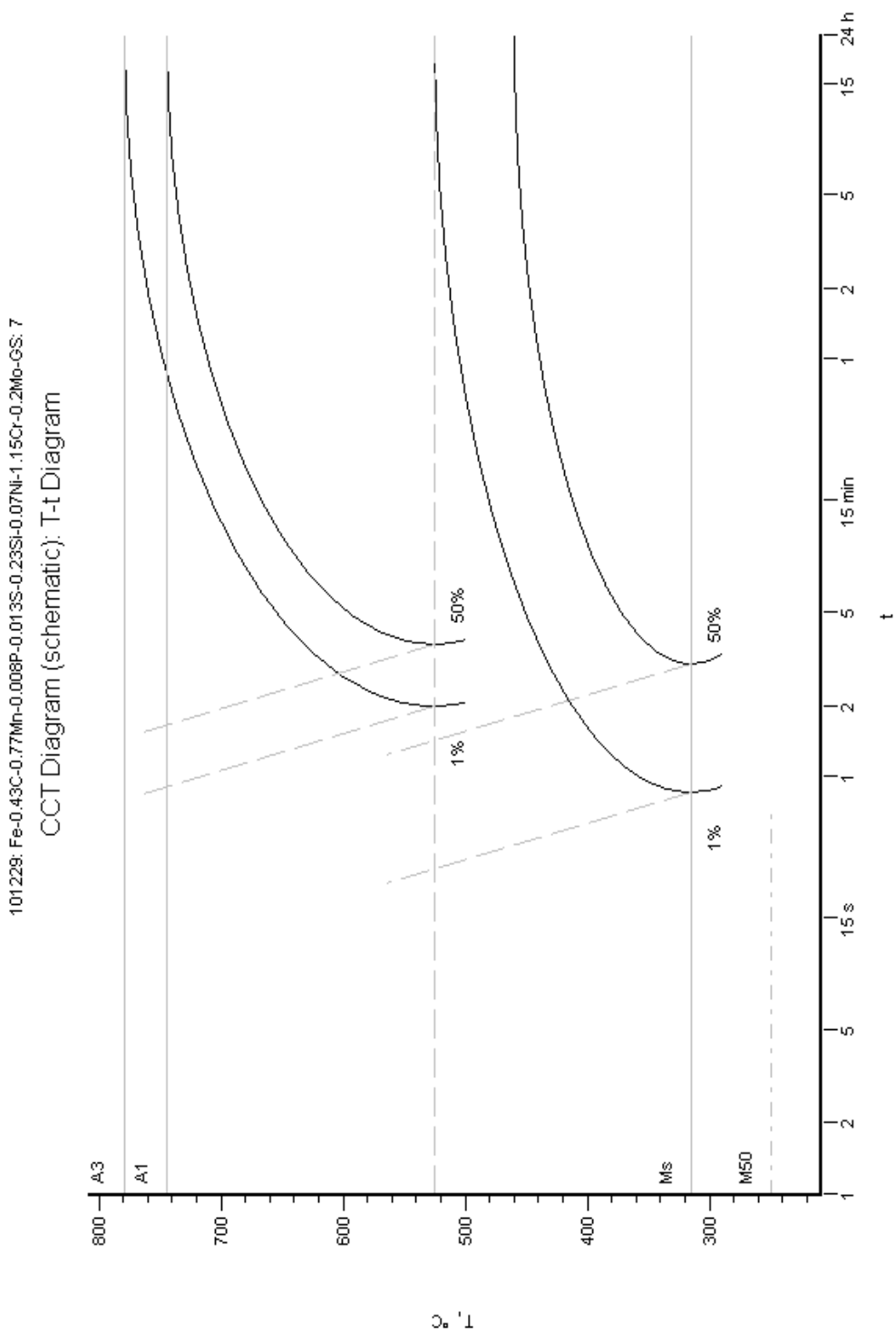


Figura 6.1: Diagrama CCT calculado para probetas de acero 4140.

6.4. Cálculo de razón de enfriamiento y HTC para distintas condiciones de polímero en probetas de Inconel[®] 600

Los datos de las curvas de enfriamiento han sido usados para calcular la razón de enfriamiento y el coeficiente de transferencia de calor en el temple de la probeta de Inconel[®] 600.

El resultado del procesamiento de estos datos puede ser usado como un método conveniente de comparación de diferentes medios de temple o condiciones. Incluso la representación del HTC como función de la temperatura puede ser útil como una condición de frontera para la simulación de los procesos de enfriamiento.

La figura 6.2 representa los datos obtenidos experimentalmente para el caso de estudio donde la solución de polímero sin ningún uso previo. Podemos observar de la figura 6.3 que la máxima velocidad de enfriamiento es de $50.5 \text{ }^\circ\text{C/s}$ y ésta se presenta a la temperatura de $767.7 \text{ }^\circ\text{C}$. El grado de incertidumbre en las mediciones de temperatura es de $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Adicionalmente, el coeficiente de transferencia de calor máximo ($785 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) se encuentra en el rango de $(723-767) \text{ }^\circ\text{C}$, ver figura 6.4.

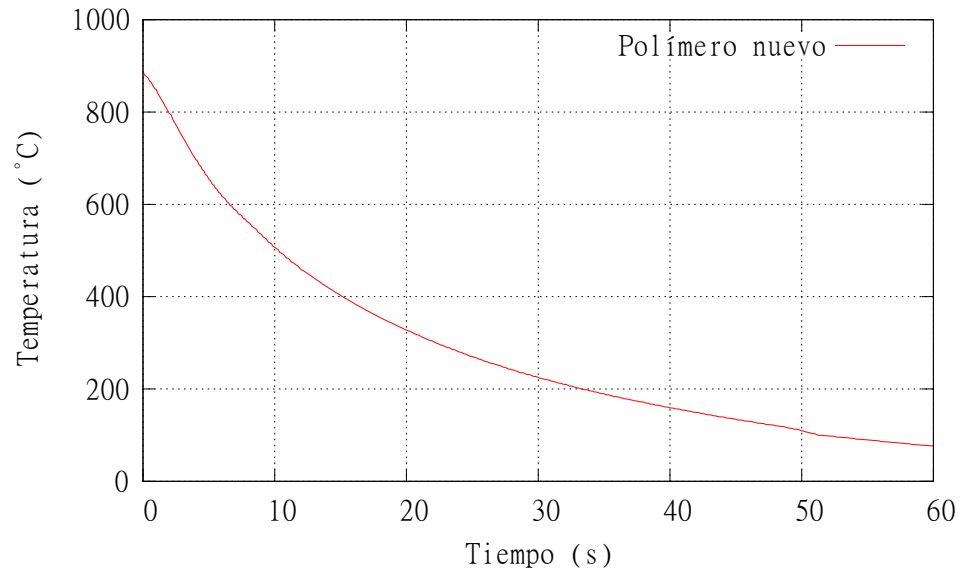


Figura 6.2: Curva de enfriamiento del Inconel[®] 600 templado con polímero nuevo.

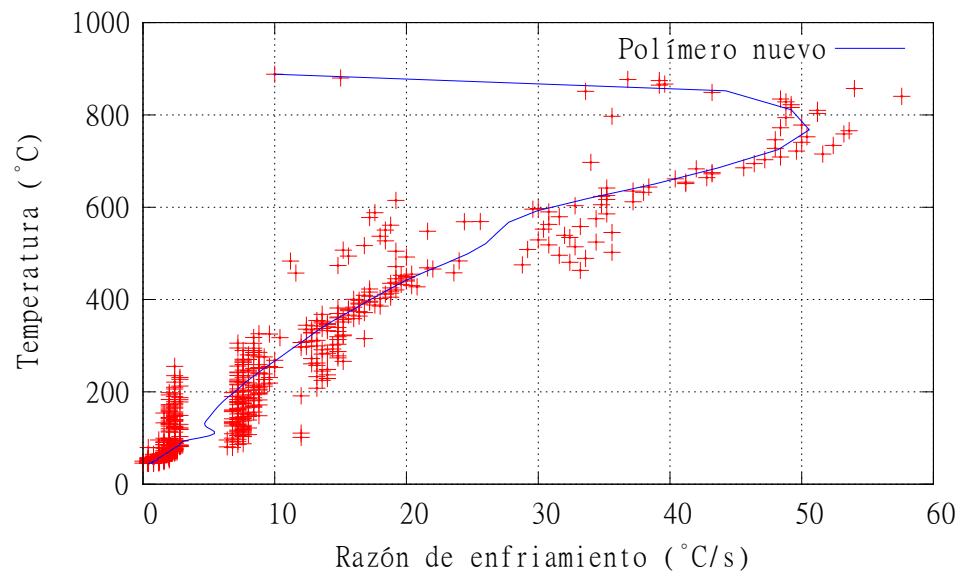


Figura 6.3: Razón de enfriamiento del Inconel[®] 600 templado con polímero nuevo.

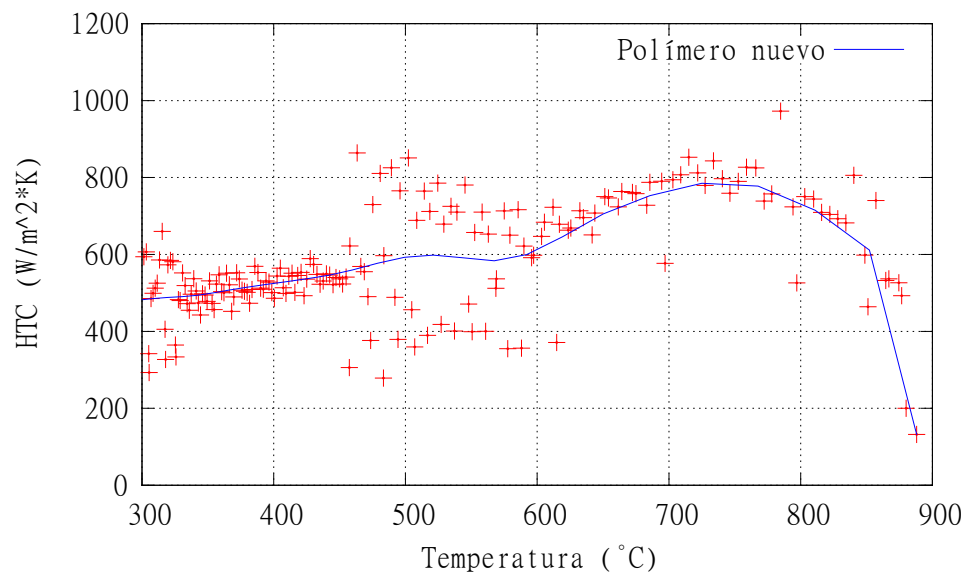


Figura 6.4: HTC de prueba con Inconel[®] 600 templado con polímero nuevo.

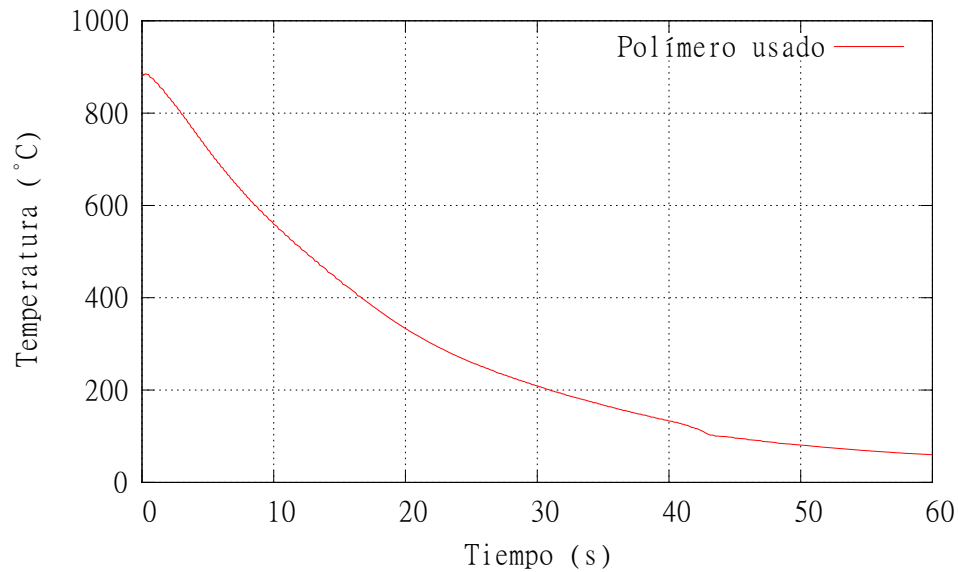


Figura 6.5: Curva de enfriamiento del Inconel[®] 600 templado con polímero usado.

Adicionalmente, la figura 6.5 muestra los datos obtenidos (experimentalmente) de la curva de enfriamiento de una probeta de Inconel[®] 600 en una solución de polímero que ha sido usado previamente. Se puede observar de la figura 6.6 que la máxima razón de enfriamiento es de $38.5 \text{ }^\circ\text{C/s}$ y ésta se encuentra a los $748.5 \text{ }^\circ\text{C}$. El grado de incertidumbre en las mediciones de temperatura es de $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

En el caso del coeficiente de transferencia de calor obtenido para la prueba de temple de Inconel[®] 600 en una solución de polímero usado se puede observar un máximo de $614 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ a la temperatura de $715 \text{ }^\circ\text{C}$ y un segundo pico de la gráfica se encuentra a los $370 \text{ }^\circ\text{C}$ con un HTC de $665 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, la figura 6.7 cuenta con una dispersión de datos amplia en el rango de los $400 \text{ }^\circ\text{C}$ a los $600 \text{ }^\circ\text{C}$ debido a ruido en la medición, sin embargo en el par de zonas que más interesan para el presente estudio exhiben muy poca dispersión, y estas (zonas) son donde se presenta la mayor

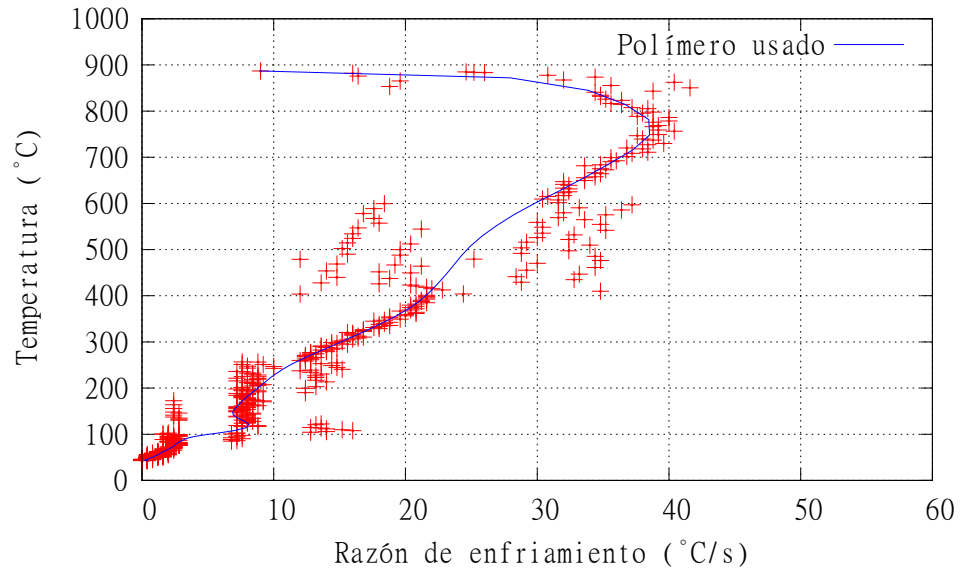


Figura 6.6: Razón de enfriamiento del Inconel[®] 600 templado con polímero usado.

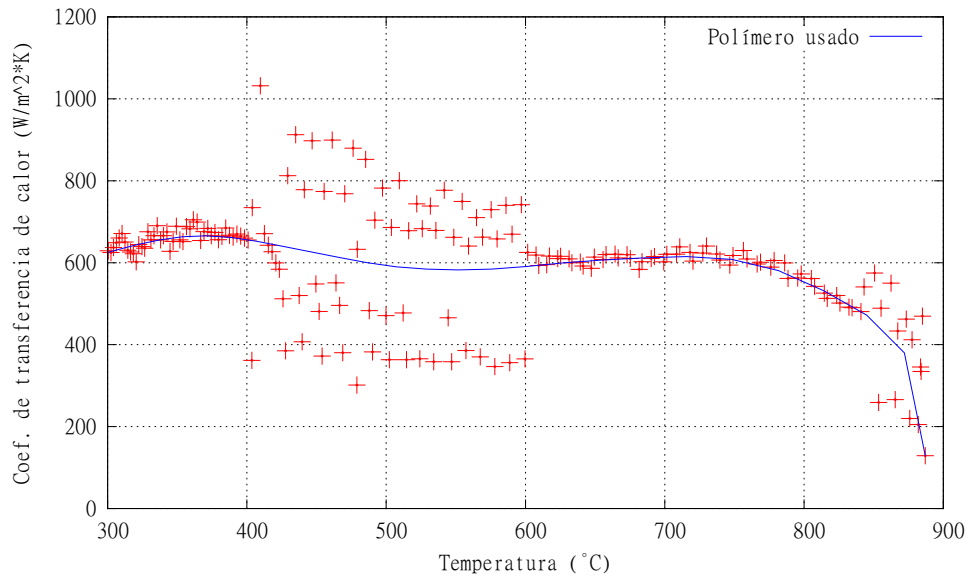


Figura 6.7: HTC de prueba con Inconel[®] 600 templado con polímero usado.

razón de enfriamiento y la temperatura de M_s .

En la figura 6.8 se muestra una comparativa de las curvas de enfriamiento de los polímeros (nuevo y usado), las curvas poseen un comportamiento similar, pero notándose que en el polímero nuevo, se logra una extracción de calor más efectiva en el rango de temperaturas de $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, convirtiéndose en un enfriamiento más lento después de los $310\text{ }^{\circ}\text{C}$; que es precisamente lo que se busca en el medio de temple, ya que es ahí donde comienza la transformación martensítica (en el caso del acero que aquí se estudia). El polímero usado muestra que va perdiendo esta característica. Además de lo anterior también cabe resaltar la existencia de una intersección al tiempo: 21.4 s y temperatura: $309.4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La comparación entre las razones de enfriamiento se muestra en la figura 6.9, es evidente que la solución de polímero usado tiene una menor velocidad de enfriamiento máxima, con $12\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ menos que el polímero nuevo a la temperatura de $750\text{ }^{\circ}\text{C}$. También podemos ver que a los $314\text{ }^{\circ}\text{C}$ la solución del polímero nuevo tiene una velocidad de enfriamiento de $12.3\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, mientras que la solución de polímero usado tiene una mayor velocidad: $16\text{ }^{\circ}\text{C/s}$.

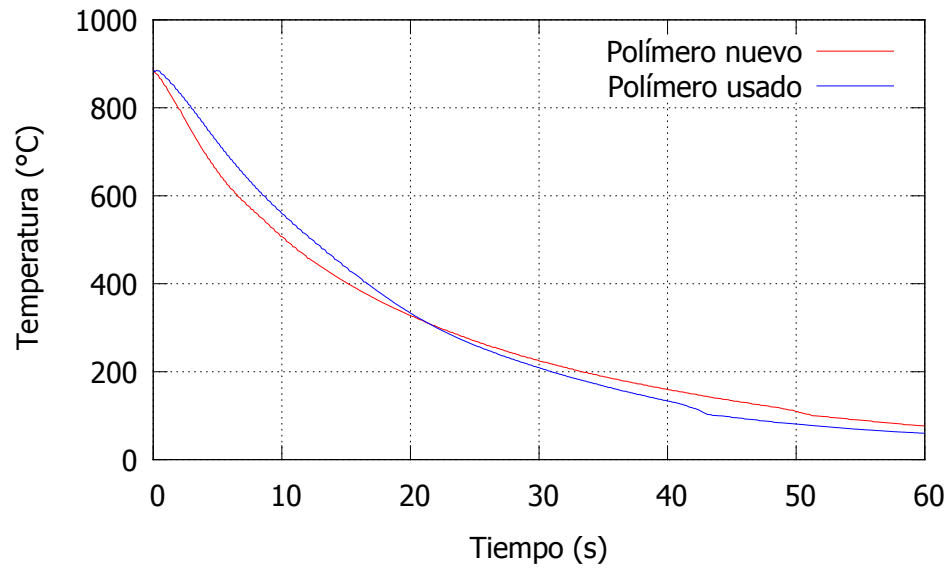


Figura 6.8: Curva de enfriamiento del Inconel[®] 600 templado con polímero nuevo y usado.

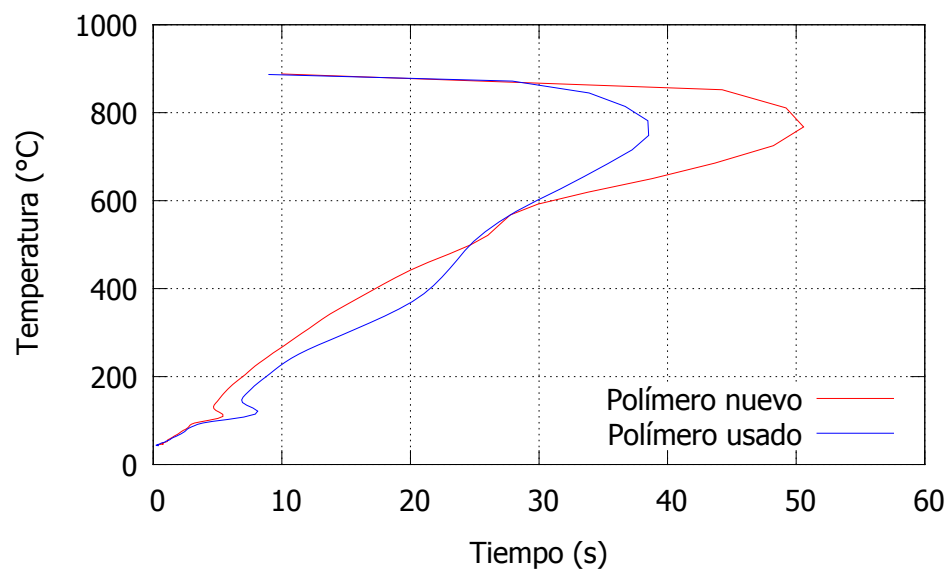


Figura 6.9: Razón de enfriamiento del Inconel[®] 600 templado con polímero nuevo y usado.

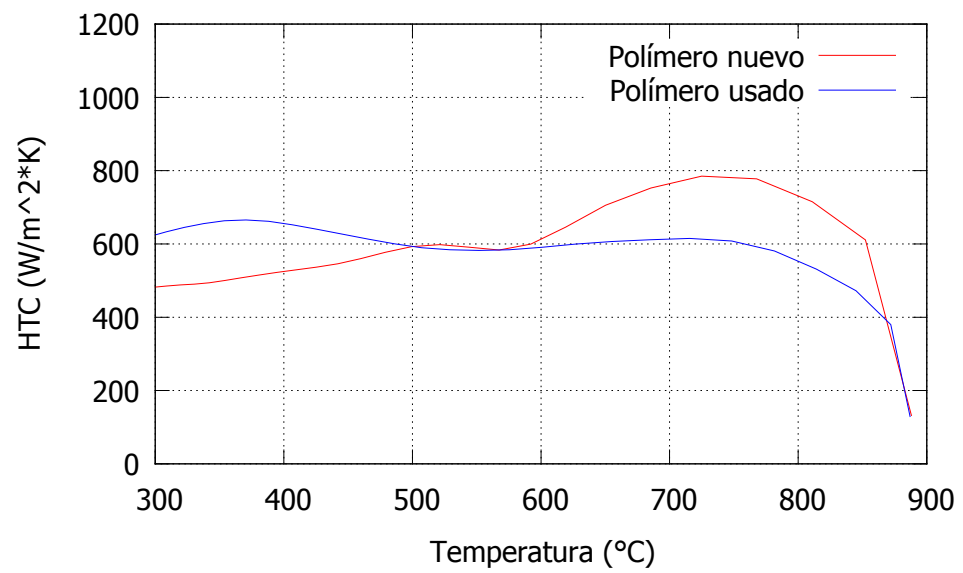


Figura 6.10: HTC de prueba con Inconel[®] 600 templado con polímero usado.

De la figura 6.10 vemos que el comportamiento de la transferencia de calor del polímero usado se mantiene en un rango mucho más estrecho que el de la solución de polímero nuevo. En los primeros segundos del temple la transferencia de calor es mucho mayor en el caso del polímero nuevo para luego ir reduciendo la transferencia de calor conforme se acerca a la temperatura M_s (314 °C). Se cree que este comportamiento se debe a que las propiedades del polímero usado se pierden luego de haber sufrido un degradación gradual en las cadenas poliméricas, ya que con la temperatura se reduce el peso molecular de la solución.

6.5. Curvas de enfriamiento del Caso de estudio: acero AISI 4140

La condición principal que distingue a las cuatro probetas en esta sección es la velocidad de agitación. Para el caso de la probeta 'A₁' cuyos resultados se muestran en las figuras 6.11 y 6.12, la agitación promedio¹ es de 0.44 (*m/s*); para el caso de las probetas 'B₂' (figuras 6.13 y 6.14), 'C₃' (figuras 6.15 y 6.16) y 'D₄' (figuras 6.17 y 6.18) la rapidez promedio del flujo es de 0.35 (*m/s*), 0.25 (*m/s*) y 0.14 (*m/s*), respectivamente. Se ha respetado la nomenclatura de la enumeración de los termopares vista en la sección 5.5.3, pág. 92.

¹Este dato se ha estimado por medio de una extrapolación de los resultados obtenidos en el Capítulo 3.

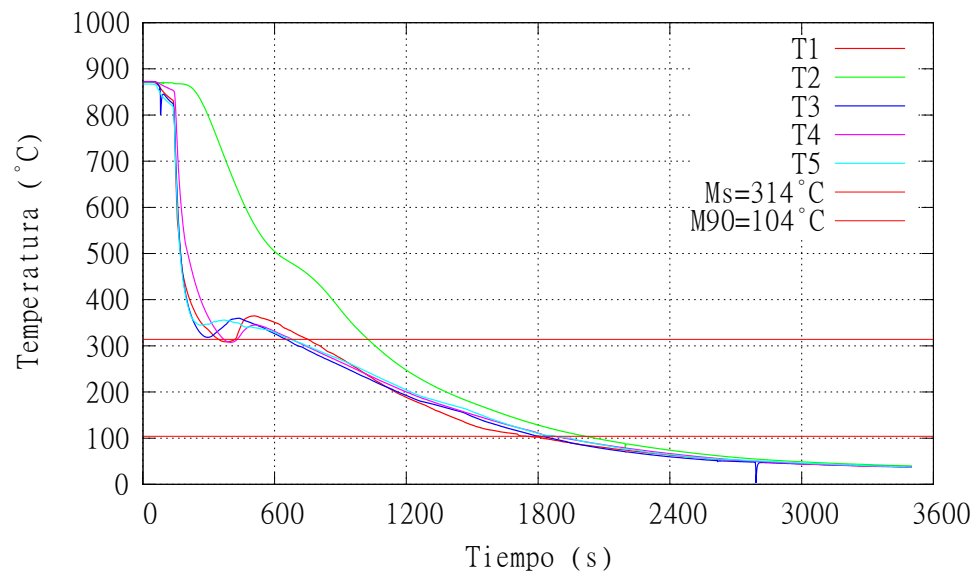


Figura 6.11: Curvas de enfriamiento de la prueba A₁.

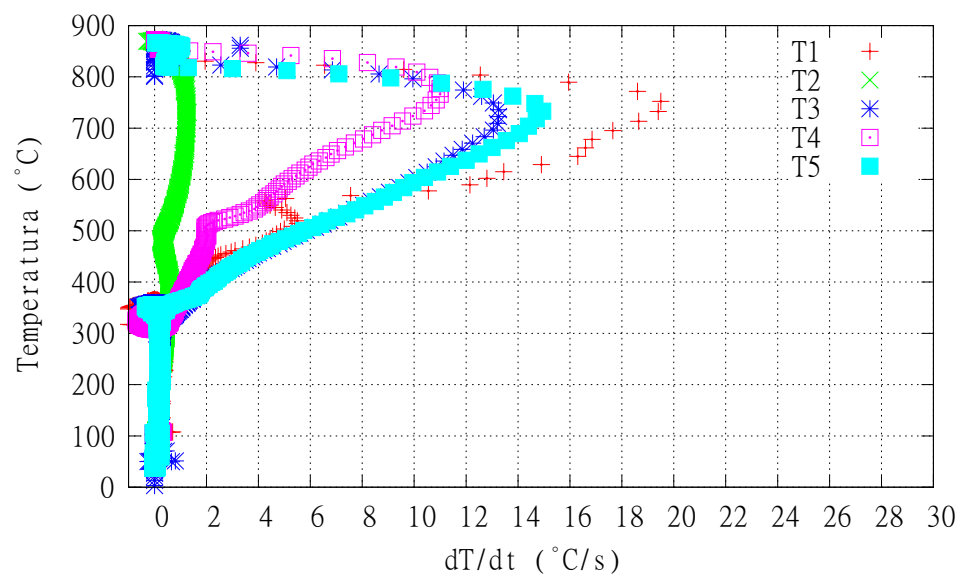


Figura 6.12: Velocidades de enfriamiento de la prueba A₁.

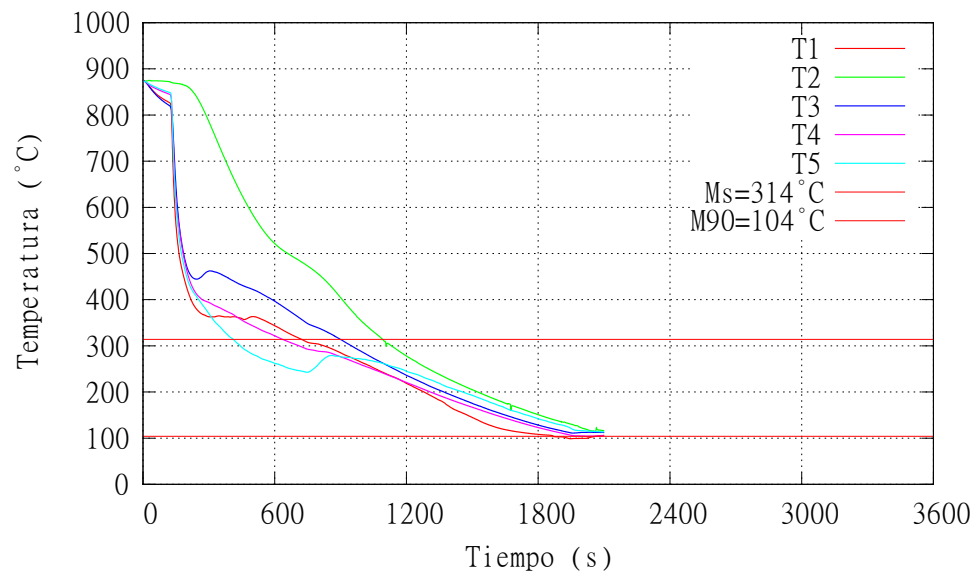


Figura 6.13: Curvas de enfriamiento de la prueba B₂.

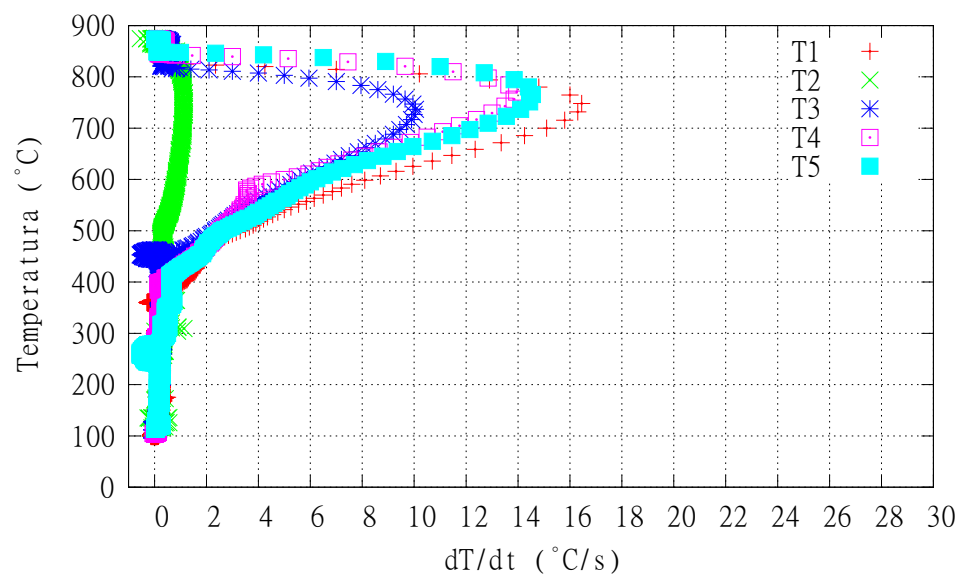


Figura 6.14: Velocidades de enfriamiento de la prueba B₂.

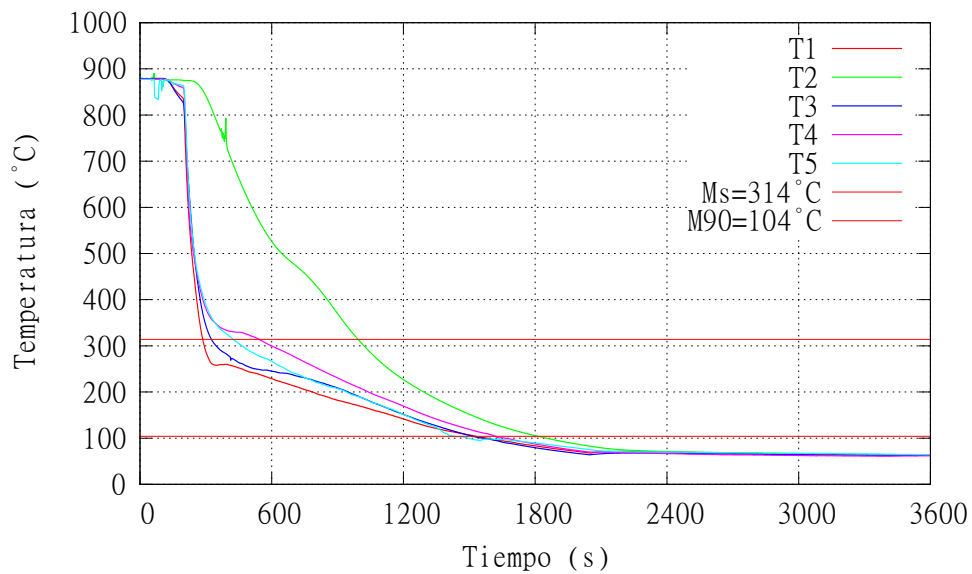


Figura 6.15: Curvas de enfriamiento de la prueba C₃.

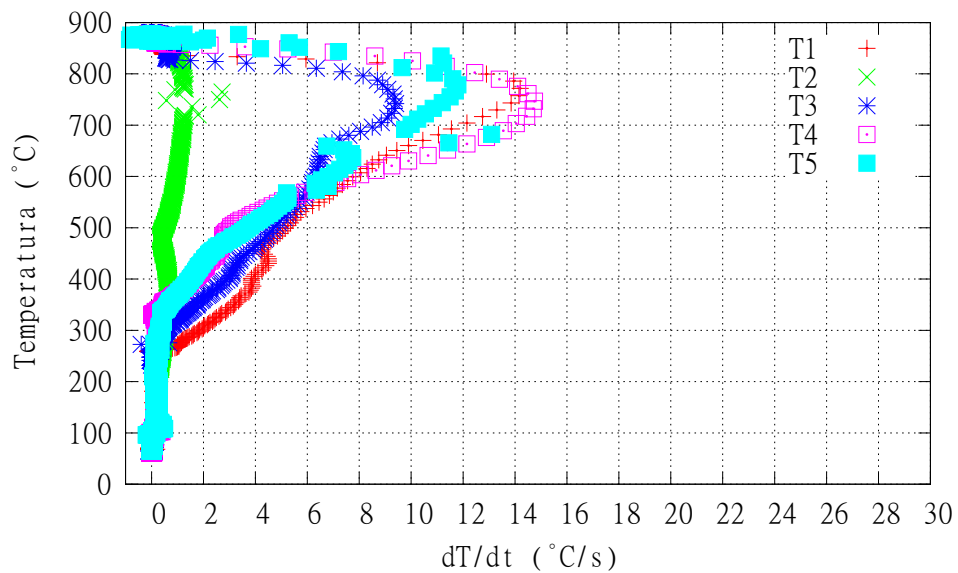


Figura 6.16: Velocidades de enfriamiento de la prueba C₃.

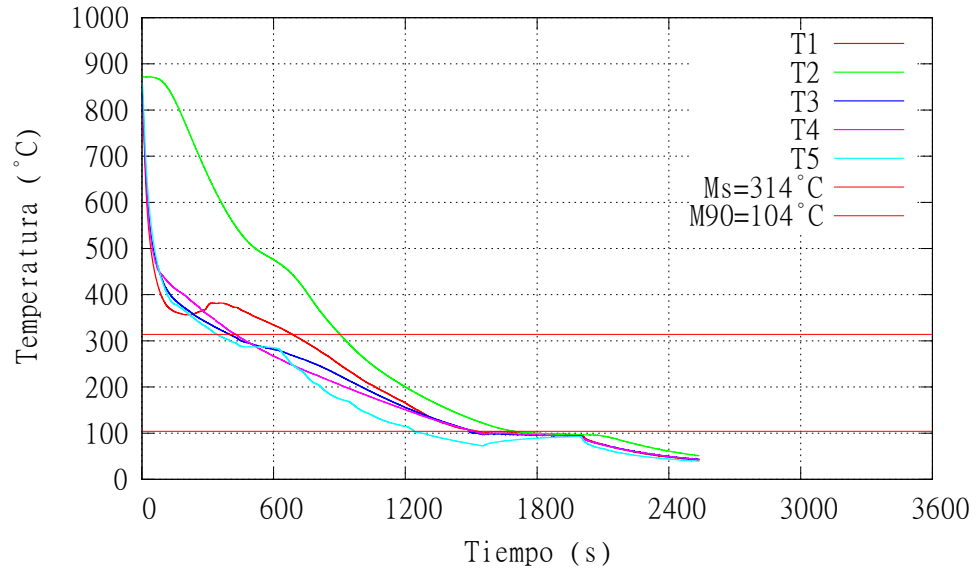


Figura 6.17: Curvas de enfriamiento de la prueba D₄.

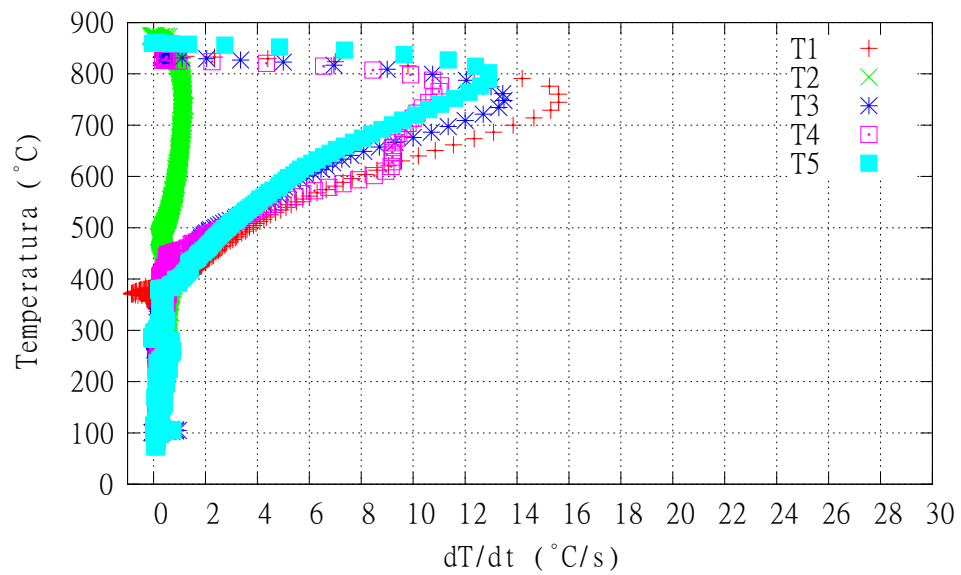


Figura 6.18: Velocidades de enfriamiento de la prueba D₄.

En las anteriores figuras (6.11-6.18) se ha visto una decreciente velocidad de enfriamiento para los casos de las pruebas con probetas de mayores dimensiones conforme disminuye la velocidad de agitación, siendo la prueba A₁ la que mayor razón de enfriamiento posee, y la prueba D₄ la que muestra menores velocidades de enfriamiento. Esto debido a que la posición de la probetas dentro del tanque de temple varía para cada una de las pruebas y que se relaciona directamente con la proximidad a la fuente de agitación.

Capítulo 7

Conclusiones y trabajo a futuro

Contenido

7.1	Agitación	114
7.2	Modelación computacional	115
7.3	Temple	116
7.4	Conclusión general	116
7.5	Sugerencias para trabajo futuro	117

7.1. Agitación

En general se encontró que la agitación es más efectiva en términos de la velocidad de flujo y en la geometría del cono de agitación cuando:

- (a) Se tienen agitadores de tres álabes en lugar de los de dos.
- (b) Se tienen agitadores con ángulo de empuje que disminuye hacia el extremo libre.
- (c) Se usa el *jetring* para direccionar el flujo.

La velocidad promedio del flujo inducido por agitadores de triple álabe es de 0.25 m/s y con un error estándar de 0.01 m/s comparada con 0.22 m/s y un error estándar de 0.01 m/s del flujo inducido por agitadores de doble álabe. Esto da un incremento nominal aproximado de 13%.

7.2. Modelación computacional

Es posible modelar el proceso de enfriamiento de anillos de acero usando la herramienta de CFD; obteniendo resultados congruentes con los procesos reales.

A partir de la modelación se puede concluir que:

- (a) La velocidad y trayectorias del flujo desarrollado en la totalidad de un tanque de temple dependen del número y posición de los agitadores.
- (b) El enfriamiento de los anillos de acero es más homogéneo en la simulación con agitadores laterales.
- (c) Es posible usar la CFD para mejorar el proceso de temple por medio de estudios de la óptima uniformidad del templado de acuerdo al estudio de la dinámica de fluidos y la transferencia de calor.

7.3. Temple

- (a) Se ha demostrado que a través del cálculo del coeficiente de transferencia de calor y la velocidad de enfriamiento, es posible evaluar el desempeño del medio de enfriamiento y valorar su función de templar piezas, ya sea en una condición de una solución polimérica usada o no.
- (b) Se comprobó la utilidad del uso de la probeta de Inconel[®] 600 para el cálculo de los valores de coeficiente de transferencia de calor en función de la temperatura.
- (c) Se comprobó la eficiencia de las soluciones de temple a base de polímero para el enfriamiento del acero tipo 4140 y los efectos de la degradación en dicha solución.
- (d) Se encontró la influencia de la posición de los anillos y la influencia de los vectores de velocidad del flujo en el proceso de enfriamiento y temple de los anillos de acero 4140.

7.4. Conclusión general

En base a todo el trabajo experimental, resultados, discusión y conclusiones por sección, se puede concluir que es posible estudiar, analizar y mejorar el desempeño de la operación de temple de anillos de acero AISI 4140 para obtener los mejores resultados, obtener piezas con durezas y propiedades mecánicas de relativa homogeneidad y establecer criterios de operación y mantenimiento de las líneas de temple.

7.5. Sugerencias para trabajo futuro

Se recomienda continuar con los siguientes trabajos:

- Estudiar el efecto conjunto de otros parámetros en la velocidad de enfriamiento y coeficiente de transferencia de calor.
- Repetir los mismos experimentos realizados con acero 4140 en atmosferas inertes a fin de evaluar la influencia de la capa de óxido en las propiedades de transferencia de calor.
- Mejorar el modelo de simulación agregando mayor complejidad a la geometría del tanque.
- Crear un modelo de simulación de la transferencia de calor que contemple las transiciones entre las diferentes etapas de enfriamiento presentadas en el medio de temple a base de soluciones poliméricas.
- Determinar el nivel de degradación y contaminación de las distintas soluciones de polímeros.
- Estimar la vida útil de las soluciones de polímeros en función de alguna variable que determine su uso.

Bibliografía

- [1] *Houghton on Quenching*. Houghton International. Inc, Philadelphia, USA, 2000.
- [2] J.W. Martin. *Concise Encyclopedia of the Structure of Materials*. Elsevier, 2007.
- [3] G. E. Totten and M. A. H. Howes. *Steel Heat Treatment Handbook*. Marcel Dekker, Inc, 1997.
- [4] H. M. Tensi B. Liscic and W. Luty. *Theory and Technology of Quenching*. Springer-Verlang, 1992.
- [5] D. V. Doane and J. S. Kirkaldy. *Hardenability Concepts with applications to steel*. American Institute of mining, metallurgical and petroleum engineering, Inc, 1978.
- [6] Z. Li B. L. Ferguson and A. M. Frebory. Computational material science. pages 274–281, 2005.
- [7] C. Simsir and C. Hakan Gur. *Journal of materials processing technology*, 207:211–221, 1997.
- [8] R. A. Hardin and C. Beckermann. *Proceedings of the 59th Technical and Operating Conference*, 2005.
- [9] B. Smoljan. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 11:75–79, July 2002.
- [10] G. E. Totten G. Sanchez Sarmiento R. N. Penha, L. C. Canale and J. M. Ventura. *Journal of ASTM International*, 3:89–97, 2006.
- [11] H. S. Hasan. *Evaluation of Heat Transfer Coefficient during Quenching of Steels*. PhD thesis, University of Cambridge / University of Technology, Bagdad, 2006.

- [12] M. Narazaki K. Funatani and M. Tanaka. *19th ASM Heat treating Society conference proceeding including steel heat treating in the new millennium*. ASM International, 1999.
- [13] A. G. Ksenofontov and S. Y. Shevchenko. volume 40. *Metal Science and Heat Treatment*, 1998.
- [14] C. Gao B. Liao N. Chen, W. Zhang and J. Pan. *Solid state phenomena*, volume 118. 2006.
- [15] N. Shimizu I. Tamura and T. Okada. *J. of heat treating*, dic. 1984.
- [16] L. Meekisho X. Chen and G. E. Totten. *19th ASM Heat treating Society conference proceeding including steel heat treating in the new millennium*. ASM International, 1999.
- [17] G. E. Totten and Y. H. Sun. *19th ASM Heat treating Society conference proceeding including steel heat treating in the new millennium*. ASM International, 1999.
- [18] H. Xieqing C. Heming and X. Jianbin. *Journal of Materials Processing Technology*. Number 138. 2003.
- [19] H. K. Kim and S. I. Oh. *Journal of Materials Processing Technology*. Number 112. 2001.
- [20] D. A. Guisbert and D. L. Moore. *19th ASM Heat treating Society conference proceeding including steel heat treating in the new millennium*. ASM International, 1999.
- [21] G. E. Totten H. M. Tensi and B. Liscic. *Heat Treatment of Metals*. Number 4.
- [22] Shuhui Ma. Characterization of the performance of mineral oil based quenchants using chte quench probe system. Master's thesis, WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE, 2002.
- [23] Shuhui Ma. *A Methodology to Predict the Effects of Quench Rates on Mechanical Properties of Cast Aluminum Alloys*. PhD thesis, WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE, 2006.
- [24] Japanese Industrial Standard k 2242. *Heat Treating Oils*, 1980.

- [25] Tagaya and I. Tamura. *Journal of hart-tech.* 18:89–97.
- [26] ASTM D6200-01. *Standard test method for determination of cooling characteristics of quench oils by cooling curve analysis*, 2007.
- [27] G. E. Totten C. E. Bates and N. A. Clinton. *Handbook of Quenchants and Quenching Technology*. ASM International, 1993.
- [28] H. Xieqing C. Heming and Honggang. *Journal of Materials Processing Technology*. 1999.
- [29] Narayan Prabhu and P. Fernandes. *Materials and design*, volume 28.
- [30] A. Perez. *Notas de curso: Seleccion de Aceros*. FIME-UANL, 2010.
- [31] A. P. Miodownik N. Saunders, X. Li and J-Ph. Schillé. *Computer Modelling of Materials Properties*. Thermotech Ltd., Surrey Technology Centre, Guildford GU2 7YG, U.K. 2002.
- [32] J. C. Chaves. *The Effect of Surface Condition and High Temperature Oxidation on Quenching Performance of 4140 Steels in Mineral Oil, in Manufacturing Engineering*. PhD thesis, Worcester Polytechnic Institute, 2001.
- [33] William F. Smith. Structure and properties of engineering alloys. page 156, 1993.
- [34] M. Tagaya and I. Tamura. Studies on the quenching media: theoretical study of cooling process during quenching. *of Jim*, 12(15):589–594, 1996.
- [35] G. E. Totten C. E. Bates. *Application of quench factor analysis to predict hardness under laboratory and production conditions*. Chicago, Illinois, USA, 1992.
- [36] William D. Callister. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- [37] C.P. Colver C.T. and C.M. Sliepcevich. Film boiling measurements and correlations for liquified hydrocarbon gases. *Journal of Chem. Eng.* 1967.
- [38] L.A Bromley. Heat transfer in stable film boiling. *Journal of Chem. Eng. Prog.* (46):221, 1967.

- [39] Y. Y. Hsu and J. W. Westwater. Approx. theory for film boiling on vertical surfaces. *Journal of AIChE Chem Eng. Prog*, 1960.
- [40] R.J. Benjamin and A.R. Balakrishnan. Nucleate pool boiling heat transfer of pure liquids at low to moderate heat fluxes. *Heat Mass Transfer*, 39(12), 1996.
- [41] R.J. Benjamin and A.R. Balakrishnan. Nucleation site density in pool boiling of saturated pure liquids: effect of surface microroughness and surface and liquid physical properties. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 12, 1997.
- [42] W.H. McAdams. *Heat Transmission*. New York: McGraw-Hill, 1945.
- [43] S.W. Churchill. *Free Convection around Immersed Bodies*. Hemisphere Publishing Co., 1983.
- [44] V. S. Arpaci. *Conduction heat transfer*. Addison-Wesley, 1966.
- [45] J. P. Holman. *Heat Transfer*. McGraw-Hill, Inc, 2004.
- [46] CA. Buczek and T. Telejko. *Journal of Materials Processing Technology*, (155-156):1324–1329, 2004.
- [47] X. Jianbin C. Heming and L. Jianyun. Computational materials science. 29:453–458, 2004.
- [48] D. B. Marghitu. *Mechanical Engineers Handbook*. Academic Press, San Diego, CAL, USA, 2001.
- [49] B. K. Dutta. *Heat Transfer, Principles and Applications*. Prentice Hall of India, 2006.
- [50] D. S. Mackenzie and D. Lambert. *6th International conference on quenching and control of residual stresses conference*. Beijing, 2003.
- [51] Josep Manuel Merlo Luis Avila. Estabilidad de los polimeros de temple. *Fuchs Lubricantes*, pages 2–4.
- [52] Mantenimiento del polimero para temple. *Proveedor de quimicos*.
- [53] G. E. Totten and G. M. Webster. Fluid flow sensors for industrial quench baths: a literature review. *Heat Treatment of Metals*, 1:6–10, 2002.

- [54] Sergey L. Kernazhitskiy. Numerical modelling of a flow in a quench tank. Master's thesis, Portland State University, 2003.
- [55] <http://www.flygt.co.uk/> consultada jdjd en julio del 2011.
- [56] Heat Treating. *ASM Handbook*, volume 4. ASM INTERNATIONAL, 1991.
- [57] Frank P. Incropera and David P. Dewitt. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley, New York, 1996.
- [58] E. Specht R. Jeschar and Chr. Kohler. *A heat transfer during cooling of heated metallic objects with evaporating liquids*. Springer-Verlag, Berlin 2002.
- [59] <http://www.ansys.com/> consultada en julio del 2011.
- [60] P.Tarin and J. Perez. *SteCal 3.0*. ASM International, 2004.

Índice de figuras

1.1	Diagrama TTT. Curva en rojo representa el enfriamiento crítico para máxima dureza [1].	2
1.2	Temperatura M_s como función del contenido de carbono.	3
1.3	Efecto del espesor de la pieza.	4
1.4	Efecto en la transformación martensítica de algunos elementos aleantes a 1 % de C.	5
1.5	Dimensiones de probeta ISO.	9
2.1	Diagrama CCT del acero AISI 4140 [31].	17
2.2	Calor específico de un acero 4140 (según la ec. de la ASM [35]).	20
2.3	Proceso de manufactura de anillos [Ajax Ring, 2011]	22
2.4	Mecanismo de enfriamiento.	24
3.1	Anemómetro	51
3.2	Representación esquemática de mediciones con anemómetro.	52
3.3	Perfiles y ángulos de incidencia en una hélice.	54
3.4	Componentes de velocidad	55
3.5	Medición de vel. del flujo inducido por hélices con ángulos de a) 7° y b) 13°	56
3.6	Hélice triple con <i>jetring</i> y gráfica comparativa de su uso.	57
3.7	Medición de vel. del flujo inducido por hélices triples con (a) y sin <i>jetring</i> (b).	58
3.8	Comparativa de velocidades entre doble y triple álabe (sin <i>jetring</i>) por posición medida.	61
3.9	Comparativa de velocidades entre doble y triple álabe (sin <i>jetring</i>) por posición medida.	62
3.10	Comparativa de velocidades entre doble y triple álabe (sin <i>jetring</i>) por posición medida.	63
3.11	Resumen estadístico de agitación con hélice de doble álabe.	65

3.12	Resumen estadístico de agitación con hélice de triple álabe.	66
3.13	Diagrama de caja para mediciones con hélice de doble álabe.	67
3.14	Diagrama de caja para mediciones con hélice de triple álabe.	68
4.1	Campo de velocidades tridimensional.	72
4.2	Contornos de velocidad mostrados en planos verticales.	73
4.3	Contornos de velocidad mostrados en planos verticales.	74
4.4	Trayectoria de flujos debido a 41 agitadores.	75
4.5	Simulación del volumen completo.	76
4.6	Trayectorias coloreadas según la magnitud de la velocidad.	78
4.7	Simulación del enfriamiento de un anillo, a la izq. se muestra la escala de temperatura en K	79
4.8	Mapa de vectores de velocidad sobre un plano medio del tanque.	81
4.9	Simulación del enfriamiento de un anillo, a la izq. se muestra la escala de temperatura en K	82
5.1	Diagrama de flujo para el trabajo experimental.	85
5.2	Esquema de probeta barrenada.	87
5.3	Fotografía de probetas maquinadas.	89
5.4	Posición de los termopares tipo K.	92
6.1	Diagrama CCT calculado para probetas de acero 4140.	99
6.2	Curva de enfriamiento del Inconel [®] 600 templado con polímero nuevo.	101
6.3	Razón de enfriamiento del Inconel [®] 600 templado con polímero nuevo.	101
6.4	HTC de prueba con Inconel [®] 600 templado con polímero nuevo.	102
6.5	Curva de enfriamiento del Inconel [®] 600 templado con polímero usado.	103
6.6	Razón de enfriamiento del Inconel [®] 600 templado con polímero usado.	104
6.7	HTC de prueba con Inconel [®] 600 templado con polímero usado.	104
6.8	Curva de enfriamiento del Inconel [®] 600 templado con polímero nuevo y usado.	106
6.9	Razón de enfriamiento del Inconel [®] 600 templado con polímero nuevo y usado.	106
6.10	HTC de prueba con Inconel [®] 600 templado con polímero usado.	107
6.11	Curvas de enfriamiento de la prueba A_1	109
6.12	Velocidades de enfriamiento de la prueba A_1	109
6.13	Curvas de enfriamiento de la prueba B_2	110
6.14	Velocidades de enfriamiento de la prueba B_2	110
6.15	Curvas de enfriamiento de la prueba C_3	111

6.16	Velocidades de enfriamiento de la prueba C_3	111
6.17	Curvas de enfriamiento de la prueba D_4	112
6.18	Velocidades de enfriamiento de la prueba D_4	112

Índice de tablas

1.1	Comparación de probetas estándar.	8
2.1	Propiedades mecánicas del 4140 normalizado y recocido.	17
2.2	Propiedades mecánicas del 4140 templado y revenido.	18
2.3	Nomenclatura de índices.	34
2.4	Nomenclatura de subíndices y superíndices.	35
3.1	Media aritmética y desviación estándar de agitación.	67
6.1	Datos del diagrama CCT del acero AISI 4140	98