

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA



**VERIFICACIÓN DEL COEFICIENTE DE
TRANSFERENCIA DE CALOR (HTC) EN
SISTEMAS DE TEMPLE A ESCALA PARA SU
IMPLEMENTACIÓN EN LA INDUSTRIA.**

POR ING. ALFONSO PÉREZ LICEA

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES**

OCTUBRE, 2024

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO**



**VERIFICACIÓN DEL COEFICIENTE DE
TRANSFERENCIA DE CALOR (HTC) EN
SISTEMAS DE TEMPLE A ESCALA PARA SU
IMPLEMENTACIÓN EN LA INDUSTRIA.**

POR ING. ALFONSO PÉREZ LICEA

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES**

OCTUBRE, 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “Verificación del coeficiente de transferencia de calor (HTC) en sistemas de temple a escala para su implementación en la industria”, realizada por el estudiante Alfonso Pérez Licea, con número de matrícula 2125683, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con orientación en Materiales.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dr. Arturo Juárez Hernández
Director

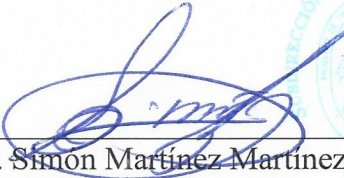
Dr. Edgar Saldaña Garza
Co-director

Dr. Luis Adolfo Leduc Lezama
Revisor

Dr. Edgar Omar García Sánchez
Revisor

Dr. Rene Cerda
Revisor

Vo.Bo.


Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



Institución 190001

Programa 557546

Acta Núm. 4423

Ciudad Universitaria, a 27 de septiembre de 2024

Índice

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.2 Problema.....	3
1.3 Justificación.....	5
1.4. Objetivos.....	6
1.5 Hipótesis.....	7
Capítulo 2. Marco teórico.....	7
2.1 Proceso de temple.....	7
2.2 Transferencia de calor.....	12
2.3 Parámetros de temple.....	13
2.4 Metodología CFD.....	15
Capítulo 3. Antecedentes.....	15
Capítulo 4. Metodología.....	20
4.1 Materiales y equipos.....	20
4.2 Procedimiento experimental.....	21
Capítulo 5. Resultados y discusión.....	25
5.1 Validación de IVF SmartQuench.....	25
5.2 Medición de velocidad de flujo: evaluación de la homogeneidad en una tina de temple industrial.....	28
5.3 Resultados de la simulación CFD con ANSYS Fluent: comparativa entre velocidades de flujo experimentales y simuladas.....	31
5.4 Resultados de la simulación CFD con ANSYS Fluent: evolución del HTC y la temperatura durante el proceso de temple.....	38
Capítulo 6. Conclusión.....	39
6.1 Recomendaciones a futuro.....	40
Capítulo 7. Bibliografía.....	41

Lista de figuras

1. Transferencia de calor en las diferentes etapas de temple.....	8
2. Efecto Leidenfrost: gota de agua flotando sobre una capa de vapor en una superficie a alta temperatura.....	9
3. Regímenes de la gota a diferentes temperaturas del componente.....	11
4. Función de la correlación entre HTC y velocidad de agitación en IVF SmartQuench	16
5. Fracciones volumétricas de la presencia de la fase de vapor a diferentes velocidades.....	18
6. Equipo de IVF SmartQuench con tina de agitación.....	19
7. Esquema del procedimiento experimental realizado para IVF SmartQuench.....	20
8. Tina de temple.....	21
9. Grafica de HTC vs temperatura obtenido con IVF SmartQuench	24
10. Grafica de HTC vs temperatura obtenido con Ansys Fluent	26
11. Etapa inicial de simulación de velocidad a 85 cm de profundidad	29
12. Etapa intermedia de simulación de velocidad a 85 cm de profundidad	30
13. Etapa final de simulación de velocidad a 85 cm de profundidad.....	30

14. Etapa inicial de simulación de velocidad a 160 cm de profundidad.....	31
15. Etapa intermedia de simulación de velocidad a 160 cm de profundidad.....	31
16. Etapa final de simulación de velocidad a 160 cm de profundidad.....	32
17. Etapa inicial de simulación de velocidad a 200 cm de profundidad.....	33
18. Etapa intermedia de simulación de velocidad a 200 cm de profundidad.....	33
19. Etapa final de simulación de velocidad a 200 cm de profundidad.....	34

Capítulo 1. Introducción

En la actualidad, el tratamiento térmico de metales y aleaciones ha adquirido un alcance significativo, dada la utilidad y versatilidad inherentes a la capacidad de aumentar o reducir la dureza de un metal. En particular, el tratamiento térmico de aceros de forja constituye un procedimiento crucial, mediante el cual se busca conferir a las piezas nuevas propiedades mecánicas o químicas a través de la modificación de su estructura cristalina.

Este proceso se lleva a cabo mediante un calentamiento seguido de un choque térmico, con el propósito de inducir cambios sustanciales en la estructura interna de la pieza. Los resultados de transformación son notables: se logra una reducción significativa en los esfuerzos internos y en el tamaño de grano, acompañados por un aumento significativo en la dureza y tenacidad del material [1].

Dentro de las diversas técnicas de tratamientos térmicos, el temple se destaca por su capacidad para endurecer y aumentar la resistencia del acero. En este proceso, el acero, previamente calentado a una temperatura superior a la austenización, se sumerge en un medio con una temperatura inferior a la del material. La transferencia de calor entre la superficie del acero y el medio de enfriamiento ocurre de manera inmediata. Sin embargo, para lograr un temple efectivo, es indispensable garantizar un enfriamiento homogéneo alrededor de la pieza. Este requisito es especialmente importante, ya que un enfriamiento desigual podría provocar variaciones en las propiedades finales del material [1,2].

En el contexto del proceso de temple, la homogeneidad en la transferencia de calor se vuelve aún más crítica. Para evitar la retención de calor en las zonas en contacto directo con la superficie del material, es esencial incorporar un agitación durante el proceso. Este agitación no solo contribuye a mantener una distribución

uniforme de la temperatura, sino que también favorece una transferencia de calor eficiente. En el marco de la simulación de procesos y la termodinámica, comprender y optimizar este aspecto del temple se convierte en un desafío fundamental para garantizar la calidad y consistencia del tratamiento térmico en la industria metalúrgica.

En el ámbito de la investigación, se plantea la hipótesis de que la implementación de simulaciones numéricas y modelos termodinámicos avanzados puede proporcionar conocimientos valiosos para mejorar la eficiencia del proceso de temple. Explorar y validar estas herramientas de simulación permitirá no solo comprender mejor los fenómenos involucrados, sino también optimizar los parámetros del proceso para lograr resultados más precisos y consistentes en la implementación industrial.

1.2 Problema

El temple, un proceso térmico enfocado en potenciar significativamente las propiedades mecánicas del acero mediante un enfriamiento rápido, se enfrenta a retos críticos. Durante el enfriamiento, surgen zonas en el material con temperaturas dispares, generando un proceso no completamente homogéneo. Este desequilibrio térmico conlleva a cambios de volumen en diversas partes de la muestra, originando tensiones debido a transformaciones de fase que afectan la distribución y empaquetamiento en la red atómica. Dichas tensiones resultan en deformaciones, y posteriormente, en fracturas internas [2,3].

Un fenómeno reportado en procesos metalúrgicos, como el templado, es la presencia del efecto Leidenfrost, que obstaculiza el control del enfriamiento mediante la formación de una capa de vapor aislante. La necesidad de un enfriamiento rápido para preservar la resistencia mecánica del material choca con la urgencia de mantener perfiles de temperatura uniformes para prevenir deformaciones [4].

Este dilema entre la velocidad de enfriamiento y la uniformidad de temperatura representa un desafío clave en la eficacia y consistencia del proceso de temple, influyendo directamente en las propiedades finales del acero tratado térmicamente.

La complejidad de este proceso proporciona un campo para la optimización de diversos parámetros, tales como el medio de temple, temperatura del medio, agitación del medio y el control de la rampa de enfriamiento del material. La inmersión del componente de trabajo desencadena una extracción de calor, impactando directamente en la microestructura, y a su vez sobre las propiedades mecánicas finales del material.

1.3 Justificación

La experimentación en procesos que involucran movimientos de fluidos no laminares presenta desafíos notables, como la complejidad para considerar múltiples escenarios de análisis. La modelación numérica emerge como una solución efectiva para superar estas dificultades, desempeñando un papel crucial en la toma de decisiones relacionadas con el diseño, construcción, operación y mantenimiento de proyectos que involucran flujo multifásico.

La aplicación de un programa de dinámica de fluidos computacional (CFD) brinda la capacidad de variar parámetros clave en proceso de temple, tales como temperatura, transferencia de calor, velocidad de enfriamiento y el modo de agitación presente en la tina de temple. Este enfoque no solo permite mejorar las condiciones de trabajo, sino que también ha demostrado ofrecer resultados significativos en entornos industriales [5].

En este contexto, el presente trabajo ha logrado indentificar los parámetros ideales para el tratamiento térmico de aceros 15-5 PH y 17-4 PH, de manera tal que, con base en los resultados obtenidos mediante simulaciones, se podrá llevar a cabo un proceso experimental más efectivo. Esta mejora se traduce en la reducción de defectos de superficie de temple durante la manufactura de piezas forjadas.

Este avance representa un paso crucial hacia la optimización de los procesos de temple, contribuyendo significativamente al desarrollo de soluciones más efectivas y eficientes en el ámbito industrial

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Verificar si el coeficiente de transferencia de calor (HTC por sus siglas en inglés) obtenido mediante el uso de IVF SmartQuench, elaborado por Research Institutes of Sweden (RISE por sus siglas en inglés), puede utilizarse en un software de dinámica de fluidos computacional para escalar las simulaciones a nivel industrial.

1.4.2 Objetivos específicos

Para poder lograr el objetivo general, se propusieron tres objetivos específicos para la realización del proyecto:

1. Medir mediante IVF SmartQuench las curvas de enfriamiento para una barra de Inconel y calcular el HTC.
2. Medir temperatura y velocidad de flujo en una tina de temple industrial utilizando un termopar y un anemómetro para determinar si existe un flujo homogéneo en la tina.
3. Simular, utilizando ANSYS Fluent como software de CFD, con los parámetros previamente medidos para verificar la escalabilidad de la relación entre el HTC y las velocidades de flujo.

1.5 Hipótesis

Los resultados obtenidos mediante el instrumento IVF SmartQuench, en conjunto con las mediciones de velocidades de flujo en la tina pueden ser considerados como referencia en un simulador CFD para verificar la escalabilidad en tinas de temple industrial. Tomando en cuenta el análisis previamente realizado por el grupo de estudio perteneciente.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Proceso de temple

Las propiedades intrínsecas que posee un metal, ya sea su dureza, fragilidad, tenacidad, y otras propiedades mecánicas, son directamente afectadas por la microestructura que la constituye. El temple es un proceso el cual consiste en primero calentar una pieza a su temperatura de austenización para después ser sumergido en un medio de menor temperatura y provocar un enfriado abrupto. Es posible predecir la microestructura resultante de un material si se conocen y pueden manipular las velocidades de enfriamiento a las que se lleva a cabo el tratamiento [6].

El tratamiento de temple se puede caracterizar y analizar utilizando instrumentos especializados, los cuales miden o proporcionan las curvas de enfriamiento resultantes para así determinar el desempeño del temple. Estas curvas de

enfriamiento son producidas cuando se sumerge un material con altas temperaturas dentro de un medio de temple [7]. Al momento que la superficie del material entra en contacto con el medio se produce una transferencia de calor significativa, esta transferencia de calor se divide en tres etapas, las cuales se pueden observar en la Figura 1. Cada una de las etapas presenta una transferencia de calor diferente y cabe recalcar que la fase de la ebullición nucleada es en donde existe una mayor transferencia de calor [8].

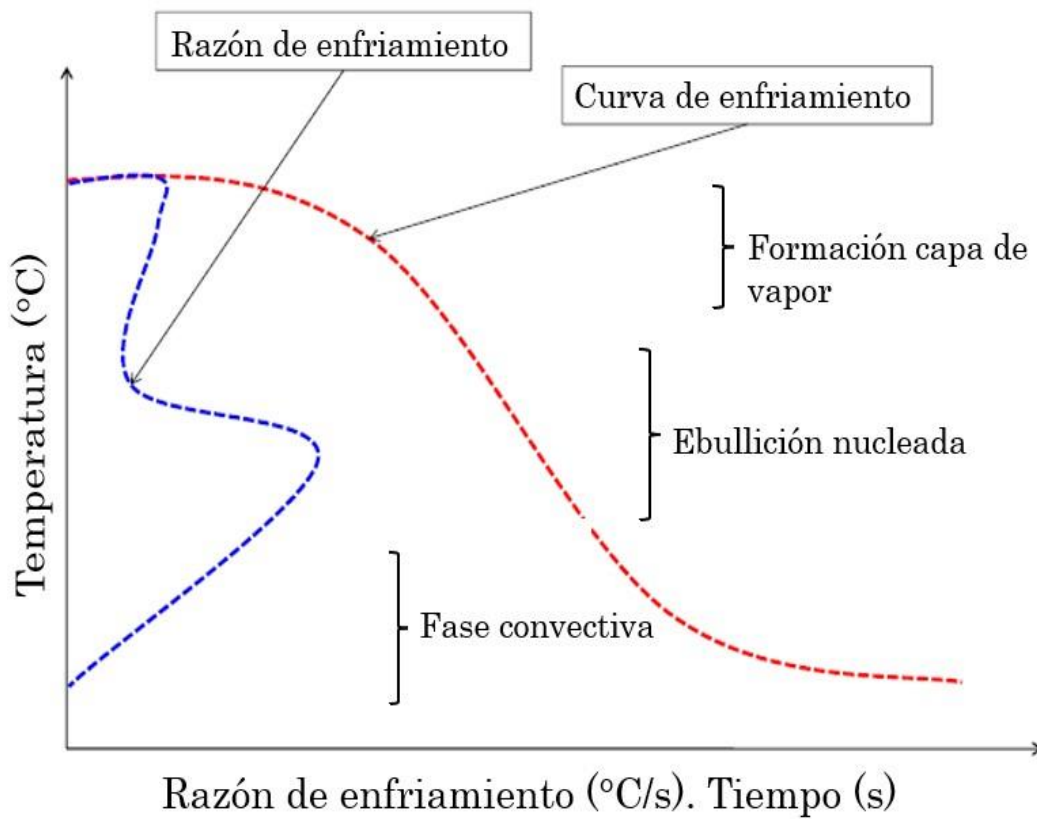


Figura 1. Transferencia de calor en las diferentes etapas de temple. [8]

2.1.1 Formación capa de vapor

Esta etapa de enfriamiento se caracteriza por la formación de una película de vapor alrededor del componente. Cuando la pieza a alta temperatura entra en contacto con el líquido empieza la aparición de burbujas en la interfaz caliente, sin embargo, la nucleación y la tasa de crecimiento de estas burbujas es tan rápido que la superficie del acero es cubierta con una capa continua de vapor [9].

Esta capa de vapor estará presente si la temperatura de la pieza es lo suficientemente alta para alcanzar la temperatura Leidenfrost, provocando que la temperatura de contacto de la pieza exceda la temperatura de saturación del líquido, formando así una evaporación y una ebullición intensivas. En esta etapa de temple el vapor actúa como un aislante, por lo que se da un enfriamiento lento, el cual ocurre principalmente por la radiación a través de la película de vapor. Si la temperatura de contacto es significativamente más alta que la temperatura de saturación del líquido da lugar al efecto Leidenfrost. El fenómeno Leidenfrost es mostrado en la Figura 2, y se puede observar como la gota de agua flota sobre la superficie, y la transferencia de calor desde el componente se ve interferida significativamente por la capa de vapor intermedia [9,10].

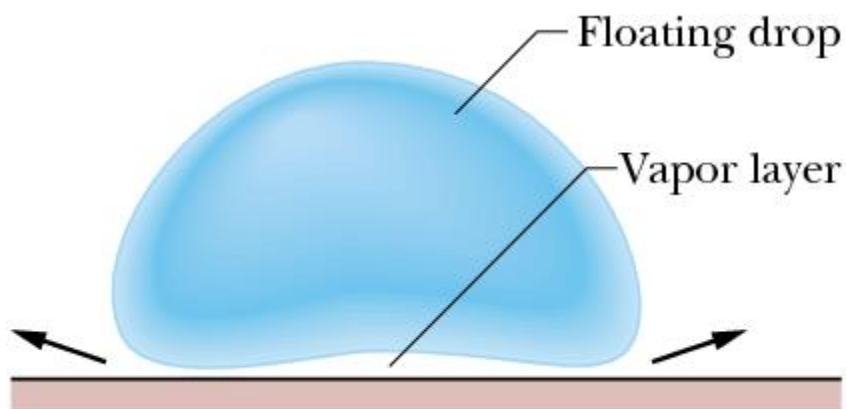


Figura 2. Efecto Leidenfrost: gota de agua flotando sobre una capa de vapor en una superficie a alta temperatura [10]

Cuando el líquido entra en contacto con la superficie caliente, exhibe características hidrodinámicas y de transferencia de calor que dependen del sobrecalentamiento de la superficie denominado ΔT_{sat} , cuya ecuación es mostrada a continuación.

$$\Delta T_{sat} = T_s - T_{sat} \quad 1.1$$

Donde T_s es la temperatura de la superficie y T_{sat} es la temperatura de saturación del líquido a presión ambiente [10].

Como se muestra en la Figura 3, hay cuatro regímenes de transferencia de calor a medida que varía la temperatura de la superficie: régimen monofásico, de ebullición nucleada, ebullición de transición y ebullición de la película [11]. A un ΔT_{sat} bajo, el calor se transfiere por conducción desde la pared al líquido y la evaporación tiene lugar solo a lo largo de la interfaz líquido-gas. Cuando ΔT_{sat} supera el umbral de ebullición nucleada, se forman pequeñas burbujas dentro de la gota. Si ΔT_{sat} aumenta aún más, de manera que llega a una condición crítica de flujo de calor, las gotas entrarán en ebullición de transición. Finalmente, cuando ΔT_{sat} alcanza la temperatura de Leidenfrost, o el punto de Leidenfrost (LFP, por sus siglas en inglés) comienza el régimen de ebullición de la película [10,11].

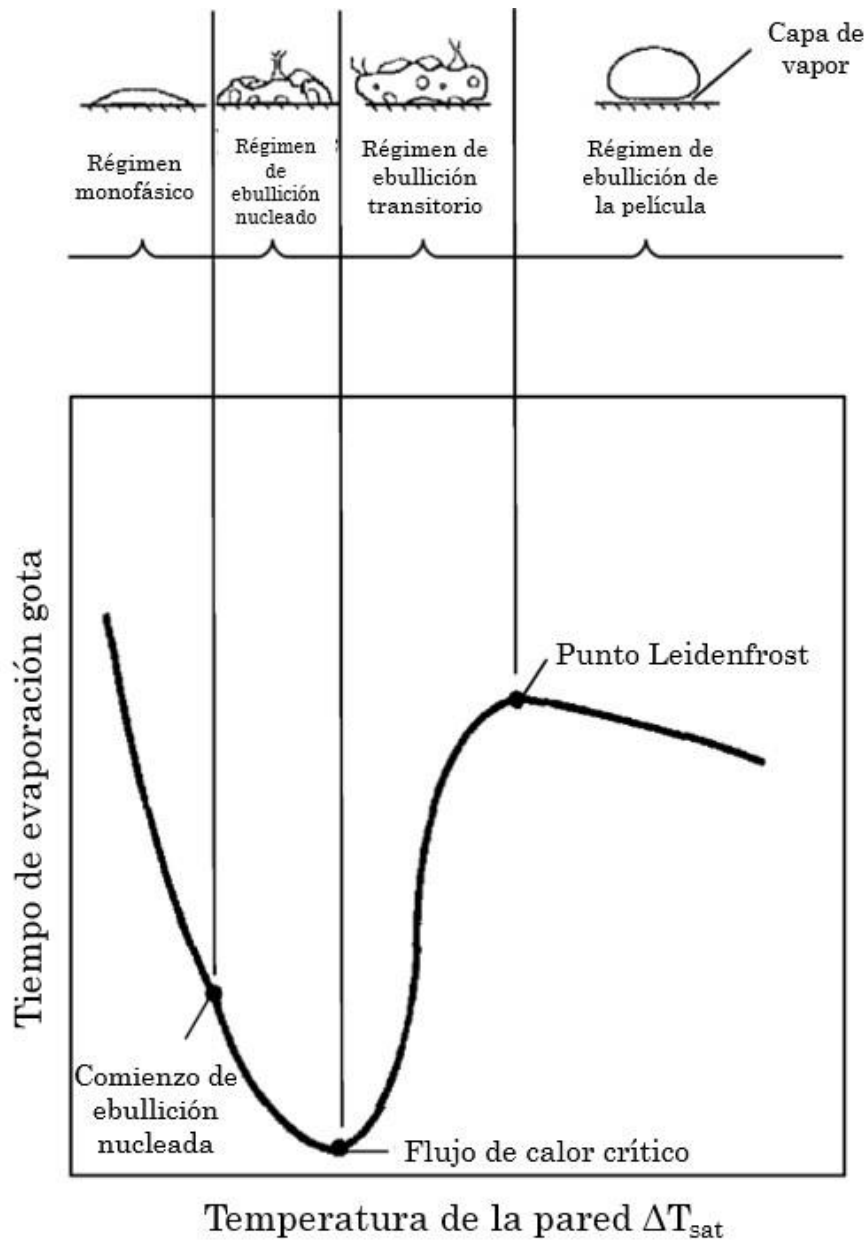


Figura 3. Regímenes de la gota a diferentes temperaturas del componente [10]

Posteriormente, la gota levita desde la superficie de una fina capa de vapor generada por la rápida evaporación desde el fondo de la gota, es decir, el contacto líquido-sólido se elimina por completo. La tendencia a evaporarse de la gota se vuelve más

grande debido a la transferencia de calor por convección intensificada a través de la película de vapor.

2.1.2. Ebullición nucleada

Esta etapa tiene las razones de enfriamiento ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$) más altas, debido a que la nucleación y crecimiento de burbujas es menor, causando que el fluido frío reemplace al anterior líquido desplazado. Este líquido frío es calentado hasta su punto de ebullición lo que da paso nuevamente a la formación de vapor, una vez alcanzado cierto tamaño esta burbuja se libera. Este proceso se repite una y otra vez en esta etapa logrando así una alta extracción de calor y un enfriamiento del acero más rápido [6].

2.1.3 Fase convectiva

Esta etapa comienza en el momento que la temperatura de la superficie del acero alcanza el punto donde la convección del líquido es suficiente para no presentar ebullición. La ebullición se detiene y el enfriamiento se llevará a cabo por conducción y convección del medio del temple [6].

2.2 Transferencia de calor

El medio de temple debe proporcionar una alta transferencia de calor para producir una velocidad de enfriamiento que minimice el cambio microestructural del componente [12].

El coeficiente de la transferencia de calor (HTC por sus siglas en inglés) en un proceso de temple está dado por:

$$h = \frac{q}{A(T_s - T_\infty)} \quad 1.2$$

Donde q es el flujo de calor de la pieza hacia el medio, A el área de la pieza, T_s temperatura de la superficie y T_∞ es la temperatura del medio.

Experimentalmente es posible estimar el coeficiente de transferencia de calor utilizando termopares en el centro geométrico de la pieza, con los cuales se obtienen las diferentes temperaturas con respecto al tiempo, esto para poder realizar curvas de enfriamiento [13].

2.3 Parámetros de temple

Algunos de los factores que afectan la extracción de calor en el proceso de temple son:

2.3.1 Medio de temple

Este factor tiene gran importancia en la razón de enfriamiento en este tipo de proceso. Son muchos los medios que se han investigado a través de los años en el campo del acero, sin embargo, los más utilizados son el agua y la salmuera. Con resultados menos efectivos se encuentran el uso de polímeros diluidos en agua, aceite y algunas sales; los medios menos efectivos en este tipo de procesos son el aire, las atmósferas de gases inertes y el vacío [6].

2.3.2 Temperatura del medio

La temperatura del medio de temple afecta su capacidad de extracción de calor, sin embargo, un medio de temple más frío no dará tasas de extracción mayores. En el caso particular del agua, cuando esta se acerca a su punto de ebullición pierde su capacidad de enfriamiento [6].

2.3.3. Agitación

La agitación del medio causa el rompimiento mecánico de la película de vapor y produce burbujas más pequeñas que promueven una separación más frecuente de las burbujas provocadas en la ebullición nucleada. Con la agitación también se logra reemplazar el líquido caliente que rodea la pieza por líquido frío. Hay dos maneras de realizar la agitación en el medio de temple, por medio del movimiento de las piezas dentro del medio o por la agitación mecánica del fluido [6].

2.3.4 Degradación de polímeros de temple

Los polímeros en el temple son utilizados principalmente para lograr una mayor uniformidad en la transferencia de calor durante el proceso de temple. En la inmersión del componente se forma a su alrededor una película aislante que durante el proceso será removida. El momento de la formación, ruptura y remoción depende de la resistencia de la película de polímero, y de la dirección y magnitud de la agitación [6].

Cuando se inicia el proceso de temple en el contorno caliente del metal se forma una película de polímero que controla la transferencia de calor, y depende del espesor (concentración) y la viscosidad (tipo de polímero y temperatura del líquido).

2.4 Metodología CFD

La dinámica de fluidos computacional tuvo origen a partir de la combinación de la mecánica de fluidos y del cálculo numérico. Proporciona un medio de simulación mediante el uso de métodos numéricos y algoritmos con el que es posible resolver y analizar de forma detallada cualquier sistema relacionado al flujo de fluidos. Algunos de los fenómenos que se producen en el flujo de fluidos son: la transferencia de calor, transporte de sólidos, reacciones químicas [14].

Para encontrar la solución numérica en un software CFD, en especial ANSYS Fluent, se utiliza el método de volúmenes finitos. El método de volúmenes finitos se basa en una discretización del dominio en pequeños volúmenes que llamamos volúmenes de control. Los principios de conservación se aplican a cada volumen de control y estos se resuelven de modo simultáneo asegurando la conservación, tanto en cada celda como globalmente en el dominio. La discretización del dominio es lo que se denomina como el mallado [14].

Capítulo 3. Antecedentes

Para la búsqueda de trabajos previos se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva utilizando ScienceDirect como herramienta. Para el primer filtro de búsqueda de bibliografía realizado, se utilizaron como palabras clave: Heat Transfer Coefficient, quenching, Computational Fluid Dynamics, obteniendo así 4,812 resultados. Posterior a la revisión de los resultados se concluyó afinar la búsqueda para encontrar trabajos más relevantes y con mayor relación. Nuevamente se realizó la búsqueda bibliográfica,

incluyendo la palabra clave Steel alloys y filtrando los trabajos que tienen más de 5 años de antigüedad. Los resultados obtenidos por este método dieron como respuesta 290 trabajos relacionados.

Existen trabajos previos que ayudaron a encaminar el trabajo propuesto. Estos trabajos, aunque no estén del todo relacionados a la temática a tratar, son herramientas clave para entender y conocer que se ha llevado a cabo y que falta por investigar.

El trabajo de tesis de José Antonio Guzmán [15] perteneciente del grupo de investigación conformado por el Dr. Luis Adolfo Leduc Lezama, reportó una correlación entre el coeficiente de transferencia de calor y la velocidad de agitación como se muestra en la Figura 4. Para la experimentación realizada se utilizó la herramienta de IVF SmartQuench para registrar los valores de la curva de enfriamiento y así determinar el HTC. Se validaron los resultados obtenidos utilizando un software de CFD para confirmar las velocidades tangenciales alcanzadas por el medio de temple al chocar con la probeta.

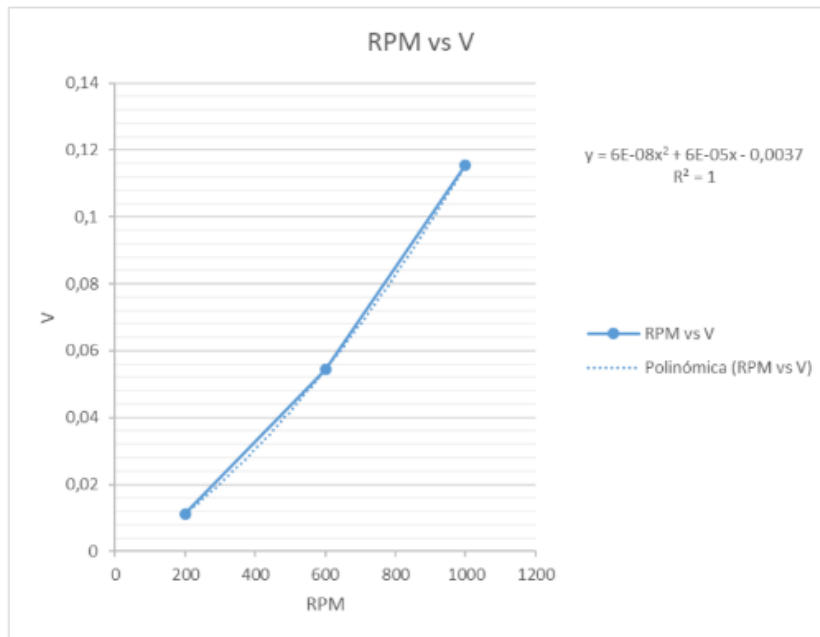


Figura 4. Función de la correlación entre HTC y velocidad de agitación en IVF SmartQuench

Marco Fontecchio et al [16] reporta un estudio con una probeta de aluminio 6061 la cual fue templada en un medio de agua destilada a diferentes temperaturas y velocidades de agitación, se analizó el factor de temple para determinar la severidad de temple que sufrió la probeta. Los resultados reportados mostraron que la razón de enfriamiento durante el temple alcanzó su mayor valor durante las velocidades de agitación más altas.

Manuel Barrena et al [17] reportaron una simulación numérica por un programa de CFD para obtener una correlación entre el esfuerzo cortante y el flujo de calor en la superficie, para un segmento de la industria automotriz. Como resultado propusieron

optimizaciones en el diseño de los tanques de temple para mejorar el rendimiento y propiedades de los materiales tratados.

D. E. Lozano et al [18] reporta una experimentación en donde se propone la medición del HTC en una probeta de Inconel y otra de AISI 304, el estudio analizó la variación del HTC dependiendo del medio de temple y la adición de sales de nitrito de sodio con el propósito de evitar la formación de la capa de vapor. Los resultados reportados indican que la presencia de las sales aumenta el HTC hasta llegar a un límite del 4%, las concentraciones con mayor porcentaje mostraron valores de HTC similares a las de 4%.

S. S. Chandel et al [19] reporta un estudio en el cual se evaluó el impacto que tienen las geometrías de salida de los chorros de agua, la cantidad de chorros, así como la distancia entre el chorro de agua y la placa de acero a temprar. El trabajo utiliza el software de CFD ANSYS Fluent para simular y visualizar los efectos que tienen estos parámetros. Se concluye que un chorro de agua a distancias aumenta el HTC un 2.1% a diferencia de dos chorros de agua sobre una placa, los dos chorros de agua mostraron un aumento en el HTC de hasta un 16.3% al momento de colocarlos estratégicamente.

Joo H. Moon et al [20] reporta un estudio en donde se investigó numéricamente el efecto que tiene en el HTC y la velocidad de enfriamiento el realizar un tratamiento de temple de una pieza cilíndrica dentro de una geometría confinada específica. Utilizaron ANSYS Fluent como software de CFD para simular y entender el efecto que tiene el cambio de fase líquido a gas durante el proceso de temple en donde se promueve la formación de la capa de vapor. Concluyeron en el trabajo que se logró reducir la cantidad de fase gaseosa generada al momento de aumentar la velocidad de flujo durante el temple como se muestra en la Figura 5, de igual forma se observó un incremento en el HTC con respecto al aumento de velocidad de flujo.

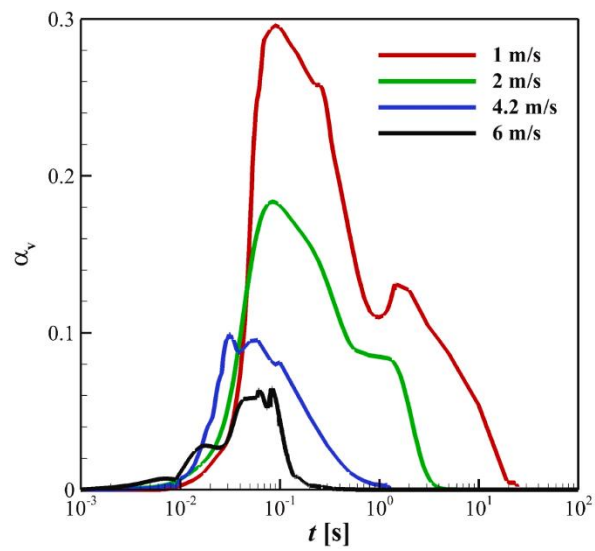


Figura 5. Fracciones volumétricas de la presencia de la fase de vapor a diferentes velocidades

Capítulo 4. Metodología

4.1 Materiales y equipos

En la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL se dispone del equipo de IVF SmartQuench de RISE. Este equipo permite llevar a cabo mediciones del coeficiente de transferencia de calor. Además, se dispone del equipo y software necesarios para analizar de manera efectiva los datos recopilados.

El equipo instrumental incluye como se muestra en la Figura 6, un CD para descargar el software de análisis de datos, un horno de inducción para calentar las probetas a la temperatura deseada, una tina para llevar a cabo el temple, un rotor que sirve para crear velocidades de flujo dentro del medio de temple, probetas de Inconel estandarizadas por RISE para llevar a cabo las mediciones y finalmente un medidor de manos, el cual recopila los datos para transferirlos a la computadora, en donde se utilizó el software ya previamente instalado y se realizó el cálculo del coeficiente de transferencia de calor con las curvas de temperaturas experimentales recopiladas.



Figura 6. Equipo de IVF SmartQuench con tina de agitación

Por otra parte, el software de CFD, computadoras, tinas de temple y el anemómetro automático que se utilizaron para llevar a cabo tanto la experimentación como la simulación de resultados fueron proporcionados por la empresa Frisa en sus instalaciones localizadas en García, NL. Adicionalmente, el agua y polímero utilizado en las tinas de temple de Frisa se embotellaron y se trasladaron a FIME para poder ser utilizados en el proceso experimental.

4.2 Procedimiento experimental

4.2.1 Procedimiento experimental de IVF SmartQuench

El procedimiento experimental para la obtención del HTC mediante el equipo IVF SmartQuench esta reportado en el manual de usuario, utilizando este manual como base se propone el siguiente diagrama de flujo para la obtención del HTC que se puede observar en la Figura 7.

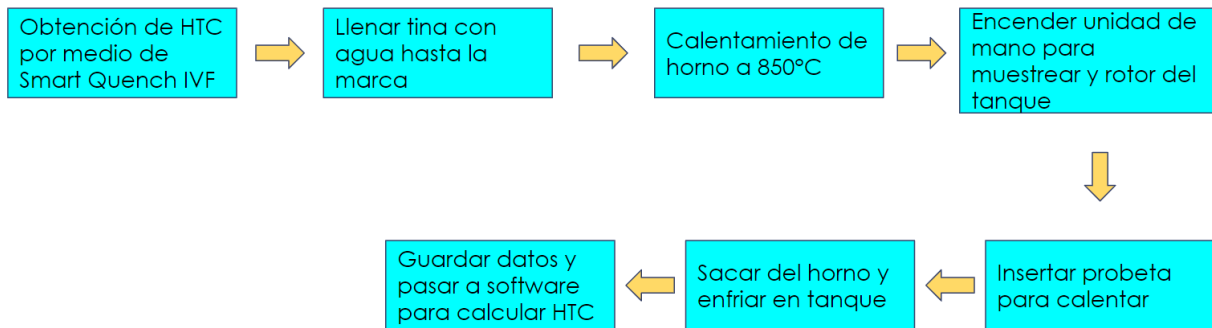


Figura 7. Esquema del procedimiento experimental realizado para IVF SmartQuench

Para llevar a cabo las mediciones de las curvas de enfriamiento con el equipo IVF SmartQuench primeramente se calentaron las probetas de Inconel a 850°C, una vez que la probeta alcanzó la temperatura deseada se retiró y se sumergió a la tina para llevar a cabo el quenching. Finalmente, las curvas de enfriamiento resultantes se registran en la unidad de mano.

De acuerdo con la ruta experimental propuesta, los datos experimentales recopilados por la unidad de mano se transfieren a una computadora en donde se analizó el HTC con la ayuda de un software incluido en el equipo IVF SmartQuench.

Los parámetros que se tomaron en consideración para las mediciones de las curvas de enfriamiento utilizando el IVF SmartQuench fueron: varianza de 200, 600 y 1000 rpm en rotor de la tina y el medio de temple de la industria, agua de la empresa.

4.2.2 Procedimiento experimental de velocidades de tina y simulación

Esta sección experimental se realizó en conjunto con el trabajo de tesis de doctorado de Andrés Felipe Molina Torres perteneciente al mismo grupo de investigación del Dr. Arturo Juárez Hernández y Dr. Luis Adolfo Leduc Lezama [21]. La fase de la obtención de velocidades experimentales del temple se realizó en una tina ubicado en una empresa de forja de la localidad ver Figura 8.



Figura 8. Tina de temple

Una vez obtenidas las velocidades de flujo encontradas en la tina de temple, se utilizó el programa de ANSYS Fluent como método comparativo para poder analizar las diferencias o similitudes generadas por la simulación.

Para llevar a cabo las simulaciones en ANSYS Fluent, Frisa proporcionó un archivo .CAD con las geometrías de la tina de temple ya dibujadas. Una vez seleccionado el archivo con las geometrías de la tina se llevaron a cabo los siguientes pasos para realizar la simulación. Primero se realizó un mallado del diseño de la tina, el mallado consiste en seleccionar la cantidad de polígonos que se encuentran en una determinada área. La cantidad de polígonos que se seleccionan es proporcional a la

calidad de simulación que se obtendrá. Sin embargo, es importante seleccionar una alta calidad de polígonos solamente en áreas de la tina que realmente sean de interés. Ya que la cantidad de polígonos totales encontrados en la tina afectaran el tiempo necesario que requiere el software para finalizar la simulación. Al finalizar el mallado se decidió que 500,000 polígonos era la cantidad necesaria para una resolución adecuada con respecto al tiempo. El siguiente paso es la selección de los parámetros como: velocidad de los rotores, ecuación de turbulencia a emplear, cantidad de iteraciones a seguir y el tipo de fluido. Respectivamente, se utilizó una velocidad de 2000 rpm, estándar K-épsilon, 200 iteraciones y agua en estado líquido. Finalmente se seleccionaron los planos o cortes de la tina en donde se llevan a cabo las mediciones de velocidad en la simulación. Se propusieron hacer cortes verticales que atraviesan cada par de impulsores y además se propusieron cortes en el eje z para poder entender mejor las velocidades de flujo desde la salida hasta la zona de enfriamiento de la pieza.

Para realizar las simulaciones de HTC y temperatura, se siguió la metodología previamente mencionada. Adicionalmente, se seleccionó la opción de cuantificar energías, seleccionando el acero como valor de referencia de HTC, los rangos de temperatura empleados fueron de 870-25°C.

Capítulo 5. Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la presente investigación, los cuales están divididos en tres etapas acorde a los objetivos específicos planteados.

5.1 Validación de IVF SmartQuench

5.1.1 Gráficas de temperatura contra HTC con IVF SmartQuench

La siguiente gráfica fue elaborada usando los datos experimentales que se obtuvieron utilizando la herramienta de IVF SmartQuench.

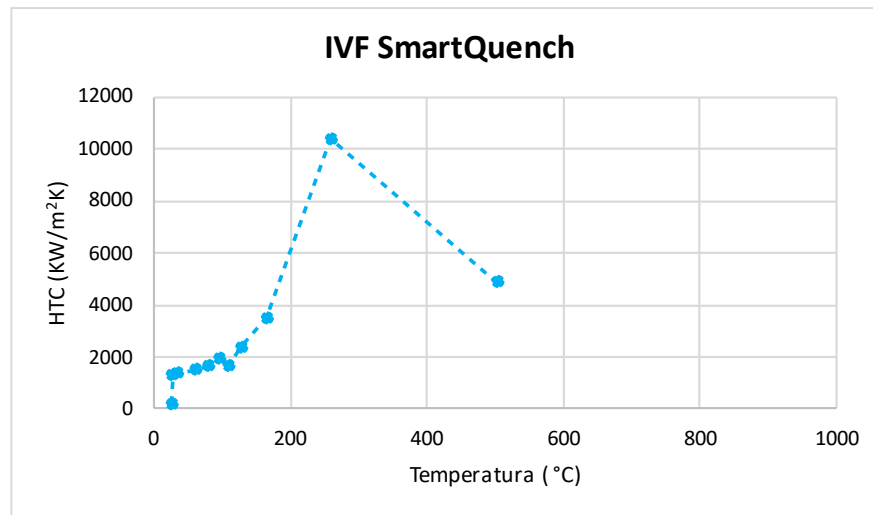


Figura 9. Grafica de HTC vs temperatura obtenido con IVF SmartQuench

Los parámetros considerados fueron en medio de temple y la variación de velocidad de agitación dentro de la tina para observar el efecto en los valores de HTC.

Como se puede observar en el anexo A1 y A2 conforme aumenta el RPM del rotor y la velocidad de agitación crece, los valores del HTC también muestran un crecimiento así mostrando una tendencia de obtener un valor mayor de HTC a una agitación mayor.

Las mediciones con agua destilada tienen una mayor dispersión que con el agua industrial, se propone que las sales y contaminantes encontrados dentro del agua industrial promueve una formación homogénea de la capa de vapor en las piezas de temple. También destaca que el agua destilada presenta valores mayores de HTC a RPM más bajos.

Los valores de HTC máximos reportadas en agua de la empresa y agua destilada como medio de temple a 200, 600 y 1000 RPM respectivamente fueron de 10171.5, 10404.7, 11481.9 KW/m²K y de 11510, 11329.104, 11206.652 KW/m²K. Estos valores hacen concordancia con lo previamente establecido. El efecto Leidenfrost se hace presente durante el temple, y la solución para remover esta capa de vapor que mitiga las transferencias de calor que ocurren, es agregar un elemento de turbulencia o movimiento en el agua. De tal manera, los resultados observados confirman el efecto en donde se propone que aumentar la velocidad de agitación disminuye el efecto Leidenfrost y aumenta el HTC durante el temple.

5.1.2 Gráficas de temperatura contra HTC con Ansys Fluent

La siguiente gráfica fue elaborada utilizando los resultados obtenidos de Ansys Fluent como simulador computacional.

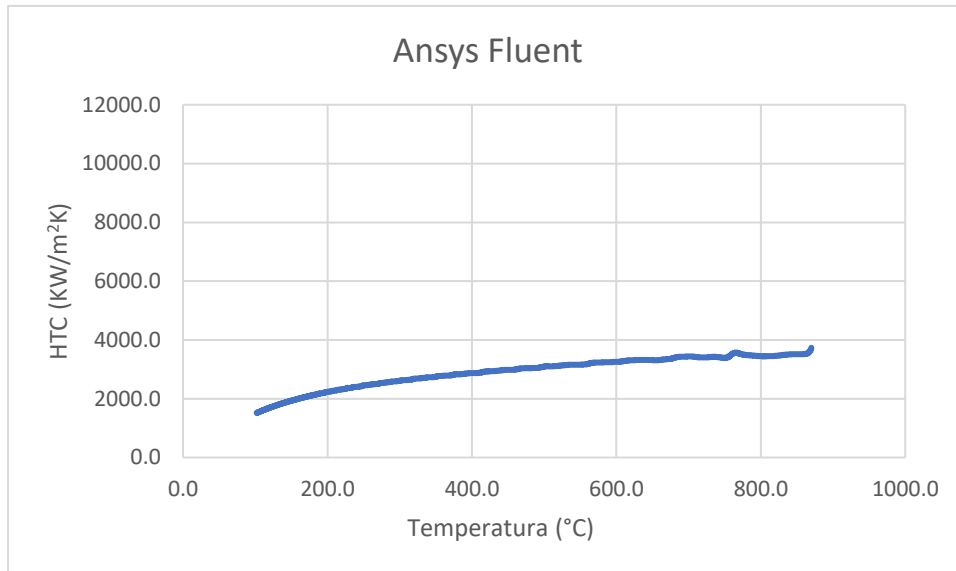


Figura 10. Grafica de HTC vs temperatura obtenido con Ansys Fluent

Para la simulación en Ansys se requirió utilizar ciertos parámetros iniciales, dichos parámetros se basaron en las temperaturas iniciales que se utilizaron en el IVF SmartQuench así como también las velocidades de agitación medidas en las tinas de temple en Frisa. Por cuestiones de dificultad del manejo del programa computacional no se tomó en cuenta el efecto Leidenfrost como parámetro dentro de las simulaciones.

La gráfica que se observa en la Figura 10 muestra un comportamiento lineal y con poca varianza en el HTC. El valor máximo de HTC obtenido por la simulación fue de 3736.3 KW/m²K.

5.1.3 Comparación de los resultados obtenidos

Como se puede observar al comparar las Figuras 9 y 10 las gráficas obtenidas presentan resultados diferentes a los que se esperaba. Ciertamente se esperaban valores de HTC diferentes entre los resultados, sin embargo, el comportamiento lineal que presenta la Figura 10 no hace concordancia con los resultados obtenidos por los experimentos

reales. Adicionalmente, la Figura 9 muestra un comportamiento similar a los resultados reportados por la literatura con un pico característico que ocurre entre los 150-400°C [22-24]. Por lo que se toma como referencia las gráficas obtenidas con los resultados del SmartQuench y se descartan las simulaciones obtenidas por Ansys Fluent.

Cabe hacer un hincapié, en la necesidad de tomar en cuenta el efecto Leidenfrost durante el temple en las simulaciones computacionales, como una recomendación para trabajos a futuro.

5.2 Medición de velocidad de flujo: evaluación de la homogeneidad en una tina de temple industrial

Como se reportó en la sección experimental, las velocidades de tina experimentales se midieron con un anemómetro automático que tomaba 10 velocidades por minuto, estas velocidades se promediaron y se reportaron en los esquemas que se muestran en las Figuras 11, 12 y 13.

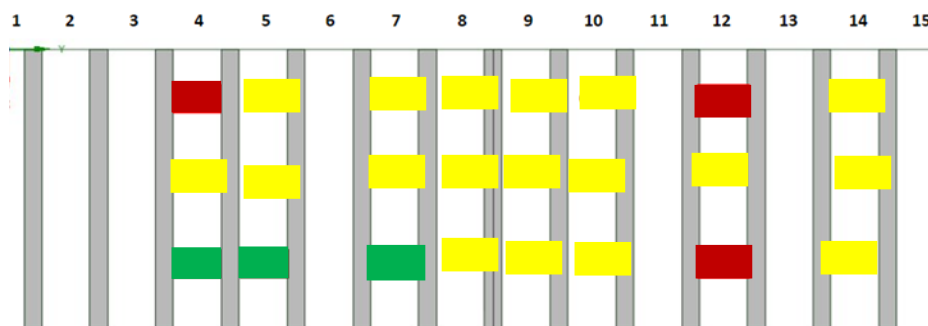


Figura 11. Esquema de tina de temple con velocidades (m/s) resultantes a 50 cm

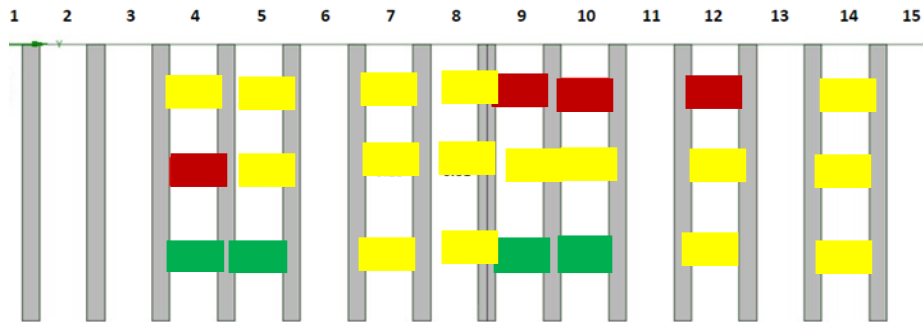


Figura 12. Esquema de tina de temple con velocidades (m/s) resultantes a 100 cm

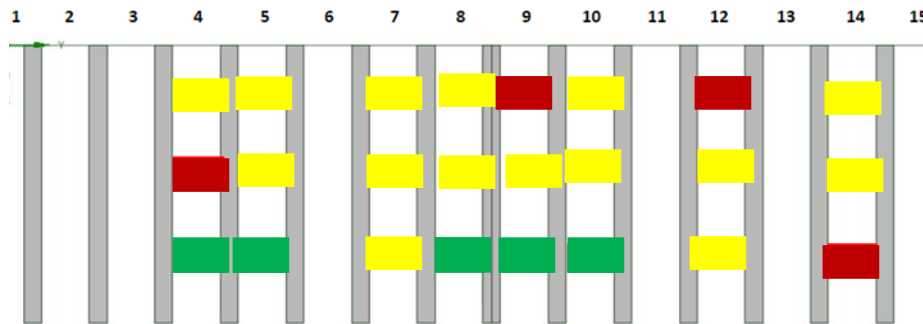


Figura 13. Esquema de tina de temple con velocidades (m/s) resultantes a 150 cm

Como se pueden observar en las figuras, existen números remarcados en color verde, estos valores de m/s son las velocidades más bajas que se midieron. Dichos valores bajos se presentan específicamente en las zonas donde trabajan el par de impulsores 1 y 4. Igualmente se puede apreciar como los números remarcados en rojo corresponde a los valores con mayores velocidades obtenidas que pertenecen principalmente a la zona de los impulsores 3 y 6.

Se obtuvieron las siguientes velocidades máximas y mínimas a 50, 100 y 150 cm de altura respectivamente, 0.69 y 0.12, 0.98 y 0.09, 0.95 y 0.09 m/s.

Los resultados obtenidos son diferentes a los esperados, puesto que la tina presenta una geometría homogénea en donde se encuentran 3 pares de impulsores y tiene una figura rectangular, se esperaría tener como resultado un patrón o un espejado en las velocidades de flujo de mitad a mitad de la tina. Sin embargo, esto no se aprecia en los resultados. Estas diferencias se atribuyen primeramente a que ocurre una posible delaminación en las piezas metálicas a templar. La delaminación por templado es un fenómeno relativamente normal al momento de templar aceros high strength low alloy (HSLA por sus siglas en inglés) [25]. Estas delaminaciones tienen como consecuencia que pequeños fragmentos del metal se hundan en la tina y choquen con los tubos de escape o los deflectores, teniendo como consecuencia una deformación de la geometría y por consecuente una reducción en la velocidad de flujo.

Otro posible factor que afecte las velocidades experimentales es el error humano, Como se puede observar en las Figuras 11, 12 y 13, al realizar las mediciones a diferentes profundidades, se esperaría tener como resultado una disminución gradual pero notable en la velocidad. Sin embargo, no se observan una reducción de velocidades, incluso existen velocidades mayores en los resultados de 150 cm comparado con los resultados a 50 cm, atribuible a una falla al momento de la captura de datos, considerando que para la captura de velocidades experimentales se utilizó un anemómetro metálico pesado con una longitud de aproximada de 1.2 m y que requería mantenerse a 90° para la medición adecuada de las velocidades, lo anterior limitando la captura de datos.

5.3 Resultados de la simulación CFD con ANSYS Fluent: comparativa entre velocidades de flujo experimentales y simuladas

5.3.1 Cortes en vertical

Para realizar la simulación por ANSYS Fluent se siguió la metodología descrita en el respectivo apartado. Como se mencionó en la metodología, para la recopilación de velocidades en simulación se decidieron hacer cortes verticales que demuestren las velocidades producidas por cada par de impulsores.

Primero el segundo deflector en ambos lados no está redireccionando el flujo para arriba, creando un punto o zona muerta. Adicionalmente, en las etapas finales de los impulsores 1-4 y 2-5 muestran que hay pérdidas considerables en las velocidades en dos instancias, primero pierden velocidad al chocar con los deflectores, pero después el flujo redireccionado choca con las vigas que sujetan las piezas a temprar y como resultado se observan velocidades de flujo bajas en estas zonas.

5.3.2 Cortes en horizontal

Adicionalmente a los cortes realizados en vertical, se hicieron cortes en horizontal para conocer las velocidades en diferentes profundidades con la finalidad de corroborar los datos experimentales y también para conocer los lugares clave para tener colocar piezas de temple.

85 cm

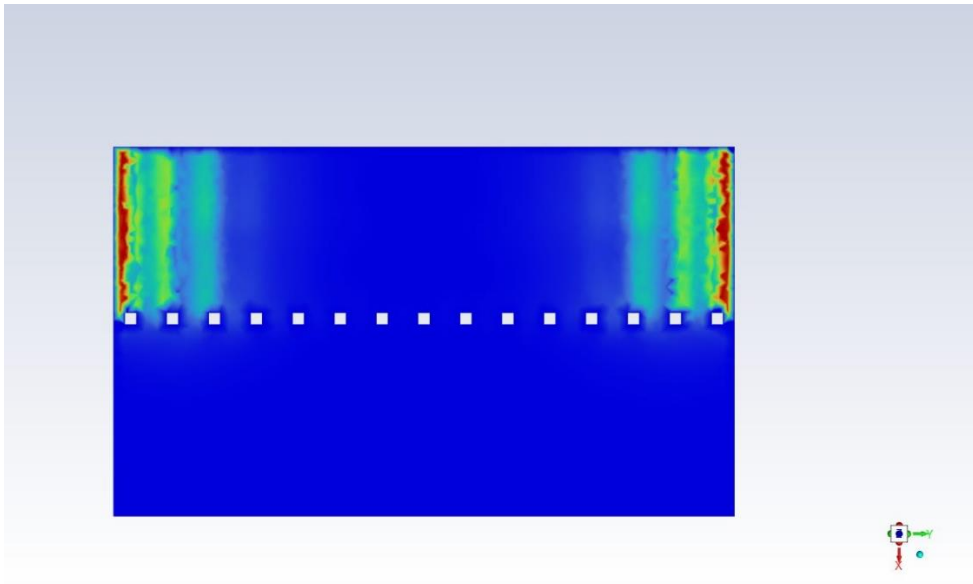


Figura 14. Etapa inicial de simulación de velocidad a 85 cm de profundidad

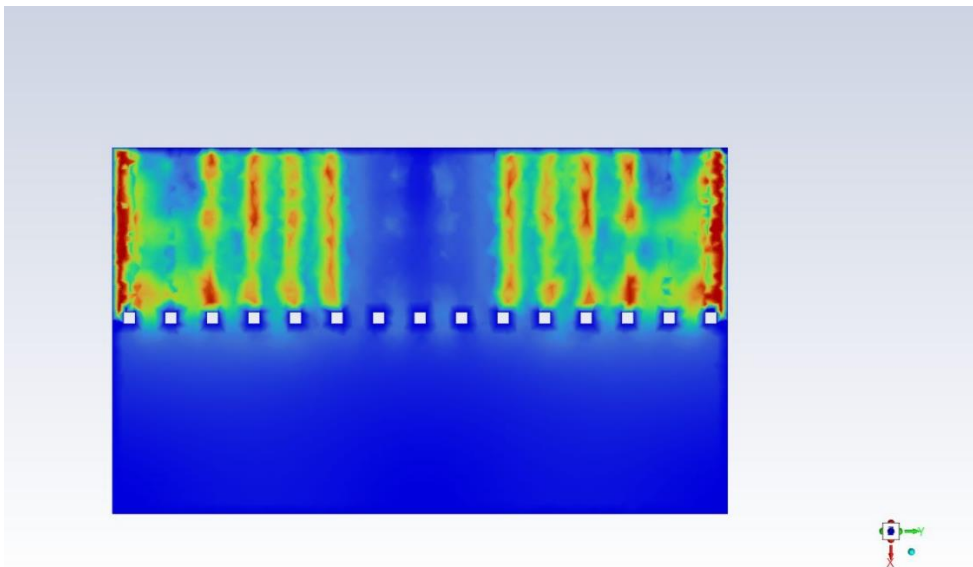


Figura 15. Etapa intermedia de simulación de velocidad a 85 cm de profundidad

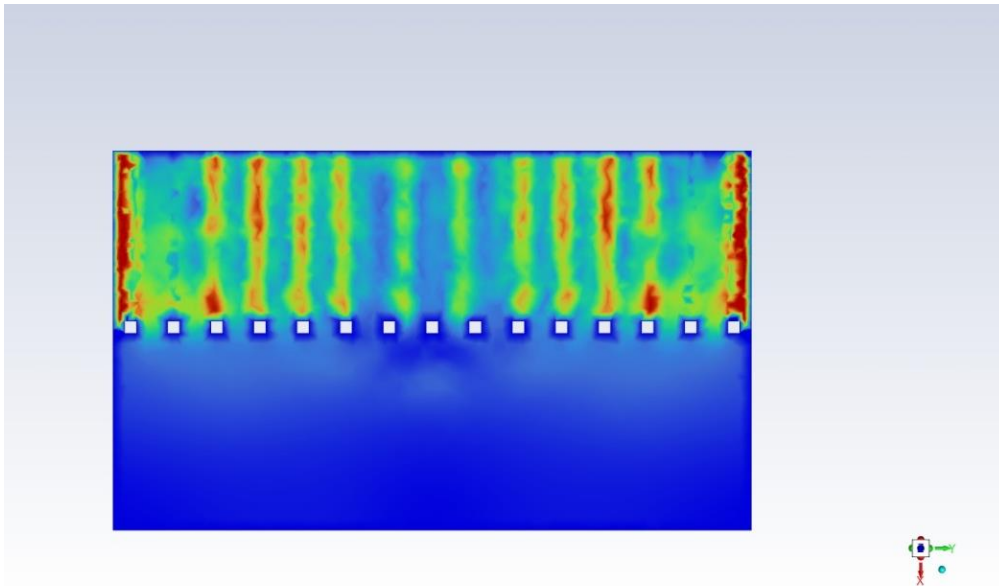


Figura 16. Etapa final de simulación de velocidad a 85 cm de profundidad

160 cm

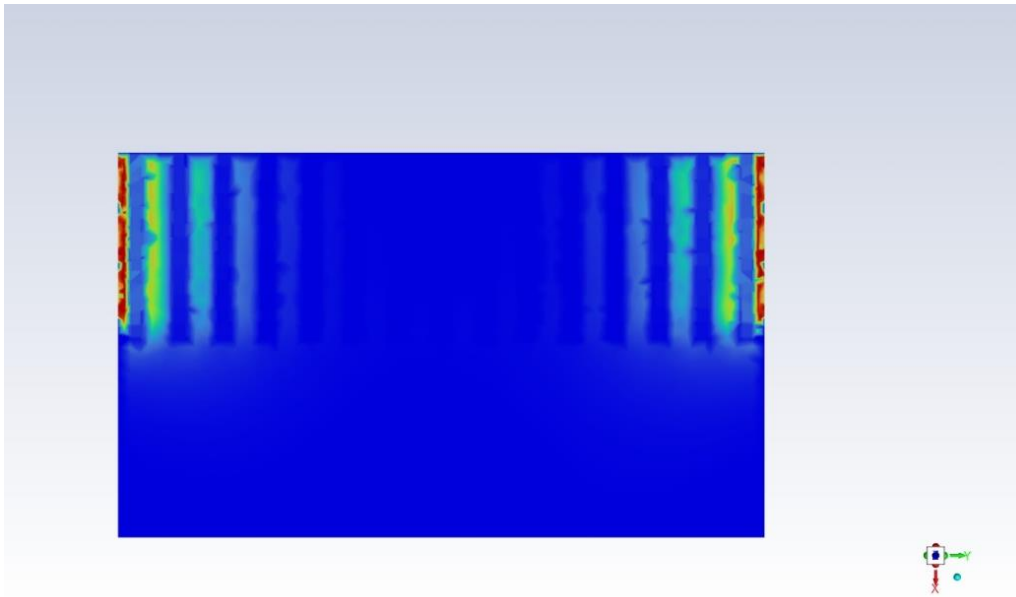


Figura 17. Etapa inicial de simulación de velocidad a 160 cm de profundidad

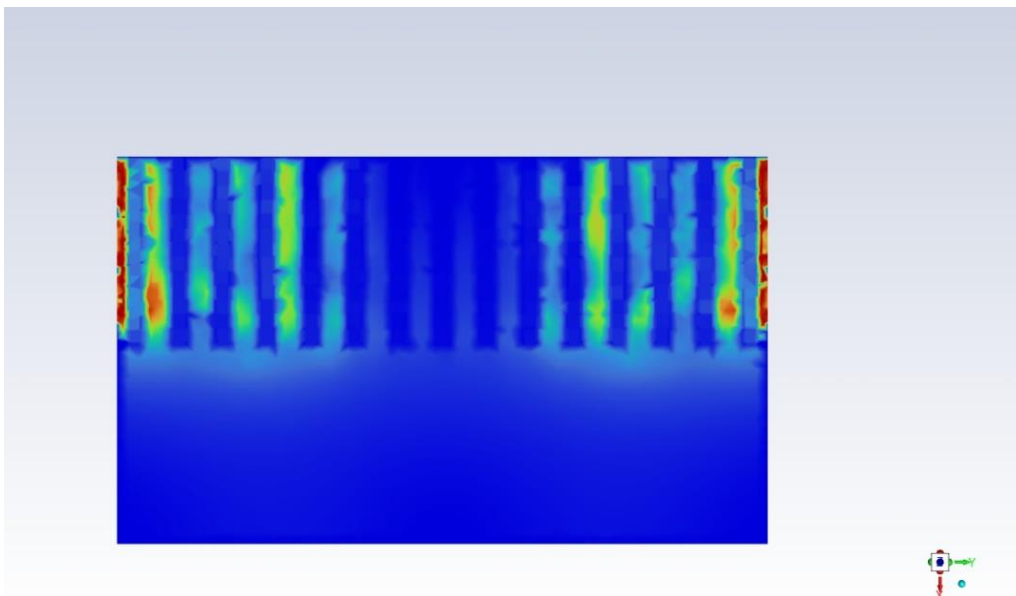


Figura 18. Etapa intermedia de simulación de velocidad a 160 cm de profundidad

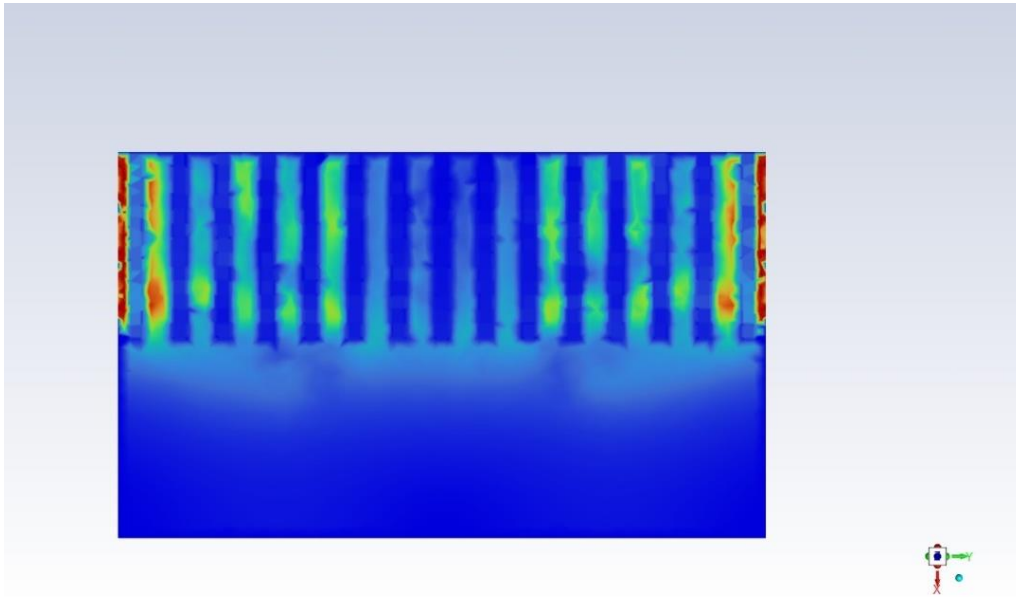


Figura 19. Etapa final de simulación de velocidad a 160 cm de profundidad

200 cm

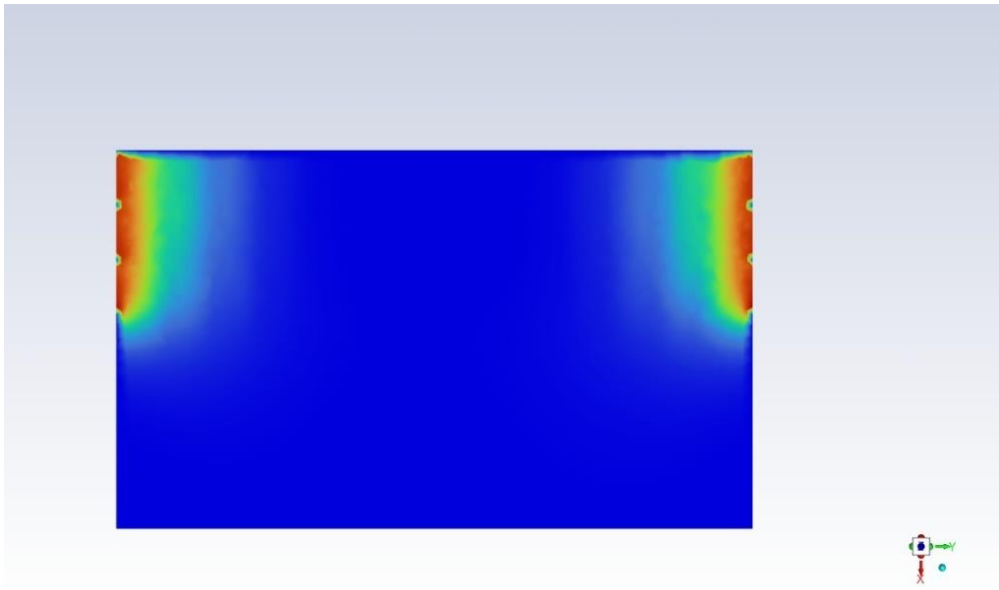


Figura 20. Etapa inicial de simulación de velocidad a 200 cm de profundidad

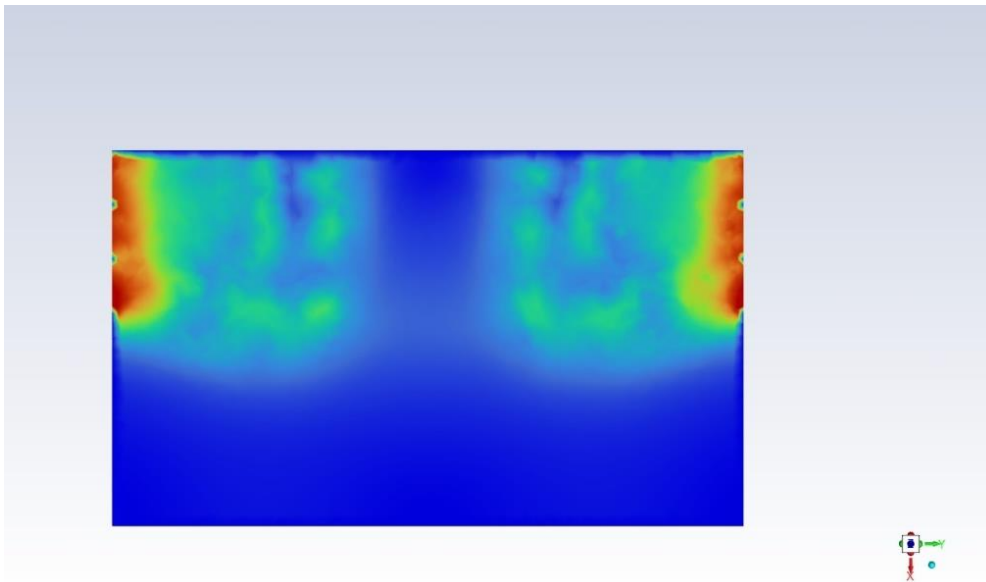


Figura 21. Etapa intermedia de simulación de velocidad a 200 cm de profundidad

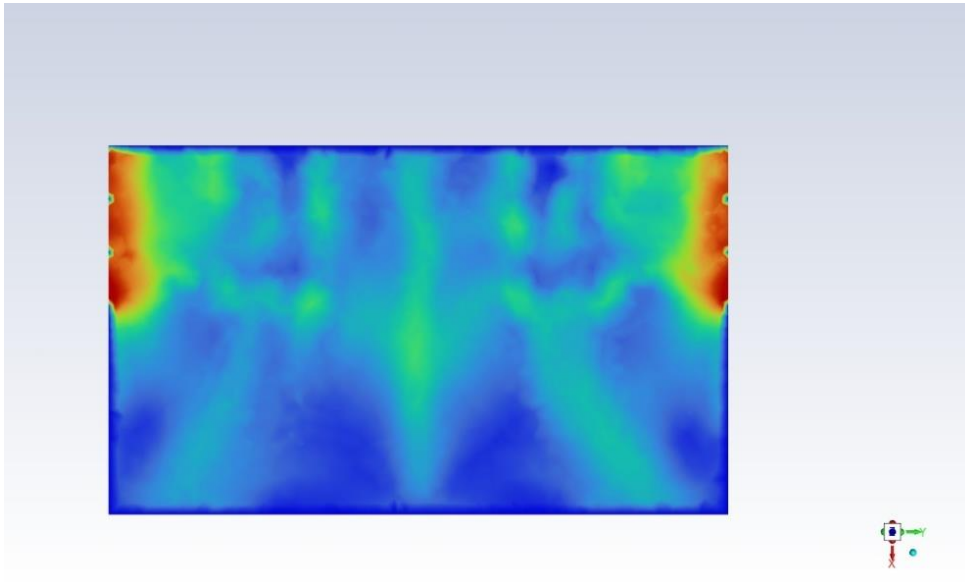


Figura 22. Etapa final de simulación de velocidad a 200 cm de profundidad

Como se puede observar en la Figura 15 y 16, las zonas de baja velocidad se están creando en los impulsores 1 y 4, este dato se puede corroborar con los valores experimentales obtenidos; así como también se aprecia en la Figura 15 en donde, como se discutió anteriormente, el segundo deflector de ambos lados está redireccionando la corriente de agua. Adicionalmente, en la figura 19 se puede observar como las velocidades de flujo más altas no se encuentran en medio de la tina. Este es un dato muy crítico, ya que todas las piezas de temple a nivel industrial en Frisa se colocan de manera aleatoria y normalmente colocan la pieza en la parte central de la tina, lo cual se corrobora en cada una de las figuras correspondientes, lo que implica menor eficiencia. Finalmente es importante mencionar que como el HTC aumenta proporcionalmente con la velocidad de flujo, así como la capa de vapor se elimina; es

indispensable la planeación de el acomodo de las piezas de temple, así como también el mantener en condiciones óptimas las tinas de temple.

5.4 Resultados de la simulación CFD con ANSYS Fluent: evolución del HTC y la temperatura durante el proceso de temple

Siguiendo la metodología descrita previamente, se realizó la simulación del HTC y la temperatura de una barra de acero en un proceso de temple. Se consideraron las interacciones entre la temperatura del agua y, además, las velocidades de flujo. Como resultado de estas simulaciones, se obtuvieron las siguientes figuras:

Se establece una correlación inversa entre el Coeficiente de Transferencia de Calor (HTC) y la temperatura. Las áreas con valores elevados de HTC presentan, en la misma representación gráfica, regiones con temperaturas más bajas, y viceversa. Es crucial destacar que la presencia de variaciones en las temperaturas a lo largo de la barra es un aspecto problemático. La heterogeneidad térmica en la pieza aumenta la probabilidad de formación de grietas de temple, lo que, a su vez, resultaría en una barra carente de propiedades mecánicas deseables.

Además, la temperatura del agua alrededor de la pieza fluye hacia el centro de la tina, dificultando así la creación de una circulación efectiva de agua a menor temperatura. De manera similar, se confirma que el flujo del agua en contacto con la barra se desplaza hacia arriba, impidiendo su recirculación en los impulsores.

Capítulo 6. Conclusión

En el presente trabajo se realizó un estudio a nivel laboratorio y uno a nivel planta sobre el proceso de temple y se puede concluir lo siguiente con los datos finales reportados.

Los valores de HTC máximos reportadas en agua a nivel industrial como medio de temple a 200, 600 y 1000 RPM y por medio del equipo de IVF SmartQuench respectivamente fueron de 10171.5, 10404.7 y 11481.9 KW/m²K.

El valor máximo de HTC obtenido por la simulación CFD de Ansys Fluent fue de 3736.3 KW/m²K.

Se obtuvieron velocidades máximas y mínimas a 50, 100 y 150 cm de altura respectivamente, 0.69 y 0.12, 0.98 y 0.09, 0.95 y 0.09 m/s.

En función de estas observaciones, se recomienda para futuros trabajos la planificación de una logística que permita acomodar las piezas de manera que se aprovechen de manera efectiva los patrones de las velocidades de flujo del medio de temple. Esta mejora en la gestión logística podría contribuir a optimizar el proceso de temple, mitigando los impactos negativos observados y mejorando la calidad final de las piezas.

6.1 Recomendaciones a futuro

Se recomienda para trabajos a futuro el realizar las simulaciones de transferencia de calor utilizando otro programa de software que pueda alimentarse con los resultados obtenidos por el IVF SmartQuench.

Adicionalmente cabe recalcar que la aplicación del IVF SmartQuench para calcular los valores de HTC atendiendo a la baja resolución de la gráfica de HTC contra temperatura que realizó el SmartQuench y que se considera que esto pudiera ser un efecto en el error de la medición del HTC en un medio, se recomienda elaborar una aplicación independiente que procese las mediciones de la temperatura y tiempo originales.

Finalmente se recomienda analizar el efecto del polímero industrial como medio de temple y el efecto que tiene en los valores de HTC.

Capítulo 7. Bibliografía

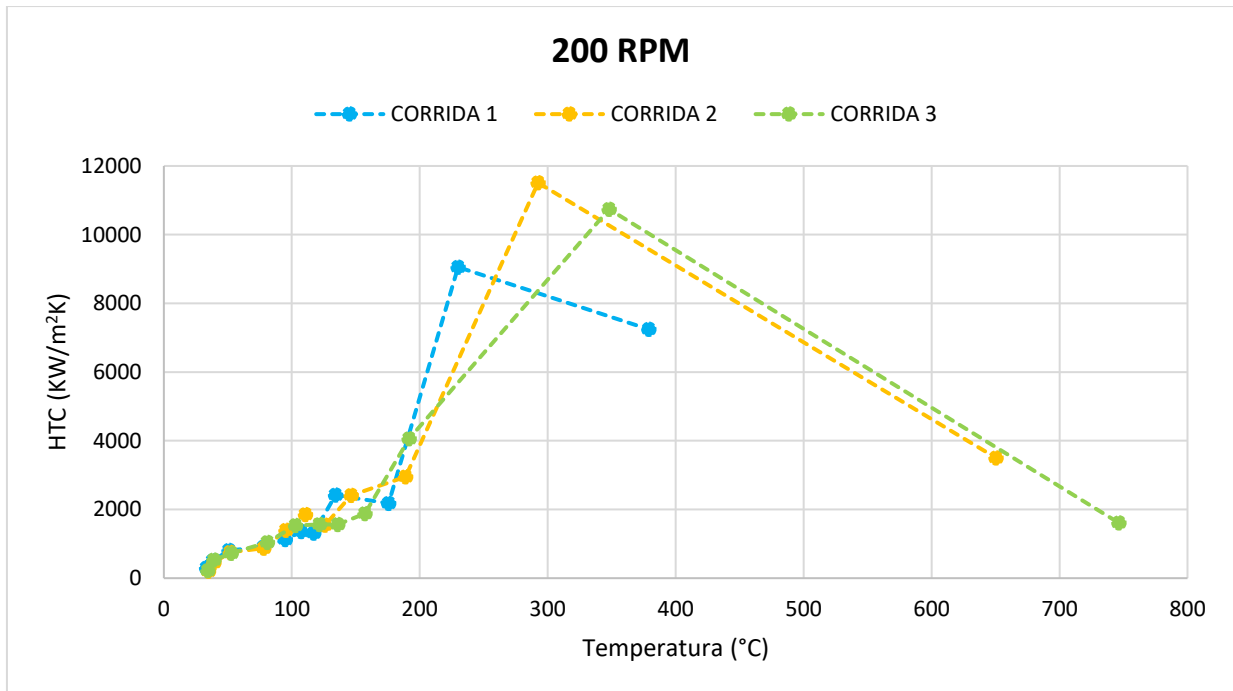
- [1] J. H. I. Lienhard and J. H. V Lienhard, (2003). A Heat Transfer Textbook, 3rd ed. Cambridge Massachusetts: Phlogiston Press.
- [2] Dossett, Jon L. Totten, George E. (2013). ASM Handbook, Volume 04A - Steel heat Treating Fundamentals and Processes. ASM International.
- [3] Krauss, George. (2015). Steels – Processing, Structure, and Performance (2nd Edition). ASM International.
- [4] Walker, Jearl. (1994). Boiling and the Leidenfrost Effect. Phys. Educ. 29.
- [5] Shen, R. Jiao, Z. Parker, T. Sun, Y. & Wang, Q. (2020). Recent application of Computational Fluid Dynamics (CFD) in process safety and loss prevention: A review. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104252>
- [6] Liščić, B., Tensi, H. M., & Luty, W. (Eds.). (1992). Theory and Technology of Quenching. (2nd ed.). CRC Press.
- [7] Chaves, J.C. "The Effect of Surface Condition and High Temperature Oxidation on Quenching Performance of 4140 Steel in Mineral Oil, in Manufacturing Engineering" (2001), Worcester Polytechnic Institute, Worcester, pp. 8-29.
- [8] Chandler, Harry. (1995). Heat Treater's Guide - Practices and Procedures for Irons and Steels (2nd Edition). ASM International.

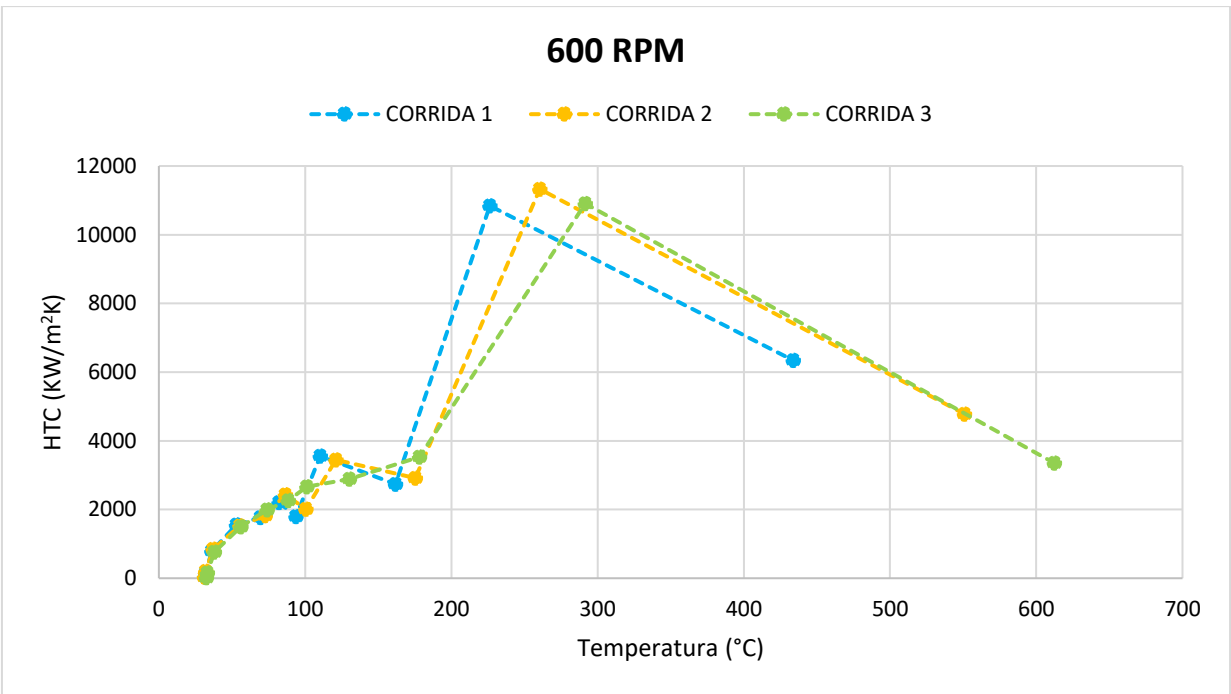
- [9] Talari, V., Behar, P., Lu, Y. Leidenfrost drops on micro/nanostructured surfaces. *Front. Energy* 12, 22–42 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11708-018-0541-7>
- [10] Bejan, Adrian Kraus, Allan D. (2003). Heat Transfer Handbook. John Wiley & Sons.
- [11] Bernardin, J. & Mudawar, Issam. (1999). The Leidenfrost Point: Experimental Study and Assessment of Existing Models. *Journal of Heat Transfer-transactions of The Asme - J HEAT TRANSFER*. 121. 894-903. <https://doi.org/10.1115/1.2826080>
- [12] Taraba, B. Duehring, S. Španielka, J. & Hajdu, Š. (2012). Effect of Agitation Work on Heat Transfer during Cooling in Oil ISORAPID 277HM. *Strojniški Vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 58(2), 102–106 <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2011.064>
- [13] Malinowski, Z., Telejko, T., Cebo-Rudnicka, A., Szajding, A., Rywotycki, M., & Hadała, B. (2016). Heat transfer coefficient distribution over the inconel plate cooled from high temperature by the array of water jets. *Journal of Physics* DOI:[10.1088/1742-6596/745/3/032093](https://doi.org/10.1088/1742-6596/745/3/032093)
- [14] ANSYS, (2011) ANSYS CFD-Solver Theory Guide.
- [15] Guzman, J. (2019) relación entre el coeficiente de transferencia de calor (htc) y la velocidad de agitación en quencho test. UANL
- [16] Fontecchio, M. & Maniruzzaman, Mohammed & Jr, R.. (2003). The effect of bath temperature and agitation rate on the quench severity of 6061 aluminum in distilled water. *International Surface Engineering Congress - Proceedings of the 1st Congress*. 449-456. <https://doi.org/10.1520/JAI101840>

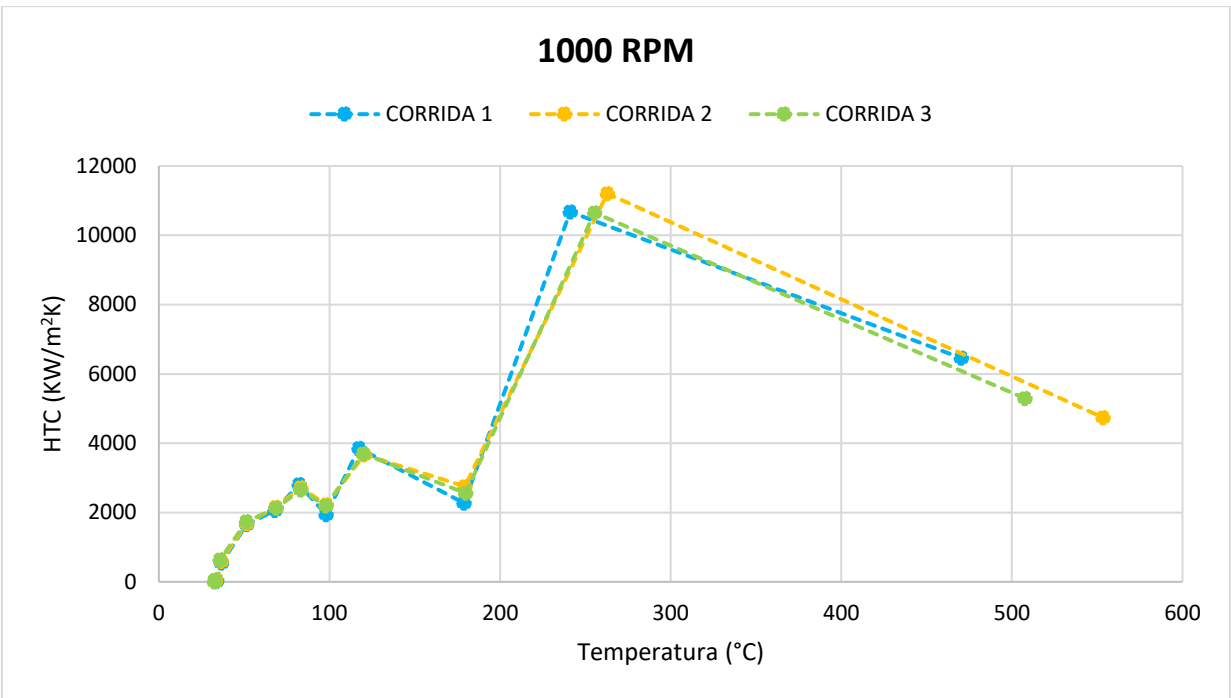
- [17] Barrera-Rodríguez, Manuel & González-Melo, Marco & Acosta-González, Francisco & Alfaro, Eddy & Garcia-Pastor, F. (2017). An Efficient Fluid-Dynamic Analysis to Improve Industrial Quenching Systems. *Metals*. 7. 190. <https://doi.org/10.3390/met7060190>
- [18] Lozano, D. & Mercado-Solis, Rafael & Colás, Rafael & Canale, Lauralice & Totten, George. (2012). Heat Transfer Coefficients during Quenching of Inconel and AISI 304 Stainless Steel Cylinders in NaNO₂ Aqueous Solutions.
- [19] Sheshang Singh Chandel, Abhinav Maurya, Prince Kumar Singh (2022) Numerical investigation of quenching technique for steel alloy hardening process using twin liquid jets, *Materials Today: Proceedings*, Volume 62, 7348-7352, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.368>
- [20] Joo Hyun Moon, Jungho Lee, Seong Hyuk Lee, (2022) Numerical study of the boiling heat transfer characteristics of bluff body quenching in cylindrical tube, *Case Studies in Thermal Engineering*, 32(19), 101900. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101900>
- [21] Andrés Felipe Molina Torres; Tesis de doctorado FIME UANL en desarrollo.
- [22] Kobasko, Nikolai. (2011). Effect of Accuracy of Temperature Measurement on Determination of Heat Transfer Coefficient during Quenching in Liquid Media. *Journal of ASTM International*. <https://doi.org/10.1520/JAI104173>
- [23] Nallathambi, Ashok & Kaymak, Yalcin & Specht, Eckehard & Bertram, Albrecht. (2009). Distortion prediction during atomized spray and array of jets quenching.
- [24] Hu, Wenyi, Yonghui Jia, Xingrui Chen, Qichi Le, Liang Chen, and Songhua Chen. (2022). "Determination of Secondary Cooling Zone Heat Transfer Coefficient with Different Alloy Types and Roughness in DC Casting by Inverse Heat Conduction Method" *Crystals* 12, no. 11: 1571. <https://doi.org/10.3390/cryst12111571>

[25] Yan, W., Sha, W., Zhu, L., Wang, W., Shan, Y., & Yang, K. (2010). Delamination fracture related to tempering in a high-strength low-alloy steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 41A, 159-171. <https://doi.org/10.1007/s11661-009-0068-y>

Anexo 1 Influencia de velocidad de agitación en HTC enfriamiento con agua destilada







Anexo 2. Influencia de velocidad de agitación en HTC enfriamiento con agua industrial

