



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

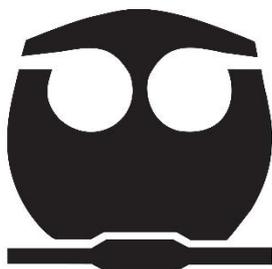
**Análisis de la curva de enfriamiento de una solución  
acuosa de polímero tipo PVP**

**TESIS**

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

**PRESENTA:**

**ALVARO ALEXEI MERLOS CASTAÑEDA**



**CIUDAD DE MÉXICO 2024**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

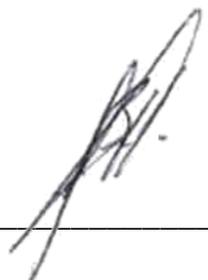
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición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

Presidente: Prof. JOSÉ BERNARDO HERNÁNDEZ MORALES  
Vocal: Prof. SERGIO GARCIA GALAN  
Secretario: Prof. ARTURO ALEJANDRO SANCHEZ SANTIAGO  
1er Suplente: Prof. VICTOR ANTONIO ARANDA VILLADA  
2do Suplente: Prof. AGUSTIN RUIZ RAMIREZ

Sitio donde se desarrolló el tema:

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

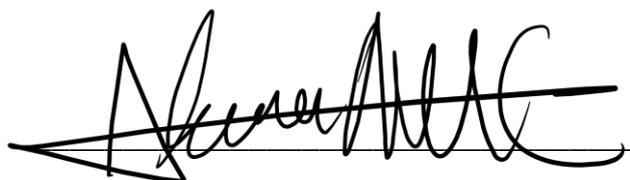
Asesor del tema:



---

Dr. José Bernardo Hernández Morales

Sustentante:

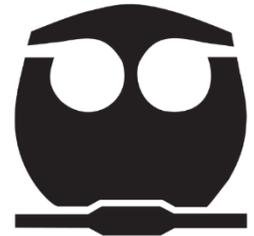


---

Alvaro Alexei Merlos Castañeda



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y  
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL  
(Titulación o Graduación con trabajo escrito)**

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la Institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado Análisis de la curva de enfriamiento de una solución acuosa de polímero tipo PVP que presenté para obtener el título/grado de INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO, es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por la Facultad de Química, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación/graduación.

**Atentamente**

Alvaro Alexei Merlos Castañeda, 316204501

(Nombre completo, firma y número de cuenta)

# Índice

## Contenido

Lista de Figuras .....	iii
Lista de Tablas .....	vi
Resumen .....	1
1 Introducción.....	3
1.1 Justificación .....	4
1.2 Objetivos .....	5
1.2.1 Generales .....	5
1.2.2 Particulares .....	5
2 Antecedentes .....	6
2.1 Tratamientos térmicos del acero .....	6
2.2 Temple .....	6
2.2.1 Medios de temple.....	7
2.2.2 Soluciones acuosas de polímeros .....	10
2.2.3 Calentamiento por inducción.....	13
2.3 Poder de enfriamiento y poder de endurecimiento .....	15
2.4 Curvas de enfriamiento de soluciones acuosas de polímero PVP .....	19
2.4.1 Comparación con otros polímeros .....	23
3 Metodología .....	25
3.1 Experimental .....	25
3.2 Computacional .....	27
4 Resultados y análisis de resultados .....	28
4.1 Resultados .....	28
4.2 Análisis de resultados .....	37
5 Conclusiones.....	57
Bibliografía .....	58

## Lista de Figuras

Figura 2.1. Tratamientos térmicos del acero [2].	6
Figura 2.2 Estructura química de algunos polímeros para temple: (a) polialquilenglicol (PAG), (b) polivinilpirrolidona (PVP), (c) poliacrilato de sodio (PA) y (d) alcohol polivinílico (PVA) [3].	10
Figura 2.3 (a) Patrón de corrientes y el campo magnético en una bobina de solenoide (a), (b). la corriente de Foucault inducida en la pieza [3].	15
Figura 2.4 Curva de enfriamiento en el centro geométrico de una probeta de Inconel 600 para cuatro medios de temple [9].	18
Figura 2.5 Distribución de dureza en una probeta de acero templada en diferentes medios de temple para los siguientes tipos de acero: a) EN19 (AISI 4140), b) EN24 (AISI 4340), c) EN31 (AISI 52100) [9].	19
Figura 2.6 Porcentaje de fases resultantes del enfriamiento en diferentes concentraciones en la superficie y el núcleo [6].	20
Figura 2.7 Dependencia de la viscosidad cinemática de la solución con la concentración de polímero para diferentes pesos moleculares: 1) 1,428,600; 2)789,400; 3) 535,700; 4) 298,800; 5) 158,500 [10].	22
Figura 2.8 Curvas de enfriamiento en el centro de una muestra de acero durante el enfriamiento: (a) en una solución acuosa de polímero al 0.3% y (b) en soluciones con viscosidad cinemática de aproximadamente $3 \times 10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s. Los números del 1 al 5 en las curvas indican peso molecular: 1) 1,428,600; 2)789,400; 3) 535,700; 4) 298,800; 5) 158,500 [10].	22
Figura 2.9 Valores de severidad de enfriamiento de Grossman como función de la concentración, la temperatura del baño y la rapidez de agitación, para soluciones acuosas de(a) PAG y (b) PVP [11].	24
Figura 3.1 Fotografía de la ducha impresa en 3D.	25
Figura 3.2 Esquema de la probeta de Inconel 600 utilizada para los ensayos de temple [8].	25
Figura 3.3 Diagrama del equipo experimental: a) contenedor del medio de temple, b) bomba 1, c) rotámetro, d) horno eléctrico tipo “libro”, e) ducha, f) bomba 2.	26
Figura 4.1 Fotografías de las trayectorias del fluido: solución acuosa de polímero PVP al 14 % (izquierda) y agua (derecha) en la ducha, para distintos valores de flujo volumínico registrado por el rotámetro.	30
Figura 4.1 (cont.) Fotografías de las trayectorias del fluido: solución acuosa de polímero PVP al 14 % (izquierda) y agua (derecha) en la ducha, para distintos valores de flujo volumínico registrado por el rotámetro.	31

Figura 4.2 Curvas de enfriamiento para tres pruebas independientes realizadas a 30 °C, sin polímero y flujo del medio de enfriamiento de 90 LPM. ....	31
Figura 4.3 Curvas de enfriamiento para tres pruebas independientes realizadas a 40 °C, sin polímero y flujo del medio de enfriamiento de 90 LPM. ....	32
Figura 4.4 Curvas de enfriamiento de pruebas independientes realizadas a 30 °C y a 40 °C, sin polímero y flujo del medio de enfriamiento de 90 LPM. ....	33
Figura 4.5 Curvas de enfriamiento de tres pruebas independientes realizadas a 30 °C y 40 °C, con polímero al 6 % y flujo del medio de enfriamiento medido de 85 LPM. ....	34
Figura 4.6 Curvas de enfriamiento de tres pruebas independientes realizadas a 30 °C y 40 °C, con polímero al 9 % y flujo del medio de enfriamiento medido de 73 LPM. ....	35
Figura 4.7 Curvas de enfriamiento para pruebas independientes realizadas a 30 y 40 °C, con polímero al 12 % y flujo del medio de enfriamiento medido de 59 LPM. ....	36
Figura 4.8 Curvas de enfriamiento de pruebas realizadas a 30 y 40 °C, para todas las concentraciones de polímero. ....	37
Figura 4.9 Rapidez de enfriamiento vs. tiempo para las pruebas realizadas a 30 °C y 40 °C, sin polímero y flujo del medio de enfriamiento de 90 LPM. ....	38
Figura 4.10 Rapidez de enfriamiento vs. temperatura local para las pruebas realizadas a 30 °C y 40 °C, sin polímero y flujo del medio de enfriamiento de 90 LPM. ....	39
Figura 4.11 Rapidez de enfriamiento vs. temperatura para las pruebas realizadas a 30 °C y 40 °C, con polímero al 6 % y flujo del medio de enfriamiento medido de 85 LPM. ....	40
Figura 4.12 Rapidez de enfriamiento vs. temperatura para las pruebas realizadas a 30 °C y 40 °C, con polímero al 9 % y flujo del medio de enfriamiento medido de 73 LPM. ....	41
Figura 4.13 Rapidez de enfriamiento vs. temperatura para las pruebas realizadas a 30 °C y 40 °C, con polímero al 12 % y flujo del medio de enfriamiento medido de 59 LPM. ....	42
Figura 4.14 Curvas de enfriamiento y de rapidez de enfriamiento vs. temperatura realizadas a 30 y 40 °C con todas las concentraciones de polímero: a) agua y polímero al 6 %, b) agua y polímero al 9 %, c) agua y polímero al 12 %. ....	43
Figura 4.15 Curvas de enfriamiento y de rapidez de enfriamiento vs. temperatura realizadas a 30 y 40 °C, con todas las concentraciones de polímero. ....	44

Figura 4.16 Rapidez de enfriamiento máxima promedio en función de la temperatura local promedio a la que se obtiene, para cada condición experimental.....	46
Figura 4.17 Tiempo promedio requerido para llegar a 600, 400 y 200 °C para cada condición experimental con un flujo de 90 LPM. ....	48
Figura 4.18 Rapidez de enfriamiento promedio a 300 °C para cada condición experimental con un flujo de 90 LPM. ....	50
Figura 4.19 Curva de enfriamiento en la posición del termopar obtenida experimentalmente (línea gris), estimada (línea punteada color azul) y curva de enfriamiento en la superficie de la probeta estimada (línea naranja) para el enfriamiento realizado con agua a 30 °C y flujo de 90 LPM.....	51
Figura 4.20 Curva de enfriamiento en la posición del termopar obtenida experimentalmente (línea azul), estimada (línea verde) y curva de enfriamiento en la superficie de la probeta estimada (línea amarilla) para el enfriamiento realizado con 6 % de polímero y flujo medido de 85 LPM a 30 °C.....	52
Figura 4.21 Flux de calor en la superficie estimado en función del tiempo para el enfriamiento a 30 °C: con agua 90 LPM (línea amarilla), 6 % de polímero a 85 LPM (línea verde), 9 % de polímero a 73 LPM (línea azul) y 12 % de polímero a 59 LPM (línea morada).....	53
Figura 4.22 Flux de calor en la superficie estimado en función del tiempo para el enfriamiento a 40 °C: con agua (línea naranja), 6 % de polímero a 85 LPM (línea gris), 9 % de polímero a 73 LPM (línea amarilla) y 12 % de polímero a 59 LPM (línea azul). ....	54
Figura 4.23 Flux de calor en la superficie máximo en función de la temperatura de la superficie a la que se obtiene para cada condición experimental. Se grafican los valores promedio de tres pruebas para cada condición experimental.....	56

## Lista de Tablas

Tabla 3.1 Matriz experimental. ....	27
Tabla 4.1 Flujo volumínico registrado por el rotámetro y medido, y presión medida. ....	29
Tabla 4.2 Rapidez de enfriamiento máxima y la temperatura a la que ocurre. ....	45
Tabla 4.3 Tiempo que transcurre para obtener 600, 400 y 200 °C desde la inmersión de la probeta. ....	47
Tabla 4.4 Rapidez de enfriamiento a 300 °C. ....	49
Tabla 4.5 Flux de calor en la superficie máximo y la temperatura superficial a la que se obtiene, ambos estimados mediante el programa WinProbe. ....	55

# Resumen

El objetivo del proyecto fue estudiar el efecto de un polímero tipo PVP (Polivinilpirrolidona) y de la temperatura del medio de enfriamiento (polímero disuelto en agua) sobre el poder de enfriamiento cuando se usa una ducha para temple por inducción, mediante el análisis de curvas de enfriamiento.

Para ello se realizaron ensayos de temple en el laboratorio con una probeta de Inconel 600, enfriándola con una ducha diseñada e impresa 3D. La ducha y la probeta estuvieron estacionarias durante los ensayos.

Se estudio un polímero comercial tipo PVP. La matriz experimental consta de cuatro valores de concentración de polímero (0 %, 6 %, 9% y 12 %) y dos valores de temperatura del medio de enfriamiento (30 °C y 40 °C). Debido a las propiedades físicas de la solución acuosa de este tipo de polímero los ensayos se realizaron a diferentes valores de flujo: 90 LPM (para 0 % polímero), 85 LPM (para 6 % polímero), 73 LPM (para 9 % de polímero) y 59 LPM (para 12 % de polímero). Cada ensayo se realizó por triplicado, lo que resultó en un total de 24 ensayos

Se obtuvieron varios parámetros clave a partir de las curvas de enfriamiento, incluyendo el tiempo necesario desde el inicio del proceso de temple para que la probeta alcanzara 600, 400 y 200 °C. En general, los resultados mostraron una tendencia clara: al aumentar tanto la temperatura del medio de temple como la concentración del polímero, la probeta tardó más tiempo en llegar a las temperaturas deseadas. Por ejemplo, cuando se utilizó un medio de temple a 40

°C con una concentración de polímero al 12%, el tiempo para alcanzar todas las temperaturas fue mayor en comparación con el agua a 30 °C, que resultó ser el medio más eficiente. La única excepción fue que el tiempo para alcanzar 600 °C cuando se utilizó la solución polimérica al 9 % fue menor que para la solución al 6 %.

Además, se determinaron parámetros relacionados con la máxima rapidez de enfriamiento, como la temperatura a la que esta ocurre y la rapidez de enfriamiento a 300 °C, para la cual se encontró que a menor concentración de polímero mayor es la rapidez de enfriamiento a esa temperatura. Estos datos permiten caracterizar el poder de enfriamiento de las soluciones poliméricas cuando se usa la ducha de enfriamiento. Según los resultados experimentales, la rapidez de enfriamiento máxima disminuye a medida que aumenta tanto la temperatura del medio como la cantidad de polímero. Por lo tanto, el agua a 30 °C resultó ser el medio de temple con la rapidez de enfriamiento máxima mayor siendo esta de -184 °C/s, mientras que la solución con 12% de polímero a 40 °C presentó la rapidez de enfriamiento máxima más baja (-103.4 °C/s).

# 1 Introducción

Debido a que las soluciones acuosas base polímero se usan comúnmente como medio de enfriamiento en duchas industriales para temple por inducción, es necesario construir una amplia base de datos del poder de enfriamiento de esa combinación medio de enfriamiento/equipo de temple. Una forma de caracterizar el poder de enfriamiento de un medio de temple es mediante el análisis de la curva de enfriamiento, que se basa en adquirir una curva de enfriamiento medida al interior de una probeta para luego calcular la rapidez de enfriamiento y así determinar parámetros tales como el tiempo para alcanzar 600, 400 y 200 °C, la rapidez de enfriamiento máxima y la rapidez de enfriamiento a 300°C, entre otros. En ese sentido, cabe mencionar que hay numerosos estudios relacionados, pero para temple por inmersión, que no son aplicables al temple mediante una ducha de enfriamiento.

Ejemplos de tipos de polímeros que se usan para temple por inducción son polialquilenglicol (PAG) y polivinilpirrolidona (PVP). A medida que el peso molecular de un polímero aumenta se espera que disminuya el poder de enfriamiento; al respecto, los polímeros tipo PVP usualmente tienen mayor peso molecular que los del tipo PAG. En este trabajo se estudió el efecto de un polímero tipo PVP.

## **1.1 Justificación**

La presente investigación se centra en la comparación de curvas de enfriamiento para un proceso de temple con ducha utilizando un medio de enfriamiento basado en polímero tipo PVP (polivinilpirrolidona) a diferentes concentraciones y temperaturas del medio de temple, para establecer posibles cambios en el poder de enfriamiento de este. Este estudio se justifica por varias razones de relevancia tanto académica como industrial. Desde un punto de vista académico, la investigación sobre medios de temple como el PVP es relativamente nueva y ofrece un amplio campo para la exploración científica. Comparar las curvas de enfriamiento a diferentes concentraciones de PVP no solo proporcionará datos valiosos sobre la eficiencia de estos medios, sino que también contribuirá a la comprensión fundamental de los mecanismos de transferencia de calor involucrados. En el área industrial, los resultados de esta investigación pueden tener aplicaciones directas en la optimización de procesos de tratamiento térmico, mejorando la calidad del producto final y la eficiencia del proceso. Industrias como la automotriz, la aeroespacial y la de manufactura en general podrían beneficiarse de las mejoras en el control del temple y la reducción de rechazos.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Generales**

Estudiar el efecto de: 1) la concentración de polímero (tipo PVP) en solución acuosa y 2) la temperatura de la solución, sobre el poder de enfriamiento durante el temple cuando este medio de enfriamiento se usa en una ducha para temple por inducción.

### **1.2.2 Particulares**

- Obtener, experimentalmente, curvas de enfriamiento - en el centro de la probeta - durante el temple de una probeta de Inconel 600 para las distintas condiciones de experimentación
- Calcular la rapidez de enfriamiento local a partir de las curvas de enfriamiento medidas
- Determinar los parámetros del análisis de las curvas de enfriamiento
- Estimar la densidad de flujo de calor en la superficie de la probeta

## 2 Antecedentes

### 2.1 Tratamientos térmicos del acero

Los tratamientos térmicos son procesos cruciales en la industria metalúrgica, diseñados para modificar las propiedades mecánicas del acero a través de cambios en la microestructura. Estos tratamientos, que incluyen el temple, el revenido, el recocido y el normalizado, entre otros, se realizan bajo condiciones controladas de temperatura y tiempo para optimizar características como la dureza, la resistencia y la ductilidad del material [1]. En la Figura 2.1 se muestran, esquemáticamente, las rutas de enfriamiento de estos tratamientos térmicos.

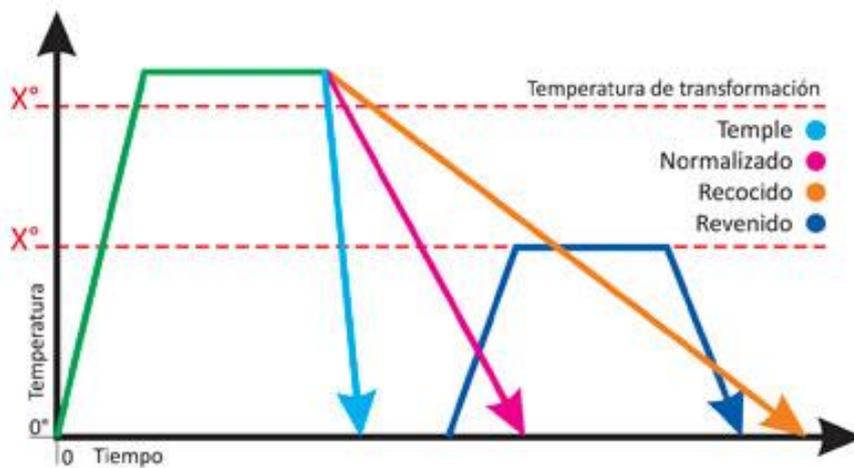


Figura 2.1. Tratamientos térmicos del acero [2].

### 2.2 Temple

El temple es uno de los tratamientos térmicos más utilizados. Su principal objetivo es aumentar la dureza del acero [1]. Este proceso implica calentar el acero a una temperatura alta, generalmente entre 800°C y 950°C, para austenizar el material. Después, se enfría rápidamente en un medio de temple,

como agua, aceite o soluciones poliméricas, lo que provoca la formación de martensita, una estructura cristalina muy dura [1].

Este tratamiento presenta ventajas significativas, como la mejora notable de la dureza y la resistencia a la tracción del acero. Sin embargo, también tiene desventajas, ya que el enfriamiento rápido puede inducir tensiones residuales y causar distorsiones o agrietamientos si no se controla adecuadamente [1].

### **2.2.1 Medios de temple**

La mayoría de los medios de temple convencionales, incluidos el agua, la salmuera, la solución cáustica, el aceite y las sales fundidas, son adecuados para templar piezas. Sin embargo, la idoneidad de cada medio debe relacionarse con piezas específicas y depende principalmente de la templabilidad del acero, los requisitos de dureza superficial y del núcleo, y la cantidad de distorsión permitida [3].

#### **Agua**

El agua agitada vigorosamente produce rapidez de enfriamiento que se acercan a las máximas rapidez alcanzables con los medios líquidos de temple [3]. Es económica, está ampliamente disponible y, a menos que esté contaminada, se puede desechar fácilmente con un mínimo de contaminación o riesgo para la salud. Sin embargo, su rapidez de enfriamiento puede causar distorsión y agrietamiento, por lo que generalmente se restringe a piezas simples y simétricas fabricadas de grados de acero de endurecimiento superficial poco profundo [3].

### **Soluciones acuosas de salmuera**

Las soluciones de salmuera proporcionan una mayor severidad de temple que el agua debido a la presencia de sales disueltas que aumentan la capacidad de extracción de calor. Son útiles para aceros de baja templabilidad donde se requiere un enfriamiento más rápido, pero pueden causar distorsión y agrietamiento en piezas complejas [3].

### **Soluciones acuosas cáusticas**

Las soluciones acuosas cáusticas proporcionan una alta intensidad de temple y son efectivas para enfriar rápidamente piezas metálicas. Sin embargo, deben manejarse con cuidado debido a su naturaleza corrosiva y la posibilidad de causar fisuras superficiales [3].

### **Aceites**

Los aceites de temple tienen una intensidad de temple más baja en comparación con el agua y la salmuera, proporcionando un enfriamiento más controlado y uniforme, lo que reduce el riesgo de distorsión y agrietamiento. Son adecuados para piezas con geometrías complejas y aceros con alta templabilidad [3].

### **Sales fundidas**

Las sales fundidas ofrecen una intensidad de temple intermedia y pueden proporcionar un enfriamiento uniforme y controlado. Son comúnmente utilizadas para piezas que requieren un enfriamiento más lento y uniforme para evitar distorsión y agrietamiento [3].

### **Gases**

El temple con gas o atmósfera se utiliza principalmente para reducir la distorsión, eliminando los altos costos de enderezamiento. En el temple con gas, las piezas

deben cargarse en bandejas de horno cuidadosamente para que las superficies de las piezas puedan enfriarse lo suficientemente rápido como para producir la dureza deseada [3].

### **Pulverizaciones (*sprays*)**

El enfriamiento por aspersión es un proceso en el cual la rapidez de enfriamiento se controla mediante la cantidad y la velocidad del agua que impacta la pieza de trabajo; la velocidad a la que la pieza se desplaza a través de los rociadores es crucial. Problemas como boquillas de rociado obstruidas pueden causar aumentos locales de temperatura en los primeros segundos del enfriamiento, lo que puede recalentar la superficie, debilitando significativamente la pieza. Para evitar interferencias con el calentamiento, el enfriamiento debe aplicarse en un ángulo alejado del cabezal de la flama y debe cubrir completamente la banda calentada. Además, en casos donde la superficie a endurecer es vertical, puede requerirse enfriamiento adicional después del enfriamiento inicial [3].

### **Soluciones acuosas de polímero**

Las soluciones poliméricas ofrecen una intensidad de temple ajustable dependiendo de la concentración del polímero, proporcionando un enfriamiento más uniforme y controlado, reduciendo así el riesgo de distorsión y agrietamiento. Son una alternativa popular al agua caliente debido a su capacidad de humedecer la superficie del metal de manera uniforme durante el temple [3].

## 2.2.2 Soluciones acuosas de polímeros

Los polímeros más comúnmente utilizados en solución acuosa como medio de temple son el polialquilenglicol, la polivinilpirrolidona y los poliacrilatos de sodio [3].

El polialquilenglicol (PAG), o los éteres de polialquilenglicol, se introdujeron por primera vez como productos comerciales a principios de la década de 1940. Estos materiales se formulan mediante la copolimerización aleatoria de óxidos de etileno y propileno, aunque también se pueden utilizar óxidos de alqueno superiores y/u óxidos de arilo. La estructura del PAG se ilustra esquemáticamente en la Figura 2.3(a) [3].

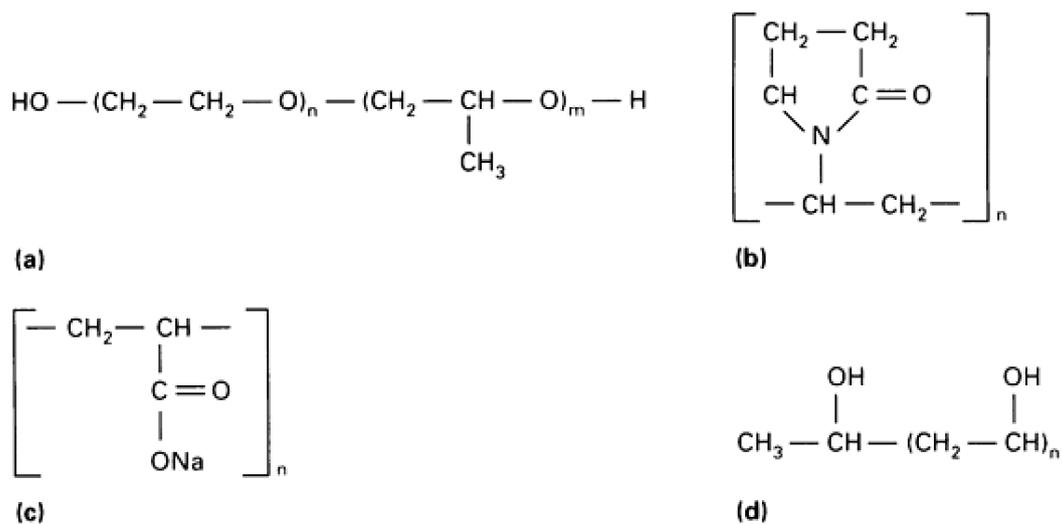


Figura 2.2 Estructura química de algunos polímeros para temple: (a) polialquilenglicol (PAG), (b) polivinilpirrolidona (PVP), (c) poliacrilato de sodio (PA) y (d) alcohol polivinílico (PVA) [3].

La polivinilpirrolidona (PVP) se deriva de la polimerización de N-vinil-2-pirrolidona. La PVP es un polímero soluble en agua caracterizado por sus propiedades de complejación y coloidales, así como por su inercia fisiológica [3].

La PVP está disponible en los Estados Unidos como un polvo blanco de flujo libre, fabricado en cuatro grados de peso molecular. Su estructura se muestra en la Figura 2.3(b). Las soluciones de PVP en agua se introdujeron por primera vez como medios de temple en 1975, coincidiendo con la emisión de la Patente de EE. UU. 3,902,929. La patente define el rango de peso molecular para el polímero de pirrolidona, la cantidad de polímero recomendada para una solución concentrada (generalmente alrededor del 10% de sólidos de polímero) y el uso preferido de un inhibidor de óxido y un conservante bactericida [3].

Otra clase de polímeros que se utiliza para formular templadores poliméricos acuosos es la clase de los poliacrilatos de sodio (PA). Se puede producir mediante la homopolimerización de acrilato de sodio o la hidrólisis alcalina de un éster de poliacrilato. El material tiene la estructura ilustrada en la Figura 2.3(c) [3].

Al igual que la polivinilpirrolidona, las soluciones acuosas de poliacrilato de sodio son solubles hasta el punto de ebullición del agua. Su capacidad para reducir la rapidez de eliminación de calor es proporcional al peso molecular del polímero y su efecto sobre la viscosidad de la solución. Al variar el peso molecular del polímero, se puede diseñar toda una familia de templadores para cubrir aplicaciones que van desde el agua hasta los aceites [3].

El uso de soluciones acuosas de alcohol polivinílico (PVA) como medios de temple se describió por primera vez en la Patente de EE. UU. 2,600,290, emitida en 1952. La estructura química del alcohol polivinílico se ilustra esquemáticamente en la Figura 2.3(d) [3].

El uso de polímeros como agentes de temple conlleva ventajas como la biodegradabilidad, la no toxicidad y la falta de inflamabilidad en comparación con otros medios de temple convencionales. No obstante, es crucial seleccionar el polímero adecuado y ajustar su concentración en la solución de temple para garantizar una rapidez de enfriamiento óptima y obtener las propiedades deseadas en el material tratado térmicamente [4].

### **Efectos de la concentración de polímero y la temperatura del baño**

La concentración del polímero en la solución de temple desencadena una serie de efectos notables en el proceso. En primer lugar, al aumentar la cantidad de polímero en la solución, se tiende a reducir el poder de enfriamiento del sistema. Este fenómeno se origina debido a que el incremento en la concentración provoca un aumento en la viscosidad del fluido, lo que a su vez dificulta la transferencia de calor entre la pieza y el medio de temple por lo que provoca una desaceleración en la rapidez de enfriamiento [6].

Por otro lado, una mayor concentración de polímero puede tener un impacto positivo en la estabilidad de la película de vapor durante el temple. Esto se debe a que el polímero actúa como un escudo protector en la superficie del material, previniendo la formación de burbujas de vapor y facilitando una extinción más lenta de la película de vapor [7].

Además, la concentración del polímero también influye en la uniformidad del proceso de enfriamiento. En líneas generales, concentraciones más bajas de polímero tienden a promover un enfriamiento más homogéneo, ya que permiten una re-humectación rápida del material y una distribución más uniforme del

medio de temple [6]. Estos factores deben considerarse cuidadosamente al diseñar un proceso de temple con soluciones poliméricas.

Es importante tener en cuenta que la concentración óptima de polímero en la solución de temple puede variar según el tipo de polímero, el material a tratar y los requisitos específicos del proceso de temple. Por lo tanto, es necesario realizar pruebas y ajustes para determinar la concentración adecuada que proporcione las propiedades deseadas en el material tratado térmicamente [4].

La temperatura de operación también influye en la intensidad del temple. Un aumento en la temperatura del baño de temple disminuye la fuerza motriz del proceso de enfriamiento. Además, la agitación desempeña un papel significativo al romper la capa de polímero que se forma en la superficie de la muestra. Esto permite una eliminación más eficiente del polímero y, como consecuencia, una rapidez de enfriamiento más alta [7].

### **2.2.3 Calentamiento por inducción**

El temple por inducción comienza con el calentamiento del acero (material conductor de electricidad) mediante la aplicación de un campo magnético variable cuyas líneas de fuerza penetran en la pieza de trabajo. En este proceso, el campo magnético variable induce un potencial eléctrico (voltaje), que genera una corriente eléctrica dependiendo de la forma y las características eléctricas de la pieza de trabajo. Estas llamadas corrientes de Foucault disipan energía y producen calor al fluir contra la resistencia de un conductor imperfecto [3].

Debido a que todos los metales son conductores eléctricos moderados, el calentamiento por inducción es aplicable a varios tipos de operaciones de

procesamiento de metales, como fundición, soldadura, *brazing*, tratamiento térmico, inducción de tensiones, refinamiento zonal y calentamiento previo al trabajo en caliente [3]. Esta técnica también se presta a una variedad de aplicaciones de materiales no metálicos, incluyendo el pegado de adhesivos, grafitización del carbono, secado, curado y sobrecalentamiento del vidrio. De estas aplicaciones, el tratamiento térmico predomina en términos del número de unidades utilizadas, siendo el endurecimiento superficial del acero y el hierro fundido el uso más prevalente [3]. Comparado con las técnicas de calentamiento en horno, el calentamiento por inducción a menudo puede proporcionar ahorros de energía y rapidez de calentamiento mucho más altas que la convección [3].

Los componentes básicos de un sistema de calentamiento por inducción son una bobina de inducción, una fuente de alimentación de corriente alterna (CA) y la propia pieza de trabajo [3]. La bobina, que puede tener diferentes formas según el patrón de calentamiento requerido, está conectada a la fuente de alimentación para que se genere un campo magnético a partir del flujo de corriente (Fig. 2.2). La magnitud del campo depende de la intensidad de la corriente y del número de vueltas en la bobina [3].

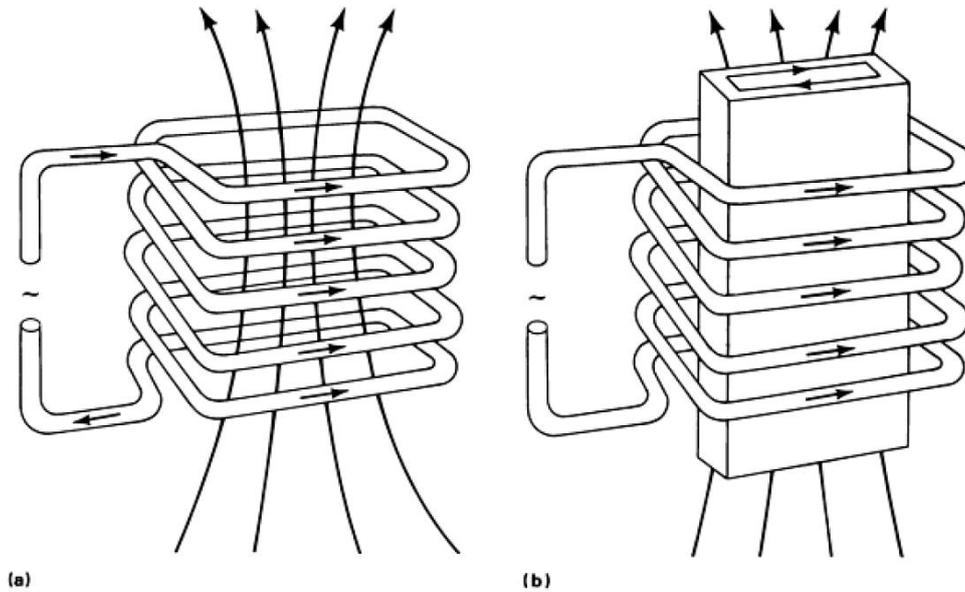


Figura 2.3 (a) Patrón de corrientes y el campo magnético en una bobina de solenoide (a), (b). la corriente de Foucault inducida en la pieza [3].

### 2.3 Poder de enfriamiento y poder de endurecimiento

Dos metodologías aplicadas en el diseño y control de procesos de temple son la caracterización del poder de enfriamiento y del poder de endurecimiento [9].

El poder de enfriamiento se refiere a la capacidad de un medio de enfriamiento para extraer calor de un material caliente de manera eficiente y controlada. En la bibliografía se suele discutir este concepto en relación con diferentes medios de enfriamiento y sus efectos en el tratamiento térmico del acero [9]. Se caracteriza – entre otras técnicas - a partir de la curva de enfriamiento.

Las curvas de enfriamiento son herramientas fundamentales para analizar el comportamiento térmico de materiales durante procesos de enfriamiento, especialmente durante el tratamiento térmico de temple. Estas curvas registran la variación de la temperatura con respecto al tiempo en un punto específico de una muestra, proporcionando una representación visual de la rapidez de

enfriamiento y, en consecuencia, de los mecanismos de transferencia de calor implicados [6, 9, 10].

Para obtener una curva de enfriamiento, se sumerge una probeta en un medio de enfriamiento y se mide la temperatura como función del tiempo en un punto específico dentro de la muestra. Los datos recolectados permiten calcular una curva de rapidez de enfriamiento, que es la primera derivada de la curva temperatura-tiempo respecto al tiempo. Las probetas pueden tener diversas formas, tales como cilindros, placas o esferas, siendo el cilindro la configuración más común debido a su capacidad de minimizar los efectos de enfriamiento en los extremos [6]. De los datos registrados se obtiene la curva de rapidez de enfriamiento, calculando la primera derivada de la temperatura con respecto al tiempo ( $\partial T/\partial t$ ) de la curva de enfriamiento **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

De acuerdo con el estándar de la norma ASTM D6482, la información que se debe reportar del análisis de curvas de enfriamiento y de rapidez de enfriamiento es [5, 8]:

- ✓ De la curva de enfriamiento se reporta el tiempo - desde la inmersión - requerido para que la probeta llegue a 600, 400 y 200°C.
- ✓ De la curva de rapidez de enfriamiento se reporta la rapidez de enfriamiento máxima, la temperatura a la que ocurre y la rapidez de enfriamiento a 300°C.

La prueba puede mostrar los efectos de la oxidación, la presencia de aditivos y sus concentraciones, o contaminación, en las características de enfriamiento del

medio de temple, ya sea aumentando o disminuyendo su poder de enfriamiento  
**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Por ejemplo, Matthews *et al.* [9] analizaron el poder de enfriamiento de diferentes medios de temple: agua destilada, aceite mineral, solución de polímero (PAG) al 10% y agua carbonatada. Los resultados muestran que el poder de enfriamiento varía significativamente entre ellos debido a sus propiedades termofísicas y comportamientos de humectación diferentes [9]. En la Figura 2.4 se presenta la rapidez de enfriamiento obtenida en los experimentos de Matthews *et al.* [9]; se observa con claridad el efecto de los diferentes medios en el poder de enfriamiento. El agua destilada exhibe la rapidez de enfriamiento más alta debido a su alta capacidad térmica y conductividad, mientras que el aceite mineral tiene una potencia de enfriamiento más baja, resultando en menores rapidezces de enfriamiento. Por su parte, la solución de polímero (PAG) al 10% y agua carbonatada presentan poder de enfriamiento intermedio, con la solución de polímero ofreciendo una mayor uniformidad en la distribución de la dureza.

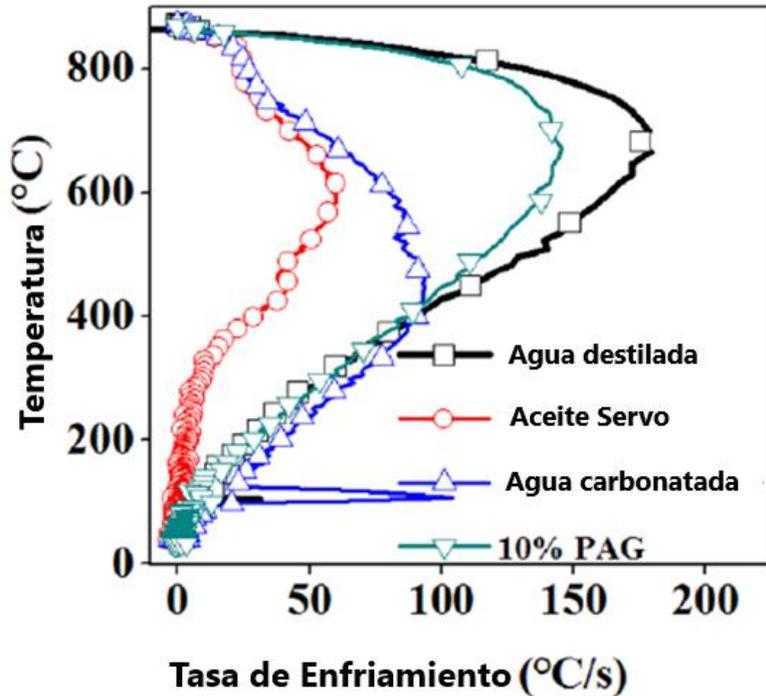


Figura 2.4 Curva de enfriamiento en el centro geométrico de una probeta de Inconel 600 para cuatro medios de temple [9].

Por su parte, las metodologías de poder de endurecimiento miden distribuciones de dureza después del temple. En la Figura 2.5 se presentan graficas del mismo trabajo de Matthews *et al.* [9] en las que se muestra el perfil radial de dureza (en unidades Vickers) obtenido con distintos aceros: a) EN19 (AISI 4140), b) EN24 (AISI 4340), c) EN31 (AISI 52100) y los medios de enfriamiento estudiados. Se observa que para los primeros dos aceros el tratamiento que produce una mayor dureza cerca de la superficie es el que se realiza con agua destilada, aunque la solución al 10% de polímero tipo PAG produce durezas similares, mientras que las menores durezas registradas para los tres aceros se producen con aceite y agua carbonatada.

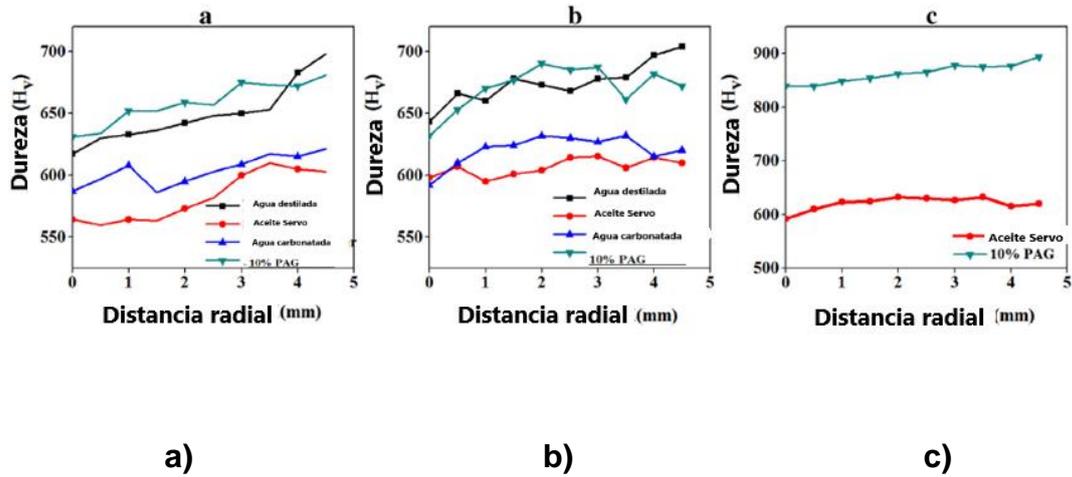


Figura 2.5 Distribución de dureza en una probeta de acero templada en diferentes medios de temple para los siguientes tipos de acero: a) EN19 (AISI 4140), b) EN24 (AISI 4340), c) EN31 (AISI 52100) [9].

## 2.4 Curvas de enfriamiento de soluciones acuosas de polímero PVP

Las curvas de enfriamiento de soluciones acuosas de polivinil pirrolidona (PVP) son fundamentales para entender cómo estas soluciones afectan el enfriamiento y las propiedades resultantes del acero tratado térmicamente. Diversos estudios han investigado la influencia de la viscosidad, la concentración y el peso molecular de las soluciones de PVP en el proceso de enfriamiento.

Vieira *et al.* [6] estudió cómo la variación en la concentración de soluciones poliméricas base PVP afecta el poder de enfriamiento del medio y, en consecuencia, la respuesta microestructural y las propiedades resultantes del acero AISI 1045. Las concentraciones evaluadas fueron del 10%, 15%, 20%, y 25% [6]. En la Figura 2.6 se presentan gráficamente los perfiles de las fases resultantes de acero después de ser templados con polímero PVP a diferentes concentraciones, tanto en la superficie como en el centro de las probetas, se

observa claramente que en la superficie, para todas las concentraciones, la fase que se encuentra en mayor cantidad es la martensita pero, a medida que se aumenta la cantidad de polímero, existe una mayor presencia de bainita e incluso al 25% de PVP se encuentra presencia de ferrita. Mientras tanto en el centro de las probetas se observa una mayor presencia de bainita a medida que se aumenta la concentración de polímero y la presencia de ferrita desde el 20% de PVP.

Estos resultados se explican porque a medida que aumenta la concentración de polímero, la viscosidad de la solución también aumenta, lo que disminuye la capacidad de enfriamiento del medio. Esto resulta en un enfriamiento más lento y una menor transformación de martensita [6].

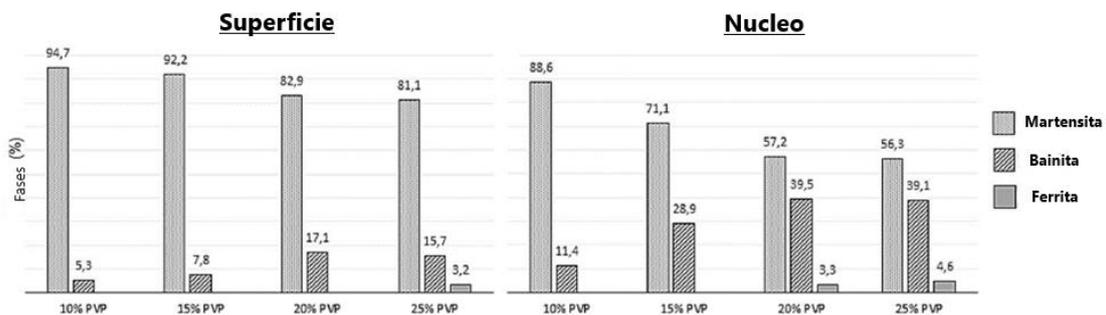


Figura 2.6 Porcentaje de fases resultantes del enfriamiento en diferentes concentraciones en la superficie y el núcleo [6].

Bozhko *et al.* (10) analizaron cómo la viscosidad y el peso molecular de las soluciones de PVP afectan su capacidad de enfriamiento. Encontraron que la viscosidad de las soluciones de PVP aumenta con el peso molecular del polímero. Este aumento en la viscosidad resulta en una disminución de la rapidez de enfriamiento. Las soluciones con viscosidad cinemática menor a  $4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  mostraron rapidez de enfriamiento más alta, mientras que las soluciones con

valores mayores presentaron una mayor estabilidad de la etapa de ebullición de película, lo que resulta en una menor rapidez de enfriamiento en el rango de temperaturas más bajas [6,10].

Se observó que las curvas de enfriamiento para soluciones de PVP con diferentes concentraciones, pero con la misma viscosidad casi coinciden. Esto indica que la viscosidad, más que la concentración, es el factor determinante en la capacidad de enfriamiento de las soluciones de PVP. Al alcanzar la viscosidad cinemática crítica (aproximadamente  $4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ), un aumento adicional en la viscosidad tiene un efecto reducido en la rapidez de enfriamiento [6,10].

La Figura 2.7 muestra la variación de la viscosidad de la solución con la concentración de polímero para polímeros de diferentes pesos moleculares: 1) 1,428,600; 2) 789,400; 3) 535,700; 4) 298,800; 5) 158,500. La figura destaca cómo la viscosidad de las soluciones poliméricas aumenta con el peso molecular del polímero siendo así el polímero 1 más viscoso que el 5.

La Figura 2.8 presenta el cambio en la temperatura en el centro de una probeta de acero durante el enfriamiento en una solución acuosa de polímero al 0.3% y en soluciones con una viscosidad cinemática de  $3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Las curvas de enfriamiento para soluciones de polímero con concentraciones de 0.3% muestran que el enfriamiento es más rápido en el rango de temperaturas altas, lo que es ideal para la formación de martensita y con una viscosidad cinemática de  $3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  la rapidez de enfriamiento es mayor en el rango de temperaturas superiores, y se observa una mayor estabilidad en la ebullición de película a viscosidades más altas [10].

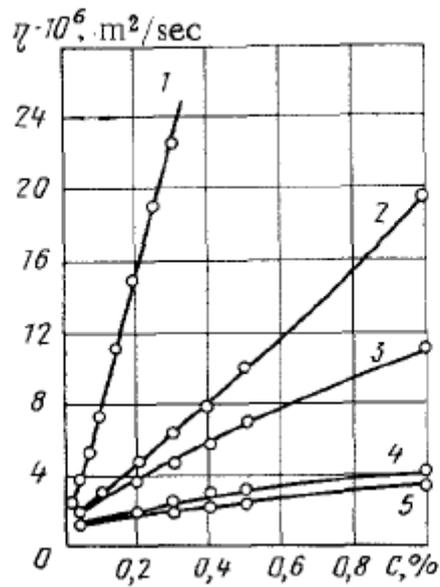


Figura 2.7 Dependencia de la viscosidad cinemática de la solución con la concentración de polímero para diferentes pesos moleculares: 1) 1,428,600; 2) 789,400; 3) 535,700; 4) 298,800; 5) 158,500 [10].

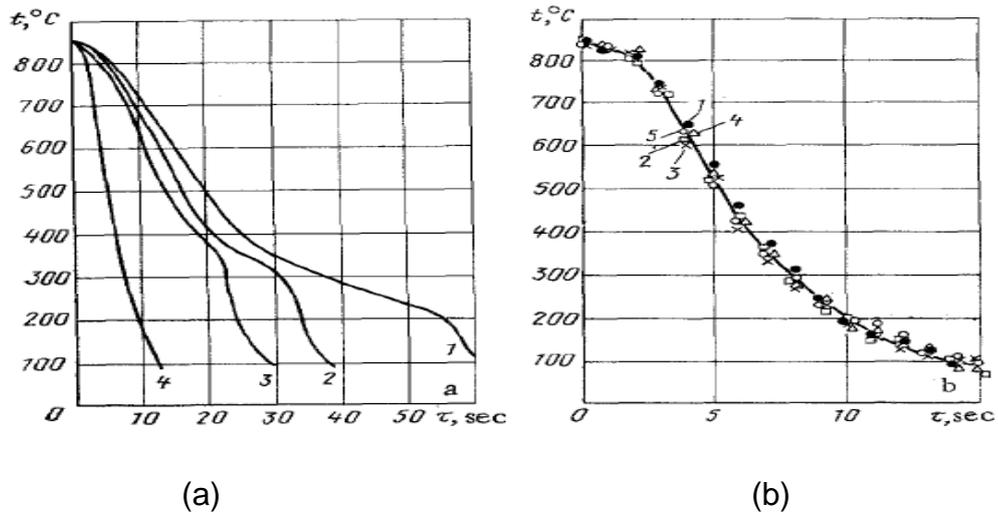


Figura 2.8 Curvas de enfriamiento en el centro de una muestra de acero durante el enfriamiento: (a) en una solución acuosa de polímero al 0.3% y (b) en soluciones con viscosidad cinemática de aproximadamente  $3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Los números del 1 al 5 en las curvas indican peso molecular: 1) 1,428,600; 2) 789,400; 3) 535,700; 4) 298,800; 5) 158,500 [10].

### 2.4.1 Comparación con otros polímeros

Totten y Canale [11] analizaron las propiedades de las soluciones acuosas de PVP en comparación con otros polímeros solubles en agua utilizados como medios de temple. Las soluciones de PVP exhiben poder de enfriamiento intermedio entre los del agua y los aceites convencionales, lo que las hace adecuadas para aplicaciones donde se requiere un enfriamiento moderado para minimizar la distorsión y las grietas de templado [10]. Las propiedades de enfriamiento de las soluciones de PVP están influidas por la estructura del polímero, su configuración (lineal o ramificada) y la viscosidad [10, 11].

En la Figura 2.9 se comparan los valores de severidad de temple de Grossman como función de la concentración, la temperatura del baño y la rapidez de agitación (flujo másico de solución polimérica) para una solución acuosa de polímeros PAG y PVP. La figura muestra que la severidad del temple disminuye con el aumento de la temperatura del baño y la concentración, y con la disminución de la rapidez de agitación, para ambos tipos de soluciones poliméricas; estas pruebas fueron realizadas por inmersión en un baño agitado. Sin embargo, la respuesta de cada tipo de polímero a estas variables es significativamente diferente debido a sus distintas propiedades físicas y químicas [11]:

- Concentración del polímero: A medida que la concentración del polímero aumenta, la viscosidad de la solución también aumenta, lo que reduce la severidad del temple. Esto se debe a que una mayor viscosidad facilita la formación de una película de polímero más estable en la superficie del metal, lo que ralentiza la transferencia de calor [11].

- Temperatura del baño: Un aumento en la temperatura del baño disminuye la viscosidad de la solución, disminuyendo la severidad del temple. Las soluciones a temperaturas más altas tienen una menor capacidad para formar una película estable, lo que permite una transferencia de calor más lenta [11].
- Rapidez de agitación: La agitación del baño reduce la estabilidad de la película de vapor y elimina más rápidamente la solución caliente del entorno inmediato de la pieza, aumentando la severidad del temple. Una mayor agitación significa una mayor tasa de flujo de polímero lo que contribuye a un enfriamiento más rápido y uniforme [11].

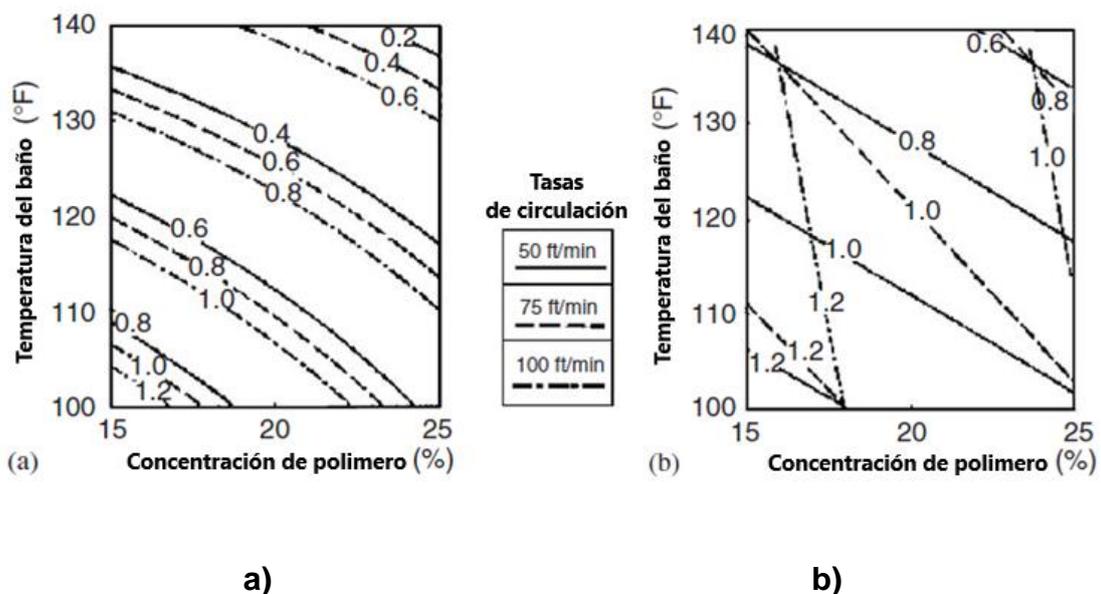


Figura 2.9 Valores de severidad de enfriamiento de Grossman como función de la concentración, la temperatura del baño y la rapidez de agitación, para soluciones acuosas de (a) PAG y (b) PVP [11].

### 3 Metodología

#### 3.1 Experimental

Se llevaron a cabo ensayos de temple en el laboratorio utilizando una probeta de Inconel 600, enfriada mediante una ducha (Figura 3.1) diseñada y construida por la empresa Quaker Houghton (Valley Forge Labs, PA) empleando tecnología de impresión en 3D, un tubo de acrílico y tapas de aleación de aluminio. El diseño de la probeta se muestra detalladamente en la Figura 3.2; nótese que la probeta está soldada a un tubo de Inconel 600.



Figura 3.1 Fotografía de la ducha impresa en 3D.

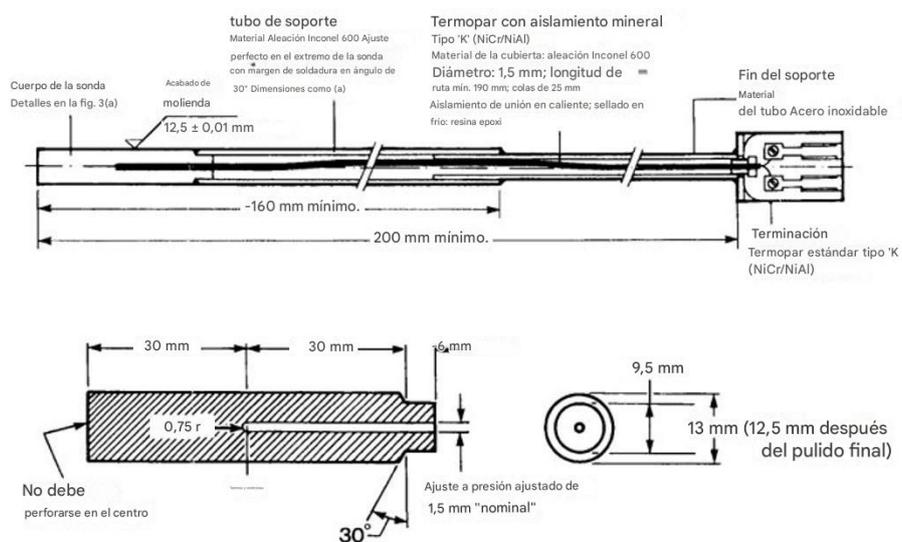
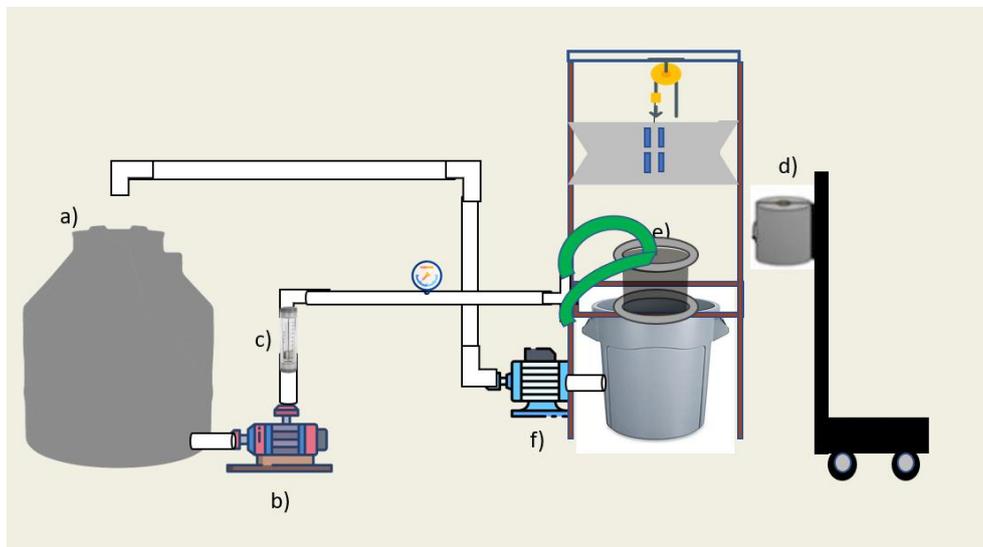


Figura 3.2 Esquema de la probeta de Inconel 600 utilizada para los ensayos de temple [8].

En la Figura 3.3 se presenta un esquema del equipo experimental. Antes de cada experimento, se lijó la probeta con lija de grano 600 y luego se introdujo en un horno eléctrico tipo "libro", calentándola hasta un poco arriba de 850 °C. El proceso de temple se iniciaba cuando el termopar ubicado dentro de la ducha registraba aproximadamente 850 °C. En ese momento, se abría el horno, se retiraba este, y se bajaba la probeta hasta que su centro geométrico coincidiera con el de la ducha. Antes de cada ensayo, se medía la posición de la probeta para asegurar la constancia de su ubicación. Para garantizar que el sistema de enfriamiento estuviera estable, se alimentaba el medio de enfriamiento a la ducha, manteniendo el flujo requerido, antes de trasladar la probeta a la posición de enfriamiento. El termopar se conectó a un sistema de adquisición de datos, controlado desde una laptop mediante el software *QuickDAQ*, con una frecuencia de adquisición de datos de 10 Hz. En cada ensayo se registró la presión de alimentación en la tubería de PVC.



*Figura 3.3 Diagrama del equipo experimental: a) contenedor del medio de temple, b) bomba 1, c) rotámetro, d) horno eléctrico tipo "libro", e) ducha, f) bomba 2.*

En la Tabla 3.1 se presenta la matriz experimental, que consta de cuatro valores de concentración (incluyendo 0%) de polímero tipo PVP y dos temperaturas. El flujo volumétrico se mantuvo constante a 90 LPM (medido con un flujómetro calibrado para agua).

*Tabla 3.1 Matriz experimental.*

Cantidad de polímero	Temperatura en °C	
Sin polímero	30	40
6%	30	40
9%	30	40
12%	30	40

### **3.2 Computacional**

La curva de enfriamiento medida en cada experimento se suavizó utilizando el *software* SigmaPlot [8]; posteriormente se calculó la rapidez de enfriamiento local mediante una aproximación de diferencias finitas hacia adelante. El suavizado se realizó empleando el filtro *Bisquare*, con los parámetros: *Sampling Proportion* igual a 0.05 y *Polynomial Degree* de 2, asegurándose de mantener el mismo número de datos que en el archivo original.

Adicionalmente, se empleó un programa de cómputo (*WinProbe*) [14], desarrollado por el grupo de trabajo, para resolver numéricamente el problema inverso de conducción de calor. El objetivo fue estimar tanto la respuesta térmica como la densidad de flujo de calor en la superficie de la probeta.

## 4 Resultados y análisis de resultados

### 4.1 Resultados

Debido a la alta viscosidad de la solución acuosa de polímero tipo PVP, los valores registrados por el rotámetro del sistema experimental – que está calibrado para agua - no son correctos. Para determinar las equivalencias entre el flujo volumínico indicado por el rotámetro y el que realmente se alimentaba a la ducha se realizaron una serie de pruebas con ayuda de un contenedor de plástico, el cual estaba rotulado a 15 L, en el que se colocaban las mangueras que se utilizaban para suministrar el líquido a la ducha y se tomaba el tiempo que tardaba en llegar a los 15 L. Esta medición se hizo por triplicado para poder obtener un promedio y fue realizada a temperatura ambiente para valores de 50, 70 y 90 LPM que marcaba el rotámetro del sistema.

En la Tabla 4.1 se presentan los resultados de las mediciones anteriormente mencionadas, las cuales fueron hechas para polímero al 12 % y 9 %, al ser estos los que presentan una mayor viscosidad. Al analizar estos resultados se observa que los valores de flujo volumínico que se utilizaron durante la experimentación fueron muy diferentes a los registrados por el rotámetro.

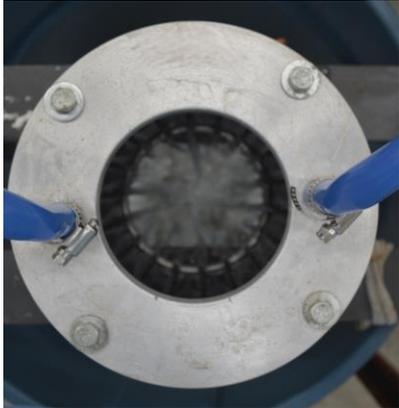
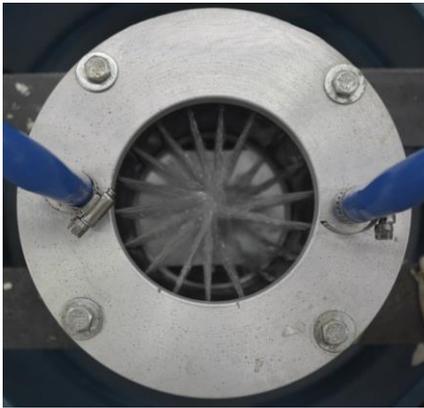
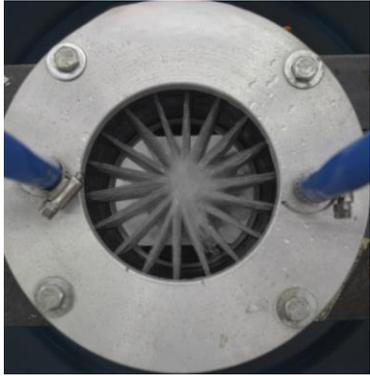
Tabla 4.1 Flujo volumínico registrado por el rotámetro y medido, y presión medida.

PVP a 15 L				
Concentración de polímero (v/o)	Flujo registrado (LPM)	Flujo medido (LPM)	Flujo medido promedio (LPM)	Presión (bar)
12%	50	30.3	29.9	0.0
		29.24		
		30.25		
	70	44.5	44.5	0.1
		44.4		
		44.5		
	90	57.7	58.9	1.0
		60		
		59.1		
9%	50	37.88	38.6	0.3
		39.37		
		38.49		
	70	56.56	56.7	1.0
		55.55		
		57.915		
	90	72.46	72.8	1.7
		72.81		
		73.01		

Aunque los valores de flujo volumínico registrados y medidos son distintos, lo que es importante para este trabajo es el patrón de flujo a la salida de los orificios de la ducha. Para comparar, al menos cualitativamente, ese patrón de flujo se tomaron videos desde la parte superior de la ducha a diferentes flujos con polímero PVP a 12 % y con agua para poder observar si esta diferencia en los flujos ocasionaba un error significativo al momento de realizar las pruebas.

En las imágenes de la Figura 4.1 se observa que no existe una diferencia notable en cuanto al choque de los chorros en el centro de la ducha para flujo volumínico de 90 LPM; tampoco se aprecia que los chorros de polímero PVP presenten una “caída” en su trayectoria por falta de presión la cual signifique un error más grave

al momento de realizar las pruebas. Lo que sí se puede destacar de estas imágenes es la diferencia en la fuerza de la salida del líquido de únicamente agua en comparación a la del polímero PVP, ya que en el caso del agua se tiene presencia de salpicadura de agua por el remolino formado al unirse los chorros en el centro.

Flujo registrado (LPM)	Polímero PVP (12%)	Agua
50		
70		

*Figura 4.1 Fotografías de las trayectorias del fluido: solución acuosa de polímero PVP al 14 % (izquierda) y agua (derecha) en la ducha, para distintos valores de flujo volumétrico registrado por el rotámetro.*

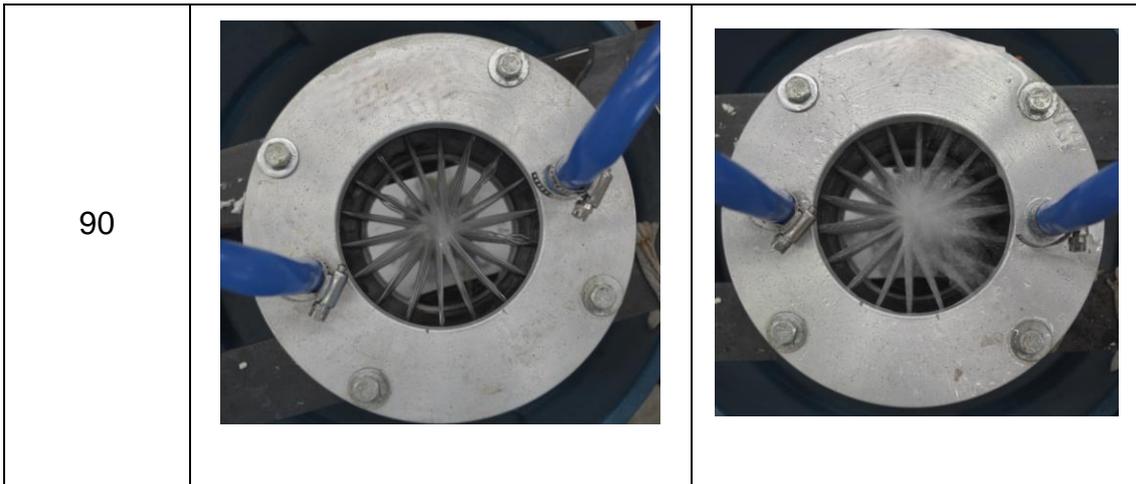


Figura 4.2 (cont.) Fotografías de las trayectorias del fluido: solución acuosa de polímero PVP al 14 % (izquierda) y agua (derecha) en la ducha, para distintos valores de flujo volumínico registrado por el rotámetro.

La Figura 4.2 muestra las curvas de enfriamiento de los ensayos realizados a 30°C utilizando solamente agua como medio de enfriamiento; estas han sido suavizadas utilizando el programa *SigmaPlot*. Se observa que las pruebas muestran una notable reproducibilidad entre sí, lo cual indica que los experimentos son repetibles.

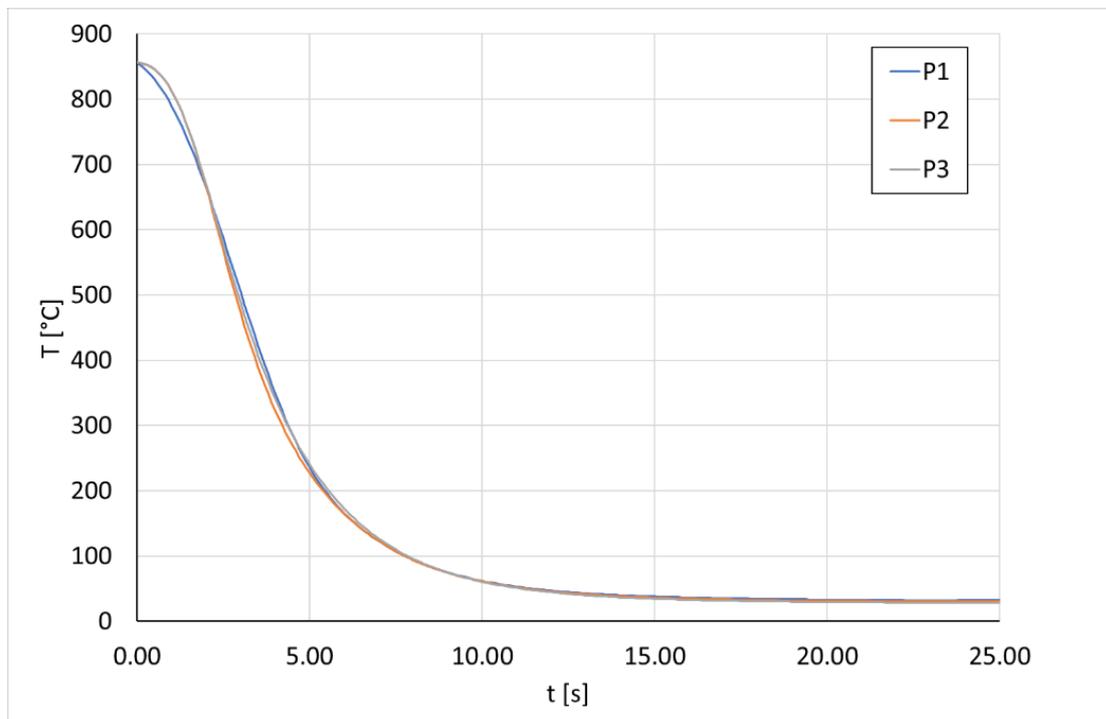
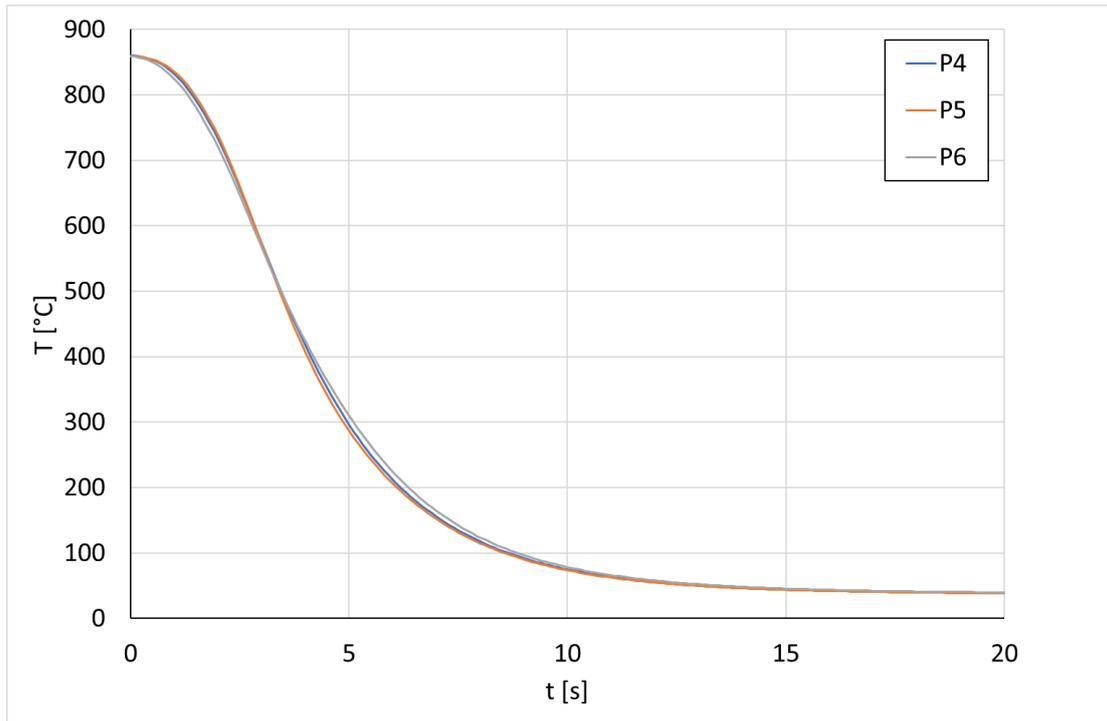


Figura 4.3 Curvas de enfriamiento para tres pruebas independientes realizadas a 30 °C, sin polímero y flujo del medio de enfriamiento de 90 LPM.

La Figura 4.3 muestra las curvas de enfriamiento de los ensayos realizados a 40 °C utilizando solamente agua como medio de enfriamiento; al igual que en las curvas a 30 °C en estas se notan mínimas diferencias entre las pruebas, lo que indica que hay muy buena repetitividad durante la experimentación.



*Figura 4.4 Curvas de enfriamiento para tres pruebas independientes realizadas a 40 °C, sin polímero y flujo del medio de enfriamiento de 90 LPM.*

La Figura 4.4 muestra las curvas de enfriamiento (suavizadas) de los ensayos realizados a 30 °C y 40 °C utilizando solamente agua como medio de enfriamiento. Se puede observar el efecto de la temperatura ya que el enfriamiento a 40 °C desplaza la curva a la derecha un par de segundos lo que es resultado de un menor poder de enfriamiento.

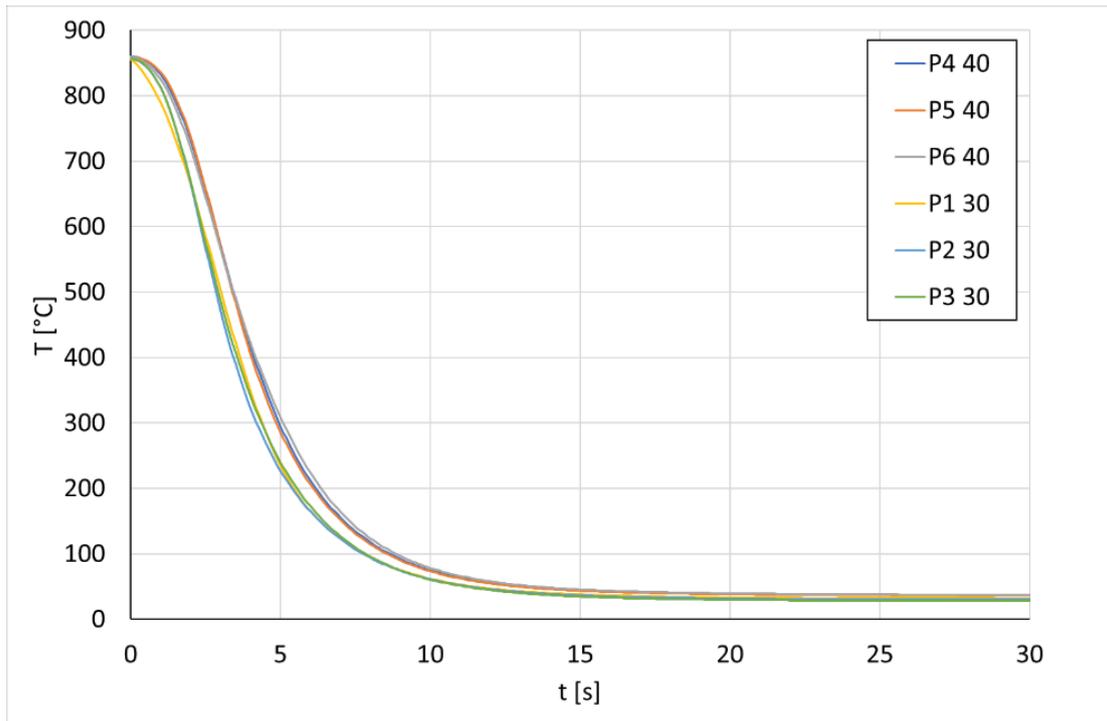
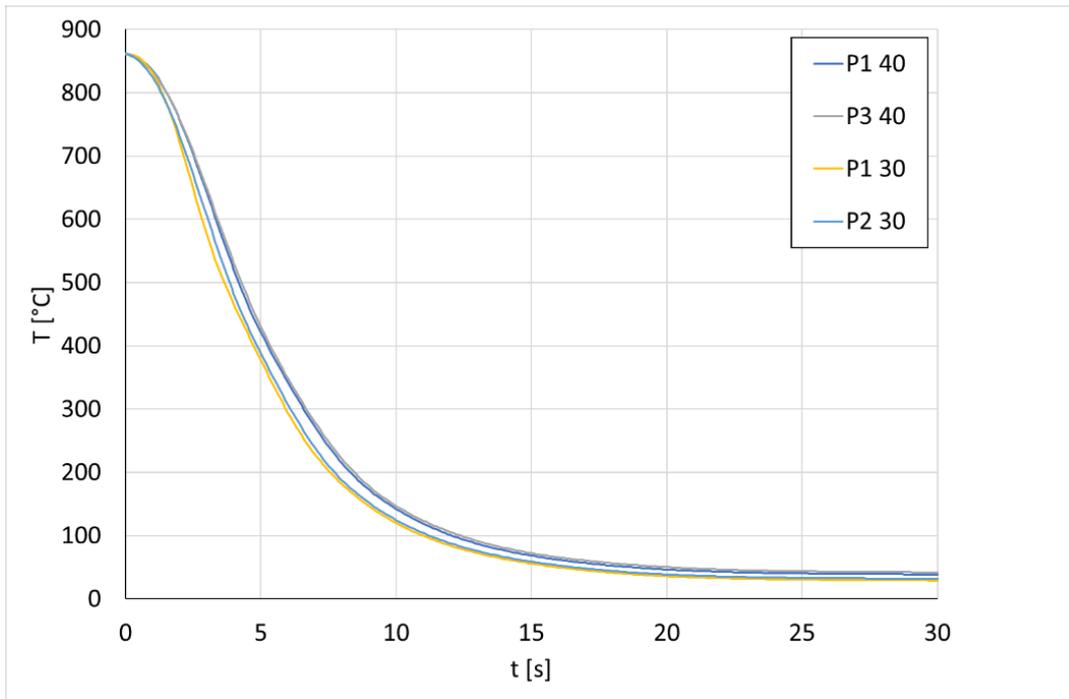


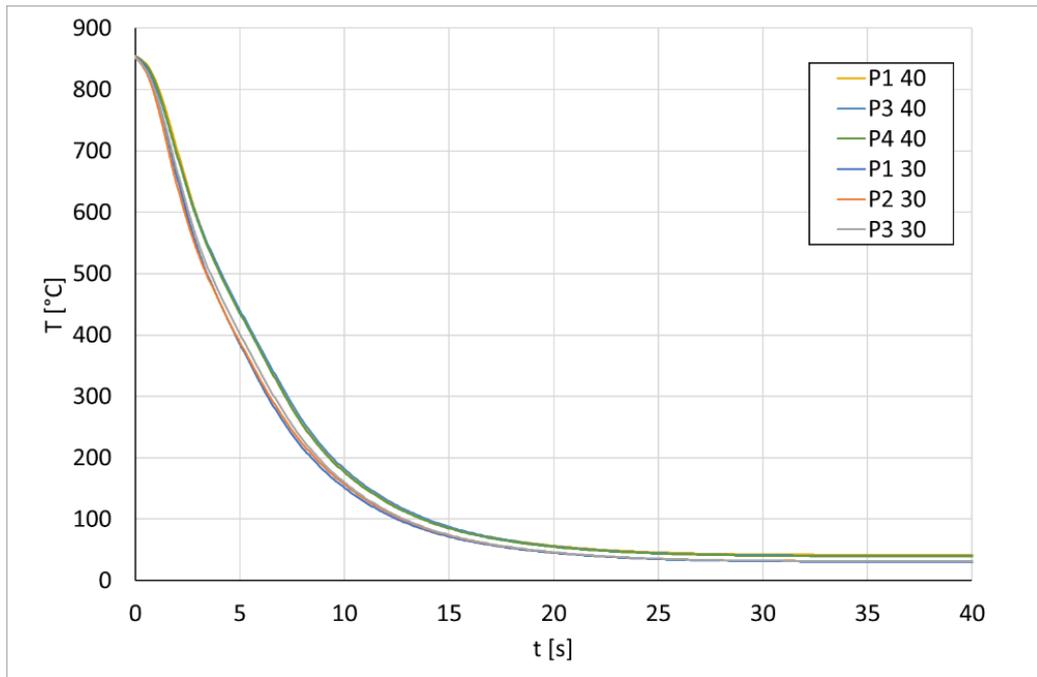
Figura 4.5 Curvas de enfriamiento de pruebas independientes realizadas a 30 °C y a 40 °C, sin polímero y flujo del medio de enfriamiento de 90 LPM.

En la Figura 4.5 se presentan las curvas de enfriamiento obtenidas con polímero a 6 % a temperaturas de 30 y 40 °C. Se aprecia que el aumento en la temperatura del medio de enfriamiento da como resultado una capacidad de enfriamiento ligeramente menor, similar al comportamiento observado con el agua. Las cuatro curvas tienen un ligero cambio en la pendiente (aproximadamente en el rango de 650 a 343 °C) el cual no era esperado al momento de iniciar este estudio. En la sección de análisis de resultados se explicará el porqué de este comportamiento.



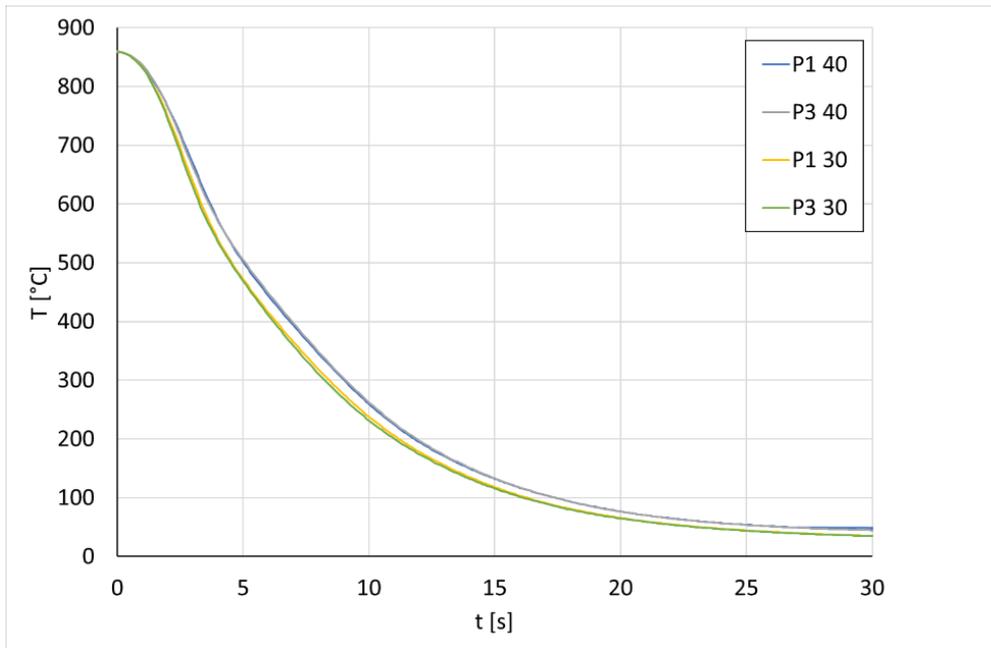
*Figura 4.6 Curvas de enfriamiento de tres pruebas independientes realizadas a 30 °C y 40 °C, con polímero al 6 % y flujo del medio de enfriamiento medido de 85 LPM.*

En la Figura 4.6 se muestran las curvas de enfriamiento obtenidas con polímero al 9 % a temperaturas de 30 y 40 °C. De nuevo, se observa que un aumento en la temperatura del medio de enfriamiento conduce a un menor poder de enfriamiento. Las curvas exhiben un comportamiento aparentemente extraño, a partir de aproximadamente 500 °C, similar al de aquellas obtenidas con 6 % de polímero, pero esta vez es más notable a simple vista.



*Figura 4.7 Curvas de enfriamiento de tres pruebas independientes realizadas a 30 °C y 40 °C, con polímero al 9 % y flujo del medio de enfriamiento medido de 73 LPM.*

En la Figura 4.7 se presenta una comparación entre las curvas de enfriamiento obtenidas con polímero al 12 % a temperaturas de 30 y 40 °C. Se aprecia el mismo efecto de la temperatura del medio y el cambio en la pendiente (aproximadamente en el rango de 680 a 428 °C), el cual no era esperado al momento de realizar las pruebas, es ahora más pronunciado.



*Figura 4.8 Curvas de enfriamiento para pruebas independientes realizadas a 30 y 40 °C, con polímero al 12 % y flujo del medio de enfriamiento medido de 59 LPM.*

En la Figura 4.8 se presentan curvas de enfriamiento a todas las concentraciones (0, 6, 9 y 12 %) y a las dos diferentes temperaturas (30 y 40 °C); por claridad solo se presenta una prueba por cada condición experimental. Se observa una clara distinción en cuatro grupos, que representan las concentraciones de polímero. Las curvas con enfriamiento más rápido son las de agua con 0 % de polímero y las más lentas - el grupo de la derecha - las de 12 % de polímero. En cada grupo se aprecian dos curvas (30 y 40 °C) de comportamiento cualitativamente similar entre sí; las que resultaron en un enfriamiento más rápido fueron las realizadas a 30 °C.

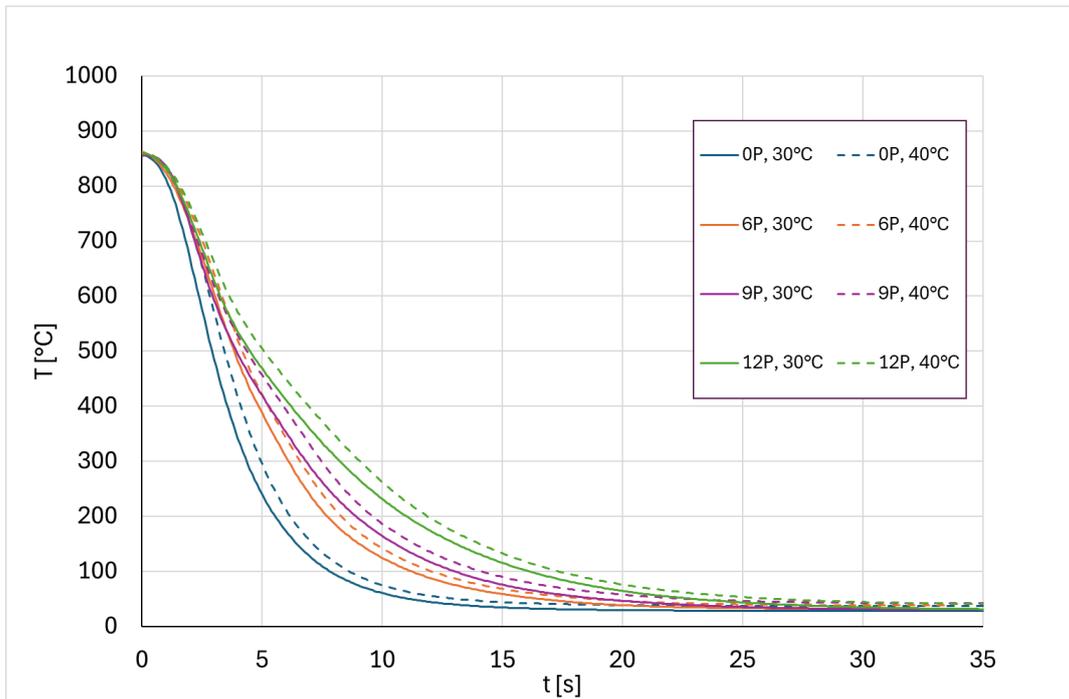
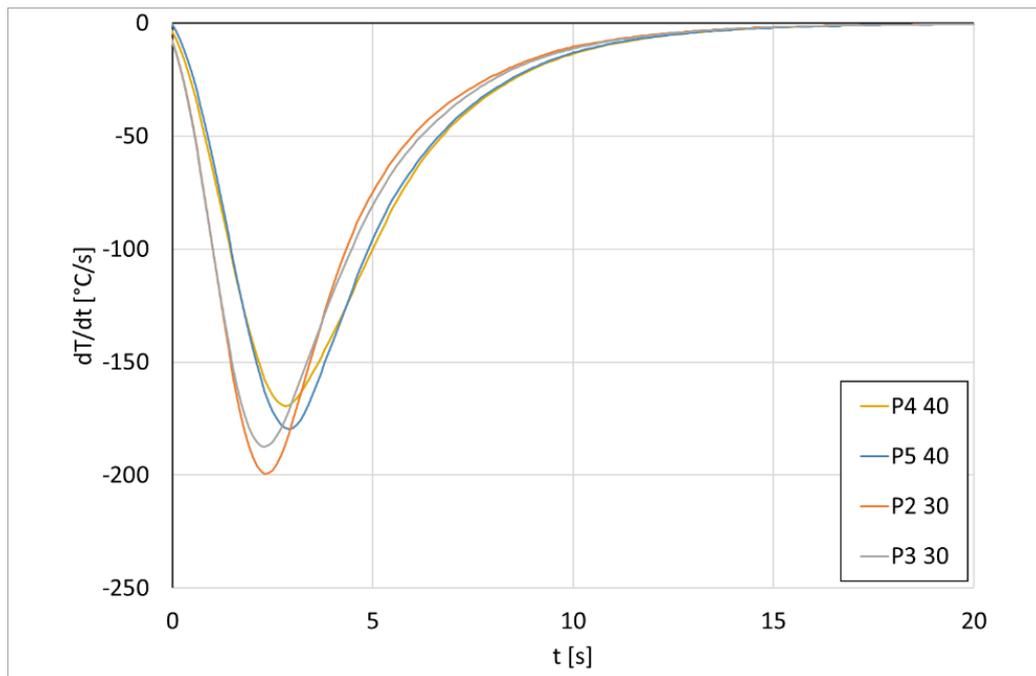


Figura 4.9 Curvas de enfriamiento de pruebas realizadas a 30 y 40 °C, para todas las concentraciones de polímero.

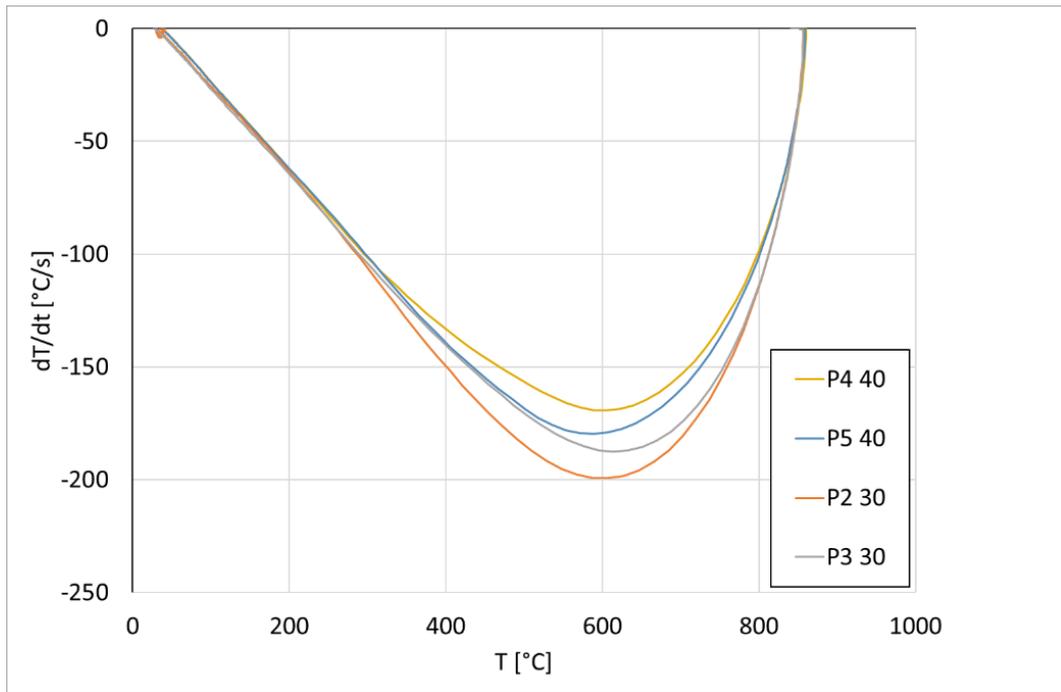
## 4.2 Análisis de resultados

En la Figura 4.9 se muestra la rapidez de enfriamiento que se obtuvo mediante la derivada numérica de las curvas de enfriamiento (previamente suavizadas) de los ensayos con agua sin polímero a 30 °C y 40 °C. En esta grafica se puede observar claramente que existe un cambio con el aumento de temperatura, ya que el tiempo para llegar a la máxima rapidez de enfriamiento en las pruebas realizadas a 30 °C es de aproximadamente 2.4 s, mientras que con 40 °C ocurre a los 2.7 s, aproximadamente. Posteriormente, para ambas temperaturas, se presenta un descenso suave hasta llegar a 0 °C/s. Al igual que en el caso de las curvas de enfriamiento, no se observa evidencia de la formación de la película de vapor durante la prueba.



*Figura 4.10 Rapidez de enfriamiento vs. tiempo para las pruebas realizadas a 30 °C y 40 °C, sin polímero y flujo del medio de enfriamiento de 90 LPM.*

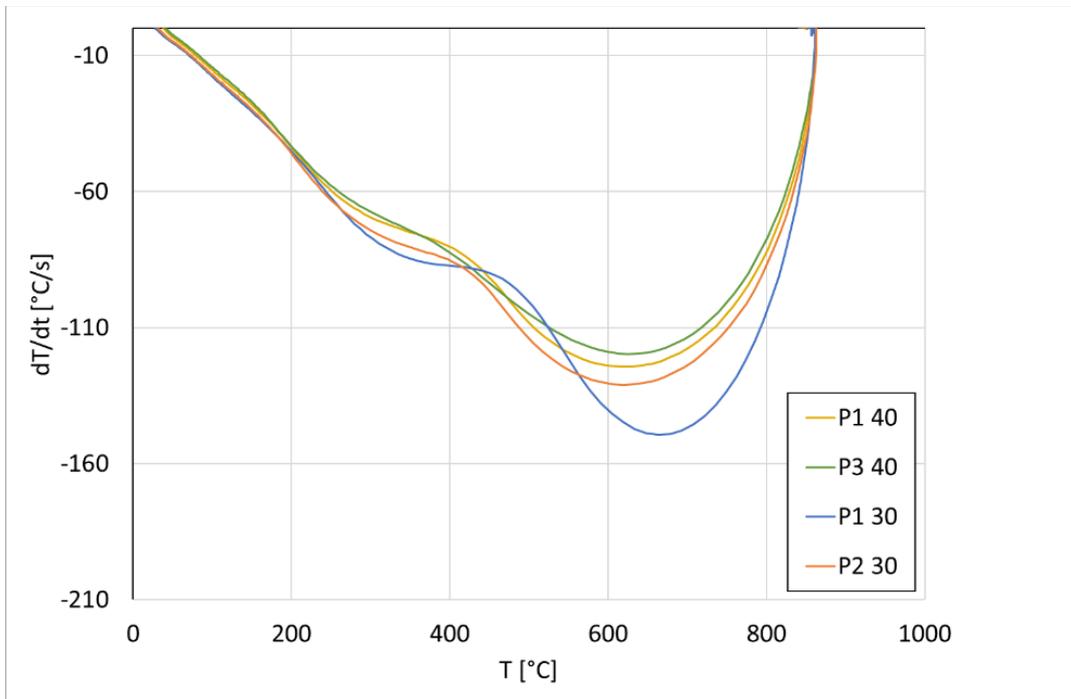
En la Figura 4.10 se presenta la rapidez de enfriamiento graficada con respecto a la temperatura local del termopar de las pruebas a 30 °C y 40 °C, sin polímero. Al inicio del enfriamiento las cuatro curvas son muy parecidas; al alcanzar aproximadamente 835 °C se nota la separación de los dos grupos de curvas, con las rapidezces de enfriamiento mayores para las pruebas realizadas a 30 °C.



*Figura 4.11 Rapidez de enfriamiento vs. temperatura local para las pruebas realizadas a 30  $^{\circ}\text{C}$  y 40  $^{\circ}\text{C}$ , sin polímero y flujo del medio de enfriamiento de 90 LPM.*

En la Figura 4.11 se presenta la rapidez de enfriamiento graficada con respecto a la temperatura local del termopar de las pruebas con polímero a una concentración de 6 % a 30 y 40  $^{\circ}\text{C}$ . Se observa que la rapidez de enfriamiento aumenta a medida que va disminuyendo la temperatura hasta llegar a su valor máximo aproximadamente a los 650  $^{\circ}\text{C}$  para la prueba realizada a 30  $^{\circ}\text{C}$ ; luego comienza a disminuir suavemente, presentando nuevamente un aumento en la rapidez de enfriamiento, para posteriormente volver a bajar hasta alcanzar el valor de cero a la temperatura del medio. Este comportamiento, que no se esperaba al inicio de este estudio, ha sido reportado en ensayos de inmersión de acuerdo con el procedimiento de análisis de curvas de enfriamiento de Quaker Houghton y ASTM D6482 (Tensi Unit) para este polímero [9]. Dado que esas pruebas son por inmersión, se puede deducir que el comportamiento observado

se debe a los componentes del polímero y su comportamiento en función de la temperatura más que al patrón de flujo del fluido.



*Figura 4.12 Rapidez de enfriamiento vs. temperatura para las pruebas realizadas a 30 °C y 40 °C, con polímero al 6 % y flujo del medio de enfriamiento medido de 85 LPM.*

En la Figura 4.12 se presenta la rapidez de enfriamiento en relación con la temperatura local del termopar para pruebas con polímero al 9 % a 30 y 40 °C. Se observa que la rapidez de enfriamiento aumenta a medida que la temperatura disminuye, alcanzando su máximo alrededor de los 715 °C a 30 °C. Luego, hay un ligero descenso seguido de un aumento más pronunciado en comparación con el 6 %. Finalmente, la rapidez vuelve a disminuir hasta llegar a cero a la temperatura del medio. Los ensayos a 30 °C muestran una mayor rapidez de enfriamiento en general.

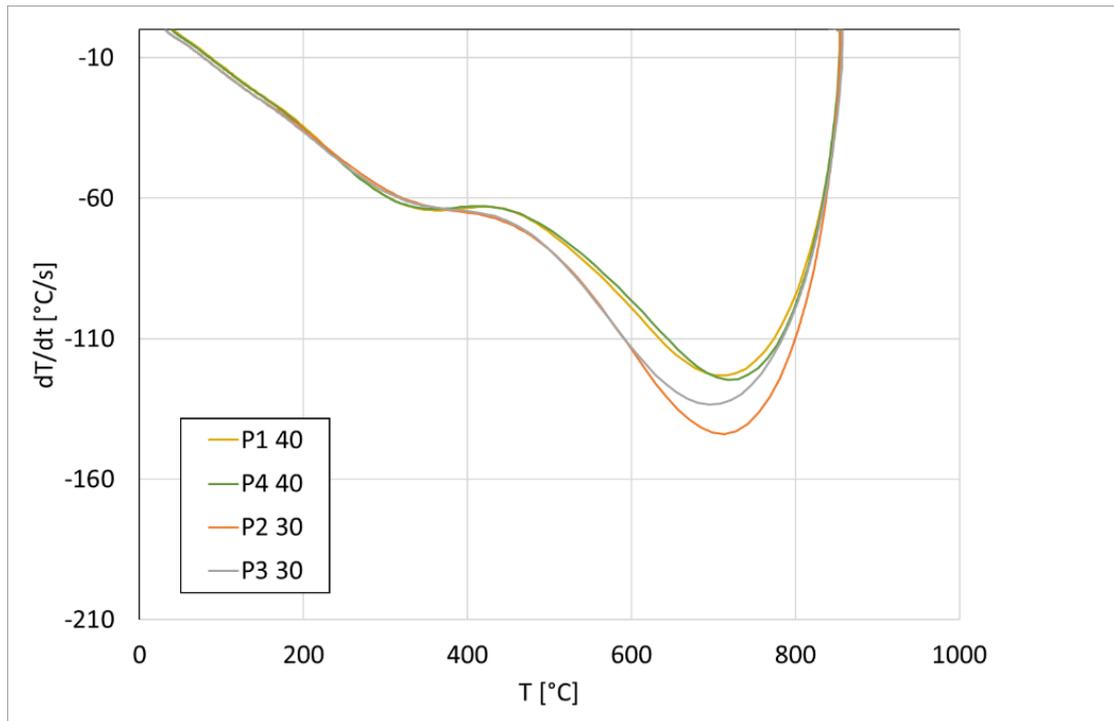


Figura 4.13 Rapidez de enfriamiento vs. temperatura para las pruebas realizadas a 30 °C y 40 °C, con polímero al 9 % y flujo del medio de enfriamiento medido de 73 LPM.

En la Figura 4.13 se presenta la rapidez de enfriamiento graficada con respecto a la temperatura local medida por el termopar en las pruebas con polímero a una concentración de 12 %, a 30 y 40 °C. Se observa que la rapidez de enfriamiento aumenta a medida que va disminuyendo la temperatura hasta llegar a su valor máximo (aproximadamente a los 690 °C para la prueba realizada a 30 °C); luego comienza a disminuir suavemente, presentando nuevamente un aumento en la rapidez de enfriamiento, para posteriormente volver a disminuir hasta alcanzar el valor de cero a la temperatura del medio; en estas pruebas se distinguen fácilmente los dos grupos de temperaturas, siendo los ensayos a 30 °C los que presentan mayor rapidez de enfriamiento.

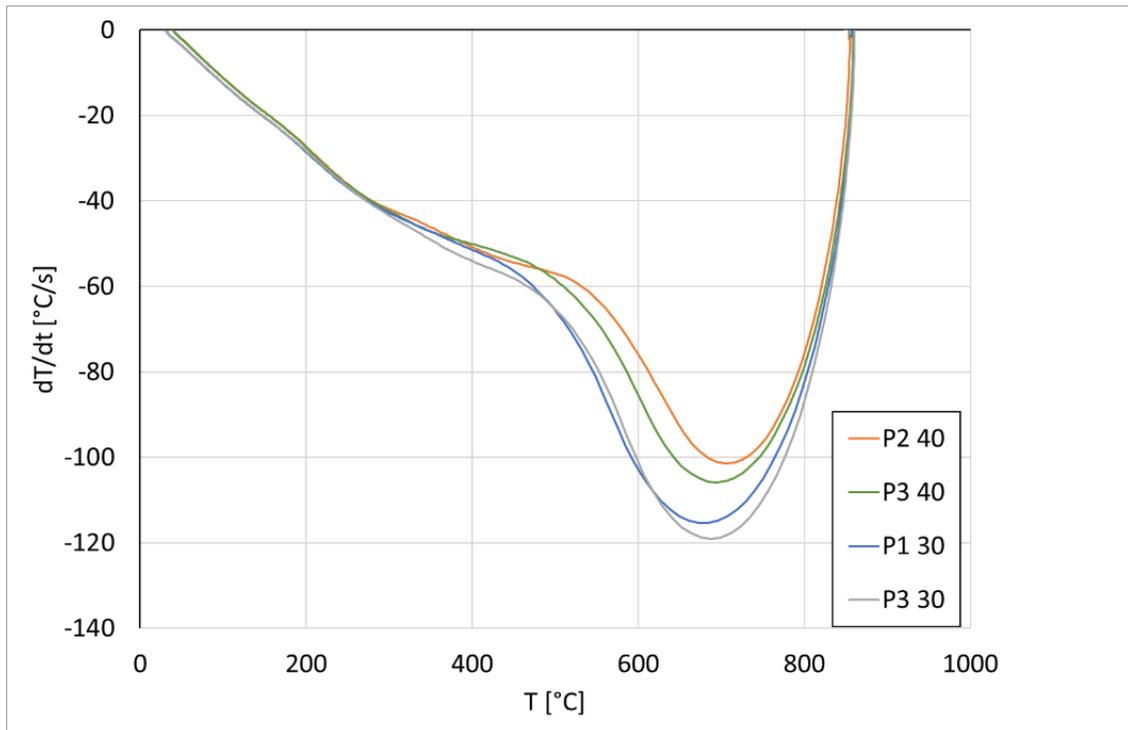


Figura 4.14 Rapidez de enfriamiento vs. temperatura para las pruebas realizadas a 30 °C y 40 °C, con polímero al 12 % y flujo del medio de enfriamiento medido de 59 LPM.

Para resaltar el efecto de la presencia del polímero sobre el poder de enfriamiento del medio de enfriamiento, en la Figura 4.14 se grafican parejas de curvas de enfriamiento producidas con medios sin y con polímero a las concentraciones estudiadas. En todos los casos el poder de enfriamiento del medio de enfriamiento con polímero es claramente menor cuando se adiciona el polímero. Debe recordarse que no todas las concentraciones fueron hechas con el mismo flujo medido (12 % fue a 59 LPM, 9 % a 73 LPM y el 6 % aproximadamente a 85%, mientras que 0 % fue a 90 LPM de agua).

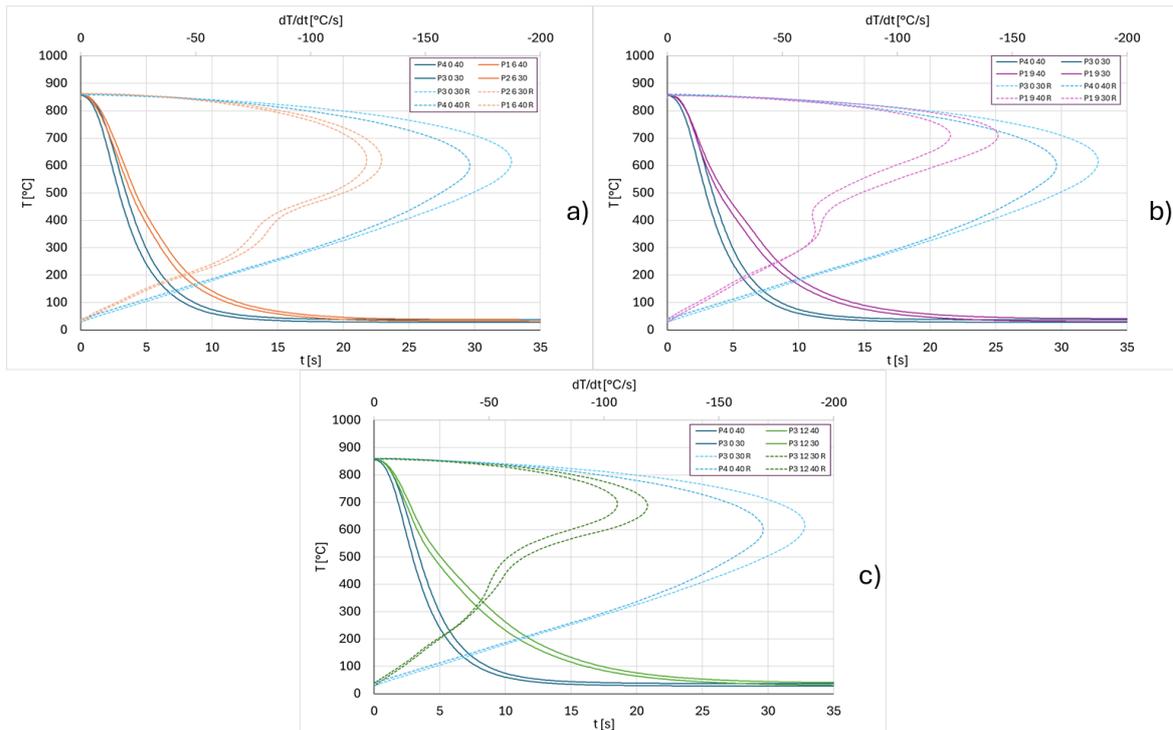


Figura 4.15 Curvas de enfriamiento y de rapidez de enfriamiento vs. temperatura realizadas a 30 y 40 °C con todas las concentraciones de polímero: a) agua y polímero al 6 %, b) agua y polímero al 9 %, c) agua y polímero al 12 %.

En la Figura 4.15 se grafican resultados de todas las condiciones experimentales estudiadas. Se aprecia el cambio en la rapidez de enfriamiento a medida que aumenta la concentración de polímero. Con base a estas gráficas, se observa un comportamiento inusual con el polímero al 9% a 30 °C, ya que muestra una mayor rapidez de enfriamiento máxima (y a una temperatura más alta) que las pruebas realizadas con un 6 %, cuando se esperaba que esa rapidez de enfriamiento máxima fuera intermedia entre el valor obtenido con 6 % y con 12 %. Sin embargo, a temperaturas por debajo de aproximadamente 550 °C el orden de rapidez de enfriamiento es el que se esperaba, es decir: agua, polímero al 6 %, polímero al 9 % y polímero al 12 %.

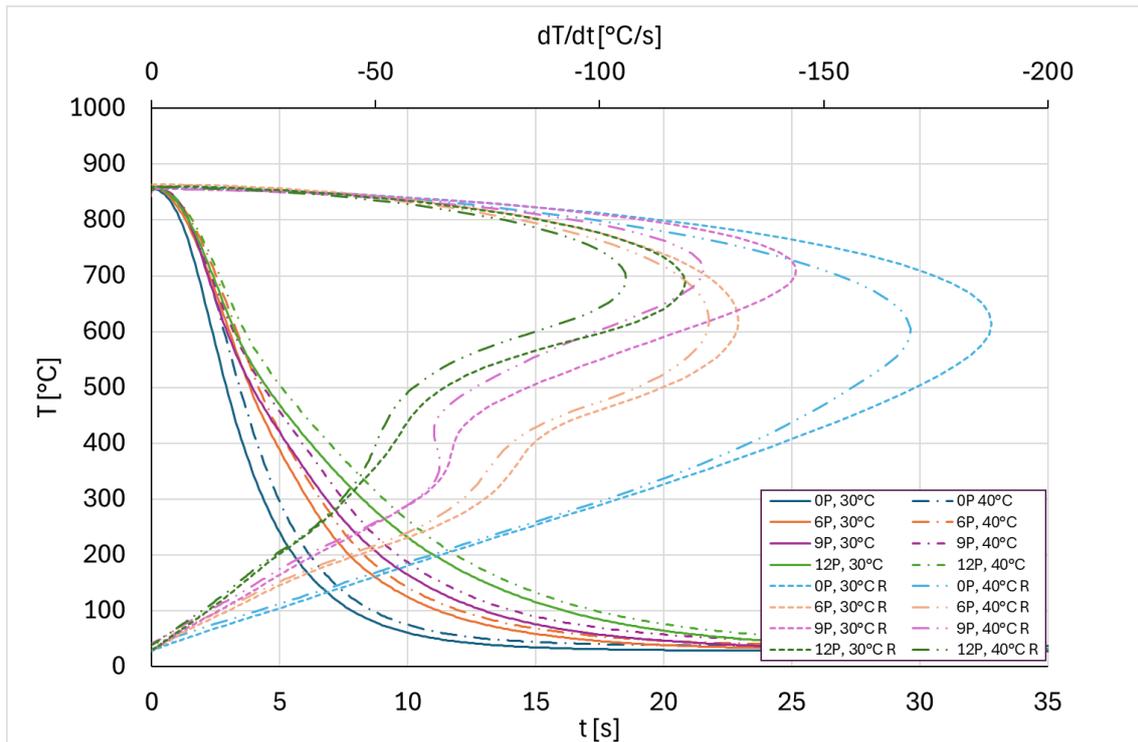


Figura 4.16 Curvas de enfriamiento y de rapidez de enfriamiento vs. temperatura realizadas a 30 y 40 °C, con todas las concentraciones de polímero.

En la Tabla 4.2 se presentan los valores promedio de la rapidez de enfriamiento máxima y la temperatura en la posición del termopar a la que ocurre para todos los ensayos llevados a cabo en este proyecto. Se observa que a menor temperatura del medio se obtiene una mayor rapidez máxima de enfriamiento, la cual ocurre a una temperatura local más baja. Esto indica que el poder de enfriamiento es mayor. Asimismo, se puede notar que la rapidez de enfriamiento máxima disminuye a medida que aumenta la concentración del polímero en el medio, y se observa a valores de temperatura local más bajas. Esto sugiere que el uso de este polímero suaviza los enfriamientos durante el enfriamiento.

Estos datos se representan de manera gráfica en la Figura 4.16, donde se observa cómo las rapidez de enfriamiento de los ensayos realizados se distinguen fácilmente en pares de curvas (correspondientes a 30 y 40 °C)

agrupados según la cantidad de polímero presente en el medio de enfriamiento. Sin embargo, se observa que la rapidez de enfriamiento máxima en las pruebas realizadas con polímero al 9 % ocurrió a temperatura más alta que las realizadas a 12 %, con valores parecidos a los de los ensayos de 6 %.

Tabla 4.2 Rapidez de enfriamiento máxima y la temperatura a la que ocurre.

Condiciones experimentales	Rapidez de enfriamiento máxima, °C/s		Temperatura, °C	Rapidez de enfriamiento máxima promedio, °C/s	Desviación estándar, °C/s	Temperatura promedio, °C	Desviación estándar, °C
	1	2					
30 °C, 90 LPM, sin polímero	1	-165.2	536.9	-184.0	17.4	586.1	42.7
	2	-199.3	607.5				
	3	-187.5	614.0				
40 °C, 90 LPM, sin polímero	4	-169.3	606.1	-169.5	9.9	603.0	12.8
	5	-179.5	589.0				
	6	-159.7	614.0				
	1	-149.3	663.6				
30 °C, 90 LPM, polímero 6%	2	-131.0	618.9	-133.2	15.1	611.6	56.0
	3	-119.4	552.3				
	1	-124.4	617.5				
40 °C, 90 LPM, polímero 6%	2	-130.4	638.6	-124.8	5.4	627.1	10.7
	3	-119.7	625.2				
	1	-143.9	714.6				
30 °C, 90 LPM, polímero 9%	2	-143.8	713.7	-140.4	6.0	707.7	11.3
	3	-133.4	694.7				
	1	-123.1	715.1				
40 °C, 90 LPM, polímero 9%	3	-118.4	717.2	-122.0	3.2	716.7	1.4
	4	-124.5	717.7				
	1	-115.3	684.5				
	2	-108.4	658.9				
30 °C, 90 LPM, polímero 12%	3	-119.0	687.7	-114.2	5.4	677.0	15.8
	1	-102.7	679.5				
	2	-101.5	705.0				
40 °C, 90 LPM, polímero 12%	3	-105.9	694.6	-103.4	2.3	693.0	12.8
	2	-101.5	705.0				

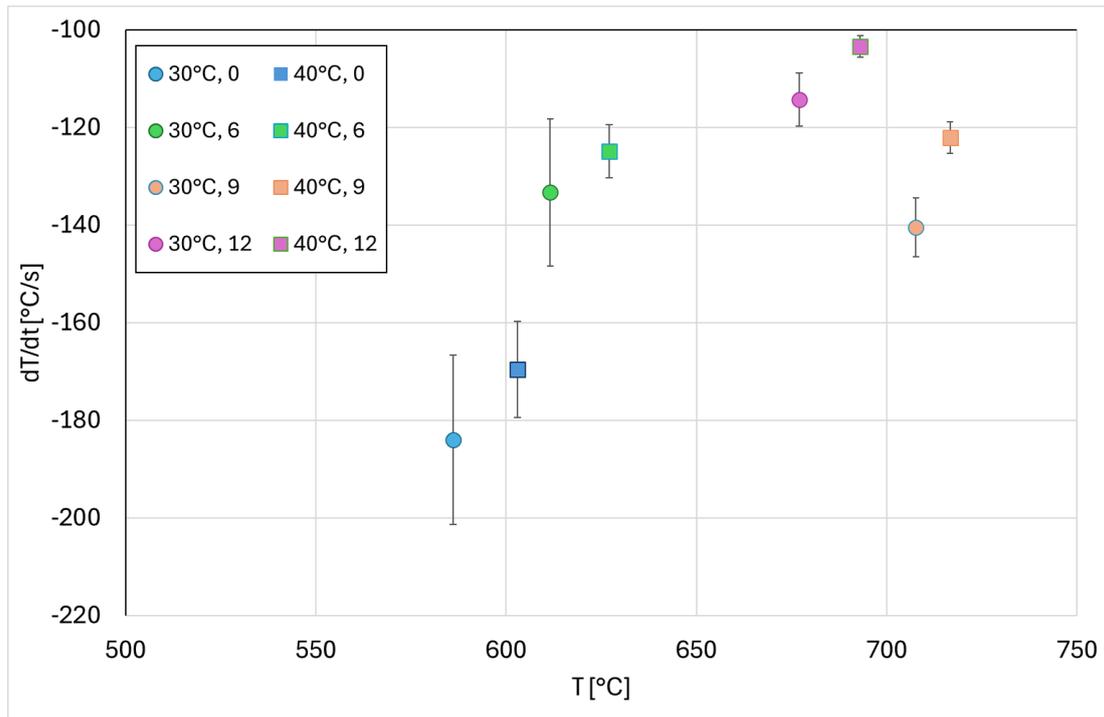


Figura 4.17 Rapidez de enfriamiento máxima promedio en función de la temperatura local promedio a la que se obtiene, para cada condición experimental.

En la Tabla 4.3 se muestran los valores de tiempo requeridos, a partir del inicio del enfriamiento, para alcanzar las temperaturas de 600, 400 y 200 °C, conforme a las especificaciones de la norma ASTM D 6200. Se evidencia que a medida que aumenta la concentración de polímero aumenta el tiempo requerido; este comportamiento se mantiene tanto en las pruebas realizadas a 30 °C como en las realizadas a 40 °C. Además, se observa que los tiempos son mayores para las pruebas realizadas a 40 °C, independientemente de la concentración de polímero utilizada. Estos resultados se presentan de manera gráfica en la Figura 4.17. En el caso de los valores de tiempo para alcanzar 600 °C, el valor para 9 % de polímero es menor que para 12 % de polímero (para las dos temperaturas de trabajo), lo cual está en concordancia con lo observado para la rapidez de enfriamiento máxima.

Tabla 4.3 Tiempo que transcurre para obtener 600, 400 y 200 °C desde la inmersión de la probeta.

Condiciones experimentales	Tiempo requerido para 600°C, s			Tiempo requerido para 400°C, s			Tiempo requerido para 200°C, s					
30 °C, 90 LPM, sin polímero	1	2.3	Promedio	Desviación estándar	1	3.6	Promedio	Desviación estándar	1	5.4	Promedio	Desviación estándar
	2	2.4			2	3.4			2	5.3		
	3	2.3	2.3	0.1	3	3.5	3.5	0.1	3	5.5	5.4	0.1
40°C, 90 LPM, sin polímero	4	2.8	Promedio	Desviación estándar	4	4.1	Promedio	Desviación estándar	4	6.1	Promedio	Desviación estándar
	5	2.8			5	4.0			5	6.0		
	6	2.7	2.8	0.1	6	4.1	4.1	0.1	6	6.3	6.1	0.2
	1	2.8	Promedio	Desviación estándar	1	4.7	Promedio	Desviación estándar	1	7.5	Promedio	Desviación estándar
	2	3.0			2	4.8			2	7.7		
	3	3.3	3.0	0.3	3	5.1	4.9	0.2	3	8.0	7.7	0.3
40 °C, 90 LPM, polímero 6%	1	3.3	Promedio	Desviación estándar	1	5.2	Promedio	Desviación estándar	1	8.3	Promedio	Desviación estándar
	2	3.1			2	5.1			2	8.1		
	3	3.4	3.3	0.2	3	5.3	5.2	0.1	3	8.4	8.3	0.2
30 °C, 90 LPM, polímero 9%	1	2.8	Promedio	Desviación estándar	1	5.1	Promedio	Desviación estándar	1	8.8	Promedio	Desviación estándar
	2	2.8			2	5.3			2	9.0		
	3	3.0	2.9	0.1	3	5.5	5.3	0.2	3	9.2	9.0	0.2
40 °C, 90 LPM, polímero 9%	1	2.8	Promedio	Desviación estándar	1	5.5	Promedio	Desviación estándar	1	9.3	Promedio	Desviación estándar
	3	2.8			3	5.6			3	9.4		
	4	2.8	2.8	0.0	4	5.5	5.5	0.1	4	9.2	9.3	0.1
	1	3.3	Promedio	Desviación estándar	1	6.3	Promedio	Desviación estándar	1	11.1	Promedio	Desviación estándar
30 °C, 90 LPM, polímero 12%	2	3.5			2	6.4			2	11.4		
	3	3.2	3.3	0.2	3	6.2	6.3	0.1	3	11.0	11.2	0.2
	1	3.6	Promedio	Desviación estándar	1	6.8	Promedio	Desviación estándar	1	11.8	Promedio	Desviación estándar
40 °C, 90 LPM, polímero 12%	2	3.7			2	7.1			2	12.1		
	3	3.6	3.6	0.1	3	6.9	6.9	0.2	3	11.8	11.9	0.2

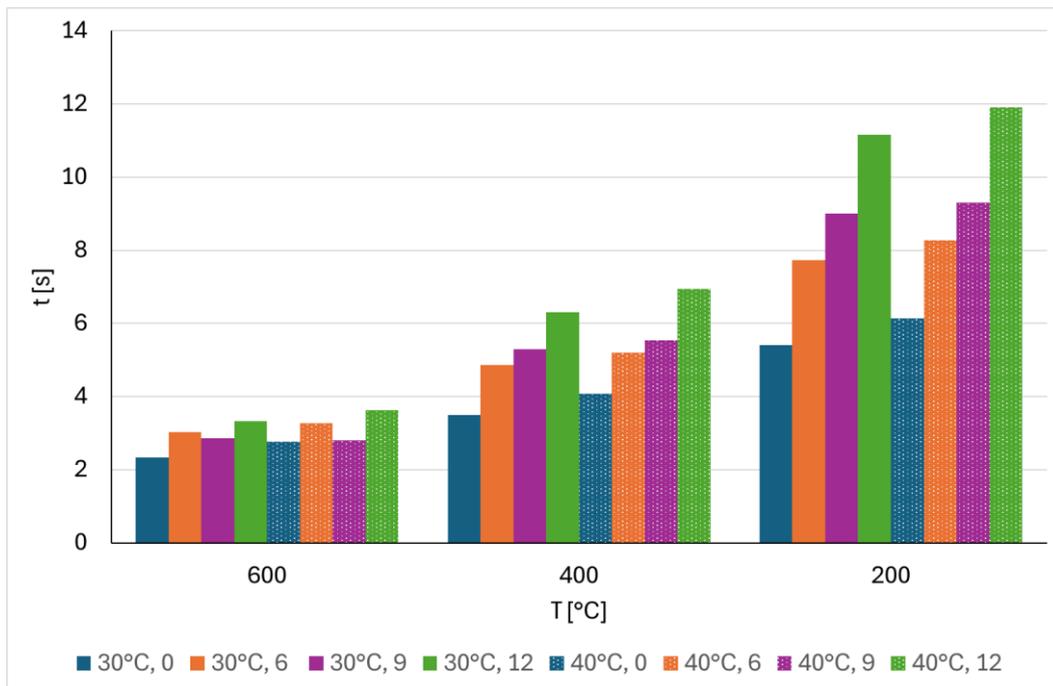


Figura 4.18 Tiempo promedio requerido para llegar a 600, 400 y 200 °C para cada condición experimental con un flujo de 90 LPM.

En la Tabla 4.4 se presentan las rapidezces de enfriamiento a 300 °C para el medio de enfriamiento a diferentes concentraciones y temperaturas (30 y 40 °C); esta es también información que pide la norma. El comportamiento de los datos indica que la mayor diferencia es debido a la concentración de polímero; para enfriamiento con 12 % de polímero la variación de rapidez de enfriamiento debido al aumento de temperatura es prácticamente nula. Los valores de rapidez de enfriamiento se encuentran representados de manera grafica en la Figura 4.18.

Tabla 4.4 Rapidez de enfriamiento a 300 °C.

Condiciones experimentales	Rapidez de enfriamiento a 300°C, °C/s		Rapidez de enfriamiento a 300°C promedio, °C/s	Desviación estándar, °C/s
30 °C, 90 LPM, sin polímero	1	-121.8	-111.7	8.8
	2	-106.3		
	3	-106.8		
40°C, 90 LPM, sin polímero	4	-103.7	-101.8	3.2
	5	-103.7		
	6	-98.1		
30 °C, 90 LPM, polímero 6%	1	-77.4	-73.0	5.1
	2	-74.3		
	3	-67.4		
40 °C, 90 LPM, polímero 6%	1	-70.2	-70.0	1.6
	2	-71.5		
	3	-68.3		
30 °C, 90 LPM, polímero 9%	1	-59.6	-58.2	1.3
	2	-57.1		
	3	-58.0		
40 °C, 90 LPM, polímero 9%	1	-59.9	-59.3	0.9
	3	-58.3		
	4	-59.8		
30 °C, 90 LPM, polímero 12%	1	-42.8	-42.9	0.7
	2	-42.2		
	3	-43.6		
40 °C, 90 LPM, polímero 12%	1	-43.0	-42.6	0.4
	2	-42.2		
	3	-42.7		

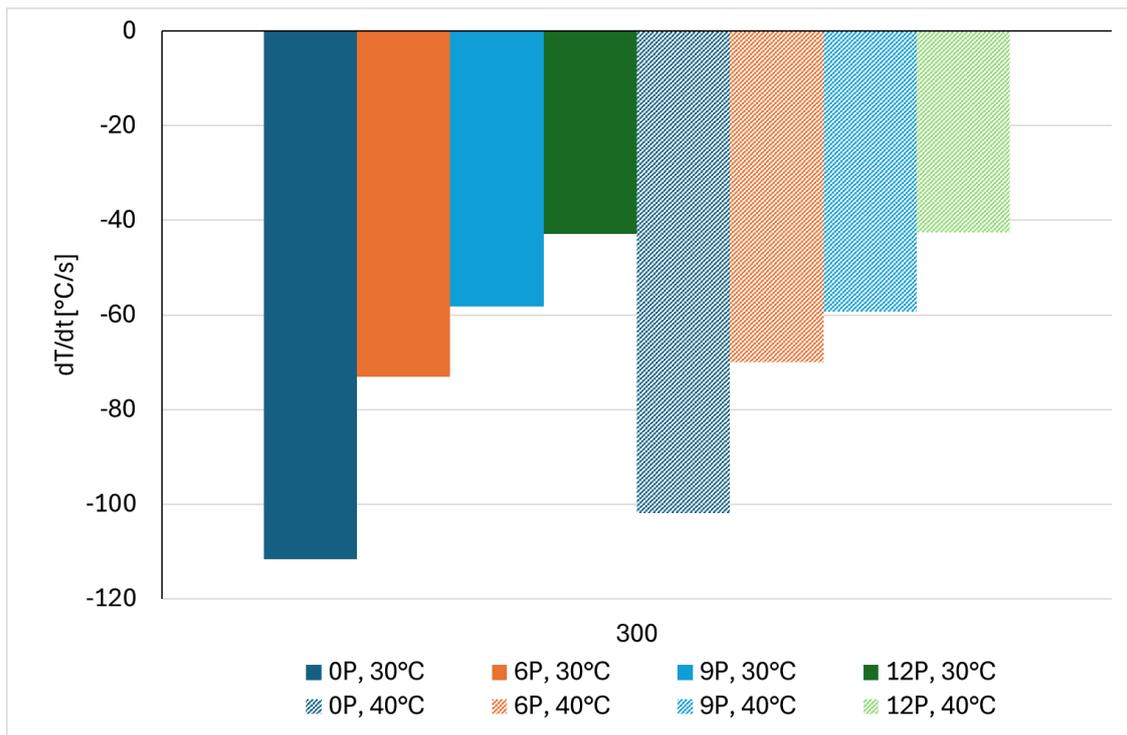


Figura 4.19 Rapidez de enfriamiento promedio a 300 °C para cada condición experimental con un flujo de 90 LPM.

Las curvas de enfriamiento medidas se utilizaron también para estimar la condición de frontera térmica, alimentándolas al *software WinProbe*, que ha sido desarrollado en el grupo de trabajo. En la Figura 4.19 se muestran la curva de enfriamiento obtenida experimentalmente con agua a 30 °C y la estimada mediante el programa *WinProbe*. Se observa que no hay una diferencia significativa entre ambas curvas, lo que indica que se seleccionó un valor adecuado del parámetro  $r$  (número de “tiempos futuros” en el método numérico de solución del *IHCP*). También se grafica la curva de enfriamiento en la superficie estimada con *WinProbe*; la temperatura de la superficie es notoriamente menor que la medida (recuérdese que el termopar está en el centro geométrico de la probeta) y alrededor de los 2.7 segundos muestra una sección irregular que no puede atribuirse al medio de enfriamiento, sino que es un artefacto numérico. Esto puede ser debido a dos factores: 1) el valor de  $r$  (el

número de pasos futuros) elegido en el programa para realizar los cálculos y 2) la distancia que hay entre el termopar y la superficie de la probeta es muy grande; nuestra hipótesis es que es lo segundo.

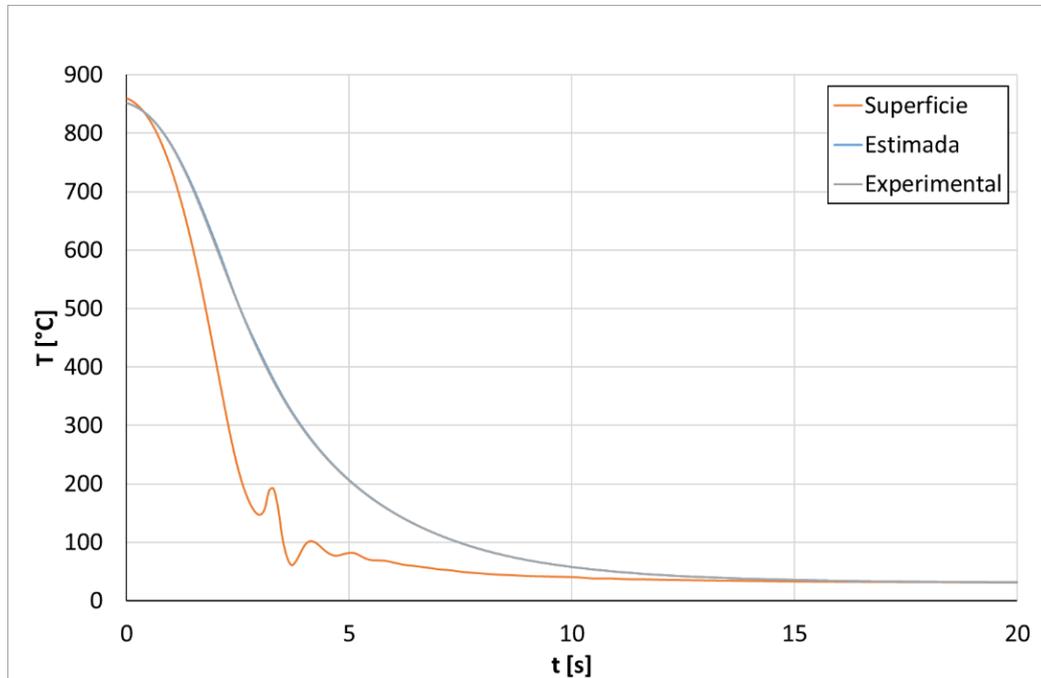


Figura 4.20 Curva de enfriamiento en la posición del termopar obtenida experimentalmente (línea gris), estimada (línea punteada color azul) y curva de enfriamiento en la superficie de la probeta estimada (línea naranja) para el enfriamiento realizado con agua a 30 °C y flujo de 90 LPM.

En la Figura 4.20 se muestra la curva de enfriamiento obtenida con polímero a 6 % y 30 °C medida experimentalmente y estimada (en el centro de la probeta y en la superficie) mediante el programa *WinProbe*. De nueva cuenta hay una sección irregular, alrededor de los 3.9 segundos, en la curva de enfriamiento de la superficie.

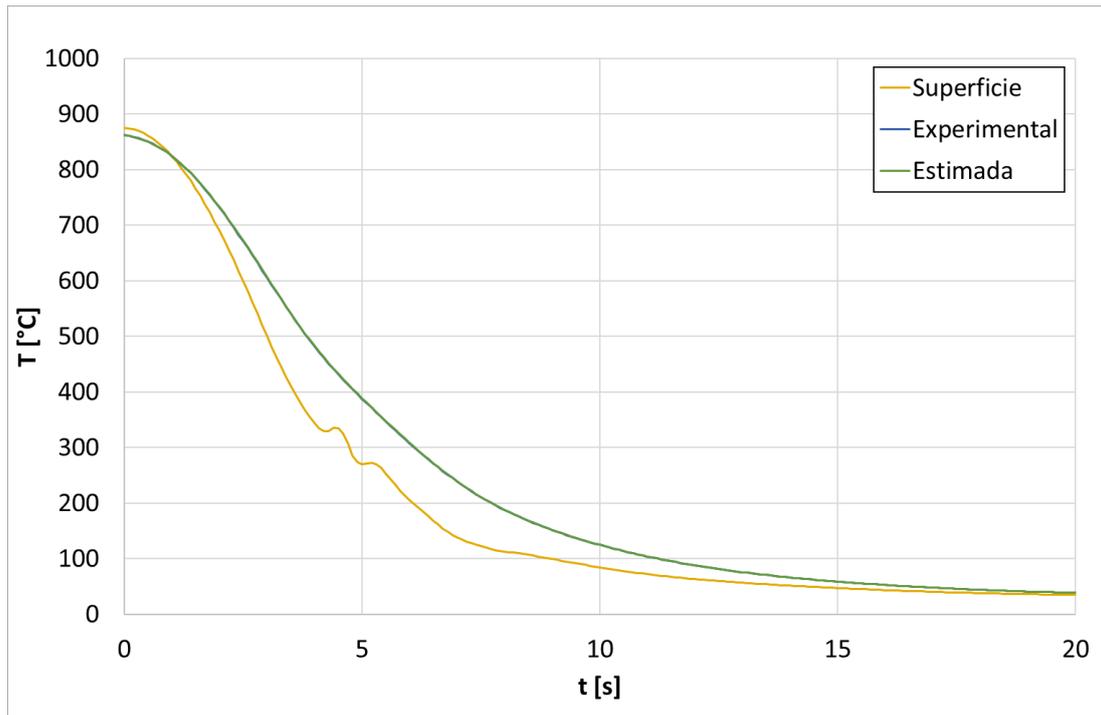


Figura 4.21 Curva de enfriamiento en la posición del termopar obtenida experimentalmente (línea azul), estimada (línea verde) y curva de enfriamiento en la superficie de la probeta estimada (línea amarilla) para el enfriamiento realizado con 6 % de polímero y flujo medido de 85 LPM a 30 °C.

En la Figura 4.21 se grafica el *flux* de calor en la superficie estimado en función del tiempo para ensayos con los cuatro medios de enfriamiento a 30 °C, mientras que las curvas para ensayos a 40 °C se muestran en la Figura 4.22.

En los ensayos realizados con 6 y 12 % de polímero a 30 °C se evidencia una clara disminución en la densidad de flujo de calor en la superficie con respecto al agua sin polímero, siguiendo la tendencia de que a medida que aumenta la concentración de polímero disminuye el flujo de calor. Sin embargo, se observa que las pruebas con polímero al 9 % resultan en un comportamiento diferente al esperado: al inicio presenta un *flux* de calor en la superficie ligeramente mayor que con las realizadas con agua hasta que alcanza su máximo (que es menor que el obtenido con agua pero mucho mayor que el que producen las soluciones al 6 y 12 % de polímero) antes que en el caso del agua; luego disminuye,

observándose más adelante un cambio de pendiente que corresponde al comportamiento explicado en el análisis de las curvas de enfriamiento y de rapidez de enfriamiento.

A 40 °C (Figura 4.21), los valores de *flux* de calor en la superficie son menores y el tiempo para alcanzar el *flux* de calor en la superficie máximo es mayor todos los medios de enfriamiento, lo que indica que disminuye el poder de enfriamiento.

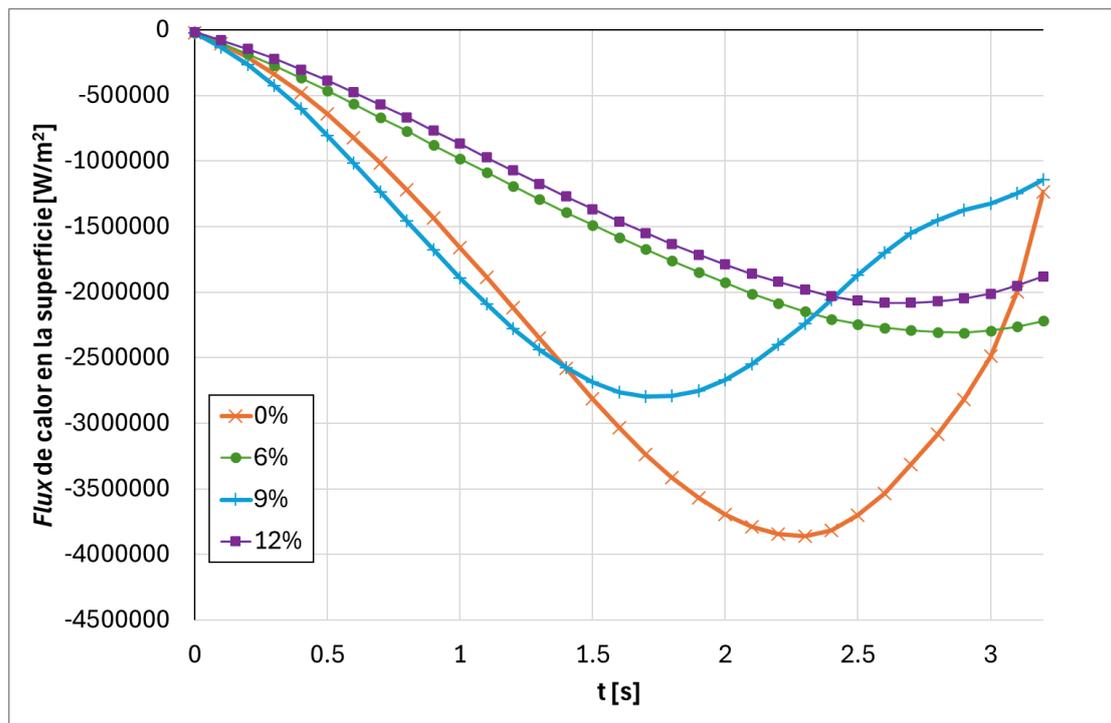


Figura 4.22 Flux de calor en la superficie estimado en función del tiempo para el enfriamiento a 30 °C: con agua 90 LPM (línea amarilla), 6 % de polímero a 85 LPM (línea verde), 9 % de polímero a 73 LPM (línea azul) y 12 % de polímero a 59 LPM (línea morada).

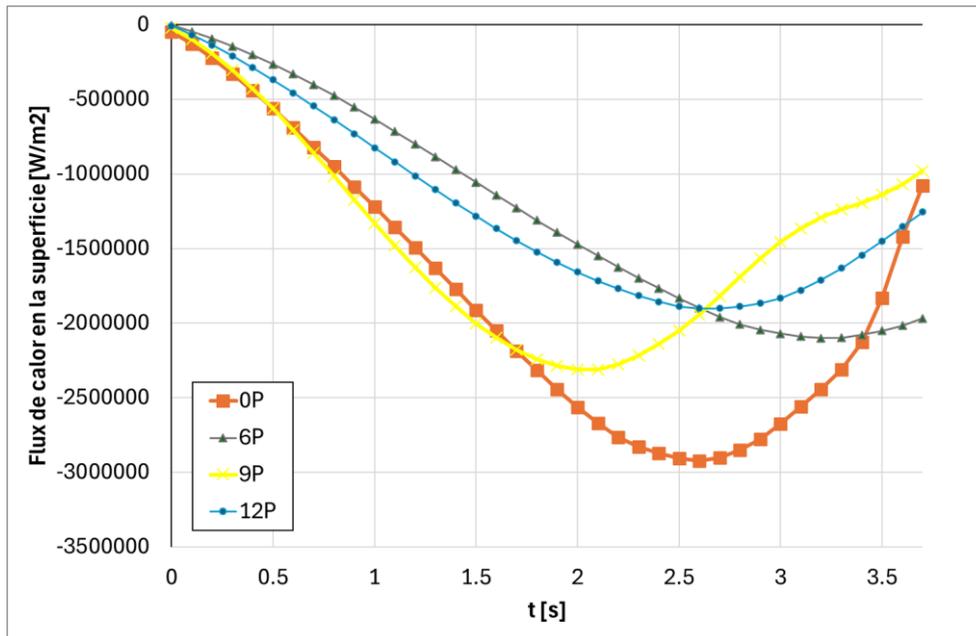


Figura 4.23 Flux de calor en la superficie estimado en función del tiempo para el enfriamiento a 40 °C: con agua (línea naranja), 6 % de polímero a 85 LPM (línea gris), 9 % de polímero a 73 LPM (línea amarilla) y 12 % de polímero a 59 LPM (línea azul).

En la Tabla 4.5 se presentan los valores máximos del *flux* de calor en la superficie, así como la temperatura de la superficie a la que se obtienen, estimados con *WinProbe*; en todos los casos son promedios de varias pruebas. En la Figura 4.23, estos valores se representan gráficamente.

Se observa una notable variación en la temperatura a la que ocurre la densidad de flujo de calor máxima para el agua a 30 °C. Además, se destaca que la prueba 3 de la solución acuosa de polímero al 6% realizada a 30 °C, exhibe una temperatura significativamente distinta a las de las otras dos pruebas; sin embargo, en las demás pruebas, se registra una variación mínima. Es importante resaltar que, como era de esperar, la densidad de flujo de calor en la superficie disminuye conforme se incrementa la concentración de polímero y la temperatura del medio de enfriamiento. Aquí se observa de manera clara el comportamiento del *flux* de calor en la superficie para la concentración de 9 % de polímero, ya que se alcanza el máximo prácticamente a la misma temperatura

que para la solución acuosa de 12 % de polímero, pero el valor del *flux* de calor en la superficie máximo es mayor que para la solución acuosa al 12 %.

*Tabla 4.5 Flux de calor en la superficie máximo y la temperatura superficial a la que se obtiene, ambos estimados mediante el programa WinProbe.*

Condiciones experimentales	Densidad de flujo de calor en la superficie máximo, W/m <sup>2</sup>		Temperatura superficial calculada, °C	Densidad de flujo de calor en la superficie máximo promedio,	Desviación estándar, W/m <sup>2</sup>	Temperatura superficial promedio, °C	Desviación estándar, °C
	1	2					
30 °C, 90 LPM, sin polímero	1	-2947980.2	93.9	-3467255.3	468714.7	247.5	136.5
	2	-3859023.5	293.7				
	3	-3594762.2	354.9				
40 °C, 90 LPM, sin polímero	4	-3125687.3	374.0	-3126139.3	204452.0	368.6	32.9
	5	-3330816.9	333.4				
	6	-2921913.6	398.5				
30 °C, 90 LPM, polímero 6%	1	-2796023.2	478.2	-2369478.1	399706.9	400.9	121.0
	2	-2308881.8	462.9				
	3	-2003529.3	261.5				
40 °C, 90 LPM, polímero 6%	1	-2180288.5	486.3	-2207269.0	122260.0	492.0	8.1
	2	-2340765.7	488.4				
	3	-2100752.8	501.2				
30 °C, 90 LPM, polímero 9%	1	-2795523.3	532.3	-2706634.1	161921.4	526.8	7.9
	2	-2804641.5	530.4				
	3	-2519737.5	517.8				
40 °C, 90 LPM, polímero 9%	1	-2309421.2	560.3	-2297191.5	78368.8	562.9	5.2
	3	-2213426.8	568.9				
	4	-2368726.5	559.5				
30 °C, 90 LPM, polímero 12%	1	-2080173.1	532.6	-2057122.7	131017.6	535.2	11.7
	2	-1916109.5	525.0				
	3	-2175085.4	548.0				
40 °C, 90 LPM, polímero 12%	1	-1817499.5	544.1	-1851557.8	44594.6	559.1	15.8
	2	-1835139.8	575.7				
	3	-1902034.0	557.6				

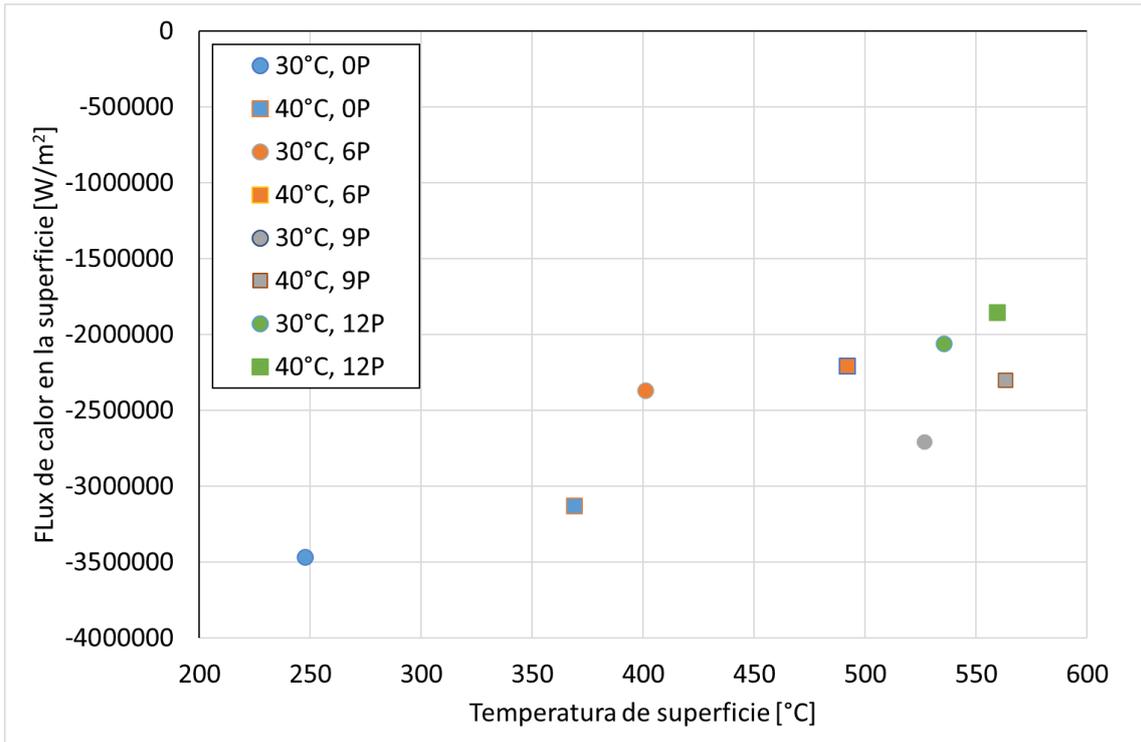


Figura 4.24 Flux de calor en la superficie máximo en función de la temperatura de la superficie a la que se obtiene para cada condición experimental. Se grafican los valores promedio de tres pruebas para cada condición experimental.

## 5 Conclusiones

- El enfriamiento con la ducha impresa en 3D evita completamente la etapa de película de vapor.
- La solución acuosa de polímero presenta un comportamiento anómalo (que se ha reportado en pruebas por inmersión) durante el enfriamiento, que consiste en un cambio en la pendiente de las curvas de enfriamiento alrededor de los 500 - 550°C.
- La mayor rapidez de enfriamiento máxima, de -184 °C/s, se obtuvo utilizando agua a 30°C sin adición de polímero, mientras que la mínima, de -103.4 °C/s, se registró con una disolución acuosa de polímero al 12 % a 40 °C.
- Los tiempos determinados para alcanzar 400 y 200°C muestran que, a menor concentración de polímero, menor es el tiempo requerido. En contraste, el tiempo para alcanzar 600 °C cuando se utilizó la solución polimérica al 9 % fue menor que para la solución al 6 %.
- Las rapidezces de enfriamiento a 300 °C indican que a menor concentración de polímero mayor es la rapidez de enfriamiento a esa temperatura.
- El comportamiento que se observó para la solución acuosa de polímero al 9% es inesperado y abre la posibilidad de un estudio más enfocado a las variables que lo afectan.

## Bibliografía

- [1]. Totten, G. E. (2006). *Steel heat treatment handbook (2nd ed.)*. Taylor & Francis Group.
- [2]. Alfred, G. (2017). *Tratamientos térmicos en una probeta de Acero*. Steemit. <https://steemit.com/stem-espanol/@gerardoalfred/tratamientos-termicos-en-una-probeta-de-acero>
- [3]. Totten, G. E. y Dossett, J. (1991). *ASM Handbook: Heat Treating of Irons and Steels. (Vol.4)*. ASM International eBooks.  
<https://doi.org/10.31399/asm.hb.v04d.9781627081689>
- [4]. Farrera, B.B., Hernández, C. A., Ramos, J. Á., Valdovinos, L. E., Granados, N. M. y Vapalahti, S. (2023). Experimental Study of the Effect of the Concentration of Water / PolyAlkylene Glycol Solutions on Heat Transfer in Steels Subjected to Quenching. *Research Square*, 1, 1-14.  
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2828796/v1>
- [5]. D02 Committee. (2022). *Test method for determination of cooling characteristics of aqueous polymer quenchants by cooling curve analysis with agitation (tensi method)*. ASTM International.
- [6]. Vieira, E. D. R., Biehl, L. V., Medeiros, J. L. B., Costa, V. M., y Macedo, R. J. (2021). Evaluation of the characteristics of an AISI 1045 steel quenched in different concentration of polymer solutions of polyvinylpyrrolidone. *Scientific Reports*, 11(1313).  
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-79060-0>
- [7]. Ramesh, G., y Narayan Prabhu, K. (2016). Effect of polymer concentration on wetting and cooling performance during immersion quenching. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 47(2), 859-881.  
DOI:10.1007/s11663-015-0541-5
- [8]. International Organization for Standardization. (1995). Industrial quenching oils-determination of cooling characteristics-nickel-alloy probe test method', ISO 9950. ISO.
- [9]. Mathews, N.G., Rao, K.M.P. y Nayak, U.V. (2019). Comparison of Cooling Behaviour of Carbon Steels in Polymer, Oil and Carbonated Quench

- Media. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 72, 1405–1408.  
<https://doi.org/10.1007/s12666-018-1542-2>
- [10]. Bozhko, G. T., Bannykh, O. A., Tropkina, M. N., Manikhin, P. I. y Popov, A. V. (1983). Effect of aqueous polymer solution viscosity on cooling capacity. *Metal Science and Heat Treatment*, 25, 810-813.  
<https://doi.org/10.1007/BF00703891>
- [11]. Totten, G. E. y Canale, L. C. F. (2005). Polymer Quenchants. En Jürgen K.H. Cahn, R., *et.al. Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (pp. 1-11). Elsevier Ltd.
- [12]. Hosseini, S. E., Zabett, A., y Li, Z. (2014). Cooling curve analysis of heat treating oils and correlation with hardness and microstructure of a low carbon steel. *Materials Performance and Characterization*, 3(4), 427-445.  
<https://doi.org/10.1520/mpc20130067>
- [13]. Soni, A., Samuel, A., y Prabhu, K. N. (2023). Experimental Investigation of Heat Transfer Characteristics of Polyethylene glycol (PEG) Based Quench Media for Industrial Heat Treatment. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 144(110865).  
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2023.110865>
- [14]. Meekisho, L., Hernandez, B., Tellez, J.S. y Chen, X. (2005). Computer-aided cooling curve analysis using WinProbe. *International Journal of Materials and Product Technology*, 24(1-4), 155 – 169.