



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE QUIMICA

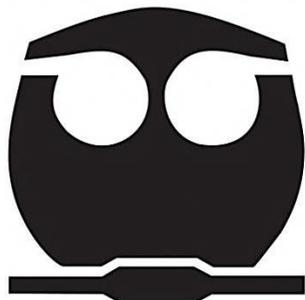
**ANALISIS TERMOESTRUCTURAL DE LA ETAPA  
DE ENFRIAMIENTO DEL PROCESO STELMOR**

**TESIS**

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

PRESENTA:

**JOSE MANUEL HERNANDEZ SOTO**



**MEXICO, D.F.**

**2015**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

Jurado asignado:

Presidente: Prof. BERNARDO FABIAN CAMPILLO ILLANES

Vocal: Prof. JOSÉ BERNARDO HERNÁNDEZ MORALES

Secretario: Prof. SERGIO GARCIA GALÁN

1er Suplente: Prof. ARTURO ALEJANDRO SANCHEZ SANTIAGO

2do Suplente: Profa. BALBINA OJEDA RAMIREZ

Sitio donde se desarrolló el tema:

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

Asesor del tema:

---

Dr. José Bernardo Hernández Morales

Sustentante:

---

José Manuel Hernández Soto

## Contenido

|   |      |
|---|------|
| Índice de figuras .....   | iii  |
| Índice de tablas .....  | viii |
| Listado de símbolos.....  | ix   |
| Resumen .....   | xi   |
| 1 Introducción .....  | 1    |
| 1.1 Alambrón de acero.....  | 1    |
| 1.2 Justificación.....  | 3    |
| 1.3 Hipótesis .....   | 4    |
| 1.4 Objetivos.....  | 4    |
| 1.5 Metas.....  | 5    |
| 2 Antecedentes .....  | 6    |
| 2.1 Tratamiento térmico .....   | 6    |
| 2.1.1 Aspectos microestructurales.....                                  | 7    |
| 2.1.2 Tratamientos isotérmicos para alambrón ( <i>patenting</i> ) ..... | 7    |
| 2.2 Diagramas CCT.....  | 8    |
| 2.3 El proceso Stelmor.....   | 9    |
| 2.4 Transferencia de calor.....   | 9    |
| 2.5 Transferencia de calor en sistemas newtonianos.....                 | 10   |
| 2.6 Transferencia de calor por convección forzada .....                 | 11   |
| 2.7 Problema directo de conducción de calor .....                       | 12   |
| 2.8 Problema inverso de conducción de calor .....                       | 12   |
| 3 Procedimiento .....   | 14   |
| 3.1 Curvas de enfriamiento .....  | 14   |
| 3.2 Trabajo computacional.....  | 17   |
| 3.3 Diagramas CCT.....  | 18   |
| 3.4 Análisis microestructural .....                                     | 19   |
| 3.4.1 Tamaño de grano de la ferrita .....                               | 19   |
| 3.4.2 Espacio interlaminar de la perlita .....                          | 21   |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.5   | Dureza.....  | 22 |
| 4     | Resultados y discusión.....                                | 24 |
| 4.1   | Curvas de enfriamiento y reproducibilidad.....             | 24 |
| 4.2   | Comparación con resultados reportados .....                | 27 |
| 4.3   | Acero inoxidable AISI 304 .....                            | 30 |
| 4.3.1 | Respuestas térmicas.....                                   | 30 |
| 4.3.2 | Rapidez local de enfriamiento .....                        | 33 |
| 4.3.3 | Estimación del <i>flux</i> de calor .....                  | 37 |
| 4.3.4 | Coeficiente de transferencia de calor .....                | 42 |
| 4.3.5 | Estimación de la velocidad del aire.....                   | 44 |
| 4.3.6 | Número de Biot .....                                       | 47 |
| 4.3.7 | Modelación del <i>flux</i> de calor de la superficie. .... | 49 |
| 4.4   | Acero hipoeutectoide.....                                  | 57 |
| 4.4.1 | Respuesta térmica.....                                     | 57 |
| 4.4.2 | Rapidez de enfriamiento local .....                        | 60 |
| 4.4.3 | <i>Flux</i> de calor de superficie .....                   | 62 |
| 4.4.4 | Diagrama CCT .....   | 64 |
| 4.4.5 | Análisis microestructural.....                             | 65 |
| 4.4.6 | Dureza .....   | 68 |
| 4.5   | Acero eutectoide .....                                     | 69 |
| 4.5.1 | Respuesta térmica.....                                     | 69 |
| 4.5.2 | Rapidez de enfriamiento local .....                        | 70 |
| 4.5.3 | <i>Flux</i> de calor de superficie .....                   | 72 |
| 4.5.4 | Diagrama CCT .....   | 74 |
| 4.5.5 | Análisis microestructural.....                             | 75 |
| 4.5.6 | Dureza .....   | 79 |
| 5     | Conclusiones.....  | 80 |
| 6     | Recomendaciones y trabajo a futuro.....                    | 82 |
| 7     | Referencias bibliográficas .....                           | 83 |
|       | Apéndice .....   | 87 |

## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.1</b> Diagrama esquemático de la línea Stelmor. A caja de agua, B cabezal conformador, C transportador, D cámara de distribución de aire, E cámara de formación de espiras [4]. .....   | 2  |
| <b>Figura 3.1</b> Representación esquemática del dispositivo experimental (con el horno cerrado): 1) horno, 2) extensiones para termopares, 3) boquilla, 4) compresora, 5) rotámetro, 6) adquisidor de datos, 7) computadora.....               | 15 |
| <b>Figura 3.2</b> Representación esquemática de la geometría de la pieza, incluyendo los barrenos para los termopares.....  | 16 |
| <b>Figura 3.3</b> Representación esquemática de la distribución de los barrenos para los termopares (vista superior); se utilizaron termopares de 1/16” de diámetro. ...  | 16 |
| <b>Figura 4.1</b> Respuesta térmica para las posiciones centro y sub-superficie para la probeta de acero inoxidable; flujo de aire: 95 LPM a 30 psi.....  | 25 |
| <b>Figura 4.2</b> Respuestas térmicas en la sub-superficie de la probeta de acero inoxidable AISI 304, complementadas con imágenes tomadas durante el enfriamiento, <i>para la probeta de acero inoxidable; flujo de aire: 95 LPM a 30 psi.</i> | 26 |
| <b>Figura 4.3</b> Respuesta térmica para las posiciones centro y sub-superficie de dos pruebas independientes con la probeta de acero inoxidable; flujo de aire: 95 LPM a 30 psi.....   | 27 |
| <b>Figura 4.4</b> Respuestas térmicas medidas para el acero inoxidable (símbolos) y reportadas por Campbell et al. [3] (líneas). .....  | 28 |
| <b>Figura 4.5</b> Respuestas térmicas medidas para el acero al carbono hipoeutectoide (símbolos) y reportadas por Campbell et al. [3] para un acero eutectoide (líneas).....  | 29 |
| <b>Figura 4.6</b> Respuestas térmicas medidas para el acero al carbono eutectoide (símbolos) y reportadas por Campbell et al. [3] para un acero eutectoide (líneas). .....  | 30 |
| <b>Figura 4.7</b> Respuestas térmicas en la sub-superficie de la probeta de acero inoxidable AISI 304 para todos los flujos de aire a 30 psi. ....  | 31 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 4.8</b> Respuestas térmicas en el centro de la probeta de acero inoxidable AISI 304 para todos los flujos de aire a 30 psi. ....  | 31 |
| <b>Figura 4.9</b> Respuestas térmicas en la sub-superficie de la probeta de acero inoxidable AISI 304, para todos los flujos de aire a 40 psi. ....   | 32 |
| <b>Figura 4.10</b> Respuestas térmicas en el centro de la probeta de acero inoxidable AISI 304, para todos los flujos de aire a 40 psi. ....  | 33 |
| <b>Figura 4.11</b> Valor absoluto de la rapidez local de enfriamiento (sub-superficie) en función de la temperatura local para la probeta de acero inoxidable AISI 304, para todos los valores de flujo de aire a 30 psi. ....    | 34 |
| <b>Figura 4.12</b> Valor absoluto de la rapidez local de enfriamiento (sub-superficie) en función de la temperatura local, de acero inoxidable AISI 304, para todos los flujos de aire a 40 psi. ....                             | 35 |
| <b>Figura 4.13</b> Valor absoluto de la rapidez local de enfriamiento (sub-superficie) en función del tiempo, para todos los flujos de aire con la probeta de acero inoxidable AISI 304, para una presión de aire de 30 psi. .... | 36 |
| <b>Figura 4.14</b> Valor absoluto de la rapidez local de enfriamiento (sub-superficie) en función del tiempo, para todos los flujos de aire con la probeta de acero inoxidable AISI 304, para una presión de aire de 40 psi. .... | 37 |
| <b>Figura 4.15</b> Flux de calor de la superficie (estimado) en función del tiempo, para la probeta de acero inoxidable AISI 304, para tres valores del parámetro $r$ ; flujo de aire: 125 LPM. ....                              | 38 |
| <b>Figura 4.16</b> Flux de calor de la superficie (estimado) en función del tiempo para la probeta de acero inoxidable AISI 304, para todos los flujos de aire a la presión de 30 psi. ....                                       | 39 |
| <b>Figura 4.17</b> Valor absoluto del flux de calor de la superficie (estimado) en función del tiempo para la probeta de acero inoxidable AISI 304, para todos los flujos de aire a la presión de 40 psi. ....                    | 40 |
| <b>Figura 4.18</b> Flux de calor estimado en función de la temperatura de la superficie (estimada), para la probeta de acero inoxidable AISI 304, para todos los flujos de aire a presión de 30 psi. ....                         | 41 |

|                    |  |    |
|--------------------|--|----|
| <b>Figura 4.19</b> | Flux de calor de la superficie (estimado) en función de la temperatura de la superficie (estimada), para la probeta de acero inoxidable AISI 304, para todos los flujos de aire a presión de 40 psi. ....                                  | 42 |
| <b>Figura 4.20</b> | Coeficiente de transferencia de calor como función de la temperatura de la superficie (estimada) para la probeta de acero inoxidable AISI 304; flujo de aire: 95 LPM a 30 psi. ....  | 43 |
| <b>Figura 4.21</b> | Coeficiente de transferencia de calor como función de la temperatura de la superficie (estimada) para la probeta de acero inoxidable AISI 304.....   | 44 |
| <b>Figura 4.22</b> | Velocidad del aire (estimada) en función del flujo volumétrico para los experimentos con la probeta de acero inoxidable AISI 304, para una presión de aire de 30 psi.....  | 45 |
| <b>Figura 4.23</b> | Velocidad de aire (estimada) en función del flujo volumétrico para los experimentos con la probeta de acero inoxidable AISI 304, para una presión de aire de 40 psi.....   | 45 |
| <b>Figura 4.24</b> | Número de Biot como función de la temperatura de la superficie para la probeta de acero inoxidable AISI 304, para un flujo de aire de 95 LPM a presión de 30 psi.....  | 48 |
| <b>Figura 4.25</b> | Número de Biot como función de la temperatura de la superficie, para todos los flujos de aire a presión de 30 psi; para la probeta de acero inoxidable AISI 304, .....   | 49 |
| <b>Figura 4.26</b> | Flux de calor adimensional (sub-superficie) en función del complemento de la temperatura adimensional (símbolos) y curva de regresión (línea), para la probeta de acero inoxidable. Flujo de aire de 50 LPM, a una presión de 40 psi. .... | 50 |
| <b>Figura 4.27</b> | Familias de flux de calor adimensional (sub-superficie) en función del complemento de la temperatura adimensional, para la probeta de acero inoxidable. Flujo de aire de 50 LPM, a una presión de 40 psi. ....                             | 51 |
| <b>Figura 4.28</b> | Parámetro $a$ en función del flujo de aire.....  | 53 |
| <b>Figura 4.29</b> | Parámetro $b$ en función del flujo de aire.....  | 53 |
| <b>Figura 4.30</b> | Parámetro $c$ en función del flujo de aire .....   | 54 |
| <b>Figura 4.31</b> | Parámetro $x_0$ en función del flujo de aire. ....   | 54 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 4.32</b> Flux de calor de la superficie calculado (líneas) y re-calculado (líneas punteadas) en función de la temperatura de la superficie, para la probeta de acero inoxidable AISI 304. Para todos los flujos de aire y una presión de aire de 30 psi .....                             | 56 |
| <b>Figura 4.33</b> Flux de calor de la superficie calculado (líneas) y re-calculado (líneas punteadas) en función de la temperatura de la superficie, para la probeta de acero inoxidable AISI 304. Para todos los flujos de aire y presión de aire de 40 psi. ....                                 | 57 |
| <b>Figura 4.34</b> Respuesta térmica para las posiciones centro y sub-superficie de la probeta de acero hipoeutectoide; flujo de aire: 65 LPM a presión de 30psi. ....  | 58 |
| <b>Figura 4.35</b> Respuesta térmica para las posiciones centro y sub-superficie de dos pruebas independientes con la probeta de acero hipoeutectoide; flujo de aire: 65 LPM a una presión de 30 psi. ....  | 59 |
| <b>Figura 4.36</b> Respuesta térmica para la posición sub-superficie de la probeta de acero hipoeutectoide, para enfriamiento con 65 LPM de aire a 30 psi y 110 LPM de aire a 40 psi. ....  | 60 |
| <b>Figura 4.37</b> Valor absoluto de la rapidez local de enfriamiento (sub-superficie) en función del tiempo para el acero hipoeutectoide, para enfriamiento con 65 LPM de aire a 30 psi y 110 LPM de aire a 40 psi. ....   | 61 |
| <b>Figura 4.38</b> Rapidez local de enfriamiento (sub-superficie) en función de la temperatura local para la probeta de acero al carbono, para dos valores de flujo de aire, para una presión de aire de 30 y 40 psi, respectivamente. ....   | 62 |
| <b>Figura 4.39</b> Flux de calor (sub-superficie) en función del tiempo para la probeta de acero hipoeutectoide, para enfriamiento con 65 LPM de aire a 30 psi y 110 LPM de aire a 40 psi. ....   | 63 |
| <b>Figura 4.40</b> Flux de calor (sub-superficie) en función de la temperatura de superficie para la probeta de acero hipoeutectoide, para enfriamiento con 65 LPM de aire a 30 psi y 110 LPM de aire a 40 psi. ....  | 64 |
| <b>Figura 4.41</b> Diagrama CCT del acero 1021 [25]. La línea vertical sólida corresponde al enfriamiento con aire para la condición de 110 LPM a una presión de 40 psi, mientras que la línea vertical punteada corresponde a la condición de enfriamiento de 65 LPM a una presión de 30 psi. .... | 65 |
| <b>Figura 4.42</b> Micrografía de acero hipoeutectoide, de llegada (100 X). Nital 2. ....   | 66 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 4.43</b> Micrografía de acero hipoeutectoide, enfriada con un flujo de aire de 65 LPM a presión de 30 psi (100 X). Nital 2.....  | 67 |
| <b>Figura 4.44</b> Micrografía del acero hipoeutectoide, enfriado con un flujo de aire de 110 LPM a presión de 40 psi (100 X). Nital 2.....  | 67 |
| <b>Figura 4.45</b> Respuesta térmica en la posición sub-superficie de la probeta de acero eutectoide, para enfriamiento con 65 LPM de aire a 30 psi y 110 LPM de aire a 40 psi.....  | 70 |
| <b>Figura 4.46</b> Valor absoluto de la rapidez local de enfriamiento (sub-superficie) en función del tiempo para el acero eutectoide, para enfriamiento con 65 LPM de aire a 30 psi y 110 LPM de aire a 40 psi. ....  | 71 |
| <b>Figura 4.47</b> Valor absoluto de la rapidez local de enfriamiento (sub-superficie) en función del tiempo para el acero al carbono eutectoide, para enfriamiento con 65 LPM de aire a 30 psi y 110 LPM de aire a 40 psi. ....   | 72 |
| <b>Figura 4.48</b> Flux de calor (sub-superficie) en función del tiempo para la probeta de acero eutectoide, para enfriamiento con 65 LPM de aire a 30 psi y 110 LPM de aire a 40 psi.....   | 73 |
| <b>Figura 4.49</b> Flux de calor de la superficie en función de la temperatura de la superficie para la probeta de acero eutectoide, para enfriamiento con 65 LPM de aire a 30 psi y 110 LPM de aire a 40 psi. ....  | 74 |
| <b>Figura 4.50</b> Diagrama CCT del acero 1080 [26]. La línea punteada corresponde al enfriamiento con aire para la condición de 65 LPM a una presión de 30 psi, mientras que la línea sólida corresponde a la condición de enfriamiento de 110 LPM a una presión de 40 psi..... | 75 |
| <b>Figura 4.51</b> Micrografía del acero eutectoide, enfriado con un flujo de aire de 65 LPM a presión de 30 psi (100 X). Nital 2.....   | 76 |
| <b>Figura 4.52</b> Micrografía del acero eutectoide, enfriado con un flujo de aire de 110 LPM a presión de 40 psi (100 X). Nital 2.....  | 76 |
| <b>Figura 4.53</b> Micrografía obtenida mediante MEB para el acero eutectoide, enfriado con un flujo de aire de 65 LPM y presión de 30 psi. (5000 X). Picral. ....   | 77 |
| <b>Figura 4.54</b> Micrografía obtenida mediante MEB para el acero eutectoide, enfriado con un flujo de aire de 110 LPM y presión de 40 psi. (4300 X). Picral. ...   | 77 |

## Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 4.1</b> Valores del diámetro de la probeta y de la velocidad de aire empleados por Campbell et al. [3].   | 46 |
| <b>Tabla 4.2</b> Diámetro de la probeta, flujo de aire y valores estimados de la velocidad del aire, para la presión de 30 psi.                                    | 47 |
| <b>Tabla 4.3</b> Diámetro de la probeta, flujo de aire y valores estimados de la velocidad del aire, para la presión de 40 psi.                                    | 47 |
| <b>Tabla 4.4</b> Parámetros obtenidos de la ecuación de Weibull 4 de parámetros para la presión de aire de 30 psi  | 52 |
| <b>Tabla 4.5</b> Parámetros obtenidos de la ecuación de Weibull 4 de parámetros para la presión de aire de 40 psi  | 52 |
| <b>Tabla 4.6</b> Ecuaciones obtenidas para los 4 parámetros de la ecuación de Weibull, para la probeta de acero inoxidable AISI 304, a una presión de aire 30 psi. | 55 |
| <b>Tabla 4.7</b> Ecuaciones obtenidas para los 4 parámetros de la ecuación de Weibull, para la probeta de acero inoxidable AISI 304, a una presión de aire 40 psi. | 55 |
| <b>Tabla 4.8</b> Tamaño de grano de la ferrita para el acero hipoeutectoide.   | 68 |
| <b>Tabla 4.9</b> Durezas obtenidas para las condiciones experimentales presentes, para el acero hipoeutectoide.  | 69 |
| <b>Tabla 4.10</b> Espacio interlaminar promedio para 3 regiones, para la probeta enfriada con aire a 65 LPM a una presión de aire de 40 psi                        | 78 |
| <b>Tabla 4.11</b> Espacio interlaminar promedio, para la probeta enfriada con aire a 110 LPM a una presión de aire de 40 psi.                                      | 78 |
| <b>Tabla 4.12</b> Dureza del acero eutectoide después del tratamiento térmico.   | 79 |

## Listado de símbolos

| Símbolo      | Cantidad  | Unidades                    |
|--------------|---|-----------------------------|
| $t$          | Tiempo  | $s$                         |
| $\rho$       | Densidad  | $kg\ m^{-3}$                |
| $V$          | Volumen   | $m^3$                       |
| $p$          | Exponente ( $p = 0, 1, 2$ para las coordenadas rectangulares, cilíndricas y esféricas, respectivamente) | -                           |
| $A_{\perp}$  | Área perpendicular al flujo de calor  | $m^2$                       |
| $k_a$        | Conductividad térmica del aire  | $W\ m^{-1}\ ^{\circ}C^{-1}$ |
| $\dot{q}$    | Rapidez volumétrica de generación de calor  | $W\ m^{-3}$                 |
| $q$          | Flux de calor   | $W\ m^{-2}$                 |
| $\bar{h}$    | Coefficiente de transferencia de calor promedio   | $W\ m^{-2}\ ^{\circ}C^{-1}$ |
| $T_o$        | Temperatura inicial   | $^{\circ}C$                 |
| $T_{\infty}$ | Temperatura del fluido  | $^{\circ}C$                 |
| $L_c$        | Longitud característica   | $m$                         |
| $\mu_a$      | Viscosidad cinemática del aire  | $m^2\ s^{-1}$               |
| $\bar{v}$    | Velocidad promedio del aire   | $m\ s^{-1}$                 |
| $Bi$         | Número de Biot  | -                           |
| $Nu$         | Número de Nusselt   | -                           |
| $Re$         | Número de Reynolds  | -                           |
| $Pr$         | Numero de Prandlt   | -                           |
| $c, m, n$    | Constantes determinadas experimentalmente   | -                           |
| $V_v$        | Fracción volumen de ferrita   | $mm^3 / mm^3$               |

|               |  |           |
|---------------|--|-----------|
| $L_T$         | Longitud lineal total                              | $mm^{-1}$ |
| $L_{3\alpha}$ | Longitud lineal de elementos promedio para ferrita | $mm/mm$   |
| $N_\alpha$    | Número de granos de ferrita                        | ---       |
| G             | Tamaño de grano ASTM                               | ---       |
| N             | Número de láminas de perlita                       | ---       |
| $N_L$         | Numero de láminas de perlita interceptadas         | $mm^{-1}$ |
| M             | Magnificación                                      | ----      |
| D             | Diámetro de la probeta                             | $mm$      |
| $\sigma$      | Espacio interlaminar                               | $mm$      |
| $\sigma_r$    | Espacio interlaminar real                          | $mm$      |

## Resumen

El estudio del proceso Stelmor es la motivación de este trabajo; éste es un tratamiento térmico, que está situado inmediatamente después del molino de laminación y utiliza aire forzado para el enfriamiento de alambón de acero, desde la temperatura de laminación, a través de la transformación de la austenita, hasta una temperatura adecuada para su manejo.

En particular, se estudió el enfriamiento con aire forzado de probetas cilíndricas fabricadas con acero inoxidable (AISI 304, primera etapa) y con acero al carbono hipoeutectoide (AISI 1020) y eutectoide (AISI 1080).

Para la primera etapa, se obtuvieron las respuestas térmicas empleando flujos de aire de 50, 65, 80, 95 y 110 LPM, usando valores de presión de aire de 30 y 40 psi.

La segunda etapa consintió en la obtención de las respuestas térmicas para dos condiciones extremas, es decir, flujo bajo (65 LPM a una presión de aire de 30 psi) y flujo alto (110 LPM a una presión de aire de 40 psi), para enfriar probetas de acero al carbono.

Parte del análisis, fue la obtención de la rapidez de enfriamiento como función de la temperatura y del tiempo. Observándose, que los valores máximos de rapidez de enfriamiento se logran, cuando la presión de aire y el flujo de aire son mayores.

Se resolvió el problema inverso de conducción de calor alimentando las respuestas térmicas al programa *Winprobe*. Posterior a esto, se estimó la velocidad del aire, empleando correlaciones empíricas en función de los números adimensionales de Reynolds, Prandtl y Nusselt.

Se desarrollaron ecuaciones empíricas que describen el comportamiento del *flux* de calor como función de la temperatura, empleando la ecuación de *Weilbull* de 4 parámetros. A su vez, se obtuvo una regresión para cada uno de los 4 parámetros como función del flujo de aire a presión constante.

Posteriormente al tratamiento, se realizó un análisis microestructural. Se determinó el tamaño de grano de la ferrita (acero hipoeutectoide) y el espacio interlaminar de la perlita (acero eutectoide), y se midieron las durezas para ambos grados de acero. Al aumentar la intensidad del enfriamiento el tamaño de grano de la ferrita y el espacio interlaminar de la perlita disminuyeron, por lo que las durezas aumentaron.

# 1 Introducción

En este apartado, se describen los usos y procesos de obtención de alambón de acero; también se establecen el objetivo, la hipótesis y la justificación del presente trabajo de investigación.

## 1.1 Alambón de acero

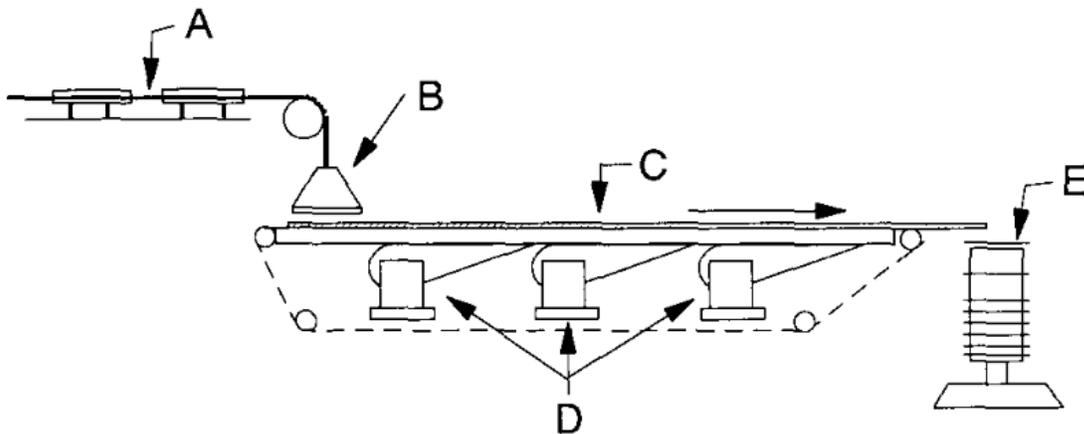
El alambón de acero es uno de los productos más versátiles de la producción moderna del acero. Actualmente, se produce alambón de acero cuyo diámetro varía entre los 5.5 a los 13.5 mm [1]. Sus aplicaciones incluyen la fabricación de clavos, tornillos, electrodos para soldadura, alambre de acero y los radios para bicicletas, entre otras aplicaciones [2].

La fabricación del alambón de acero, comienza en los molinos de laminación; usualmente se emplean palanquillas de aproximadamente 100 mm<sup>2</sup>, de longitud variable. El primer paso, consiste en calentar las palanquillas a una temperatura adecuada para laminación ( $\approx 1260$  °C). Posteriormente, las palanquillas se laminan a las dimensiones finales, con velocidades (para diámetros de alambón pequeños a la salida) de aproximadamente 55 m/s. Las cajas de agua están situadas después de los molinos de laminación para brindar una temperatura intermedia previa al enfriamiento continuo. La función de las cajas de agua, es remover la cascarilla de óxido y así proveer un enfriamiento rápido (esta operación se realiza en fracciones de segundo, debido a las altas velocidades de transporte del material) [3].

Desde su desarrollo, el proceso Stelmor se ha convertido en uno de los procesos de *patenting* más populares a nivel mundial. El principal objetivo del *patenting* de alambón de acero, es producir un material cuya microestructura sea la apropiada para los posteriores pasos de procesamiento. El control microestructural se logra a

través de la variación de la historia térmica del acero. En el proceso de *patenting* con plomo fundido, el control microestructural, se ajusta con la variación de la temperatura del baño de plomo. Algunos de los procesos más recientes emplean agua y baños de sales fundidas para impartir las características deseadas de enfriamiento. Sin embargo, debido a cuestiones económicas y a razones relacionadas con la salud, el proceso Stelmor se ha convertido en un estándar industrial [3].

En la Figura 1.1 se muestra un esquema típico de la línea Stelmor [4]. Como se puede ver, las cajas de agua (A) están localizadas inmediatamente antes del cabezal de colocación de la línea. En el cabezal de colocación (B), el alambroón de acero se conforma en espiras continuas, que se colocan en una cama móvil (C). Los ventiladores de aire forzado, localizados en la zona (D), dirigen el flujo de aire a las posiciones deseadas. Típicamente, la línea Stelmor posee de 4 a 6 zonas de aire forzado; cada una de estas zonas permite un control independiente de flujo de aire [4 - 6].



**Figura 1.1** Diagrama esquemático de la línea Stelmor. A caja de agua, B cabezal conformador, C transportador, D cámara de distribución de aire, E cámara de formación de espiras [4].

## 1.2 Justificación

Muchos de los procesos industriales de ingeniería metalúrgica se basan en el uso de tratamientos térmicos para la obtención de materiales, cuyas propiedades mecánicas sean las óptimas para su desempeño, tal como es el caso del proceso Stelmor. Sin embargo, a veces las pruebas realizadas por ensayo y error a nivel laboratorio no son suficientes para describir un fenómeno en particular. Debido a esto es necesario recurrir a herramientas de Ingeniería de Procesos Metalúrgicos. En particular, base de las herramientas de Ingeniería de Procesos Metalúrgicos es el uso de ecuaciones matemáticas que permitan simular y predecir un fenómeno de interés. A su vez, estos modelos matemáticos requieren de condiciones a la frontera que sean realistas. Como primer paso para obtener condiciones a la frontera para el proceso Stelmor, en este trabajo se estimará la condición de frontera para el enfriamiento de un acero que no sufra transformación de fase; en una segunda etapa, se trabajó con aceros al carbono (que sí transforman).

Además de estimar la condición a la frontera para el problema térmico, es importante determinar – cuantitativamente – las características microestructurales de las piezas tratadas. Esta información es útil para validar modelos matemáticos que simulen la evolución microestructural.

### 1.3 Hipótesis

Para el caso de acero inoxidable, es posible obtener la ecuación que describe el comportamiento de *flux* de calor de la superficie como función de la temperatura de la superficie, a partir de la ecuación de Weibull de 4 parámetros

Es posible utilizar curvas de enfriamiento obtenidas durante el enfriamiento con aire forzado de probetas de acero al carbono para estimar la condición de frontera térmica mediante la solución del problema inverso de conducción de calor.

### 1.4 Objetivos

- I. Generar una ecuación empírica que relacione a la densidad de flujo (*flux*) de calor en la superficie como variable dependiente con la temperatura de la superficie como variable independiente, para probetas de acero inoxidable AISI 304.
- II. Determinar el tamaño de grano (acero hipoeutectoide) y el espacio interlaminar (acero eutectoide) para dos grados de acero, para dos condiciones de enfriamiento.

## 1.5 Metas

- i. Obtener las respuestas térmicas para probetas con y sin transformación de fase (acero al carbono 1040, 1080 y acero inoxidable, respectivamente).
- ii. Calcular la rapidez de enfriamiento para el centro y la sub-superficie.
- iii. Estimar la condición de frontera térmica (en términos del *flux* de calor de la superficie) para cada uno de los flujos de aire empleados durante la experimentación.
- iv. Obtener un conjunto de ecuaciones que describan el comportamiento del *flux* de calor como función de la temperatura, para un conjunto de familias de flujos de aire, a presión constante (30 y 40 psi, respectivamente).
- v. Estimar, a partir de una correlación para el número de Nusselt, la velocidad de flujo de aire para cada flujo empleado.
- vi. Caracterizar la microestructura obtenida para dos grados de acero, hipoeutectoide y eutectoide, para dos condiciones extremas de experimentación (65 LPM a 30 psi y 110 LPM a 40 psi).

## 2 Antecedentes

En el presente capítulo se describen conceptos generales de los tratamientos térmicos, así como una descripción detallada del proceso Stelmor. Posteriormente, se presentan algunos conceptos y ecuaciones empíricas reportadas en la literatura, relacionadas con el enfriamiento de una pieza cilíndrica mediante convección forzada. Finalmente, se describe un método numérico de solución del problema inverso de conducción de calor.

### 2.1 Tratamiento térmico

Los tratamientos térmicos desempeñan un papel importante en la fabricación de componentes de ciertas aleaciones, ya que con estos procesos se logran obtener las características deseadas en un material; tal es el caso de la microestructura final obtenida, la que a su vez dará como resultado aleaciones con las propiedades mecánicas requeridas, lo que permitirá un mejor desempeño durante su uso.

Un tratamiento térmico consiste del calentamiento de las piezas hasta una temperatura adecuada (a la cual se le denota con el símbolo  $T_{\gamma}$  – Transformación austenítica), mantenimiento a esta temperatura (para obtener una estructura completamente homogénea), para finalmente enfriarla en las condiciones convenientes. Las variables del proceso son factores que deben ser cuidadosamente estudiados ya que tienen una influencia significativa sobre la microestructura y propiedades finales obtenidas.

Una manera más formal de definir qué es un tratamiento térmico, de acuerdo a la *American Society for Metals*, es la siguiente: “Una combinación de operaciones controladas de calentamiento y enfriamiento que se aplican a un metal o aleación en estado sólido, de tal manera que se producen las propiedades deseadas” [7].

### **2.1.1 Aspectos microestructurales**

Debido a la demanda de propiedades al final de un tratamiento térmico, es de vital importancia el tipo de microestructura durante y posterior al tratamiento, ya que ésta definirá la calidad y la facilidad del material para que sea procesado. El principal interés de este tratamiento recae en la obtención de estructuras suaves y dúctiles para su fácil conformación, ya que de lo contrario, se obtendrá como resultado la formación de estructuras duras, que propiciarían la fragilización y ruptura del material.

Las microestructuras deseadas se conforman de ferrita y perlita. Las estructuras formadas por ferrita (o hierro alfa), se definen como soluciones sólidas, cuya estructura cristalina corresponde al sistema cúbico. Esta fase es la más blanda de todos los constituyentes del acero, es muy dúctil y maleable. La perlita es un microconstituyente eutectoide, formado por láminas alternadas de ferrita y cementita [8].

El tamaño de grano y el espaciado interlaminar están en función de la rapidez de enfriamiento y del medio de extracción de calor, que influyen directamente a los procesos de nucleación y crecimiento.

### **2.1.2 Tratamientos isotérmicos para alambros (*patenting*)**

Este tratamiento se suele utilizar en la industria de la trefilería para la fabricación de alambres de alta resistencia. Unas veces se emplea como tratamiento intermedio, para destruir el efecto del estirado y conseguir estructuras muy finas, ya que tienen una gran tenacidad y una excelente aptitud para ser deformadas; otras veces se emplea como operación final para que el alambre de acero tenga una resistencia muy elevada [8].

Este tratamiento se utiliza en aleaciones de acero de medio y alto carbono, y aleaciones de baja aleación. Anteriormente este tratamiento consistía del

calentamiento del material por encima de la temperatura de austenizado, para asegurar la obtención de una estructura homogénea de austenita; después de un mantenimiento suficiente a esta temperatura, el acero era sumergido en un baño de plomo a una temperatura constante. Esto daba como resultado la transformación de la austenita a perlita fina. Comúnmente la temperatura de los baños de plomo se encontraba en los rangos de 450 a 550 ° C. Sin embargo, por cuestiones económicas y de salud, este método se ha dejado de utilizar; actualmente se emplea un flujo de aire forzado para el enfriamiento de alambón de acero; éste se conoce como proceso Stelmor [9].

## **2.2 Diagramas CCT**

A nivel industrial, los tratamientos térmicos en su gran mayoría implican un enfriamiento continuo del material, lo que lleva a una limitación de los diagramas TTT, ya que no proporcionan información correcta en el caso de enfriamientos continuos.

El método más usual para obtener las curvas CCT es por dilatometría. La representación gráfica de las transformaciones en condiciones de enfriamiento continuo, se realiza en un diagrama Temperatura contra logaritmo de tiempo, en el cual muestra, además:

- Las curvas que representan gráficamente las velocidades de enfriamiento
- Las durezas finales obtenidas
- El porcentaje aproximado de transformación
- Zonas de transformación de fase

### **2.3 El proceso Stelmor**

El proceso *Stelmor* se basa en el enfriamiento controlado de varillas de acero al carbono a través del rango de temperaturas de la descomposición de la austenita a ferrita y perlita en aceros hipo- y eutectoides. Las varillas viajan desde el último molino a través de una zona de “cajas de agua” que provocan un enfriamiento que afecta el tamaño de grano previo de la austenita mientras que un *jet* de agua remueve óxidos superficiales que se hubieran formado. Posteriormente, las varillas pasan a un cabezal en donde son enrolladas y transportadas a una zona de enfriamientos sucesivos.

En ésta última se usa un flujo de aire forzado, mediante un conjunto de ventiladores que impactan a la varilla para obtener propiedades homogéneas y la microestructura deseada. El objetivo de este tratamiento es obtener ferrita proeutectoide de grano fino (en grados hipoeutectoides) o el espacio interlaminar más fino posible (en grados eutectoides) [10].

Esa microestructura favorece la obtención de una pieza con propiedades mecánicas más dúctiles, para así evitar la fragilización del producto debido a la formación de fases duras tales como martensita y bainita, asociadas a altas rapidezces de enfriamiento.

### **2.4 Transferencia de calor**

La construcción de modelos matemáticos es una de las principales herramientas para la resolución de problemas industriales. En el caso de tratamientos térmicos, los campos de interés son el térmico, el microestructural y el de desplazamiento; dado que las condiciones de enfriamiento en el proceso *Stelmor* son relativamente “suaves”, no se considera al campo de desplazamiento en los modelos matemáticos del proceso.

El proceso está gobernado por la evolución del campo térmico por lo que se requiere construir un modelo de transferencia de calor. La resolución de problemas de transferencia de calor se basa en la descripción matemática de los mecanismos participantes a través de un balance microscópico de energía térmica del proceso bajo estudio.

La ecuación gobernante [11], generalizada para cualquier sistema de coordenadas, para transporte en estado no estacionario en 1D, con generación y transporte de intercara (en la dirección perpendicular al flujo de calor) está descrita por:

$$\frac{1}{x^p} \frac{\partial}{\partial x} \left( k A_{\perp} x^p \frac{\partial T}{\partial x} \right) + qV + h A_{\parallel} (T_{\infty} - T) = \rho C_p V \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.1)$$

El primer término del lado izquierdo representa al transporte neto por conducción, el segundo a la rapidez de “generación” de energía térmica, y el tercero a intercambio con el medio ambiente (en dirección perpendicular al flujo por conducción); el término del lado derecho representa a la acumulación de energía térmica. En el proceso de interés, la rapidez volumétrica de generación de calor se debe a las transformaciones de fase de austenita a ferrita y de austenita a perlita.

## 2.5 Transferencia de calor en sistemas newtonianos

En el análisis de sistemas de transferencia de calor, se observa que en algunos cuerpos la temperatura del interior permanece casi uniforme en todo momento; esto se debe a que la resistencia a la transferencia de calor por conducción al interior del cuerpo es despreciable con respecto a la resistencia de convección de la superficie, tal que el mayor gradiente térmico se desarrolla a través de la película del fluido en la superficie [11].

[11] La aplicación de este método solo es válida, para la siguiente condición:

$$Bi = \frac{\bar{h} L_c}{k} < 0.1 \quad (2.2)$$

## 2.6 Transferencia de calor por convección forzada

La convección forzada ocurre entre una superficie y un fluido cuyo movimiento es provocado por una fuerza externa. Un ejemplo característico es el proceso Stelmor, en el cual se suministra un flujo de aire forzado para el enfriamiento de alambrón de acero. Los números adimensionales característicos para este tipo de fenómeno son el Nusselt, el Reynolds y el Prandtl.

Debido a la dificultad asociada con la resolución de problemas acoplados de transporte de momentum y transporte de calor, se han construido relaciones empíricas, en función de números adimensionales, que permitan calcular el coeficiente de transferencia de calor y, con este valor, el flujo de calor o el *flux* de calor.

Por ejemplo, Knudsen y Katz [12] desarrollaron correlaciones a partir del estudio experimental del flujo de aire a través de la sección circular de geometrías cilíndricas (como es el caso del alambrón de acero). De acuerdo a esos investigadores, el número de Nusselt se puede calcular a partir de:

$$Nu = \frac{\bar{h} D}{k} = C(Re)^m (Pr)^n \quad (2.3)$$

[12] El número de Prantl se define como:

$$\text{Pr} = \frac{c_p \mu}{k} \quad (2.4)$$

[12] El número de Reynolds se define de la siguiente manera:

$$\text{Re} = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2.5)$$

Una vez que se conoce el número de Nusselt, es posible calcular el coeficiente de transferencia de calor con una correlación de este tipo. Desafortunadamente, este tipo de correlaciones sólo están disponibles para temperaturas relativamente bajas y no consideran transformación de fase en el sólido.

## **2.7 Problema directo de conducción de calor**

El problema directo de conducción de calor (*DHCP*, por sus siglas en inglés) consiste en calcular la evolución de los campos térmico y (si fuera el caso) microestructural, a partir de la ecuación de conducción en las coordenadas pertinentes, las condiciones a la frontera y la condición inicial. El método de solución puede ser analítico o numérico.

## **2.8 Problema inverso de conducción de calor**

El presente estudio tiene como uno de sus objetivos, la obtención de la condición de frontera, mediante la solución del problema inverso de conducción de calor

(*IHCP: Inverse Heat Conduction Problem*); éste consiste en estimar la condición a la frontera en la superficie durante el enfriamiento a partir de mediciones experimentales de la respuesta térmica.

Una de las soluciones numéricas más utilizadas para resolver el *IHCP* se basa en el método de Beck *et al.* [13 - 14] que se desarrolló en estudios aeroespaciales (sin transformación de fase). Este método secuencial utiliza el concepto de “tiempos futuros” para estabilizar numéricamente a la solución y aplica el método numérico de diferencias finitas implícito.

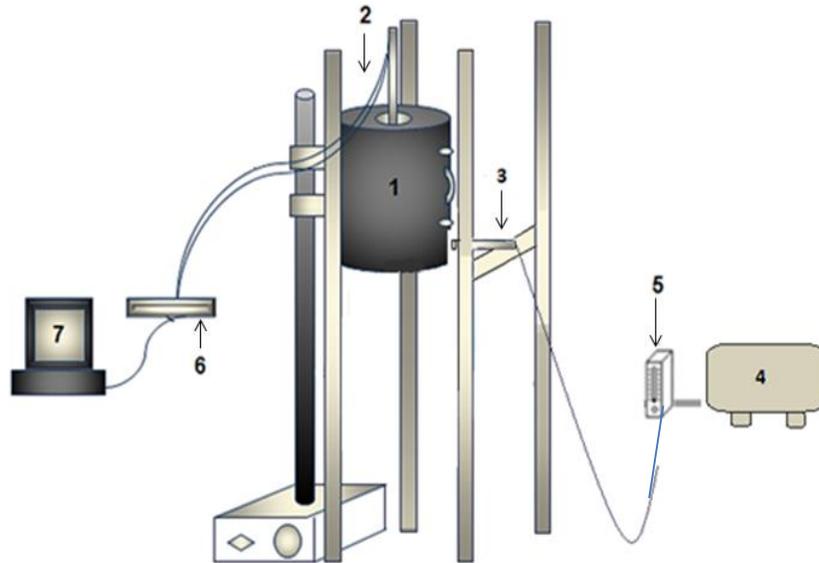
Una de las dificultades de la estimación de frontera térmica ocurre durante la transformación de fase. Debido a la interacción entre el campo térmico y el microestructural, se debe resolver un modelo que permita incluir a la transformación de fase; este es el caso del modelo reportado por Prasanna Kumar *et al.* [15], en el que se incorporó el calor latente debido a la transformación de fase en una formulación de entalpía.

### **3 Procedimiento**

En este capítulo se describe la metodología desarrollada en el presente trabajo. Esta consiste de varias partes: determinación de curvas de enfriamiento, trabajo computacional, análisis microestructural y realización de ensayos mecánicos (medición de dureza).

#### **3.1 Curvas de enfriamiento**

La información experimental base para el desarrollo de este trabajo son las curvas de enfriamiento durante el tratamiento térmico. Para generar estas curvas, se construyó un dispositivo experimental (ver Figura 3.1) que consistió de una boquilla de aire conectada a un rotámetro (marca Cole-Palmer) mediante una línea que incluye filtros de agua y de aceite, conectada a una compresora (marca Evans de 235 L de capacidad y 3 HP de potencia). Se empleó un horno de resistencia eléctrica, tipo libro, para el calentamiento (en aire) de las probetas cilíndricas de acero. La probeta se calentó a una temperatura inicial de 850 °C. Posteriormente, la probeta se enfrió mediante el flujo de aire (en dirección perpendicular al eje de la probeta) proveído por la boquilla.



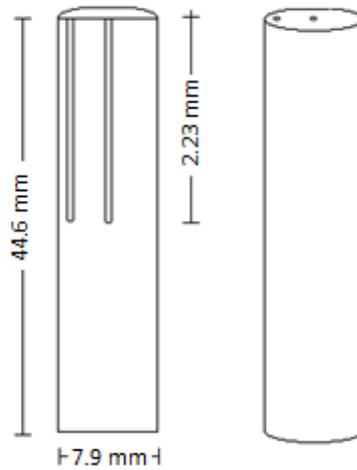
**Figura 3.1** Representación esquemática del dispositivo experimental (con el horno cerrado): 1) horno, 2) extensiones para termopares, 3) boquilla, 4) compresora, 5) rotámetro, 6) adquisidor de datos, 7) computadora.

Las probetas empleadas en la primera etapa se fabricaron con acero inoxidable AISI 304 (para aislar al problema térmico del microestructural) y se instrumentaron con 2 termopares tipo K: un termopar central y otro localizado a 2 mm del centro (sub-superficie). La longitud de la probeta era de 44.6 mm, con un diámetro de 7.9 mm, lo que favorece flujo de calor solamente en la dirección radial. Las dimensiones y geometría de la probeta se muestran en la Figura 3.2 y 3.3.

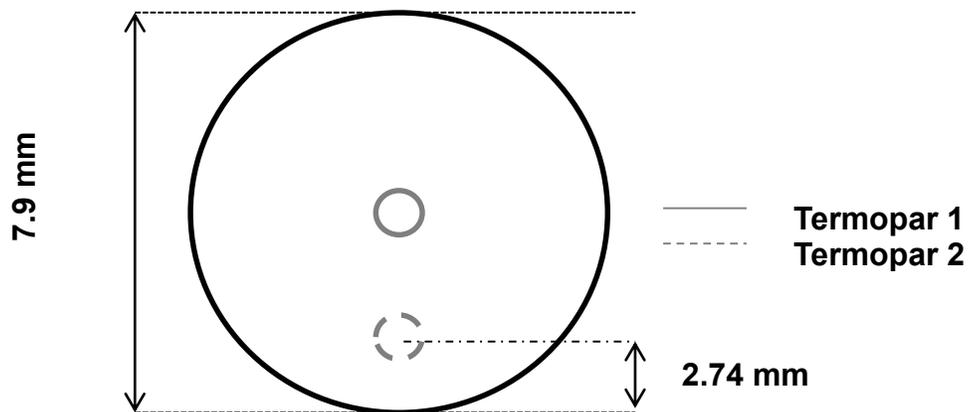
Las respuestas térmicas de los dos termopares (centro y orilla), se registraron mediante un adquisidor de datos marca (*Pico Technology modelo TC-08*) controlado por el *software Picolog*.

Los valores de flujo de aire empleados para los experimentos con el acero inoxidable AISI 304 fueron: 50, 65, 80, 95 y 110 LPM (a una presión constante de 30 y 40 psi).

Para los aceros al carbono (AISI 1020 y eutectoide) se utilizaron las dos condiciones extremas de enfriamiento: 1) 65 LPM a 30 psi y 2) 110 LPM a 40 psi.



**Figura 3.2** Representación esquemática de la geometría de la pieza, incluyendo los barrenos para los termopares.



**Figura 3.3** Representación esquemática de la distribución de los barrenos para los termopares (vista superior); se utilizaron termopares de 1/16" (1.58 mm) de diámetro.

### 3.2 Trabajo computacional

Para analizar los resultados se realizó una serie de cálculos, que se describen a continuación. Una vez medidas las respuestas térmicas, se calculó la rapidez de enfriamiento; estos resultados se graficaron como función del tiempo o de la temperatura local.

También se obtuvieron valores de *flux* de calor de la superficie, alimentando los datos de las respuestas térmicas al programa de cómputo *Winprobe* [16], que incorpora una solución numérica del problema inverso de conducción de calor. Los valores estimados de *flux* de calor de la superficie se graficaron en función del tiempo o de la temperatura de superficie estimada.

Para los experimentos con las probetas de acero inoxidable AISI 304 se realizaron, además, cálculos del coeficiente de transferencia de calor, estimación de la velocidad del aire y regresión no lineal de las curvas de *flux* de calor.

Con la información obtenida al resolver el problema inverso de conducción de calor (*IHCP*, por sus siglas en inglés) se calcularon valores instantáneos del coeficiente de transferencia de calor, aplicando la ley de enfriamiento de Newton y suponiendo que la temperatura del aire es de 25°C.

A partir de la tabla de datos de coeficiente de transferencia de calor como función de la temperatura de la superficie (estimada al resolver el *IHCP*) para cada flujo y presión de aire, se calculó numéricamente un valor promedio del coeficiente de transferencia de calor empleando el método del trapecio [17]. Como una primera aproximación se calculó la temperatura de película como un promedio entre la temperatura inicial de la probeta y la temperatura del medio.

Posteriormente, se calcularon los números adimensionales Nusselt ( $Nu$ ) y Prandtl ( $Pr$ ), con los valores de las propiedades termofísicas del aire reportadas en la literatura (ver Tabla A 1.1 del *Anexo A.I*) [18]. Finalmente, se estimó el número de Reynolds y a partir de éste la velocidad del flujo de aire (ver Capítulo 2.5, Ecuación 2.3), empleando los parámetros  $n$  y  $c$  adecuados (ver Tabla A 1.2 del *Anexo A.I*).

Además, se desarrollaron ecuaciones empíricas del *flux* de calor como función de la temperatura de la superficie, mediante el *software SigmaPlot 10 [19]*. Para esto, los valores de *flux* de calor y de temperatura de superficie se expresaron en forma adimensional. Se empleó la función estadística de *Weibull* de 4 parámetros (Ec. 3.1, [19]) para ajustar las curvas mencionadas, dado que presenta un comportamiento similar al del gráfico de *flux* de calor adimensional como función de la temperatura de superficie adimensional.

$$f(x) = a \left[ \frac{c-1}{c} \right]^{\frac{1-c}{c}} abs \left[ \frac{x-x_0}{b} + \left( \frac{c-1}{c} \right)^{\frac{1}{c}} \right]^{c-1} e^{-abs \left[ \left( \frac{x-x_0}{b} + \left( \frac{c-1}{c} \right)^{\frac{1}{c}} \right)^c + \frac{c-1}{c} \right]} \quad (3.1)$$

Se realizó un ajuste para que el comportamiento fuese lo más similar posible; en este caso, se obtuvo el valor complemento del valor de la temperatura adimensional, es decir, 1 menos el valor de la temperatura adimensional.

Posteriormente, se realizaron regresiones para obtener un conjunto de ecuaciones que describieran el comportamiento de cada uno de los parámetros de la ecuación de *Weibull* como función del flujo de aire (a presión constante).

Finalmente, se reconstruyeron las familias de *flux* de calor de la superficie como función de la temperatura de la superficie, empleando las funciones que describen a los parámetros.

### 3.3 Diagramas CCT

Se extrajeron los datos de los diagramas CCT para aceros AISI 1020 y AISI 1080, mediante el *software UN-Scan-it 7.0* y se les sobrepusieron las respuestas térmicas para las dos condiciones de enfriamiento experimentales para cada grado de acero al carbono.

### 3.4 Análisis microestructural

Se seccionó una porción (de 1 cm de longitud, a partir del centro) de cada una de las probetas de acero al carbono tratadas térmicamente. Una vez que las probetas fueron seccionadas, se montaron en baquelita. Posteriormente se prepararon metalográficamente. La preparación metalográfica, consiste de los pasos siguientes:

- 1) Desbaste grueso  
Serie de lijas
  - 240, 320, 400 y 600
- 2) Pulido grueso  
Paño de terciopelo y alúmina 1  $\mu\text{m}$
- 3) Pulido fino  
Paño de terciopelo y alúmina 1  $\mu\text{m}$
- 4) Ataque químico por inmersión y por contacto, Nital 2 y Picral [20].
- 5) Observación con el microscopio óptico.

La observación con el microscopio óptico se realizó con una magnificación de 100X y 500X.

Posteriormente, se determinó el tamaño de grano de la ferrita y el espacio interlamilar de la perlita, para los acero hipoeutectoide y eutectoide, respectivamente.

#### 3.4.1 Tamaño de grano de la ferrita

Se fotografió un conjunto de las imágenes observadas con el microscopio. A partir de estas imágenes el tamaño de grano se determinó comenzando con la obtención de la fracción de volumen de ferrita ( $V_v$ ). Esta se obtuvo mediante la comparación de las imágenes obtenidas contra la de una figura patrón [21].

Posteriormente, se trazaron 3 círculos concéntricos (de 1.5, 3 y 4.5 cm de diámetro) y se contó el número de granos de ferrita que intersectan los tres círculos. [21] El tamaño de grano se calculó con las Ecuaciones 3.2, 3.3 y 3.4, que aplican para cuando se presentan dos fases (ferrita y perlita).

$$L_T = \frac{M}{\pi D} \quad (3.2)$$

$$\overline{L_{3\alpha}} = \frac{V_V L_T}{N_\alpha} \quad (3.3)$$

$$G [ASTM] = [-6.646 \log(\overline{L_{3\alpha}})] - 3.298 \quad (3.4)$$

Donde:

M Magnificación

D diámetro (mm)

V<sub>v</sub> Fracción volumen de ferrita ( $mm^3/mm^3$ )

L<sub>T</sub> Longitud lineal total (mm)

L<sub>3α</sub> Longitud lineal de elementos promedio para ferrita (mm)

N<sub>α</sub> Número de granos de ferrita

G Tamaño de grano ASTM

### 3.4.2 Espacio interlaminar de la perlita

Se determinó el espacio interlaminar para las probetas de acero eutectoide para las dos condiciones extremas de experimentación. El análisis se realizó con el microscopio electrónico de barrido (MEB) marca *JEOL* modelo 35CF. Se tomó un conjunto de imágenes a 2500X; mediante 3 círculos, localizados en distintas direcciones de crecimiento de perlita, se contó el número de láminas que intersectaran dichos círculos [21]. El diámetro del círculo era de 49.7 mm. [21] Para calcular el espaciamiento promedio real se emplearon las ecuaciones 3.5 a 3.7.

$$N_L = \frac{M N}{\pi D} \quad (3.5)$$

$$\sigma = \frac{1}{N_L} \quad (3.6)$$

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{2} \quad (3.7)$$

Donde:

M Magnificación

D Diámetro (mm)

N Número de láminas de perlita

$N_L$  Número de láminas de perlita interceptadas ( $\text{mm}^{-1}$ )

$\sigma$  Espacio interlamelar (mm)

$\sigma_r$  Espacio interlamelar real (mm)

### 3.5 Dureza

Una vez que las probetas fueron observadas con el microscopio, se procedió a realizar el ensayo de dureza. El análisis se realizó a lo largo de la dirección radial en el mismo plano observado con el microscopio. Las pruebas se llevaron a cabo en el equipo *Buehler Macromet 3 Rockwell/superficial Type hardness tester*, con una carga de 100 kgf y 60 kgf de para las escalas HRB (identador 1/16") y HRA (identador diamante), respectivamente. Los valores de dureza obtenidos se transformaron a la escala HV, mediante el uso de unas tablas.

### 3.6 Composición química

La composición química de las probetas AISI 1020 se comprobó mediante un ensayo de emisión óptica por chispa, empleando el equipo Spectro Analytical Instrument, modelo *Spectro LAB*. Por otra parte, la composición química del acero eutectoide se obtuvo del fabricante. En las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 se muestran las composiciones químicas correspondientes.

**Tabla 3.1** Composición química (medida) de las probetas de acero AISI 1020.

| % C   | % Si  | % Mn  | % P   | % S   | % Cr  | % Mo  | % Ni  | % Al  | % Co  |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.203 | 0.325 | 0.635 | 0.012 | 0.005 | 0.081 | 0.046 | 0.065 | 0.010 | 0.008 |

**Tabla 3.2** Composición química (nominal) de las probetas de acero eutectoide 1020 [22].

| Clasificación | % C         | % Mn        | % P max | % S max |
|---------------|-------------|-------------|---------|---------|
| AISI 1020     | 0.18 – 0.23 | 0.30 – 0.60 | 0.040   | 0.050   |

**Tabla 3.3** Composición química (del fabricante) de las probetas de acero AISI 1080.

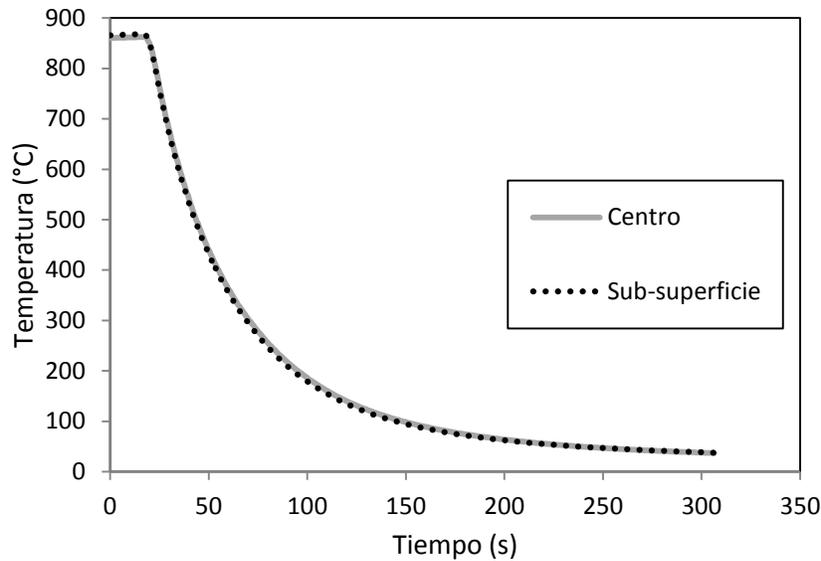
| Análisis químico (típico) | % C         | % Mn        | % P max | % S max |
|---------------------------|-------------|-------------|---------|---------|
| AISI 1080                 | 0.65 - 0.75 | 0.60 – 0.90 | 0.040   | 0.050   |

## **4 Resultados y discusión**

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante la experimentación y se presenta la discusión de los mismos. La información se presenta en el orden siguiente: primero se analiza la reproducibilidad de los experimentos, luego se comparan algunas curvas de enfriamiento con resultados reportados en la literatura; enseguida se reporta el análisis de los resultados para las probetas de acero inoxidable AISI 304 y, finalmente, los resultados y su análisis para las probetas de los aceros al carbono (grado AISI 1020 y 1080, respectivamente).

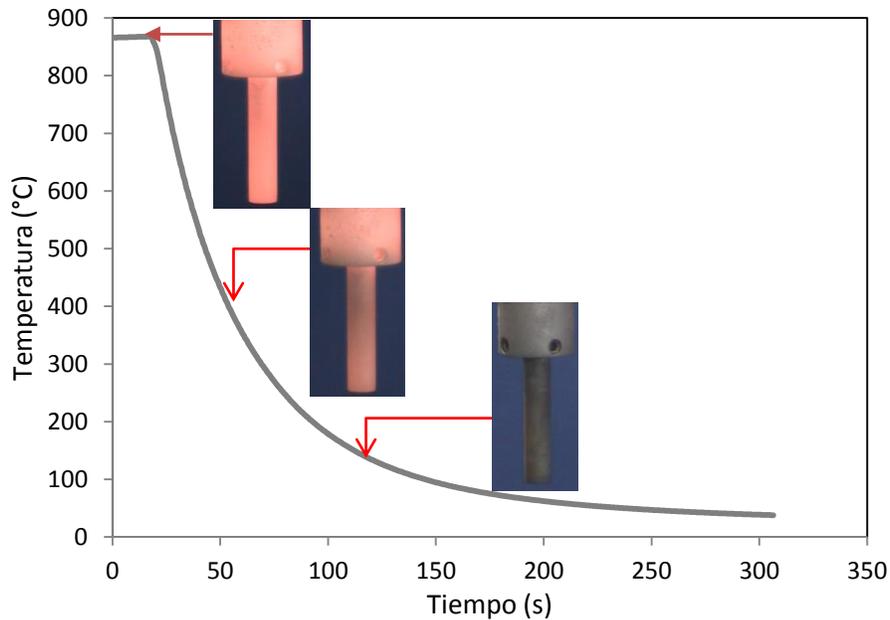
### **4.1 Curvas de enfriamiento y reproducibilidad**

Se obtuvieron las respuestas térmicas para diferentes condiciones de flujo de aire, manteniendo la temperatura inicial de la probeta, la presión de la línea de aire y la distancia boquilla-probeta, constantes. La Figura 4.1 muestra la curva de enfriamiento (temperatura vs. tiempo), para un flujo de aire de 95 LPM a 30 psi. Durante los primeros segundos se observa una zona de temperatura constante; esta zona corresponde a la lectura de datos donde la probeta se encuentra aún dentro del horno. Posteriormente ocurre el enfriamiento de la pieza debido al impacto del aire; se observa un cambio de pendiente que indica el enfriamiento pero no se observa ninguna recalcancia asociada a alguna transformación de fase. Este enfriamiento continúa hasta que la temperatura de la probeta tiene valores cercanos a los de la temperatura del aire. Se puede observar que los valores de las temperaturas para los termopares (centro y sub-superficie) tienen un comportamiento muy similar; esto indica que no existen gradientes térmicos significativos.



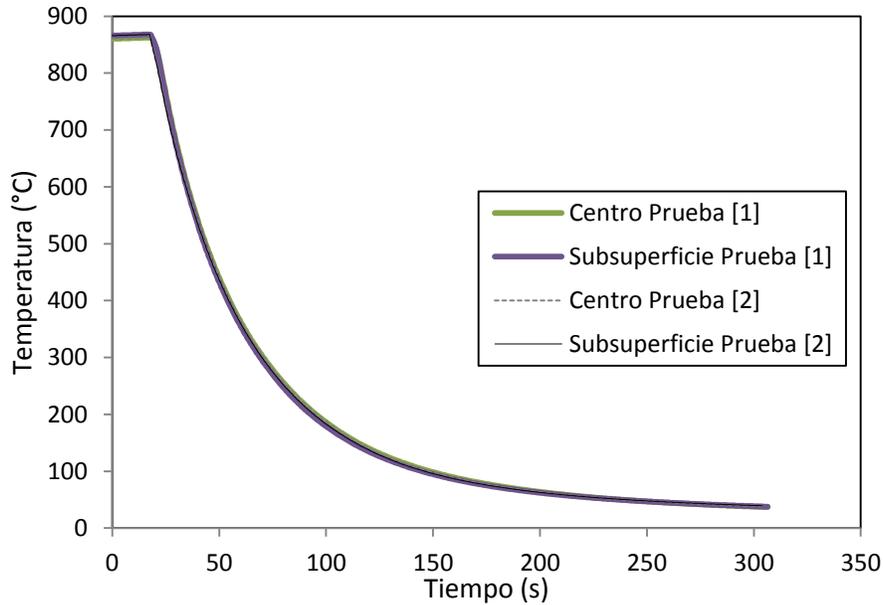
**Figura 4.1** Respuesta térmica para las posiciones centro y sub-superficie para la probeta de acero inoxidable; flujo de aire: 95 LPM a 30 psi.

Además, se generó una secuencia de imágenes extraídas de videos tomados durante el enfriamiento de la pieza. Esta secuencia de imágenes se muestra en la Figura 4.2. La primera imagen corresponde al tiempo cuando la probeta está a punto de ser impactada por el flujo de aire: el color de la probeta inicialmente es rojo y homogéneo en toda la superficie. La segunda imagen corresponde a un tiempo de enfriamiento de la probeta de 50 s, se observa un cambio de color de rojo a tonos grises; esta transición de color, es indicativo del enfriamiento de la probeta. En la tercera imagen, correspondiente a 100 s, se observa un color oscuro en toda la superficie de la pieza.



**Figura 4.2** Respuestas térmicas en la sub-superficie de la probeta de acero inoxidable AISI 304, complementadas con imágenes tomadas durante el enfriamiento; *flujo de aire: 95 LPM a 30 psi.*

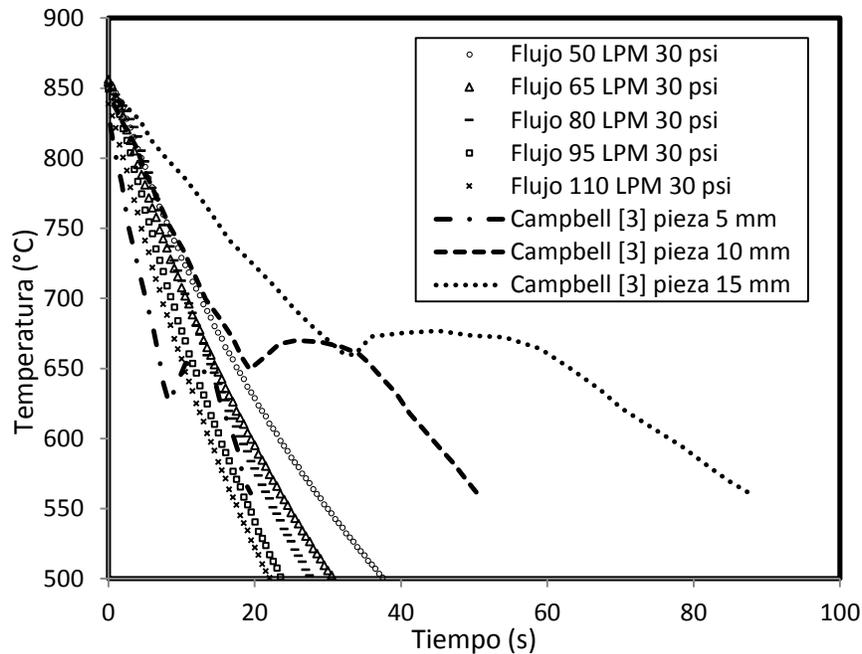
En la Figura 4.3 se muestra un ejemplo de la respuesta térmica local para pruebas realizadas por duplicado. Se presentan 4 curvas de enfriamiento: para dos pruebas independientes y las dos posiciones de los termopares (centro y sub-superficie). No se observa recalcancia asociada a una transformación de fase, debido a que se trabajó con acero inoxidable austenítico. Se puede observar un comportamiento similar entre las temperaturas registradas por los dos termopares (centro y sub-superficie), lo indica que no hay presencia de gradientes térmicos significativos. Dada la similitud de los resultados entre ambas pruebas, se puede concluir que el procedimiento experimental para producir las curvas de enfriamiento es reproducible.



**Figura 4.3** Respuesta térmica para las posiciones centro y sub-superficie de dos pruebas independientes con la probeta de acero inoxidable; flujo de aire: 95 LPM a 30 psi.

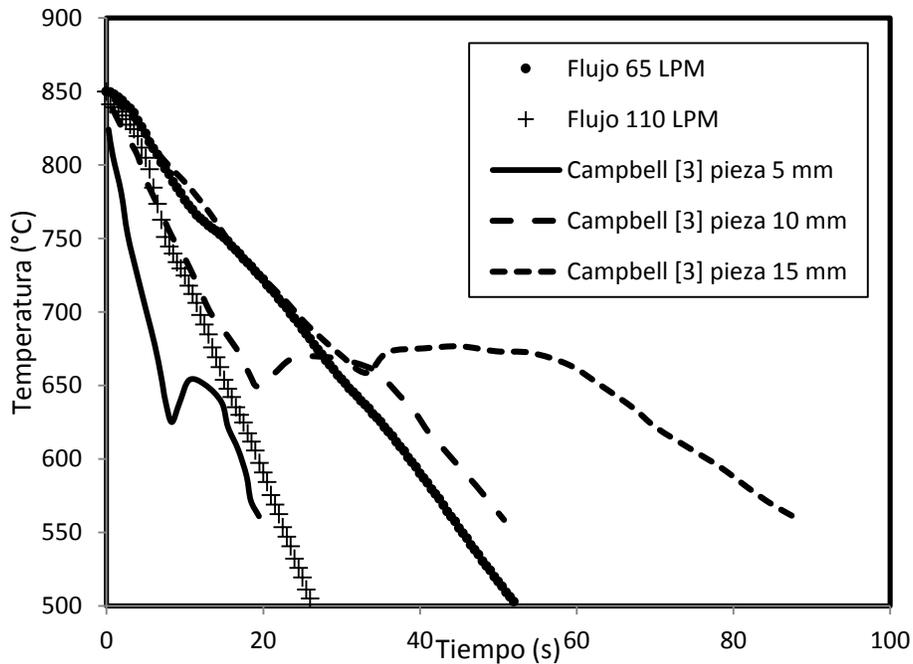
## 4.2 Comparación con resultados reportados

El interés de esta investigación es estudiar regímenes de enfriamiento similares a los que se obtienen en el proceso Stelmor; por esto, la Figura 4.4 muestra una comparación de algunas de las respuestas térmicas medidas en este trabajo con las reportadas por Campbell *et al.* [3]. La diferencia principal entre los gráficos reportados por Campbell *et al.*, y los gráficos de las respuestas térmicas medidas para el acero inoxidable AISI 304, radica en la recalcificación. De la gráfica se puede aseverar que los experimentos realizados son pertinentes, ya que se observa que las curvas de enfriamiento medidas están dentro de los intervalos obtenidos para los enfriamientos de las diferentes piezas realizadas por Campbell *et al.* [3].



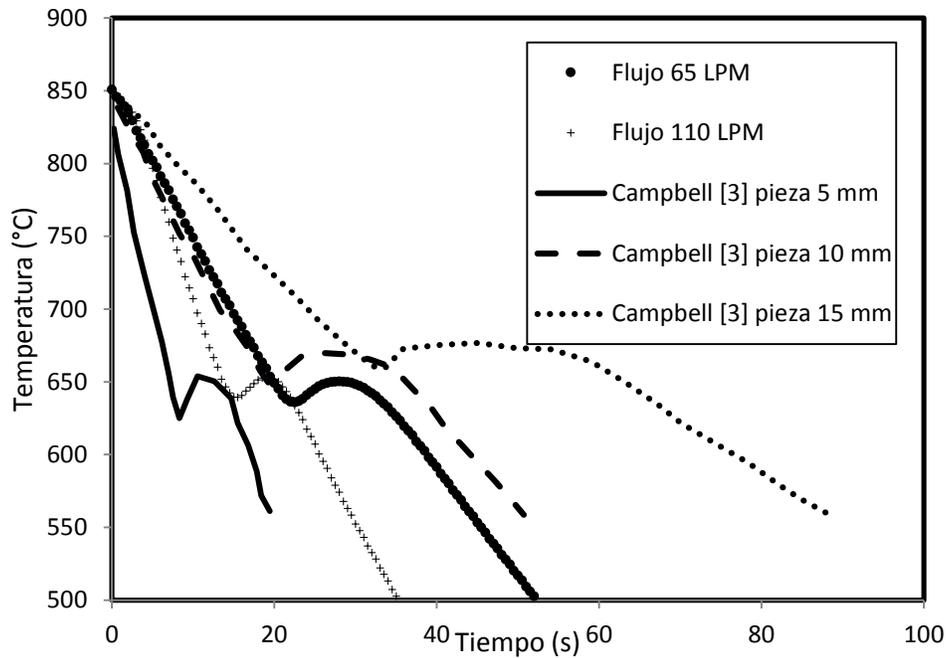
**Figura 4.4** Respuestas térmicas medidas para el acero inoxidable (símbolos) y reportadas por Campbell et al para un acero eutectoide (líneas) [3].

La Figura 4.5 muestra una comparación entre las respuestas térmicas medidas para un acero con transformación (acero al carbono hipoeutectoide) y las reportadas por Campbell et al. [3]. Se pueden observar en las curvas experimentales reportadas en este trabajo dos cambios de pendiente, asociados con las transformaciones de fase austenita-ferrita y austenita-perlita. También se puede apreciar que la recalcancia es mayor para las respuestas térmicas medidas por Campbell et al, dado que se trata de un acero eutectoide.



**Figura 4.5** Respuestas térmicas medidas para el acero al carbono hipoeutectoide (símbolos) y reportadas por Campbell et al. para un acero eutectoide (líneas) [3].

La Figura 4.6 muestra las respuestas térmicas obtenidas para el acero eutectoide, para dos condiciones de enfriamiento (65 a 30 psi y 110 LPM a 40 psi). En este caso se puede observar que la recalentación asociada a la transformación de fase es mayor. Esto está asociado a que la transformación perlítica es más exotérmica en comparación a la transformación ferrítica.

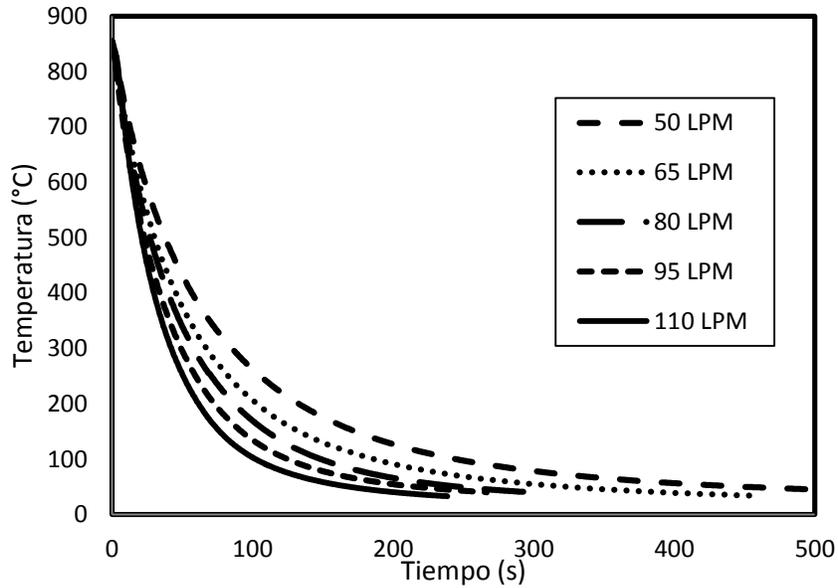


**Figura 4.6** Respuestas térmicas medidas para el acero al carbono eutectoide (símbolos) y reportadas por Campbell et al. para un acero eutectoide (líneas) [3].

### 4.3 Acero inoxidable AISI 304

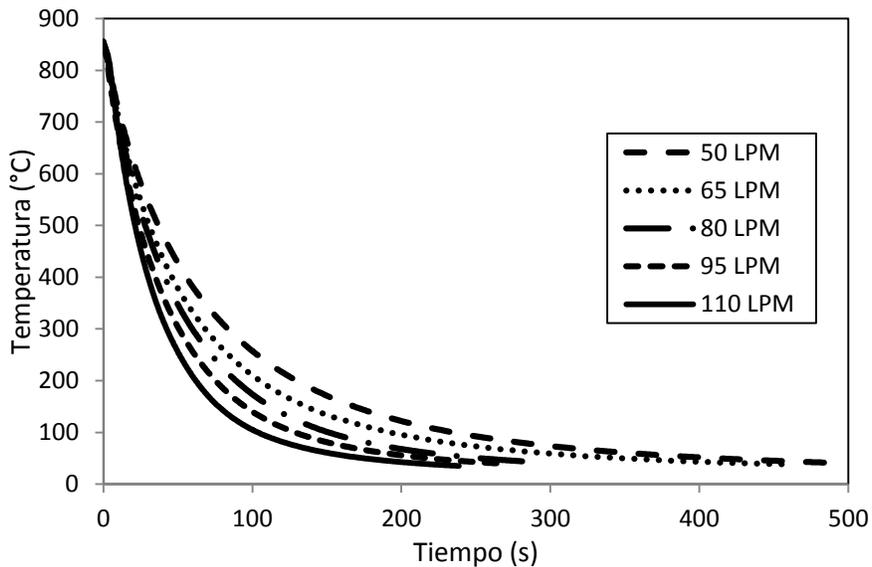
#### 4.3.1 Respuestas térmicas

En la Figura 4.7 se muestran las respuestas térmicas (en la posición del termopar de la sub-superficie) obtenidas para todos los flujos de aire, a 30 psi, empleados en la experimentación. Como se puede apreciar, a flujos más altos la rapidez de extracción de calor es mayor, como lo evidencia la mayor pendiente en las curvas de enfriamiento, por lo que la probeta se enfría en mucho menor tiempo.



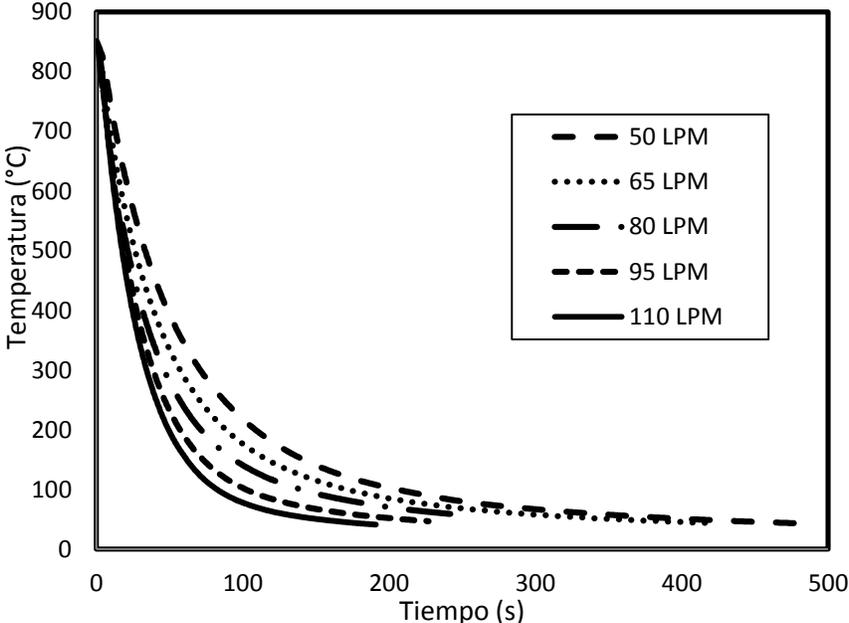
**Figura 4.7** Respuestas térmicas en la sub-superficie de la probeta de acero inoxidable AISI 304 para todos los flujos de aire a 30 psi.

En la Figura 4.8 se grafican las respuestas térmicas en el centro de la probeta para todos los flujos de aire a 30 psi; el comportamiento es similar al de las respuestas térmicas en la sub-superficie para esas condiciones de enfriamiento.



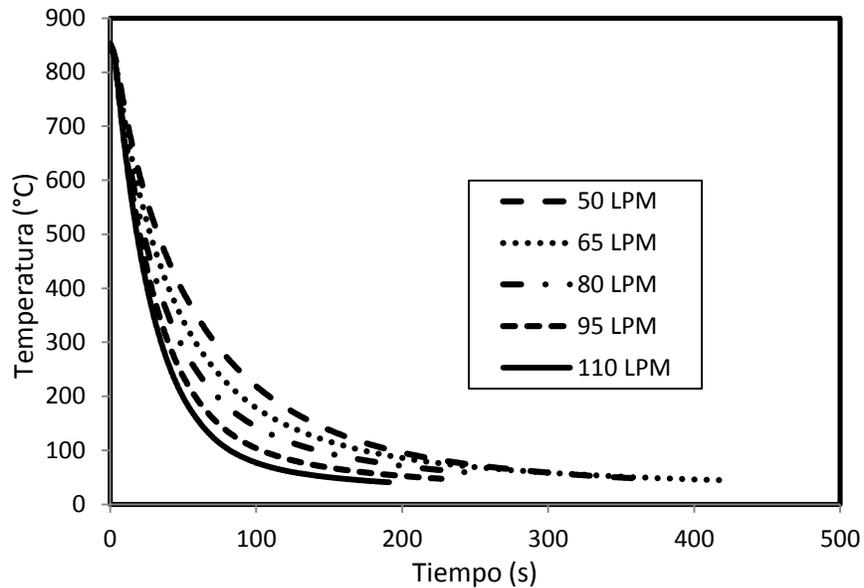
**Figura 4.8** Respuestas térmicas en el centro de la probeta de acero inoxidable AISI 304 para todos los flujos de aire a 30 psi.

En la Figura 4.9 se observan las respuestas térmicas registradas en la sub-superficie para aire a 40 psi; se aprecia que representan también una familia de curvas. Además, a flujos más altos, la rapidez de extracción de calor es mayor, por lo que la probeta se enfría en mucho menor tiempo.



**Figura 4.9** Respuestas térmicas en la sub-superficie de la probeta de acero inoxidable AISI 304, para todos los flujos de aire a 40 psi.

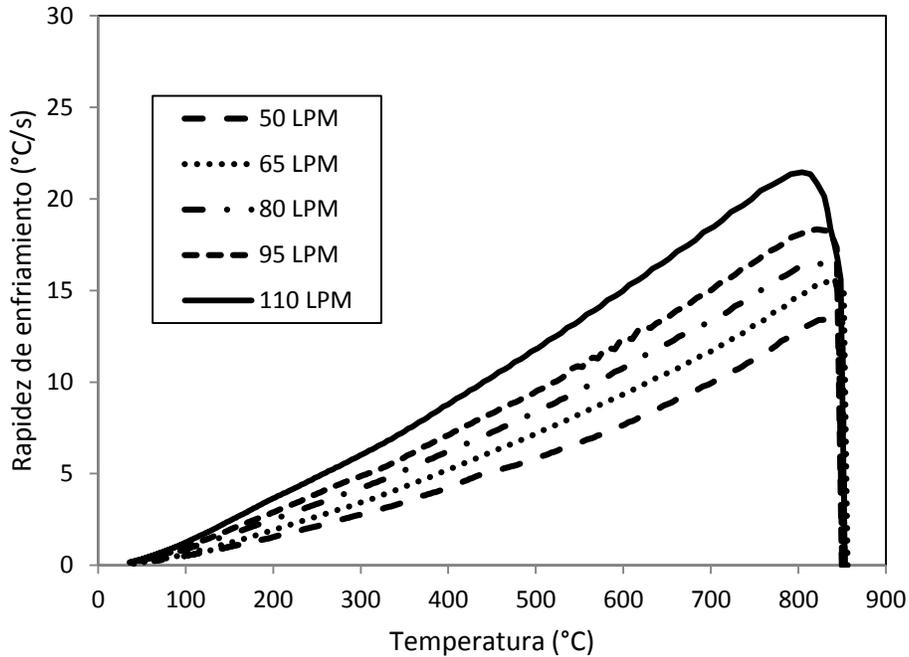
En la Figura 4.10 se muestra el conjunto de respuestas térmicas, en la posición centro, para la presión de aire de 40 psi.



**Figura 4.10** Respuestas térmicas en el centro de la probeta de acero inoxidable AISI 304, para todos los flujos de aire a 40 psi.

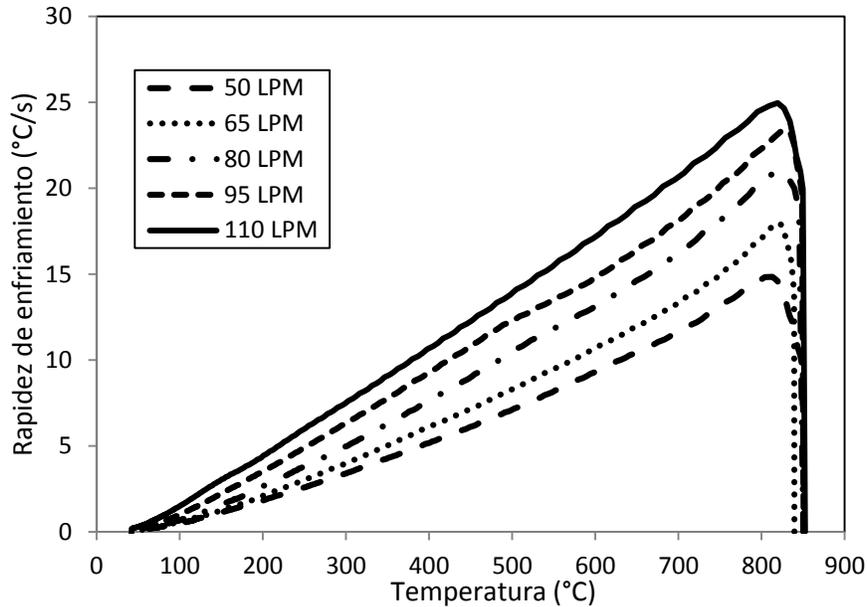
#### 4.3.2 Rapidez local de enfriamiento

A partir de las respuestas térmicas medidas se calculó la rapidez de enfriamiento suponiendo un comportamiento lineal entre cada pareja de datos. En la Figura 4.11 se grafica la rapidez local de enfriamiento como función de la temperatura local para aire a 30 psi. Se alcanza un valor máximo de rapidez de enfriamiento y, posteriormente, una disminución de la rapidez debido a la disminución de la fuerza motriz. Esta es una curva típica de enfriamiento con aire, donde no hay transformación de fase asociada ni con el fluido ni con el sólido. El máximo valor de rapidez de enfriamiento ocurre a casi la misma temperatura local en todos los casos. Se puede observar que a mayor valor del flujo de aire, la rapidez local de enfriamiento es mayor; de acuerdo a la rapidez de enfriamiento máxima producida, los flujos de aire empleados quedan ordenados de la manera siguiente: 110 LPM > 80 LPM > 65 LPM > 50 LPM.



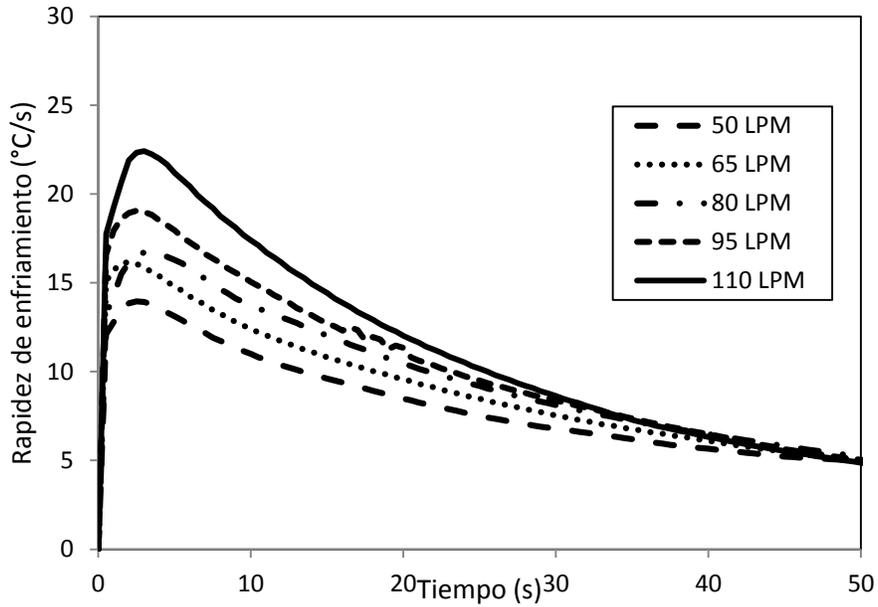
**Figura 4.11** Valor absoluto de la rapidez local de enfriamiento (sub-superficie) en función de la temperatura local para la probeta de acero inoxidable AISI 304, para todos los valores de flujo de aire a 30 psi.

En la Figura 4.12 se grafica la rapidez de enfriamiento como función de la temperatura local, para todos los valores de flujo de aire a 40 psi. De la gráfica se desprende que se obtiene una mayor rapidez de enfriamiento para valores de flujo de aire altos. Comparando esta Figura 4.11 con la Figura 4.12 se observa que a mayor valor de presión, mayor es la rapidez de enfriamiento.



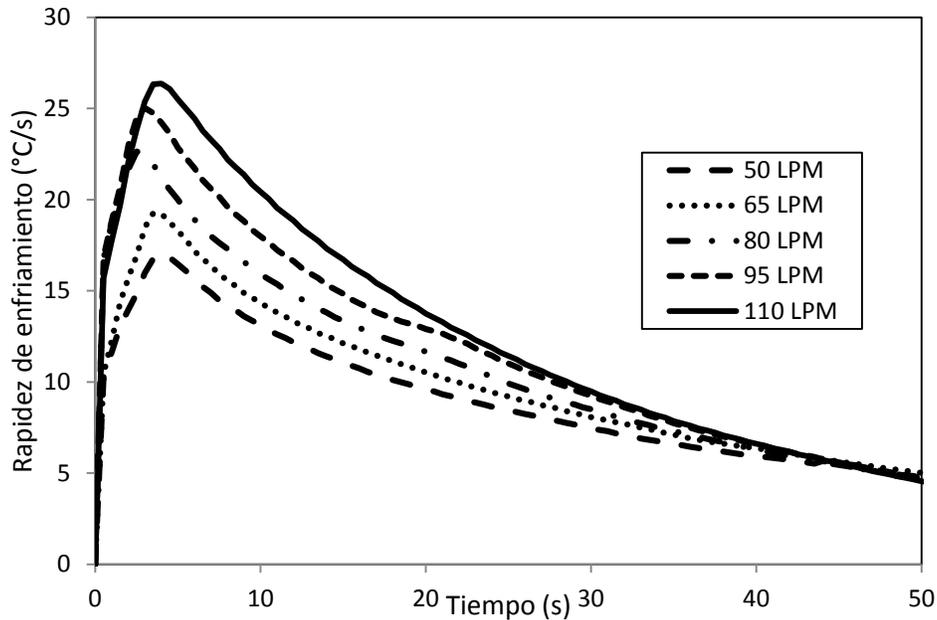
**Figura 4.12** Valor absoluto de la rapidez local de enfriamiento (sub-superficie) en función de la temperatura local, de acero inoxidable AISI 304, para todos los flujos de aire a 40 psi.

En la Figura 4.13 se pueden observar las rapidezces de enfriamiento en la sub-superficie como función del tiempo para todos los valores de flujo de aire, a 30 psi, estudiado con la probeta de acero inoxidable. En la figura se puede observar que se alcanza, rápidamente, el valor máximo de rapidez de enfriamiento y posteriormente se observa una disminución de la rapidez de enfriamiento asociado con la disminución de la fuerza motriz. Se observa que a mayores flujos de aire, la rapidez de enfriamiento aumenta. El valor máximo de rapidez de enfriamiento obtenido para el flujo de 110 LPM es de 22.2 °C/s mientras que para el flujo de 50 LPM es a 14.3 °C/s. Sin embargo, se puede apreciar un traslape entre las curvas para el flujo de aire de 65 LPM y 80 LPM.



**Figura 4.13** Valor absoluto de la rapidez local de enfriamiento (sub-superficie) en función del tiempo, para todos los flujos de aire con la probeta de acero inoxidable AISI 304, para una presión de aire de 30 psi.

En la Figura 4.14 se observa el gráfico de rapidez de enfriamiento como función del tiempo para la presión de 40 psi; el comportamiento es muy similar al de la Figura 4.13. Sin embargo, se puede observar que el valor de rapidez de enfriamiento es mayor para la curva de 110 LPM en comparación con el valor para la presión de aire de 30 psi con el mismo flujo de aire.

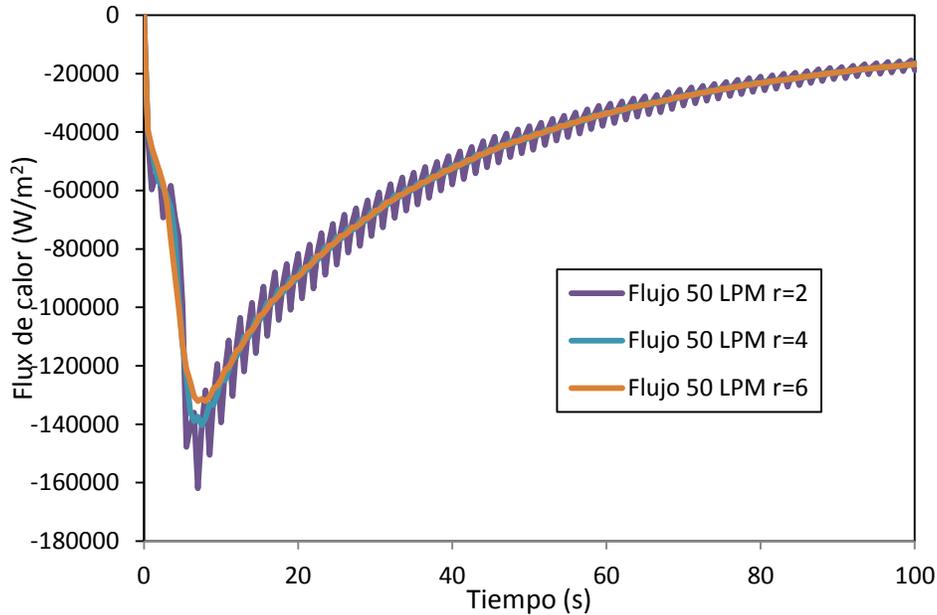


**Figura 4.14** Valor absoluto de la rapidez local de enfriamiento (sub-superficie) en función del tiempo, para todos los flujos de aire con la probeta de acero inoxidable AISI 304, para una presión de aire de 40 psi.

### 4.3.3 Estimación del *flux* de calor

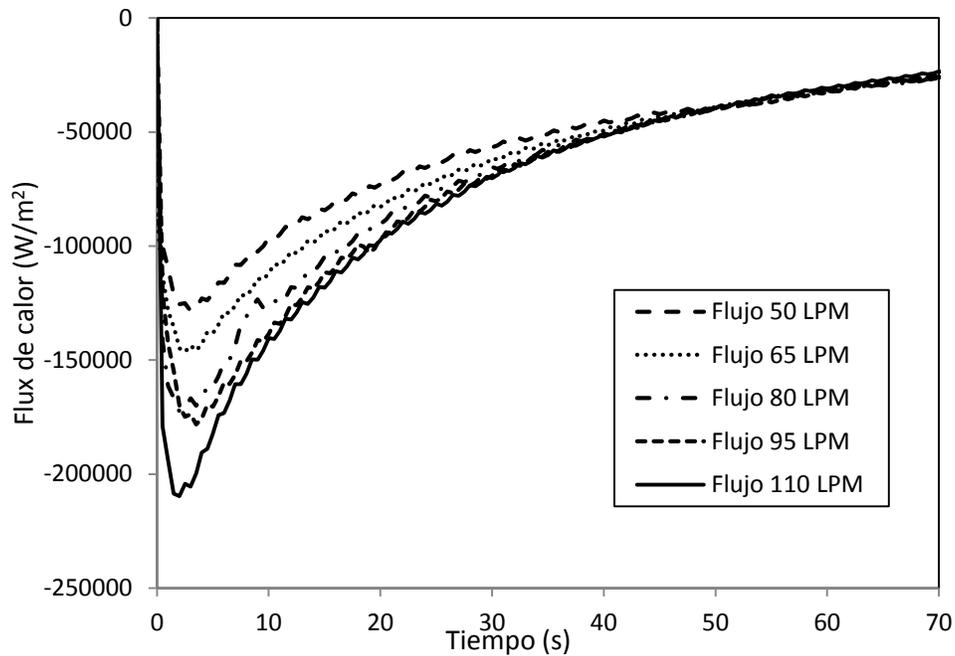
Las respuestas térmicas en la sub-superficie (de la probeta de acero inoxidable) se alimentaron al programa de cómputo *WinProbe* [8] que resuelve numéricamente el *IHCP*, sin incluir transformaciones de fase. En la Figura 4.15 se puede observar el *flux* de calor en la superficie - estimado con el programa *Winprobe* - para el flujo de aire más bajo (50 LPM), como función del tiempo. En este caso se obtuvieron 3 curvas, cada una con un valor de *r* diferente; recuérdese que éste parámetro representa al número de tiempos futuros. Se puede apreciar que, para un valor de *r* igual a 2, se obtiene un pico más alto de *flux* de calor de la superficie, sin embargo también se puede observar un número mayor de oscilaciones conforme el tiempo aumenta. Para el caso de un valor de *r* igual a 4 disminuye el valor del *flux* de calor de la superficie máximo, y la curva se suaviza un poco más. Finalmente, para el caso de *r* igual a 6, disminuye aún más el valor

de *flux* de calor de la superficie máximo; sin embargo, las oscilaciones han disminuido notablemente. Basándose en estos resultados, se decidió utilizar un valor de  $r$  igual a 4 para todas las estimaciones del *flux* de calor.



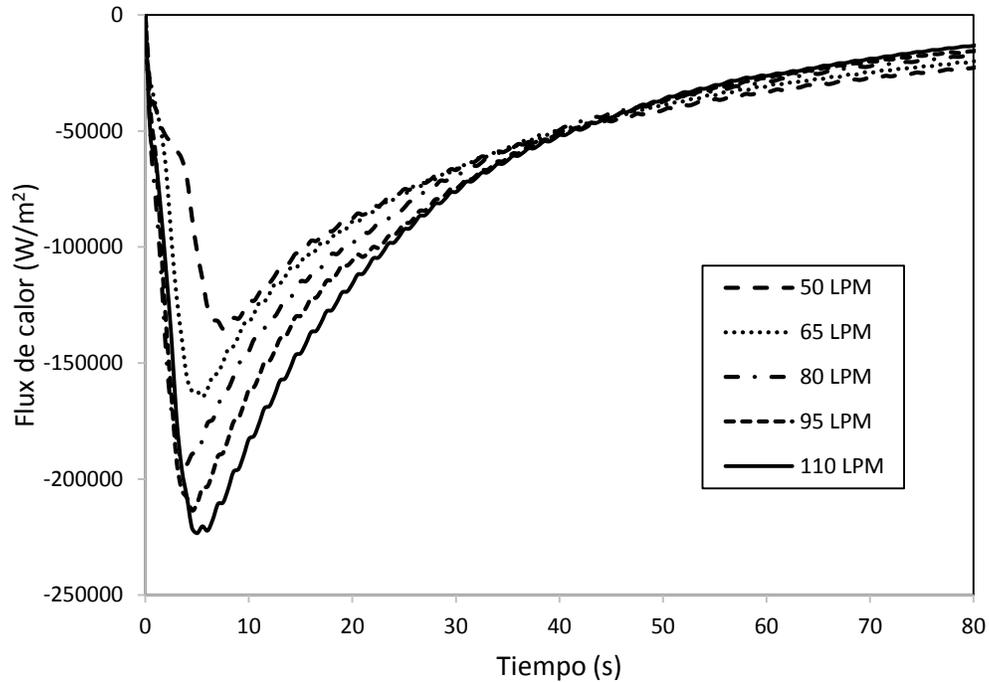
**Figura 4.15** Flux de calor de la superficie (estimado) en función del tiempo, para la probeta de acero inoxidable AISI 304, para tres valores del parámetro  $r$ ; flujo de aire: 50 LPM para una presión de aire de 30 psi.

En la Figura 4.16 se muestra el *flux* de calor de la superficie (estimado) en función del tiempo para todos los experimentos (a presión de 30 psi) con el acero inoxidable. En este caso se puede observar la tendencia siguiente de las curvas: a mayor flujo de aire, mayor es el *flux* de calor de la superficie. Se aprecia que durante los primeros instantes el valor de *flux* de la superficie es cercano a cero, ya que estos valores corresponden al tiempo en el que la probeta se encontraba aún dentro del horno. Posteriormente, conforme se extrae el calor, el *flux* de calor alcanza un valor máximo. Finalmente el *flux* de calor decrece notablemente, debido a que la fuerza motriz disminuye.



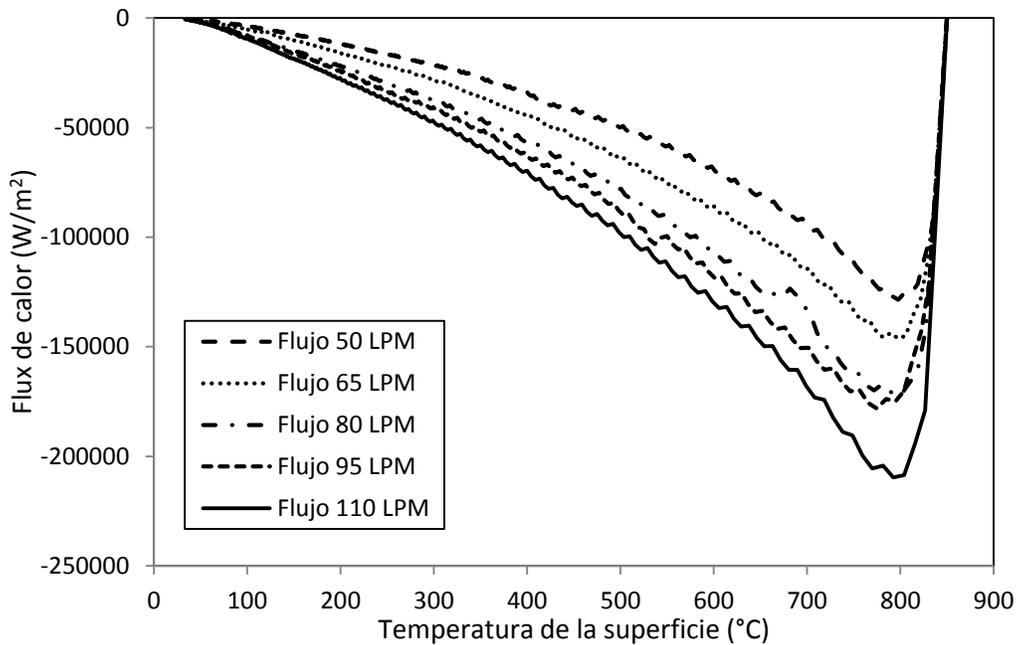
**Figura 4.16** Flux de calor de la superficie (estimado) en función del tiempo para la probeta de acero inoxidable AISI 304, para todos los flujos de aire a la presión de 30 psi.

En la Figura 4.17 se grafican los resultados para aire a 40 psi. De nuevo, durante los primeros instantes de tiempo, el *flux* de calor es casi cero, esta zona representa los primeros instantes donde la probeta se encontraba dentro del horno. Posteriormente conforme se enfría la pieza, el *flux* de calor llega a un valor máximo y luego disminuye, debido a la disminución de la fuerza motriz.



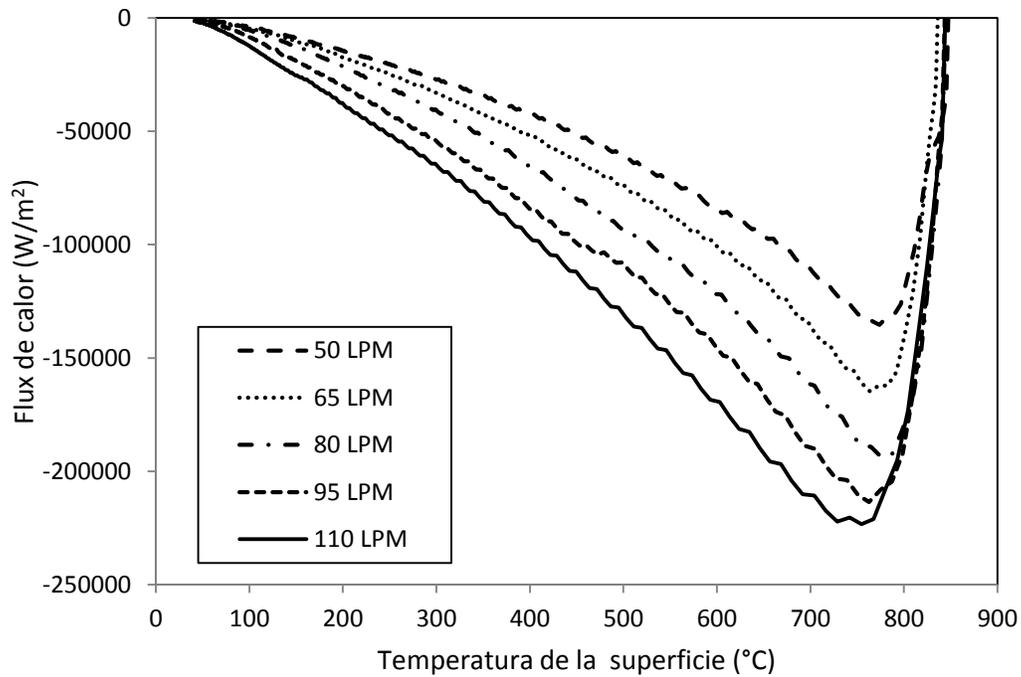
**Figura 4.17** Flux de calor de la superficie (estimado) en función del tiempo para la probeta de acero inoxidable AISI 304, para todos los flujos de aire a la presión de 40 psi.

El *flux* de calor de la superficie (estimado) también se graficó como función de la temperatura de la superficie (estimada), como se muestra en la Figura 4.18 para la presión de aire de 30 psi. Se puede observar que el *flux* de calor aumenta (en valor absoluto), casi de manera lineal, hasta un valor máximo. Una vez que se alcanza el valor máximo, disminuye a medida que disminuye la temperatura de la superficie debido a la disminución de la fuerza motriz. Se puede apreciar que los valores máximos de *flux* de calor se alcanzan a temperaturas cercanas entre sí pero con diferentes valores de *flux* de calor.



**Figura 4.18** Flux de calor estimado en función de la temperatura de la superficie (estimada), para la probeta de acero inoxidable AISI 304, para todos los flujos de aire a presión de 30 psi.

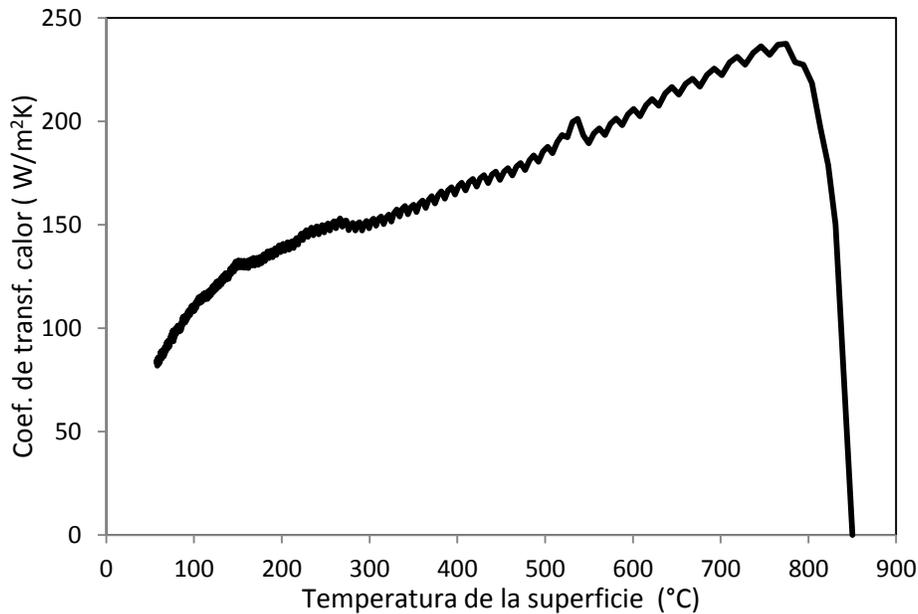
En la Figura 4.19 se aprecia el *flux* de calor de la superficie en función de la temperatura de la superficie para la presión de aire de 40 psi. Se puede observar que el inicio de la familia de curvas parte de la misma temperatura, que es la temperatura inicial al comenzar el enfriamiento (850 °C). En este gráfico también se observa el valor máximo de *flux* de calor; a medida que disminuye la temperatura el *flux* de calor alcanza valores cercanos a cero, debido a la disminución de la fuerza motriz. Se puede observar que el valor máximo de *flux* de calor, para la familia de curvas presentes, se alcanza casi a la misma temperatura de superficie.



**Figura 4.19** Flux de calor de la superficie (estimado) en función de la temperatura de la superficie (estimada), para la probeta de acero inoxidable AISI 304, para todos los flujos de aire a presión de 40 psi.

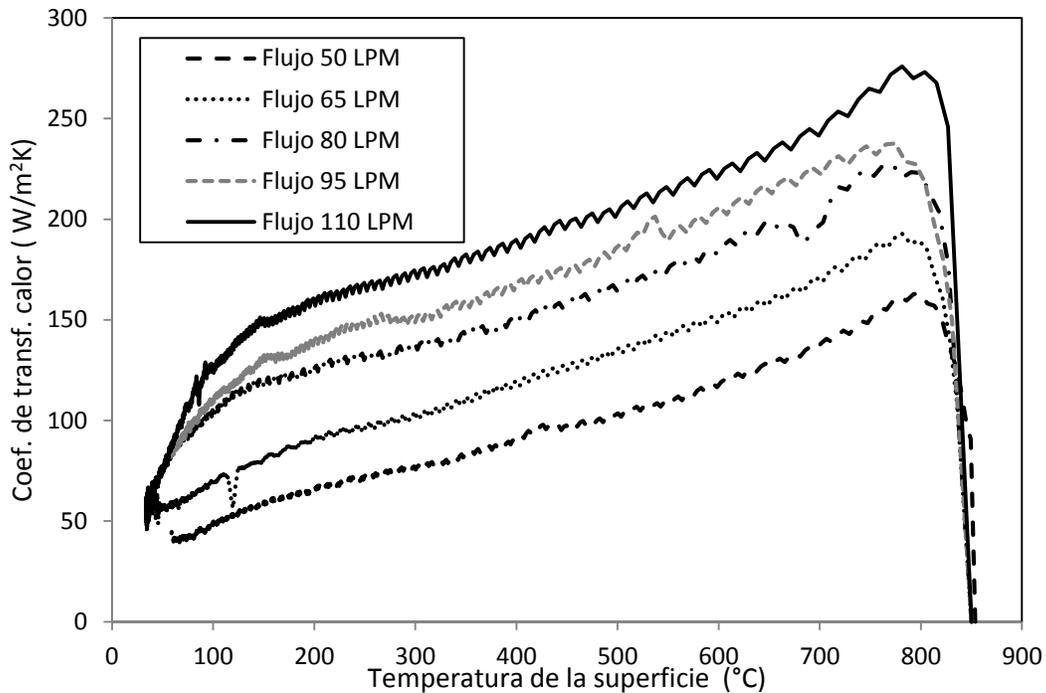
#### 4.3.4 Coeficiente de transferencia de calor

Una vez estimados el *flux* de calor de la superficie y la temperatura de la superficie, es posible calcular el coeficiente de transferencia de calor correspondiente (utilizando la ley de enfriamiento de Newton). En la Figura 4.20 se grafica el coeficiente de transferencia de calor como función de la temperatura de la superficie para un experimento con la probeta de acero inoxidable y flujo de aire de 95 LPM a 30 psi.



**Figura 4.20** Coeficiente de transferencia de calor como función de la temperatura de la superficie (estimada) para la probeta de acero inoxidable AISI 304; flujo de aire: 95 LPM a 30 psi.

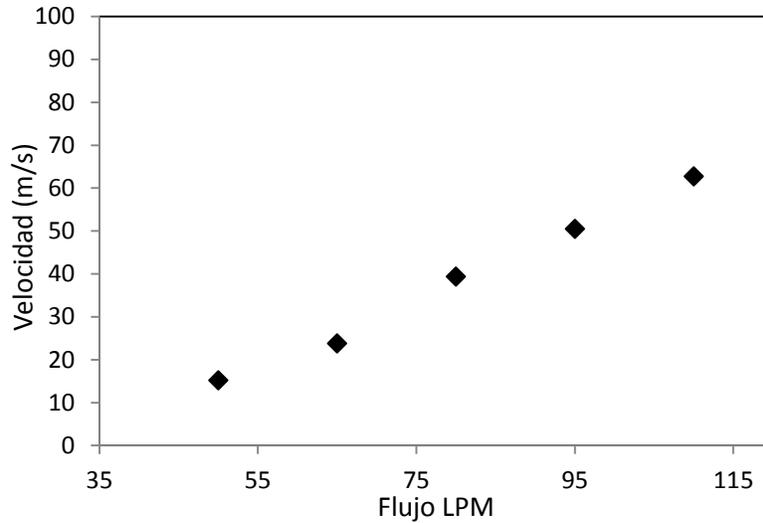
La Figura 4.21 muestra el coeficiente de transferencia de calor como función de la temperatura de la superficie (estimada) para todos los flujos de aire estudiados, a una presión de 30 psi. Se puede observar un comportamiento similar al de la Figura 4.19 (*flux* de calor de la superficie como función de la temperatura de la superficie); el coeficiente de transferencia de calor y el *flux* de calor de la superficie dependen significativamente del flujo de aire empleado durante los experimentos. Al igual que en el caso de las curvas para *flux* de calor de la superficie, se obtiene un valor máximo de coeficiente de transferencia de calor para luego disminuir conforme la fuerza motriz disminuye. El valor máximo del coeficiente de transferencia de calor se alcanza en un rango relativamente cerrado de valores de temperatura de la superficie. También se puede observar cierta irregularidad, ya que se presentan valles para los flujos de 65 y 80 LPM. Esta irregularidad es más pronunciada en el flujo de 65 LPM, debido a que los datos se adquirieron a una frecuencia de adquisición relativamente alta.



**Figura 4.21** Coeficiente de transferencia de calor como función de la temperatura de la superficie (estimada) para la probeta de acero inoxidable AISI 304.

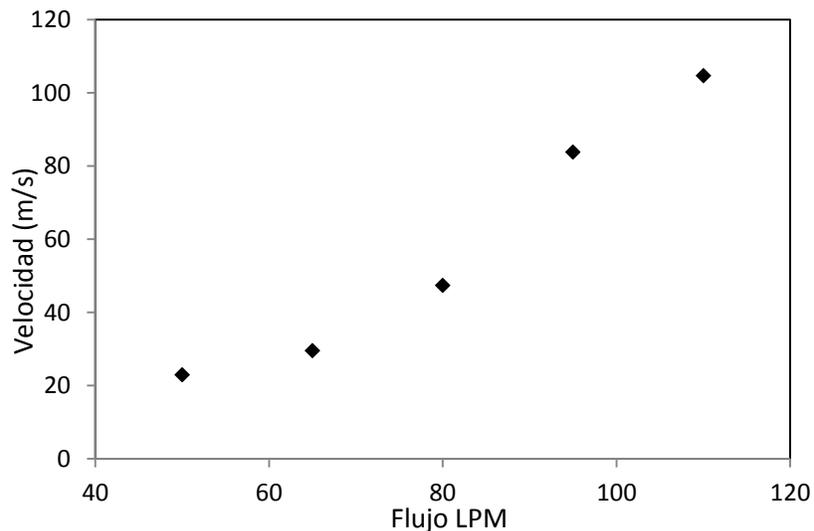
#### 4.3.5 Estimación de la velocidad del aire

A partir de los valores de cada una de las curvas de la Figura 4.22 se obtuvo un valor de coeficiente de transferencia de calor representativo de todo el enfriamiento para cada flujo de aire estudiado a presión de 30 psi. Utilizando la correlación adecuada para flujo perpendicular a un cilindro se estimó la velocidad promedio a partir del número de Reynolds calculado de la correlación. Una vez obtenidas las velocidades de aire, éstas se graficaron en función del flujo volumétrico para la presión de 30 psi (ver Figura 4.24). Como se puede apreciar, conforme se aumenta el flujo de aire la velocidad promedio también aumenta.



**Figura 4.22** Velocidad del aire (estimada) en función del flujo volumétrico para los experimentos con la probeta de acero inoxidable AISI 304, para una presión de aire de 30 psi.

En la Figura 4.23, se presenta el gráfico de velocidad de aire en función del flujo volumétrico, para una presión de 40 psi. El valor máximo estimado de la velocidad del aire aumentó de 63 m/s a 105 m/s al cambiar de 30 a 40 psi de presión.



**Figura 4.23** Velocidad de aire (estimada) en función del flujo volumétrico para los experimentos con la probeta de acero inoxidable AISI 304, para una presión de aire de 40 psi.

En las Tablas 4.1 a 4.3 se muestran los valores de velocidad del aire estimados para los experimentos así como los datos reportados por Campbell *et al.* [3]. Se puede observar que los valores estimados de la velocidad del aire para los experimentos realizados son del orden de los valores utilizados por Campbell *et al.*, por lo que, como se había mencionado con los gráficos de evolución térmica, se podría concluir que las condiciones experimentales cumplen con el régimen de enfriamiento durante la etapa de enfriamiento del proceso Stelmor. Cabe mencionar que se está buscando la posibilidad de medir la velocidad del aire de manera directa.

También puede observarse en las Tablas 4.1 y 4.3, que los valores de velocidad de aire estimados para la presión de 40 psi son mayores en comparación con los valores para la presión de 30 psi.

**Tabla 4.1** Valores del diámetro de la probeta y de la velocidad de aire empleados por Campbell *et al.* [3].

| <b>Diámetro (mm)</b> | <b>Velocidad de aire (m/s)</b> |
|----------------------|--------------------------------|
| 8                    | 22 y 6                         |
| 11                   | 6                              |

**Tabla 4.2** *Diámetro de la probeta, flujo de aire y valores estimados de la velocidad del aire, para la presión de 30 psi.*

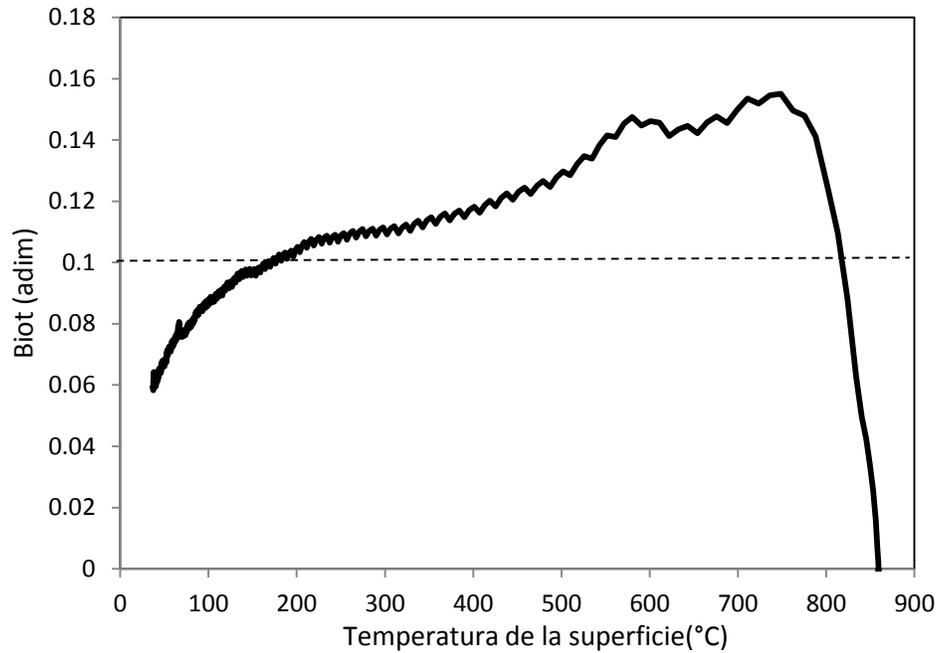
| <b>Diámetro</b> | <b>Flujo (LPM)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> |
|-----------------|--------------------|------------------------|
| 7.9 mm          | 50                 | 15.3                   |
|                 | 65                 | 24.0                   |
|                 | 80                 | 39.4                   |
|                 | 95                 | 51.0                   |
|                 | 110                | 63.0                   |

**Tabla 4.3** *Diámetro de la probeta, flujo de aire y valores estimados de la velocidad del aire, para la presión de 40 psi.*

| <b>Diámetro</b> | <b>Flujo (LPM)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> |
|-----------------|--------------------|------------------------|
| 7.9 mm          | 50                 | 23.0                   |
|                 | 65                 | 30.0                   |
|                 | 80                 | 47.0                   |
|                 | 95                 | 84.0                   |
|                 | 110                | 105.0                  |

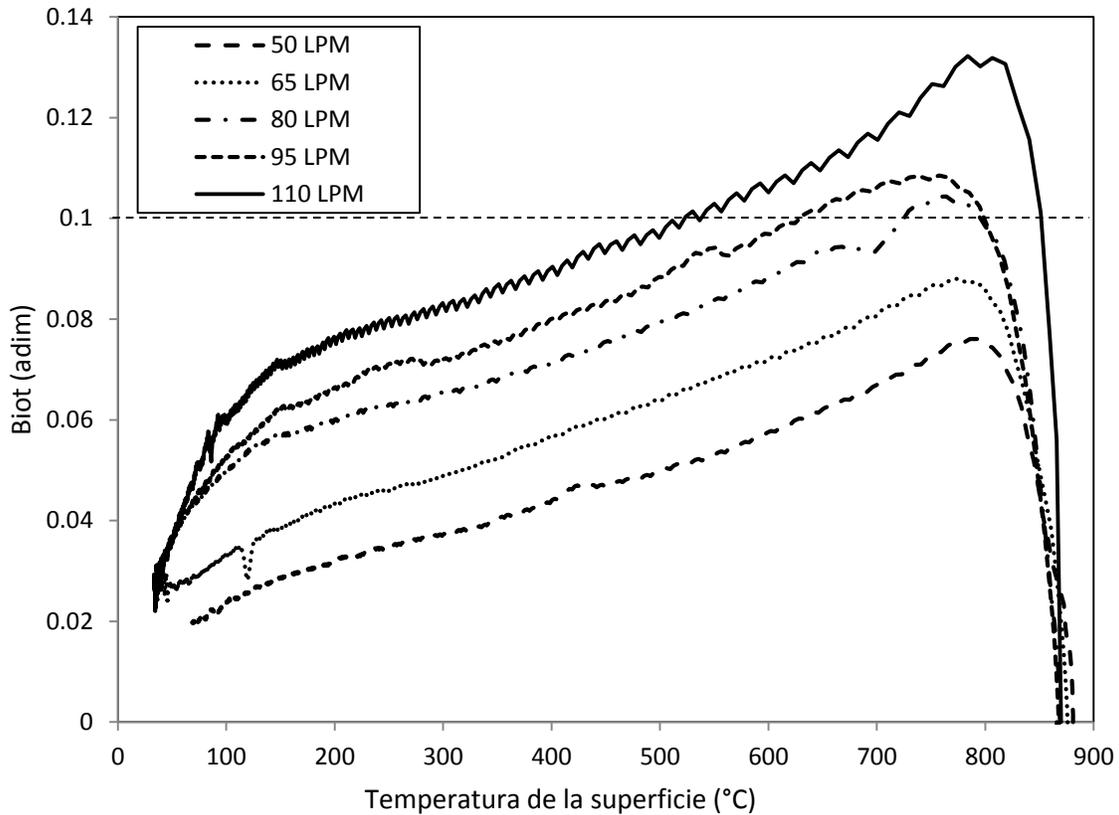
#### 4.3.6 Número de Biot

Finalmente, se calcularon los valores del número de Biot para cada uno de los flujos y se graficaron en función de la temperatura de la superficie. Como ejemplo, en la Figura 4.24 se muestra el caso para flujo de aire de 95 LPM a la presión de 30 psi. En este caso, los valores obtenidos de Biot durante el enfriamiento no corresponden a un enfriamiento newtoniano, ya que algunos de estos valores se encuentran por arriba del valor de 0.1 (línea punteada).



**Figura 4.24** Número de Biot como función de la temperatura de la superficie para la probeta de acero inoxidable AISI 304, para un flujo de aire de 95 LPM a presión de 30 psi.

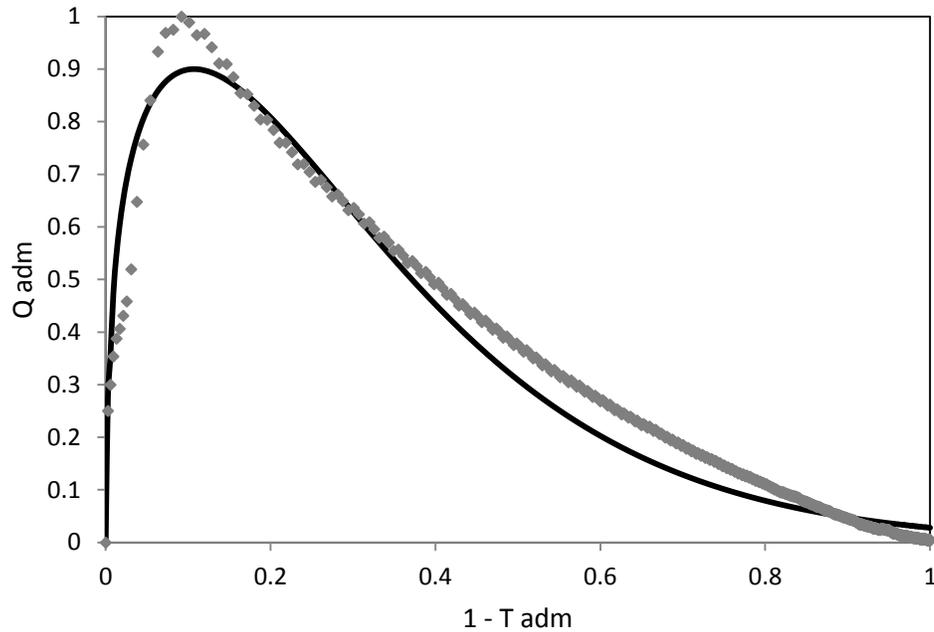
En la Figura 4.25 se grafican los valores obtenidos del número de Biot para todos los flujos de aire a presión de 30 psi. Los valores del número de Biot obtenidos, para el flujo de aire de 50 LPM, corresponden a un enfriamiento newtoniano (ya que se encuentra por debajo de 0.1).



**Figura 4.25** Número de Biot como función de la temperatura de la superficie, para todos los flujos de aire a presión de 30 psi; para la probeta de acero inoxidable AISI 304,

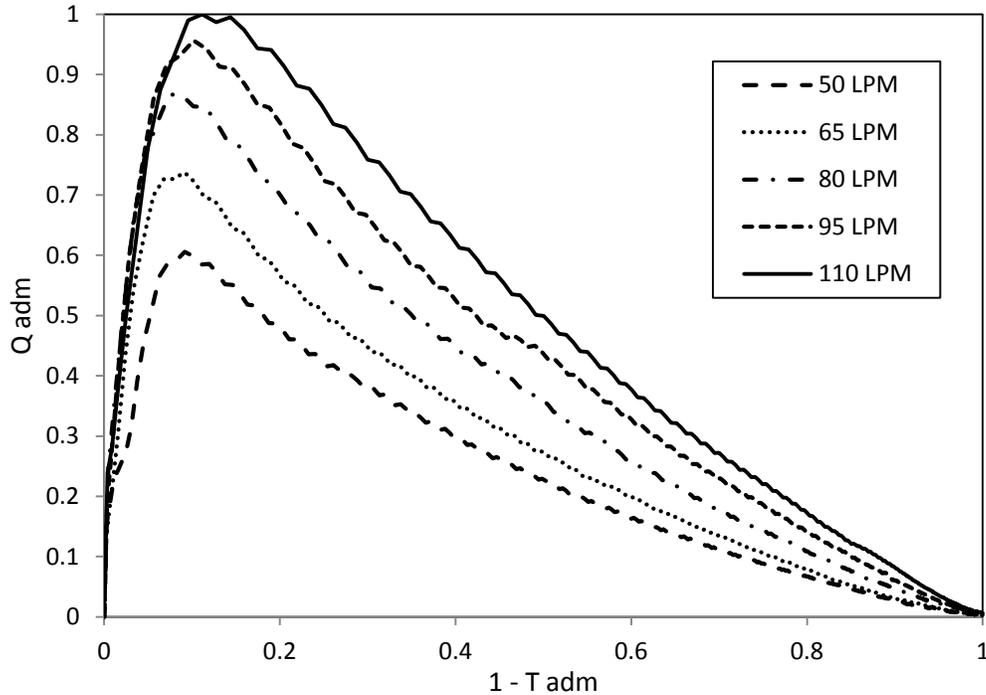
#### 4.3.7 Modelación del *flux* de calor de la superficie

En la Figura 4.26 se grafica la curva de *flux* de calor de la superficie adimensional como función del valor complemento de la temperatura adimensional (símbolos) junto con la curva de la regresión obtenida con el *software SigmaPlot* (línea) usando la ecuación de Weibull de 4 parámetros (ver Ec. 3.1 capítulo 3), para flujo de aire de 50 LPM a 40 psi. El valor de coeficiente de correlación ( $R^2$ ) fue de 0.984. La comparación entre ambas curvas es razonablemente cercana.



**Figura 4.26** Flux de calor adimensional (sub-superficie) en función del complemento de la temperatura adimensional (símbolos) y curva de regresión (línea), para la probeta de acero inoxidable. Flujo de aire de 50 LPM, a una presión de 40 psi.

En la Figura 4.27 se presenta una familia de curvas de *flux* de calor como función del complemento de la temperatura adimensional.



**Figura 4.27** Familias de flux de calor adimensional (sub-superficie) en función del complemento de la temperatura adimensional, para la probeta de acero inoxidable.  
Flujo de aire de 50 LPM, a una presión de 40 psi.

A continuación se presentan las Tablas (4.4 y 4.5). En estas se pueden observar los resultados obtenidos (4 parámetros y coeficiente de correlación), para todos los flujos de aire empleados experimentalmente, para la presión de aire de 30 y 40 psi.

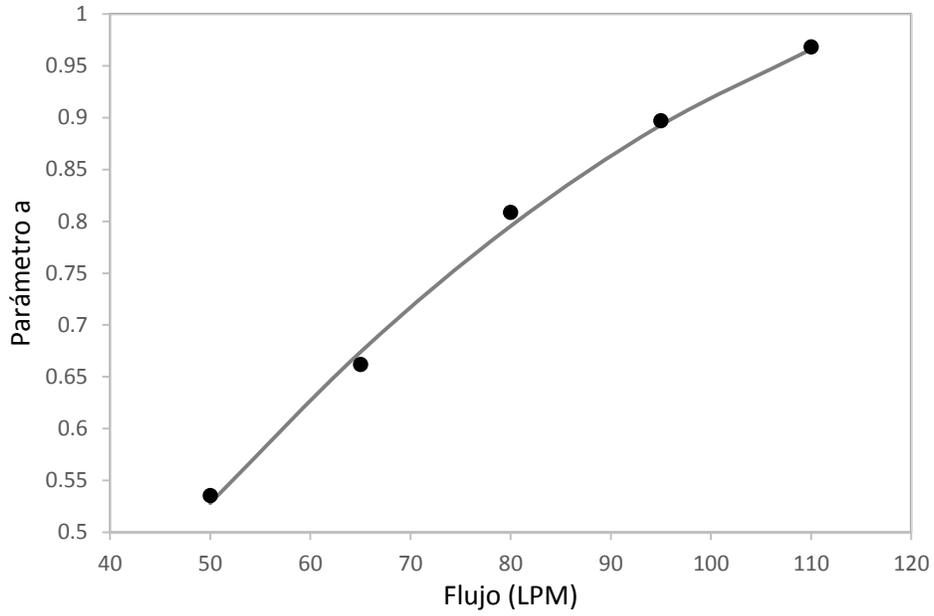
**Tabla 4.4** *Parámetros obtenidos de la ecuación de Weibull 4 de parámetros para la presión de aire de 30 psi*

| <b>Presión<br/>30 psi</b> | <b>Flujo (LPM)</b> |       |       |       |       |
|---------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Parámetro</b>          | 50                 | 65    | 80    | 95    | 110   |
| R <sup>2</sup>            | 0.989              | 0.989 | 0.988 | 0.992 | 0.984 |
| a                         | 0.528              | 0.640 | 0.777 | 0.773 | 0.894 |
| b                         | 0.324              | 0.327 | 0.336 | 0.374 | 0.345 |
| c                         | 1.298              | 1.306 | 1.273 | 1.346 | 1.348 |
| x <sub>0</sub>            | 0.104              | 0.108 | 0.100 | 0.136 | 0.127 |

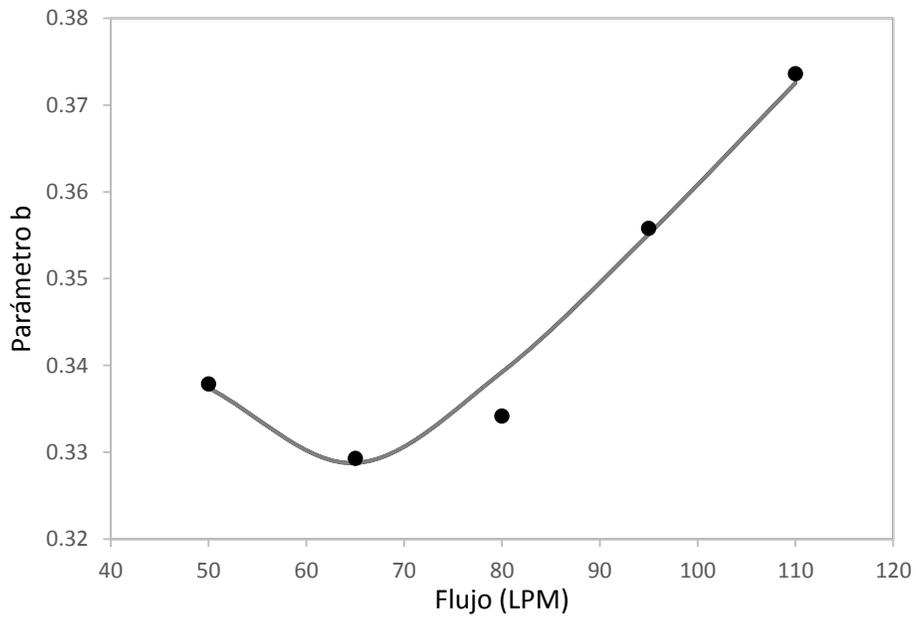
**Tabla 4.5** *Parámetros obtenidos de la ecuación de Weibull 4 de parámetros para la presión de aire de 40 psi*

| <b>Presión<br/>40 psi</b> | <b>Flujo (LPM)</b> |       |       |       |       |
|---------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Parámetro</b>          | 50                 | 65    | 80    | 95    | 110   |
| R <sup>2</sup>            | 0.984              | 0.985 | 0.987 | 0.985 | 0.987 |
| a                         | 0.536              | 0.662 | 0.809 | 0.897 | 0.968 |
| b                         | 0.338              | 0.329 | 0.334 | 0.356 | 0.374 |
| c                         | 1.397              | 1.360 | 1.323 | 1.393 | 1.467 |
| x <sub>0</sub>            | 0.138              | 0.126 | 0.121 | 0.146 | 0.171 |

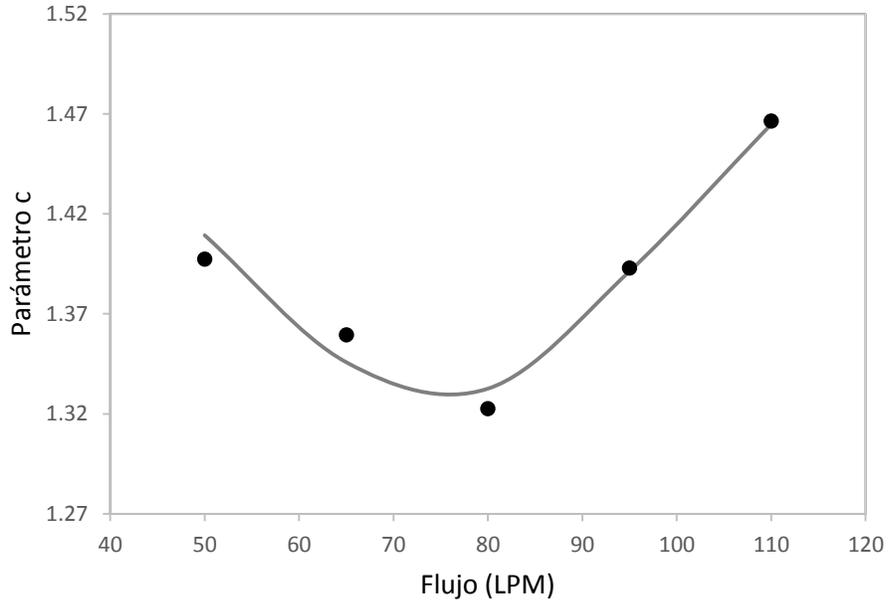
El conjunto de Figuras 4.28 a 4.31 muestra los valores de los parámetros de la regresión no lineal como función del flujo de aire, a una presión constante de 40 psi.



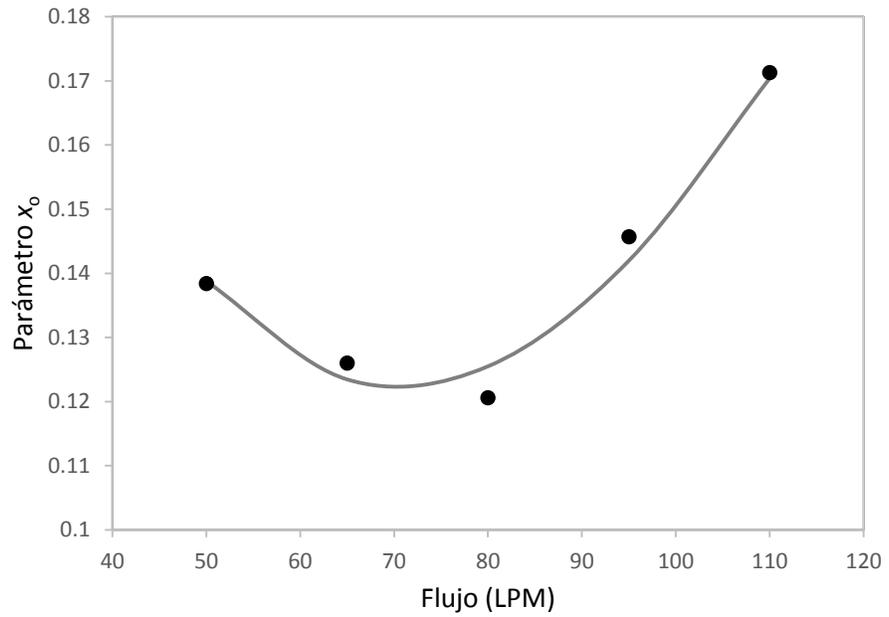
**Figura 4.28** Parámetro  $a$  en función del flujo de aire a una presión de aire de 40 psi.



**Figura 4.29** Parámetro  $b$  en función del flujo de aire a una presión de aire de 40 psi.



**Figura 4.30** *Parámetro  $c$  en función del flujo de aire a una presión de aire de 40 psi.*



**Figura 4.31** *Parámetro  $x_0$  en función del flujo de aire a una presión de aire de 40 psi.*

En la tabla 4.6 y 4.7 se muestran las ecuaciones obtenidas a partir de los 4 parámetros de la ecuación de Weibull, para todos los flujos de aire a las condiciones de presión de 30 y 40 psi, respectivamente.

**Tabla 4.6** Ecuaciones de regresión de los 4 parámetros de la ecuación de Weibull, para la probeta de acero inoxidable AISI 304, a una presión de aire 30 psi.

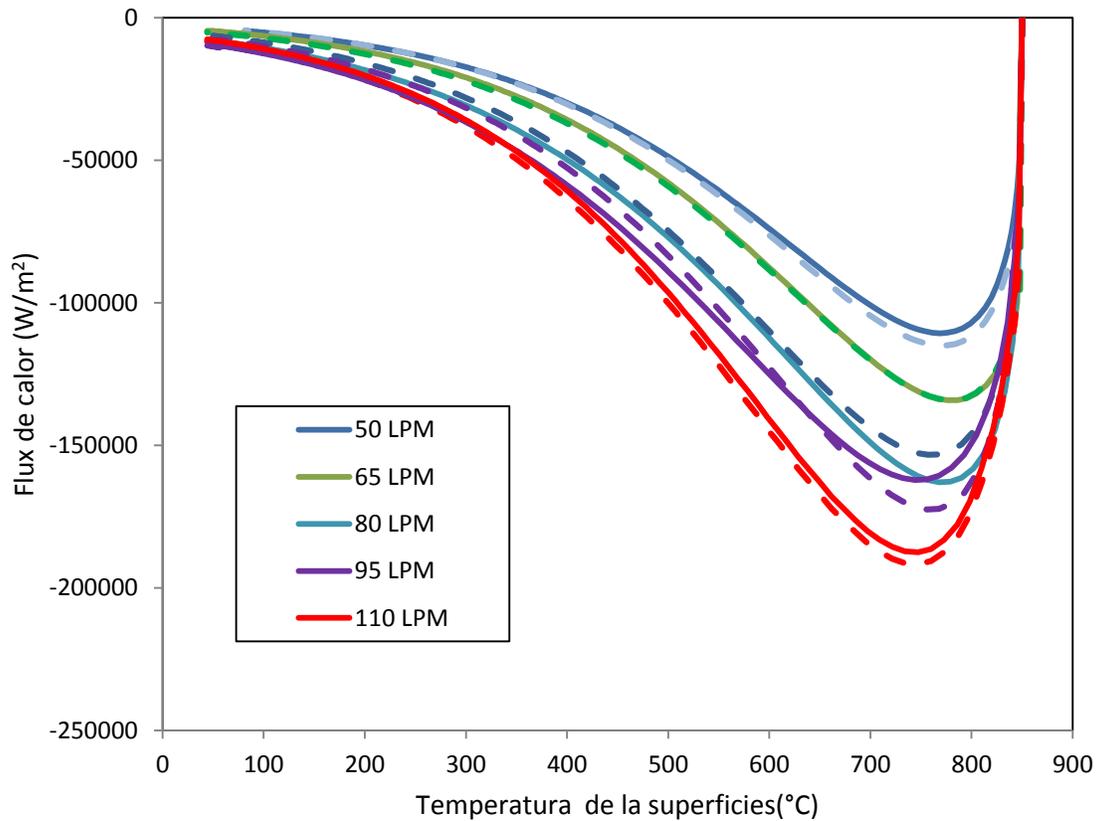
| Parámetro      | Ecuación   | R <sup>2</sup> |
|----------------|--|----------------|
| a              | $a = -0.0267 - 0.0121 * x - 0.0001 * x^2$        | 0.9541         |
| b              | $b = 0.3018 + 0.0004 * x - 4.2424E - 7 * x^2$    | 0.9690         |
| c              | $c = 1.5016 - 0.0060 * x + 4.2000E - 5 * x^2$    | 0.9660         |
| X <sub>o</sub> | $X_o = -0.1607 - 0.0052 * x - 1.2929E - 5 * x^2$ | 0.9403         |

**Tabla 4.7** Ecuaciones de regresión de los 4 parámetros de la ecuación de Weibull, para la probeta de acero inoxidable AISI 304, a una presión de aire 40 psi.

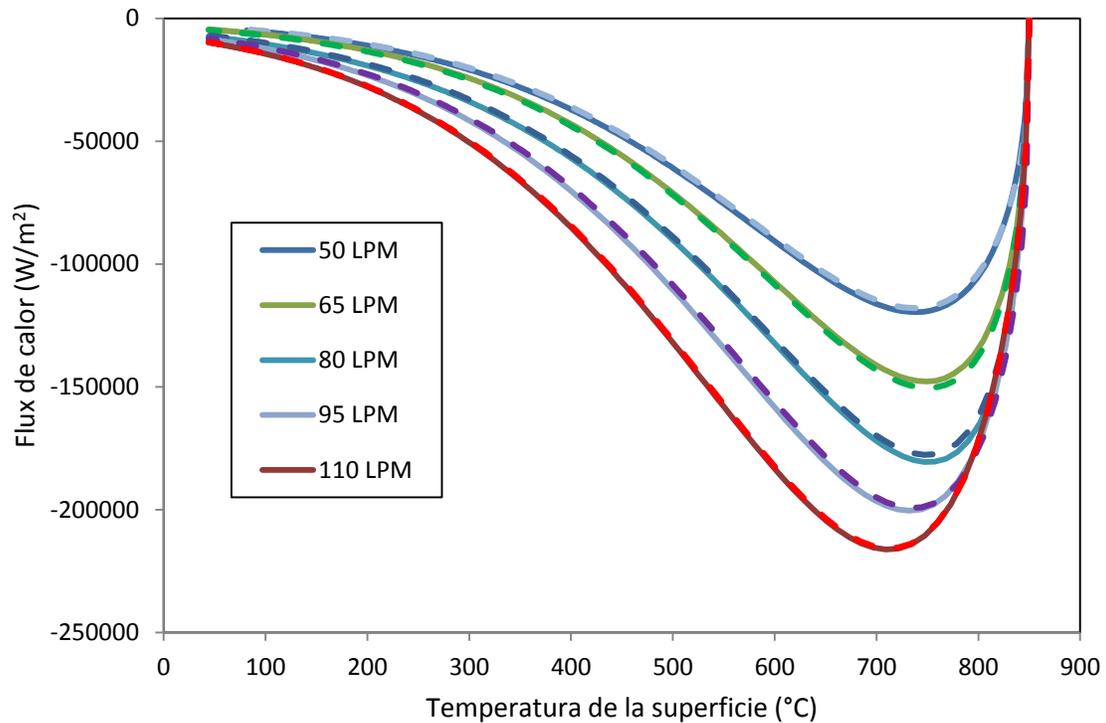
| Parámetro      | Ecuación   | R <sup>2</sup> |
|----------------|--|----------------|
| a              | $a = -0.1325 + 0.0159 * x + -5.3768E - 5 * x^2$          | 0.9972         |
| b              | $b = 0.2403 + 2.5254 * \exp^{-0.0844*x} + 0.0012 * x$    | 1.0000         |
| c              | $c = 1.3191 + 0.0015 * \text{abs}[x - 74.4480]^{1.2816}$ | 0.9621         |
| X <sub>o</sub> | $X_o = -0.7541 + 1.1207 \exp^{-0.0124*x} + 0.0058 * x$   | 0.9836         |

En la Figura 4.32 y 4.33 se muestran los gráficos de *flux* de calor calculado (con Winprobe) y recalculado (con la ecuación de Weibull y sus parámetros calculados a partir del valor de flujo de aire) para todos los flujos de aire estudiados. Se puede observar que los valores recalculados son similares a los calculados, lo que valida el procedimiento aplicado. Sin embargo, se puede observar, una ligera diferencia entre la curva calculada y recalculada de 80 LPM

y una presión de aire de 30 psi. No se presenta la curva obtenida con *Winprobe* para el flujo de 90 LPM, debido a que se presentó una probable pérdida de presión, dando como resultado un traslape entre la curva de 80 y 90 LPM.



**Figura 4.32** Flux de calor de la superficie calculado (líneas) y re-calculado (líneas punteadas) en función de la temperatura de la superficie, para la probeta de acero inoxidable AISI 304. Para todos los flujos de aire y una presión de aire de 30 psi



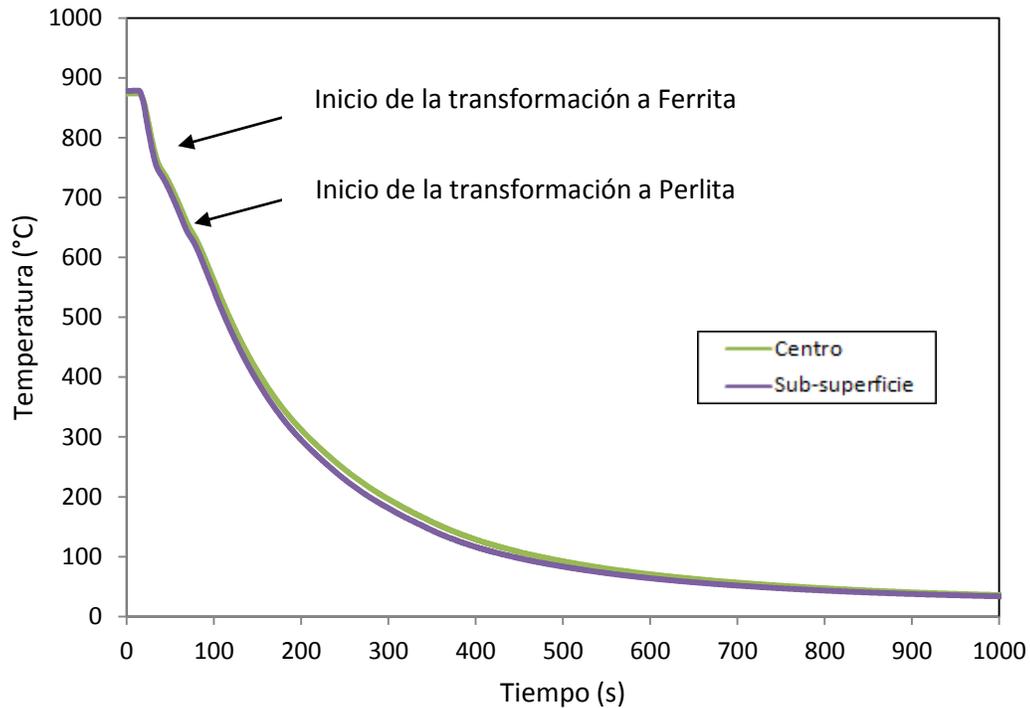
**Figura 4.33** Flux de calor de la superficie calculado (líneas) y re-calculado (líneas punteadas) en función de la temperatura de la superficie, para la probeta de acero inoxidable AISI 304. Para todos los flujos de aire y presión de aire de 40 psi.

#### 4.4 Acero hipoeutectoide

##### 4.4.1 Respuesta térmica

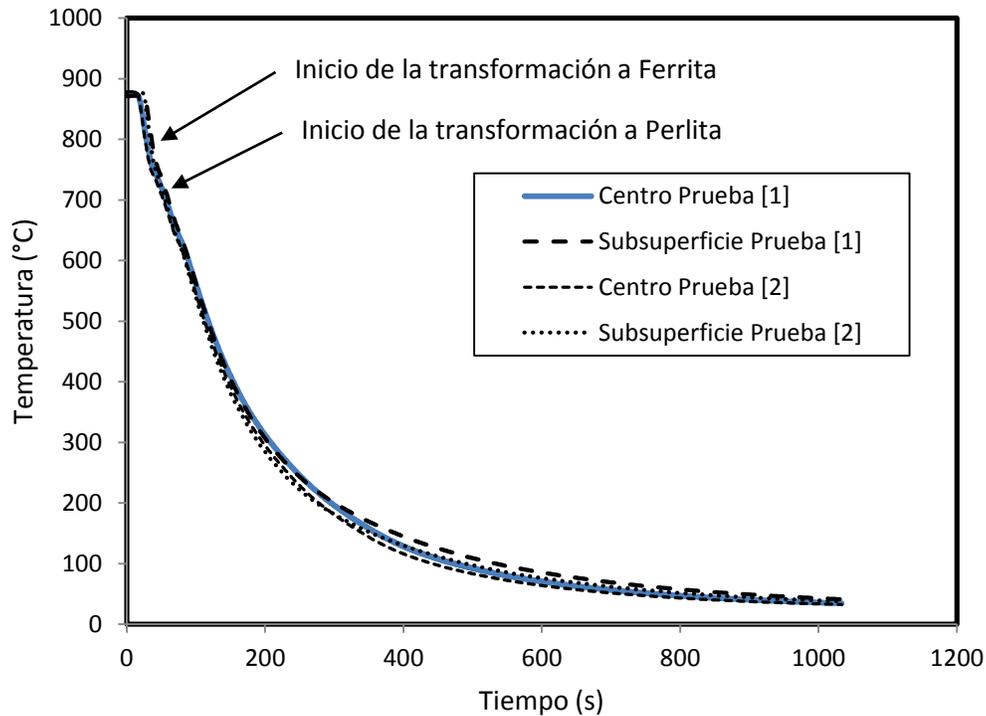
En la Figura 4.34 se muestra una curva de enfriamiento para la probeta de acero hipoeutectoide. Se puede observar una zona inicial en la que la temperatura es constante; esta temperatura corresponde a una zona donde la probeta se encuentra aún dentro del horno. Seguido a esto empieza la zona donde la probeta es impactada por el aire y comienza el enfriamiento. En la curva de enfriamiento se aprecian dos cambios notorios de pendiente,

asociados con el desprendimiento de calor durante las transformaciones de fase. En la figura se marca con flechas el inicio de las dos transformaciones difusionales, correspondientes a un acero hipoeutectoide.



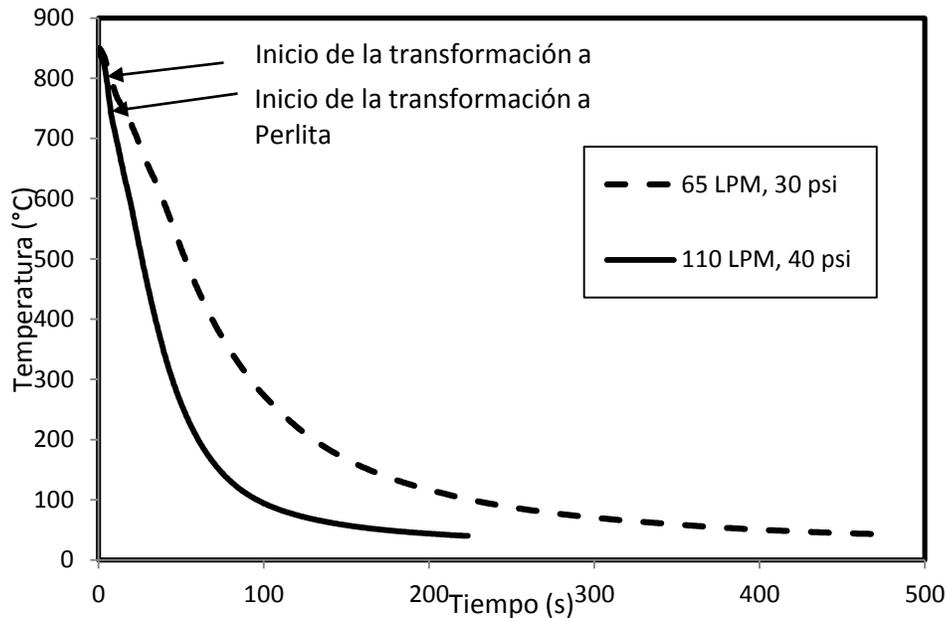
**Figura 4.34** Respuesta térmica para las posiciones centro y sub-superficie de la probeta de acero hipoeutectoide; flujo de aire: 65 LPM a presión de 30 psi.

Los experimentos con este acero, al igual que las pruebas anteriores, se realizaron por duplicado para verificar la reproducibilidad de los mismos. En la Figura 4.35 se muestran las respuestas térmicas obtenidas para dos experimentos independientes. Se observa que los experimentos son reproducibles.



**Figura 4.35** Respuesta térmica para las posiciones centro y sub-superficie de dos pruebas independientes con la probeta de acero hipoeutectoide; flujo de aire: 65 LPM a una presión de 30 psi.

En la Figura 4.36 se muestran dos respuestas térmicas para dos condiciones de enfriamiento. La primera se llevó a cabo con un flujo de aire de 65 LPM a una presión de 30 psi, mientras que la segunda a un flujo de aire de 110 LPM a una presión de 40 psi. Se pueden observar dos cambios de pendiente, asociados a las transformaciones de fase. La primera de estas es el cambio de austenita a ferrita y la segunda a perlita. La recalcencia es más notable para la condición más suave de enfriamiento.



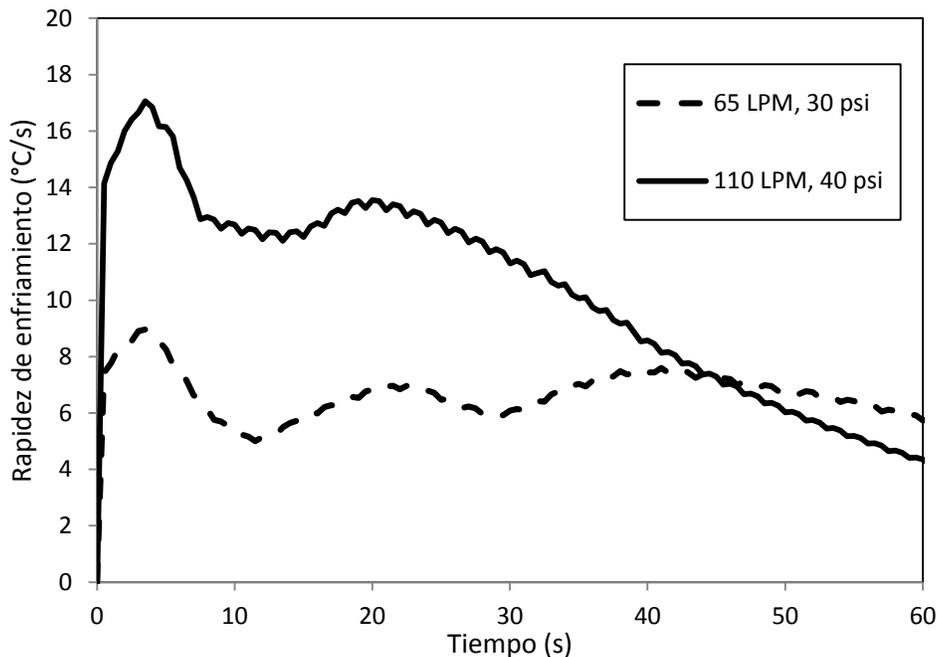
**Figura 4.36** Respuesta térmica para la posición sub-superficie de la probeta de acero hipoeutectoide, para enfriamiento con 65 LPM de aire a 30 psi y 110 LPM de aire a 40 psi.

#### 4.4.2 Rapidez de enfriamiento local

En la Figura 4.37 se muestra la rapidez local de enfriamiento para la probeta de acero hipoeutectoide; la primera curva de rapidez se realizó a un valor de flujo de aire de 65 LPM y presión de 30 psi; mientras que la segunda corresponde a un flujo de aire de 110 LPM y presión de 40 psi. En este caso se puede observar que durante, dos instantes de tiempo, la rapidez de enfriamiento disminuye (recuérdese que se está graficando el valor absoluto de esta cantidad). Esto se debe a las transformaciones de fase que ocurren durante el enfriamiento de la pieza y que son reacciones exotérmicas. La primera disminución de la rapidez de enfriamiento ocurre a aproximadamente 7 s y está asociada a la transformación de austenita a ferrita, mientras que la segunda

disminución ocurre a aproximadamente 22 s y se debe a la transformación de austenita a perlita.

Se puede ver que la recalcancia (y, por lo tanto, la disminución local de la rapidez de enfriamiento) asociada con las transformaciones a ferrita y perlita, para el flujo de 65 LPM y presión de 30 psi, es mucho más marcada, que en comparación con la curva de 110 LPM y presión de 40 psi.

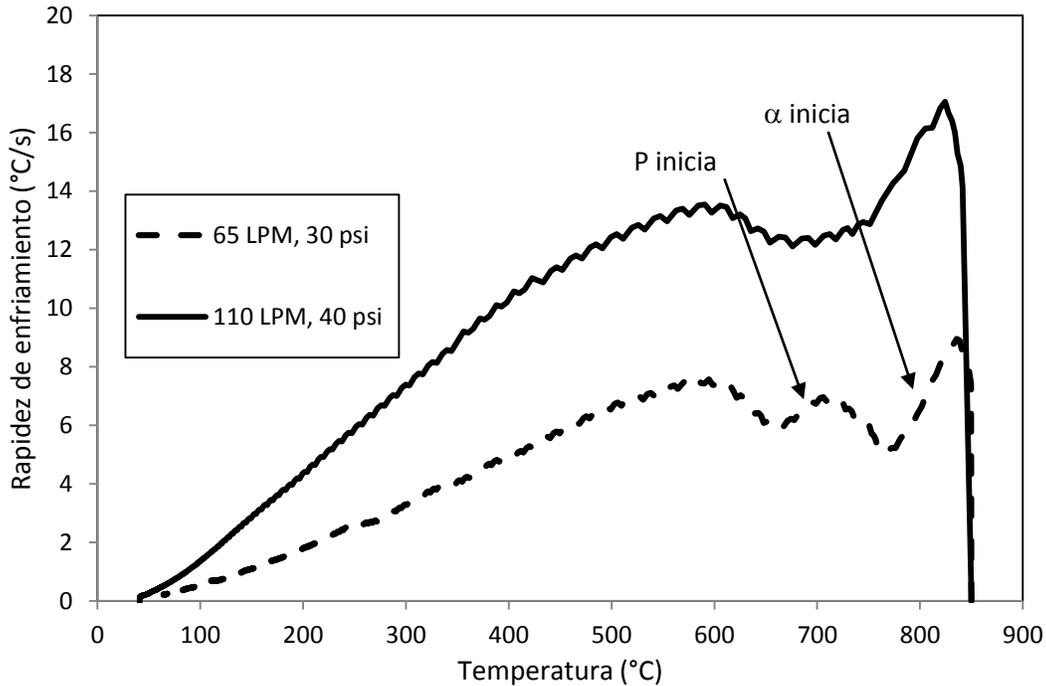


**Figura 4.37** Valor absoluto de la rapidez local de enfriamiento (sub-superficie) en función del tiempo para el acero hipoeutectoide, para enfriamiento con 65 LPM de aire a 30 psi y 110 LPM de aire a 40 psi.

En la Figura 4.38 se graficó el valor de la rapidez de enfriamiento como función de la temperatura, para la presión de 40 psi.

Se puede notar, que para la curva de rapidez de enfriamiento de 65 LPM, se presentan 2 caídas; estas dos caídas están asociadas a la transformación de fase de austenita-ferrita y perlita. Sin embargo, para la curva de rapidez de

enfriamiento de 110 LPM, sólo se observa una sola caída, probablemente se deba a la transformación bainítica. Esto se discutirá más adelante en la sección de análisis microestructural.



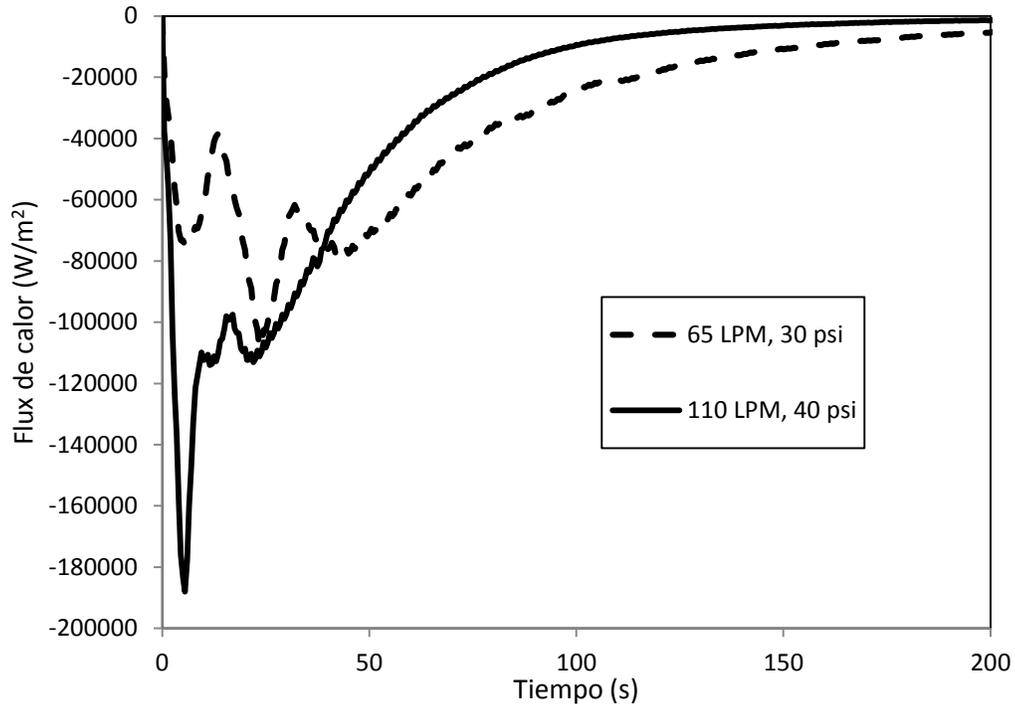
**Figura 4.38** Valor absoluto de la rapidez local de enfriamiento (sub-superficie) en función de la temperatura local para el acero hipoeutectoide, para enfriamiento con 65 LPM de aire a 30 psi y 110 LPM de aire a 40 psi.

#### 4.4.3 Flux de calor de superficie

A continuación se presentan los gráficos de *flux* de calor como función del tiempo y la temperatura. El valor negativo de esta cantidad indica que se está extrayendo calor de la probeta hacia el medio de enfriamiento.

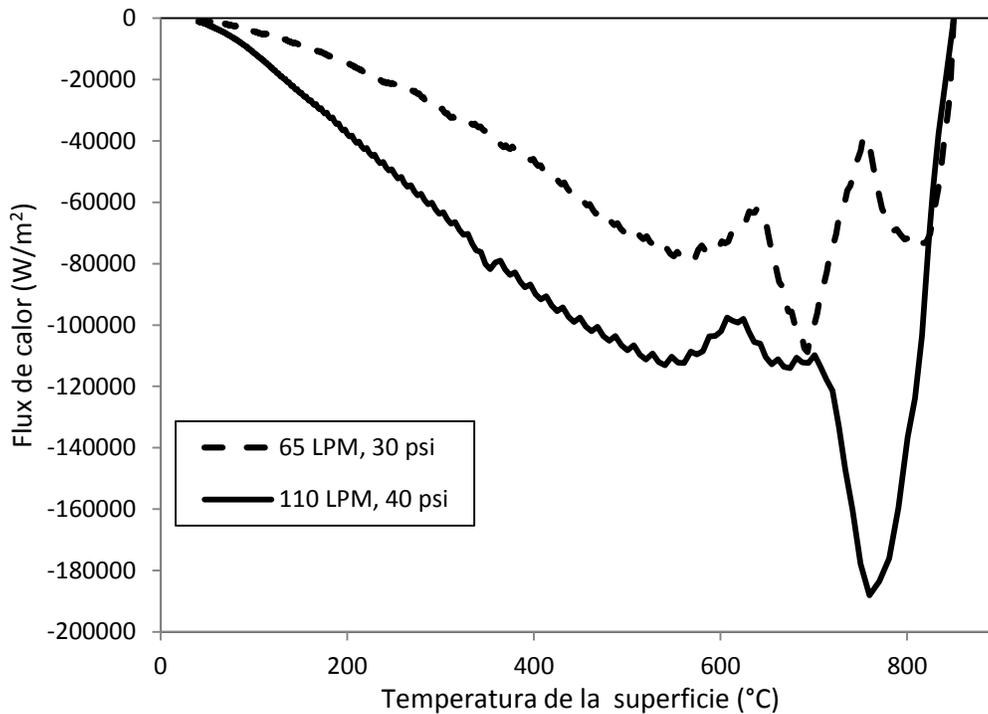
En la Figura 4.39, se presenta un comportamiento muy similar al del gráfico de rapidez de enfriamiento en función de la temperatura. Se puede apreciar que, para la curva de 65 LPM a 30 psi, se presentan dos cambios de pendiente;

como se mencionó anteriormente, estos cambios representan las zonas de recalcificación debido a la transformación de austenita a ferrita y de austenita a perlita. Sin embargo la curva de *flux* de calor para un valor de flujo de aire de 110 LPM a 40 psi, solo presenta una caída.



**Figura 4.39** Flux de calor (sub-superficie) en función del tiempo para la probeta de acero hipoeutectoide, para enfriamiento con 65 LPM de aire a 30 psi y 110 LPM de aire a 40 psi.

Para finalizar esta sección se muestra la Figura 4.40. En este caso se observa el *flux* de calor como función de la temperatura de la superficie (ambos estimados). Se pueden apreciar las temperaturas a las cuáles ocurren las transformaciones de fase. Se pueden observar los mismos cambios de comportamiento, dos para el flujo de aire y presión más bajos y uno solo para el flujo de aire y presión más altos.

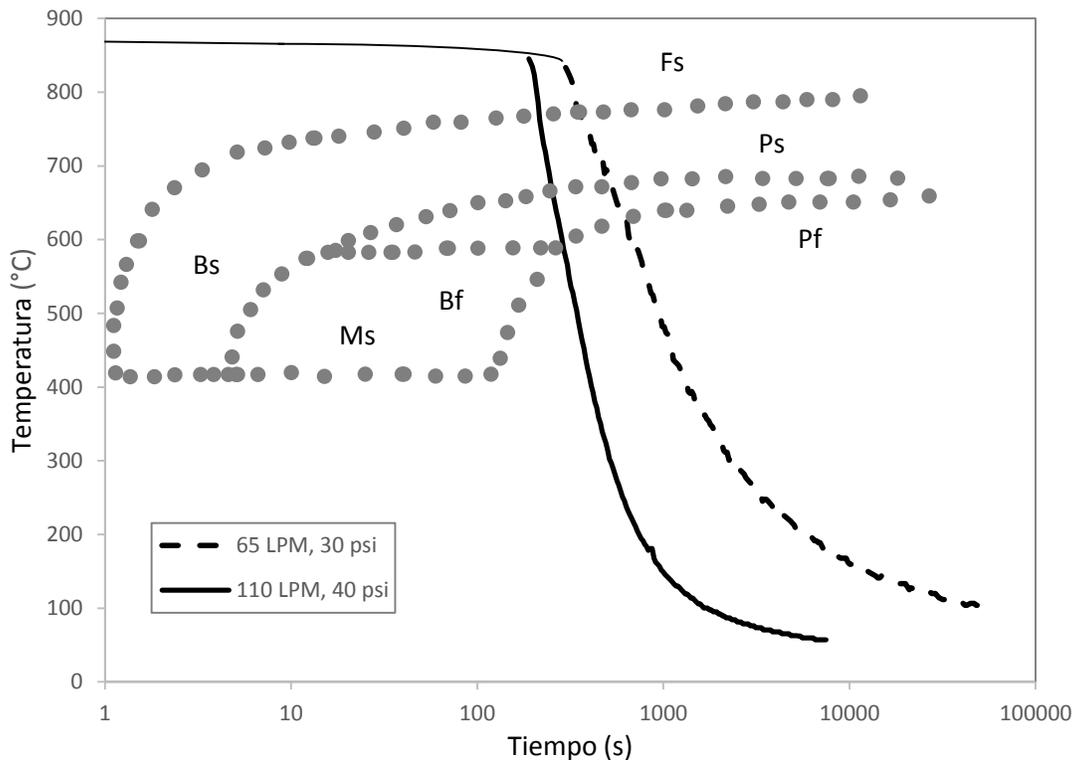


**Figura 4.40** Flux de calor (sub-superficie) en función de la temperatura de superficie para la probeta de acero hipoeutectoide, para enfriamiento con 65 LPM de aire a 30 psi y 110 LPM de aire a 40 psi.

#### 4.4.4 Diagrama CCT

En la Figura 4.41 se muestra el diagrama CCT para el acero AISI 1020. Se puede observar que, para la condición de enfriamiento de 65 LPM a una presión de aire de 30 psi, los constituyentes que se obtienen de acuerdo al diagrama son ferrita y perlita.

Por otra parte, la línea sólida, representa a la condición de enfriamiento de 110 LPM a una presión de aire de 40 psi, sugiere que los constituyentes obtenidos son ferrita, perlita y un poco de bainita, sin embargo, en las micrografías que se muestran en la sección siguiente no se observa esto último.



**Figura 4.41** Diagrama CCT del acero 1020 [25]. La línea punteada corresponde al enfriamiento con aire para la condición de 65 LPM a una presión de 30 psi, mientras que la línea sólida corresponde a la condición de enfriamiento de 110 LPM a una presión de 40 psi.

#### 4.4.5 Análisis microestructural

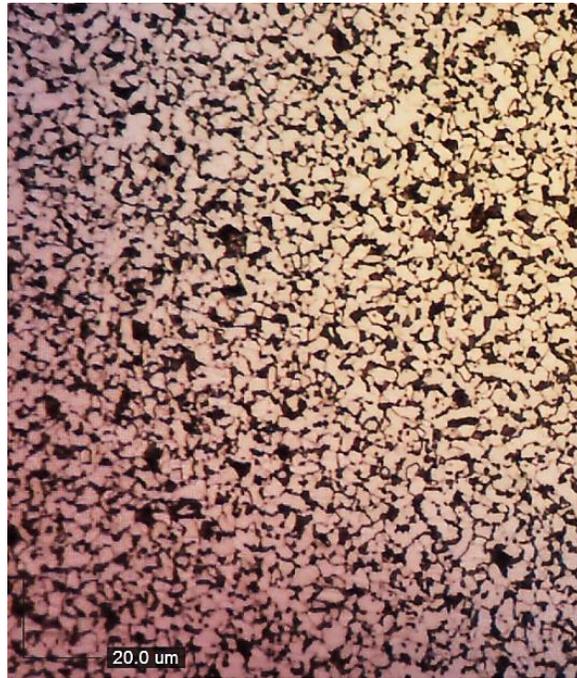
En la sección que se muestra a continuación se presentan las microestructuras finales obtenidas mediante el tratamiento térmico. Se realizó el análisis de cada una de las imágenes correspondientes para obtener la fracción de ferrita y el tamaño de grano.

A continuación se presenta el conjunto de micrografías tomadas a 100 X después de atacar las muestras con Nital 2. En las Figuras 4.42 a 4.44 se

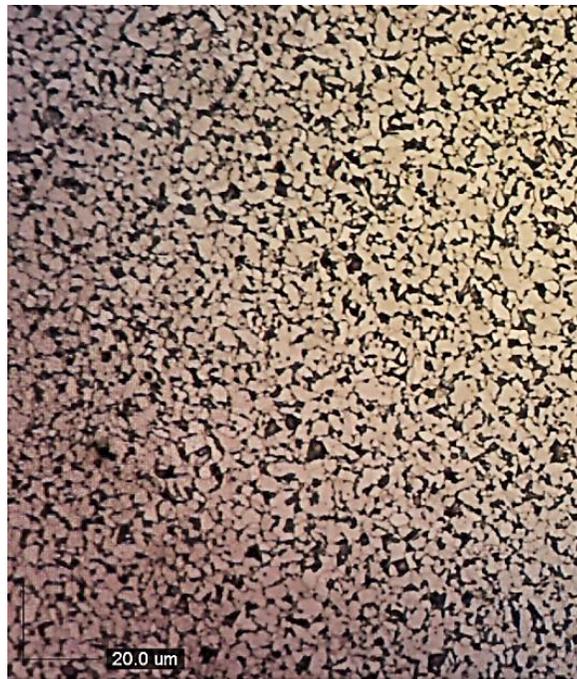
puede observar que la microestructura corresponde a una mezcla de ferrita y perlita. Además, el tamaño de grano ferrítico en la Figura 4.42 (condición de enfriamiento más “suave”) es mayor en comparación al de la Figura 4.44.



**Figura 4.42** Micrografía de acero hipoeutectoide, de llegada. Nital 2.



**Figura 4.43** Micrografía de acero hipoeutectoide, enfriada con un flujo de aire de 65 LPM a presión de 30 psi. Nital 2.



**Figura 4.44** Micrografía del acero hipoeutectoide, enfriado con un flujo de aire de 110 LPM a presión de 40 psi. Nital 2.

En la Tabla 4.8 se muestra el detalle de los cálculo del tamaño de grano para el acero hipoeutectoide. Como era de esperarse, a mayor flujo de aire y presión, mayor rapidez de extracción de calor y por lo tanto menor tamaño de grano.

**Tabla 4.8** *Tamaño de grano de la ferrita para el acero hipoeutectoide.*

| <b>Llegada</b> |                |                |                 |        |
|----------------|----------------|----------------|-----------------|--------|
| Región         | V <sub>v</sub> | N <sub>α</sub> | L <sub>3α</sub> | G ASTM |
| 1              | 0.88           | 24             | 0.036           | 6.26   |
| 2              | 0.94           | 28             | 0.033           | 6.51   |
| Promedio       |                |                |                 | 6      |

| <b>65 LPM 30 psi</b> |                |                |                 |        |
|----------------------|----------------|----------------|-----------------|--------|
| Región               | V <sub>v</sub> | N <sub>α</sub> | L <sub>3α</sub> | G ASTM |
| 1                    | 0.69           | 34             | 0.020           | 7.96   |
| 2                    | 0.81           | 39             | 0.021           | 7.88   |
| 3                    | 0.81           | 42             | 0.019           | 8.09   |
| Promedio             |                |                |                 | 8      |

| <b>110 LPM 40 psi</b> |                |                |                 |        |
|-----------------------|----------------|----------------|-----------------|--------|
| Región                | V <sub>v</sub> | N <sub>α</sub> | L <sub>3α</sub> | G ASTM |
| 1                     | 0.86           | 61             | 0.014           | 9.01   |
| 2                     | 0.81           | 59             | 0.014           | 9.07   |
| 3                     | 0.81           | 55             | 0.015           | 8.87   |
| Promedio              |                |                |                 | 9      |

#### 4.4.6 Dureza

En esta sección se muestran los valores de dureza obtenido. En la Tabla 4.9 se detallan los resultados de la medición de dureza en las muestras de llegada y tratadas térmicamente. Se puede observar que a mayor flujo de aire y presión,

mayor es la dureza, lo que es consistente con el menor tamaño de grano. Sin embargo, la dureza en dirección radial, tomada para 4 puntos, no es idéntica. Esto es indicativo que el enfriamiento no es newtoniano, lo que se aprecia claramente para la condición de enfriamiento de flujo de aire de 110 LPM a 40 psi.

**Tabla 4.9** Durezas obtenidas para el acero hipoeutectoide.

| Llegada  |     |     |
|----------|-----|-----|
| Medición | HRB | HV  |
| 1        | 73  | 132 |
| 2        | 75  | 137 |
| 3        | 75  | 137 |
| 4        | 76  | 139 |
| Promedio | 75  | 136 |

| 65 LPM 30 psi |      |     |
|---------------|------|-----|
| Medición      | HRB  | HV  |
| 1             | 85.0 | 165 |
| 2             | 85.2 | 165 |
| 3             | 85.2 | 165 |
| 4             | 85.6 | 165 |
| Promedio      | 85.2 | 165 |

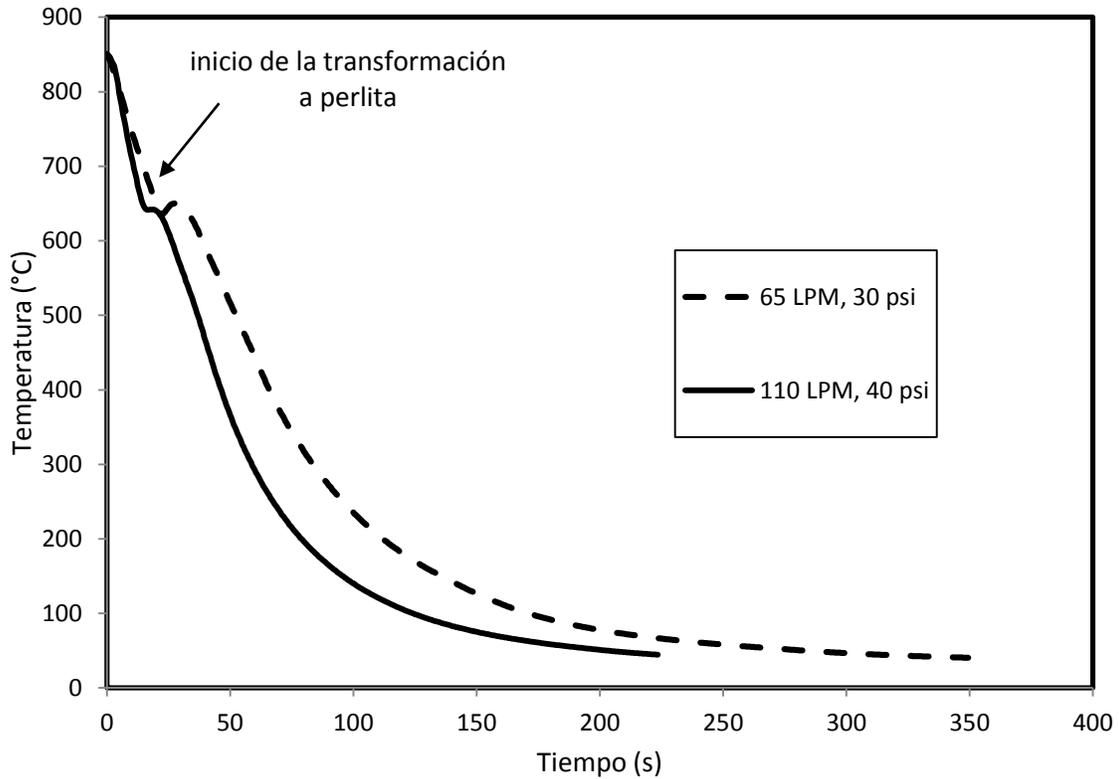
| 110 LPM 40 psi |      |     |
|----------------|------|-----|
| Medición       | HRB  | HV  |
| 1              | 87.4 | 172 |
| 2              | 87.5 | 172 |
| 3              | 87.6 | 172 |
| 4              | 88.1 | 176 |
| Promedio       | 87.6 | 173 |

## 4.5 Acero eutectoide

### 4.5.1 Respuesta térmica

En la Figura 4.45 se muestran las respuestas térmicas medidas, para dos condiciones de flujo y presión. Puede observarse que la curva de enfriamiento presenta una sola transformación de fase, notable por el cambio de pendiente. Puede notarse que hay mayor recalescencia en comparación al caso de las

probetas de acero hipoeutectoide; esto se debe a que la reacción de la transformación de austenita a perlita es muy exotérmica.

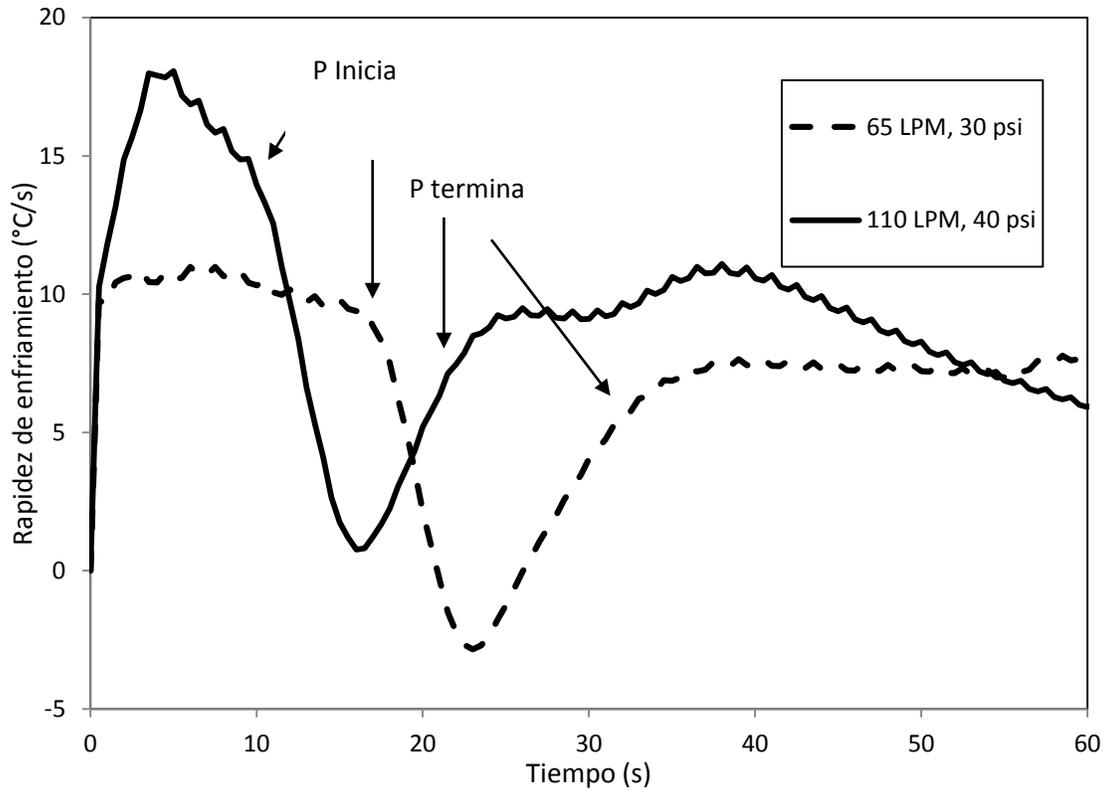


**Figura 4.45** Respuesta térmica en la posición sub-superficie de la probeta de acero eutectoide, para enfriamiento con 65 LPM de aire a 30 psi y 110 LPM de aire a 40 psi.

#### 4.5.2 Rapidez de enfriamiento local

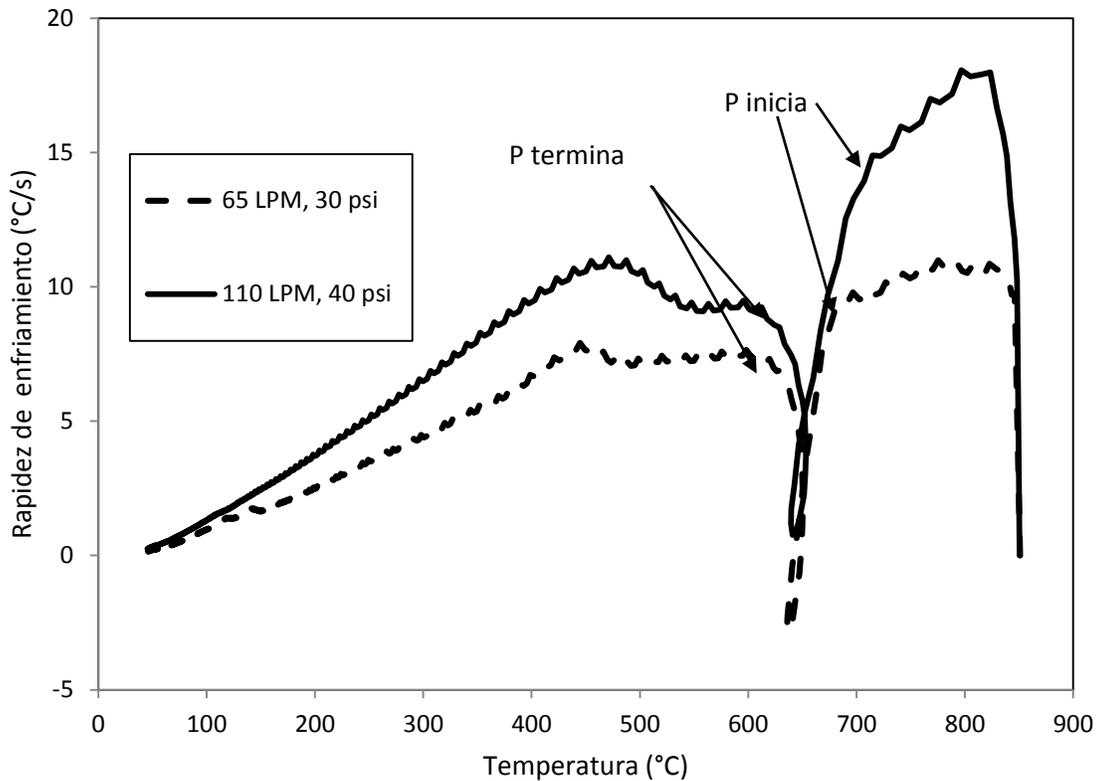
En la Figura 4.46, se presentan los gráficos de rapidez de enfriamiento como función del tiempo, para dos condiciones extremas, es decir, para el flujo de 65 LPM se usó una presión de aire de 30 psi, y para el flujo de 110 LPM se usó una presión de aire de 40 psi. Los sitios de recalescencia se observan como

caídas de rapidez de enfriamiento, debido al recalentamiento que sufre la pieza debido a la transformación de fase.



**Figura 4.46** Valor absoluto de la rapidez local de enfriamiento (sub-superficie) en función del tiempo para el acero eutectoide, para enfriamiento con 65 LPM de aire a 30 psi y 110 LPM de aire a 40 psi.

En la Figura 4.47, se grafica la rapidez de enfriamiento como función de la temperatura. Se puede observar que la caída de rapidez de enfriamiento, asociada a la recalescencia, ocurre a una temperatura de 673 °C para ambas condiciones experimentales.

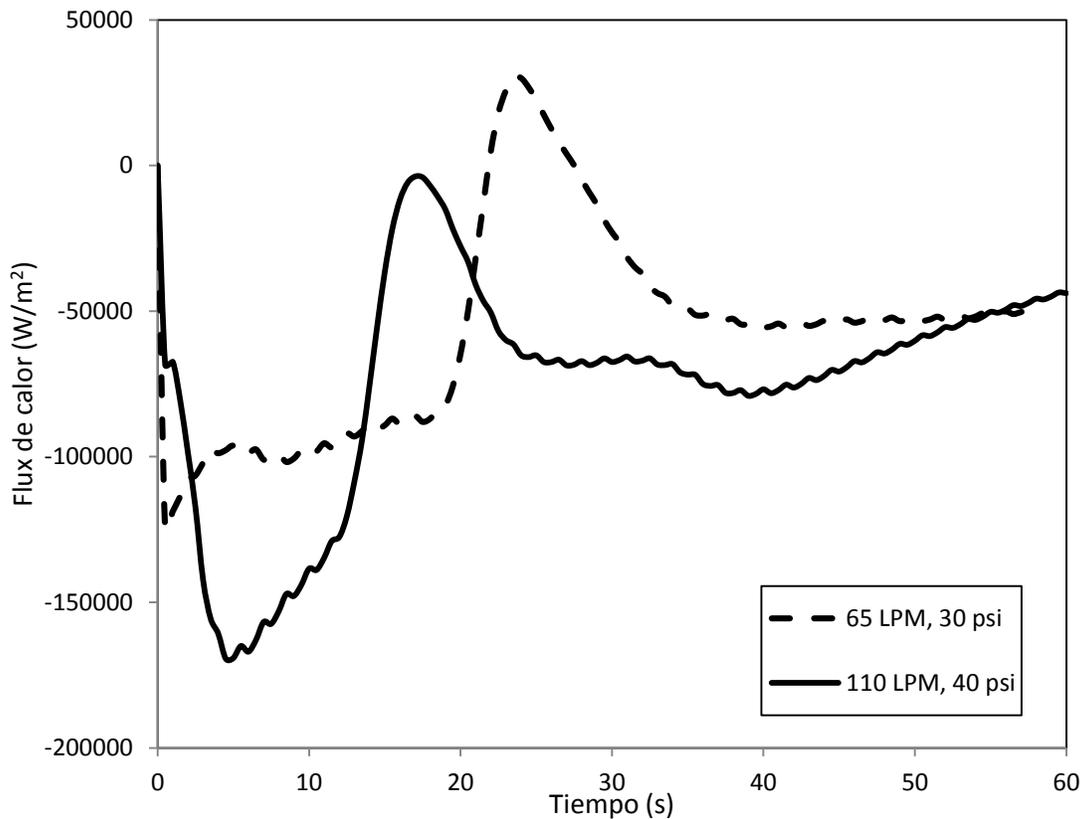


**Figura 4.47** Valor absoluto de la rapidez local de enfriamiento (sub-superficie) en función del tiempo para el acero al carbono eutectoide, para enfriamiento con 65 LPM de aire a 30 psi y 110 LPM de aire a 40 psi.

### 4.5.3 Flux de calor de superficie

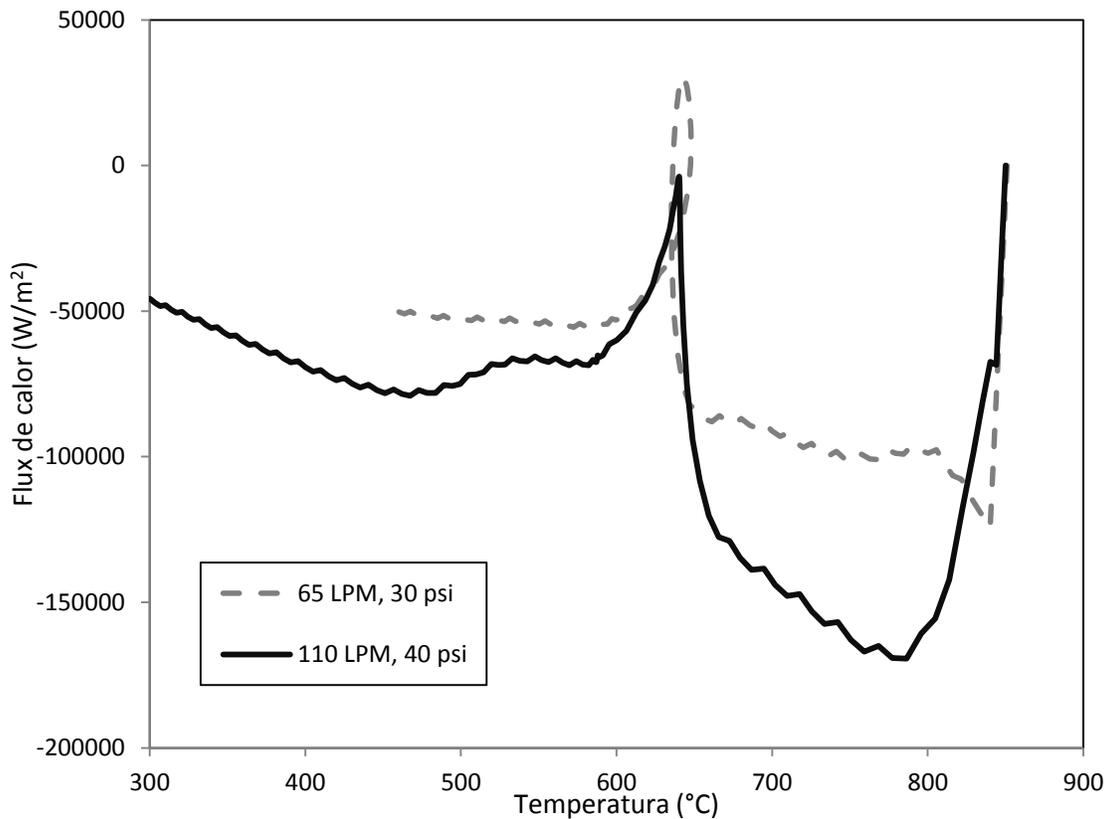
Finalmente se presenta el gráfico de *flux* de calor como función del tiempo. Los resultados obtenidos en esta sección están basados en los resultados obtenidos por Prasanna Kumar, et al. [15].

En la Figura 4.48, se observa solo una caída de *flux* de calor; esto está asociado a que solo se presenta una transformación de fase (austenita-perlita).



**Figura 4.48** Flux de calor (sub-superficie) en función del tiempo para la probeta de acero eutectoide, para enfriamiento con 65 LPM de aire a 30 psi y 110 LPM de aire a 40 psi [15].

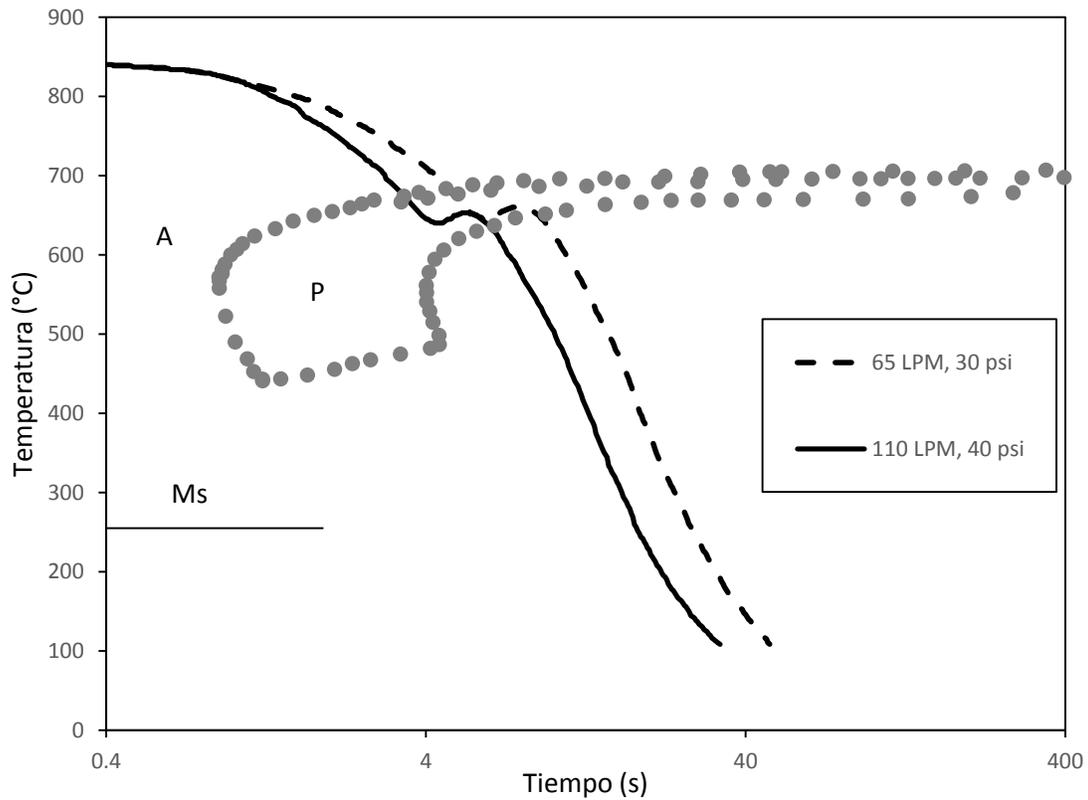
En la Figura 4.49 se muestra el *flux* de calor en función de la temperatura de la superficie. Se puede observar la temperatura a la cual ocurre la transformación de fase, al igual que la recalcencia. Para ambas curvas el *flux* de calor máximo se alcanza a la misma temperatura, así como la transformación de fase. Se observan valores positivos de *flux* de calor ya que hay un calentamiento significativo de la pieza, asociado a la transformación de fase.



**Figura 4.49** Flux de calor de la superficie en función de la temperatura de la superficie para la probeta de acero eutectoide, para enfriamiento con 65 LPM de aire a 30 psi y 110 LPM de aire a 40 psi [15].

#### 4.5.4 Diagrama CCT

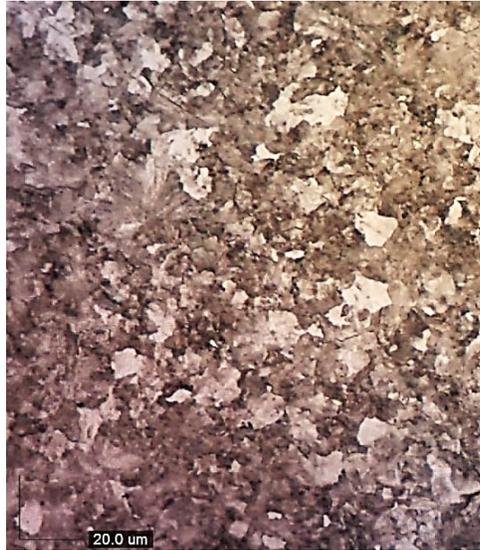
En la Figura 4.50 se muestra el diagrama CCT correspondiente al acero AISI 1080. También se grafican las curvas de enfriamiento experimentales para el acero eutectoide. El diagrama confirma que el microconstituyente que debe formarse es perlita; los puntos de inicio y fin de la transformación que se observan en las curvas de enfriamiento son similares a los valores del diagrama publicado (recuérdese que el acero usado no es exactamente un AISI 1080).



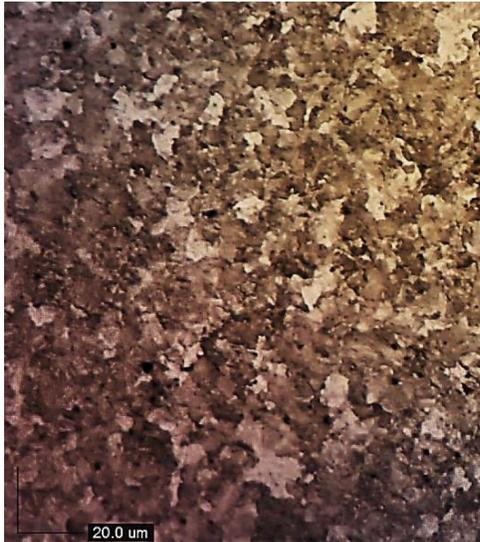
**Figura 4.50** Diagrama CCT del acero 1080 [26]. La línea punteada corresponde al enfriamiento con aire para la condición de 65 LPM a una presión de 30 psi, mientras que la línea sólida corresponde a la condición de enfriamiento de 110 LPM a una presión de 40 psi.

#### 4.5.5 Análisis microestructural

A continuación se presenta el conjunto de micrografías obtenidas para el acero eutectoide tomadas a 100 X. Como se puede observar en las Figura 4.51 a 4.52, la microestructura es perlítica.



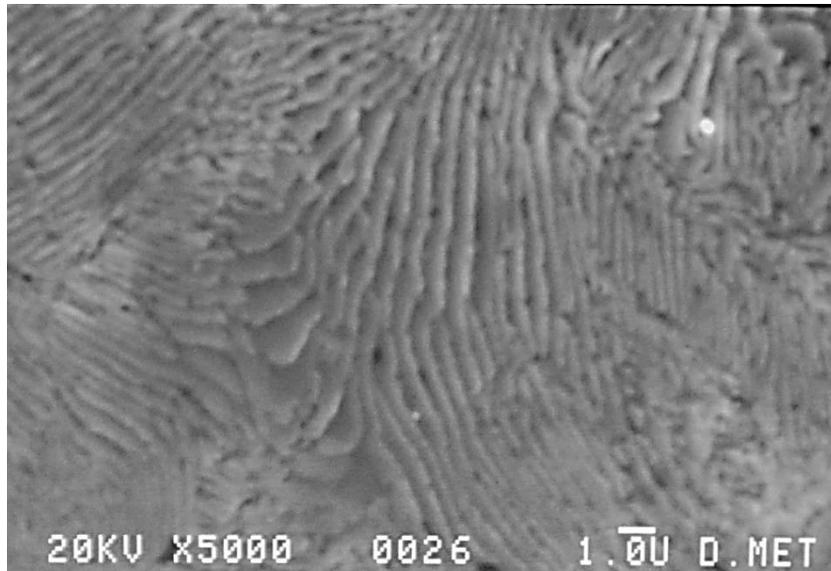
**Figura 4.51** Micrografía del acero eutectoide, enfriado con un flujo de aire de 65 LPM a presión de 30 psi. Nital 2.



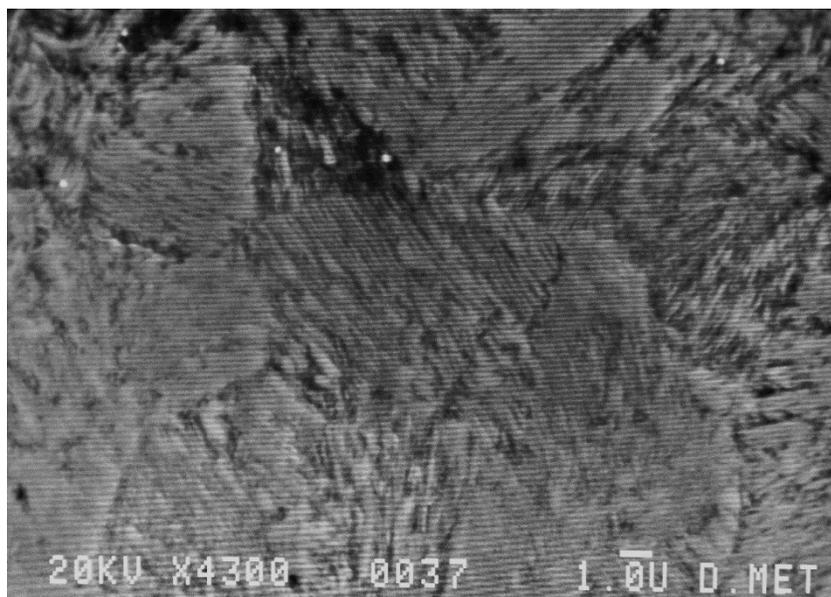
**Figura 4.52** Micrografía del acero eutectoide, enfriado con un flujo de aire de 110 LPM a presión de 40 psi. Nital 2.

En las Figuras 4.53 y 4.54 se muestran las micrografías obtenidas mediante MEB. Se puede observar que, el espacio interlaminar para la condición de

enfriamiento con aire a 110 LPM a una presión de 40 psi, es menor en comparación al de la Figura 4.56.



**Figura 4.53** Micrografía obtenida mediante MEB para el acero eutectoide, enfriado con un flujo de aire de 65 LPM y presión de 30 psi. Picral.



**Figura 4.54** Micrografía obtenida mediante MEB para el acero eutectoide, enfriado con un flujo de aire de 110 LPM y presión de 40 psi. Picral

En las Tablas 4.10 y 4.11 se muestra el detalle de los cálculos para la determinación del espacio interlaminar para las dos condiciones de enfriamiento. El espacio interlaminar es más fino (39 nm vs. 75 nm) conforme mayor es la rapidez de extracción de calor. Sólo se presenta un resultado para la condición de aire de 110 LPM y 40 psi, debido a que no se distinguían con suficiente claridad las laminillas en la metalografía.

**Tabla 4.10** Espacio interlaminar promedio para 3 regiones, para la probeta enfriada con aire a 65 LPM a una presión de aire de 40 psi

| 65 LPM 30 psi |          |             |                              |                 |                 |
|---------------|----------|-------------|------------------------------|-----------------|-----------------|
| N             | Aumentos | NI (int/mm) | $\sigma_r$ ( $\mu\text{m}$ ) | $\sigma_r$ (nm) | $\sigma_v$ (nm) |
| 14            | 5000     | 557.0423    | 0.1795                       | 179.519         | 89.759          |
| 20            |          | 795.7747    | 0.1257                       | 125.663         | 62.831          |
| 17            |          | 676.4085    | 0.1478                       | 147.839         | 73.919          |
|               |          |             |                              | Promedio        | 75.503          |

**Tabla 4.11** Espacio interlaminar promedio, para la probeta enfriada con aire a 110 LPM a una presión de aire de 40 psi.

| 1080 110 LPM 40 psi |          |       |             |                              |                 |                 |
|---------------------|----------|-------|-------------|------------------------------|-----------------|-----------------|
| N                   | Aumentos | Lv    | NI (int/mm) | $\sigma_r$ ( $\mu\text{m}$ ) | $\sigma_r$ (nm) | $\sigma_v$ (nm) |
| 18                  | 9000     | 0.014 | 1289.155    | 0.078                        | 77.570          | 38.785          |

#### 4.5.6 Dureza

En la Tabla 4.12 se muestran los valores de dureza medidos para el acero grado eutectoide, para dos condiciones de enfriamiento. Como era de esperarse, se obtuvo mayor dureza para el mayor flujo de aire y presión, debido a que producen una mayor rapidez de extracción de calor.

**Tabla 4.12** Dureza del acero eutectoide después del tratamiento térmico.

| 65 LPM 30 psi |      |      |     |
|---------------|------|------|-----|
| Medición      | HRA  | HRC  | HV  |
| 1             | 63.2 | 26   | 272 |
| 2             | 66.5 | 32   | 318 |
| 3             | 66.8 | 33   | 327 |
| 4             | 67.3 | 34   | 336 |
| Promedio      | 65.9 | 31.2 | 313 |

| 110 LPM 40 psi |      |      |     |
|----------------|------|------|-----|
| Medición       | HRA  | HRC  | HV  |
| 1              | 68.4 | 36   | 354 |
| 2              | 68.7 | 37   | 363 |
| 3              | 69.3 | 38   | 372 |
| 4              | 69.4 | 38   | 372 |
| Promedio       | 68.9 | 37.2 | 365 |

## 5 Conclusiones

- Mediante la comparación de las respuestas térmicas medidas con los datos reportados por Campbell *et al.* se concluye que se obtuvieron resultados que describen de manera correcta el enfriamiento del proceso Stelmor.
- Se obtuvieron valores de *flux* de calor de la superficie en la frontera mediante la solución al problema inverso de conducción de calor. El valor de  $r$  igual a 4 es el óptimo para estimar el *flux* de calor de la superficie para las condiciones experimentales, mediante la solución del problema inverso de conducción de calor.
- Se empleó una relación, en función de números adimensionales, que describiera el flujo de aire sobre una geometría cilíndrica, para estimar el valor de la velocidad del aire; los resultados son congruentes con los valores reportados en la literatura aunque es posible mejorar la estimación.
- Se calcularon los valores de rapidez de enfriamiento para la probeta con transformación para los dos flujos de aire estudiados. De estas curvas se identificaron las temperaturas de inicio y fin de las transformaciones austenita-ferrita y austenita-perlita.
- Las curvas de *flux* de calor de la superficie (adimensional) como función del valor complemento de la temperatura de la superficie (adimensional), para las probetas de acero inoxidable AISI 304, pueden ajustarse mediante una regresión de Weibull de 4 parámetros.

- Se construyó un conjunto de ecuaciones que permiten calcular cada uno de los parámetros de la ecuación de Weibull en función del flujo volumétrico de aire. Se recalcularon los valores de *flux* de calor de superficie, observándose que los valores calculados y recalculados son muy similares entre sí, por lo que el procedimiento utilizado puede considerarse como válido.
- El tamaño de grano de la ferrita (acero hipoeutectoide) y el espacio interlaminar de la perlita (acero eutectoide) disminuyeron al aumentar la intensidad del enfriamiento. En consecuencia, aumentó la dureza.

## **6 Recomendaciones y trabajo a futuro**

Se recomienda efectuar más experimentos con las probetas de acero al carbono, para complementar la información de la respuesta microestructural.

Como trabajo futuro, sería interesante medir la distribución de velocidad de la huella de aire, así como diseñar un dispositivo para obtener un flujo de aire lo más homogéneo posible.

## 7 Referencias bibliográficas

1. Roberts, W. L. Manufacturing engineering and materials processing. *Hot Rolling of Steel*. Edit. Marcel Dekker INC. New York. 1983. pp. 322 – 325.
2. <https://www.industry.siemens.com/datapool/industry/industrysolutions/metals/simetal/en/Morgan-Stelmor-Controlled-Cooling-Conveyor-System-en.pdf> (revisión: 3 de noviembre del 2014).
3. Campbell, P.C. *Application of microstructural engineering to the controlled cooling of steel wire rod*. Tesis de doctorado. University of British Columbia, Vancouver, Canada. 1989. pp. 1 – 7, 72 – 87.
4. Campbell, P.C., Hawbolt, E.B. y Brimacombe, J.K. *Microstructural engineering applied to the controlled cooling of steel wire rod. Part I Experimental Design and Heat Transfer*. Metallurgical Transactions A, Vol 22A, 1991, pp. 2769 – 2778.
5. Campbell, P.C., Hawbolt, E.B. y Brimacombe, J.K. *Microstructural engineering applied to the controlled cooling of steel wire rod. Part II Experimental Microstructural Evolution and Mechanical Properties*. Metallurgical Transactions A. Vol 22A. 1991. pp. 2779 – 2790.
6. Campbell, P.C., Hawbolt, E.B. y Brimacombe, J.K. *Microstructural engineering applied to the controlled cooling of steel wire rod. Part III Mathematical Model – Formulation and Predictions*. Metallurgical Transactions A, Vol 22A, 1991, pp. 2791 – 2805.
7. Heat Treating. En *Metals Handbook*, Vol. 4, 9ª ed. (1981). Ohio: ASM International. pp. 39- 58.

8. Apraiz, J. B. *Tratamientos térmicos de los aceros*. CIE Inversiones Editoriales Dossat, 8ª ed., España, 2000. pp. 97 – 100, 266 – 269.
9. Rajan, T.V. *Heat Treatment: Principles and Techniques*. PHI Learning Private limited. 2º ed. New Dehli. 2011. pp. 106 – 10.
10. Labib. H.F, Youssef, Y.M, Dashwood, R.J y Lee, P.D. *Instrumentation and simulation of industrial steel wire rod cooling line*. Materials Science and Technology. 2001. Vol 17. pp. 856 – 863.
11. Cengel, A. Y. *Transferencia de calor*. 2ª edición. México. Editorial Mc Graw Hill. 2000. pp. 380 -389.
12. Holman, J.P. *Heat transfer*. Tenth edition. Mc Graw Hill. New York. 2010. Pp. 293 – 303.
13. Beck J.V., Litkouhi B. y St. Clair Jr. C.R. Efficient Solution of the Nonlinear Inverse Heat Conduction Problem, *Numerical Heat Transfer*, 1982, Vol. 5. pp. 275-286.
14. <http://www.heatlab.cz/research/inverse-heat-conduction-problem> (revisión: 8 de julio del 2014).
15. Prasanna Kumar T.S., Hernández-Morales B. y Totten G.E. *Reference QuenchProbe – An alternative probe design for in-situ estimation of cooling rates, heat flux, and hardenability during immersion quenching of hardenable steels*. *Materials Performance and Characterization*, ASTM International, 2014, doi: 10.1520/MPC20140004.

16. Meekisho, L. Hernandez Morales, B, Tellez Martinez, J.S, Chen X. *Computer-aided cooling curve analysis using Winprobe*. Int. J. Materials and Product Technology, vol 24, 2005, Nos 1-4. pp. 155 -169
17. <http://www.gridmorelos.uaem.mx/~mcruz//cursos/mn/inttrapezoide.pdf> (revisión: 3 noviembre del 2014).
18. [http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d\\_156.html](http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html) (revisión: 3 noviembre del 2014).
19. <http://www.sigmaplot.com/> (revisión: 12 de febrero del 2015).
20. ASM Handbook. Metallographer`s Guide: Practices and Procedures for Iron and Steels. Vol 9 American Society for Metals, 2002.
21. [http://www.buehler-asia.com/brochure/apps\\_support-tech-notes\\_vol1\\_issue5.pdf](http://www.buehler-asia.com/brochure/apps_support-tech-notes_vol1_issue5.pdf) (revisión: 20 de marzo del 2015).
22. ASM Handbook. Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys. Vol 1 American Society for Metals, 2002.
23. Steven, C. C. *Métodos numéricos para ingenieros*. 5ª edición. México. Editorial Mc Graw Hill. 2006. pp. 720 – 732.
24. Walpole, E. R, Myers H. R., Myers, L.S. y Ye, K. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Edit. Pearson. 9ª edición. México 2012. pp. 246 – 251.
25. Vander Voort, George, F. *Metallography Principles and practice*. ASM international. Edit. Mc Graw Hill. New York. 2007. pp. 425, 436 – 459.

26. Atkins, M. *Atlas of CCT diagrams for engineering Steels. American Society for Metal. USA. 1980. pp. 28*
27. L` Institut de Recherches de la Sidèrurgie Francaise (ISRID). *Courbes de transformation des aciers de fabrication francaise. 1974. pp. 3, 10.*
28. Cruces, R. R. *Análisis inverso del flujo de calor en 2D para ensayos de temple de probetas a escala laboratorio.* Tesis de maestría. Programa Maestría en Ciencia e Ingeniería de Materiales, Enero 2015.

## Apéndice

### A 1 Tablas empleadas para calcular los números adimensionales de Prandtl, Reynolds y Nusselt

**Tabla A 1.1** Propiedades termofísicas del aire [18].

| Temperatura<br>- $t$ -<br>(°C) | Densidad<br>- $\rho$ -<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Capacidad<br>Calorífica<br>- $c_p$ -<br>(kJ/kg.K) | Conductividad<br>Térmica<br>- $k$ -<br>(W/m.K) | Vel.<br>Cinémática<br>- $\nu$ -<br>$\times 10^{-6}$ (m <sup>2</sup> /s) | Coef. de<br>expansión<br>- $\beta$ -<br>$\times 10^{-3}$ (1/K) | Número de<br>Prandtl<br>- $Pr$ - |
|--------------------------------|--|---|--|---|--|----------------------------------|
| 20                             | 1.205  | 1.005   | 0.0257   | 15.11   | 3.43   | 0.713                            |
| 40                             | 1.127  | 1.005   | 0.0271   | 16.97   | 3.20   | 0.711                            |
| 60                             | 1.067  | 1.009   | 0.0285   | 18.90   | 3.00   | 0.709                            |
| 80                             | 1.000  | 1.009   | 0.0299   | 20.94   | 2.83   | 0.708                            |
| 100                            | 0.946  | 1.009   | 0.0314   | 23.06   | 2.68   | 0.703                            |
| 120                            | 0.898  | 1.013   | 0.0328   | 25.23   | 2.55   | 0.70                             |
| 140                            | 0.854  | 1.013   | 0.0343   | 27.55   | 2.43   | 0.695                            |
| 160                            | 0.815  | 1.017   | 0.0358   | 29.85   | 2.32   | 0.69                             |
| 180                            | 0.779  | 1.022   | 0.0372   | 32.29   | 2.21   | 0.69                             |
| 200                            | 0.746  | 1.026   | 0.0386   | 34.63   | 2.11   | 0.685                            |
| 250                            | 0.675  | 1.034   | 0.0421   | 41.17   | 1.91   | 0.68                             |
| 300                            | 0.616  | 1.047   | 0.0454   | 47.85   | 1.75   | 0.68                             |
| 350                            | 0.566  | 1.055   | 0.0485   | 55.05   | 1.61   | 0.68                             |
| 400                            | 0.524  | 1.068   | 0.0515   | 62.53   | 1.49   | 0.68                             |

**Tabla A 1.2** Constantes para la ecuación 2.3 [12].

| Re                 | C      | n     |
|--------------------|--------|-------|
| 0.4 – 4            | 0.989  | 0.330 |
| 4 – 40             | 0.911  | 0.385 |
| 40 - 4000          | 0.683  | 0.466 |
| 4000 – 40, 000     | 0.193  | 0.618 |
| 40, 000 – 400, 000 | 0.0266 | 0.805 |

## A 2 Validación

Para la validación del análisis de los datos experimentales para la probeta de acero inoxidable, se consideró: estado no estacionario, sin gradientes térmicos, sin generación de calor y flujo de calor en dirección radial. La resolución, analítica y numérica, de la ecuación se presenta a continuación.

Método analítico:

A partir del balance de energía térmica:

$$\sum E + \sum G = \sum S + Ac \quad (\text{A 2.1})$$

Donde:

$$\sum E = 0$$

$$\sum G = 0$$

Por lo tanto la ecuación (1), queda de la siguiente forma

$$-\sum s = Ac$$

Como:

$$Ac = \rho C_p V_p \frac{dT}{dt}$$

$$-\sum s = -\tilde{h} A (T_\infty - T(t))$$

Entonces:

$$-\tilde{h} A (T_\infty - T(t)) = \rho C_p V_p \frac{dT}{dt} \quad (\text{A 2.2})$$

C.I  $T(t) = T_0 = 850 \text{ }^\circ\text{C}$

Resolviendo e integrando, se obtiene la solución de la ecuación A 2.2:

$$T(t) = (T_0 - T_\infty)e^{\left(-\frac{\tilde{h} A}{\rho C_p V_p}\right)} + T_\infty \quad (\text{A 2.3})$$

Método de Euler [22]

Se calculó también la respuesta térmica con el método de Euler, para un paso de tiempo  $h = 0.5$ . La solución del método es la siguiente:

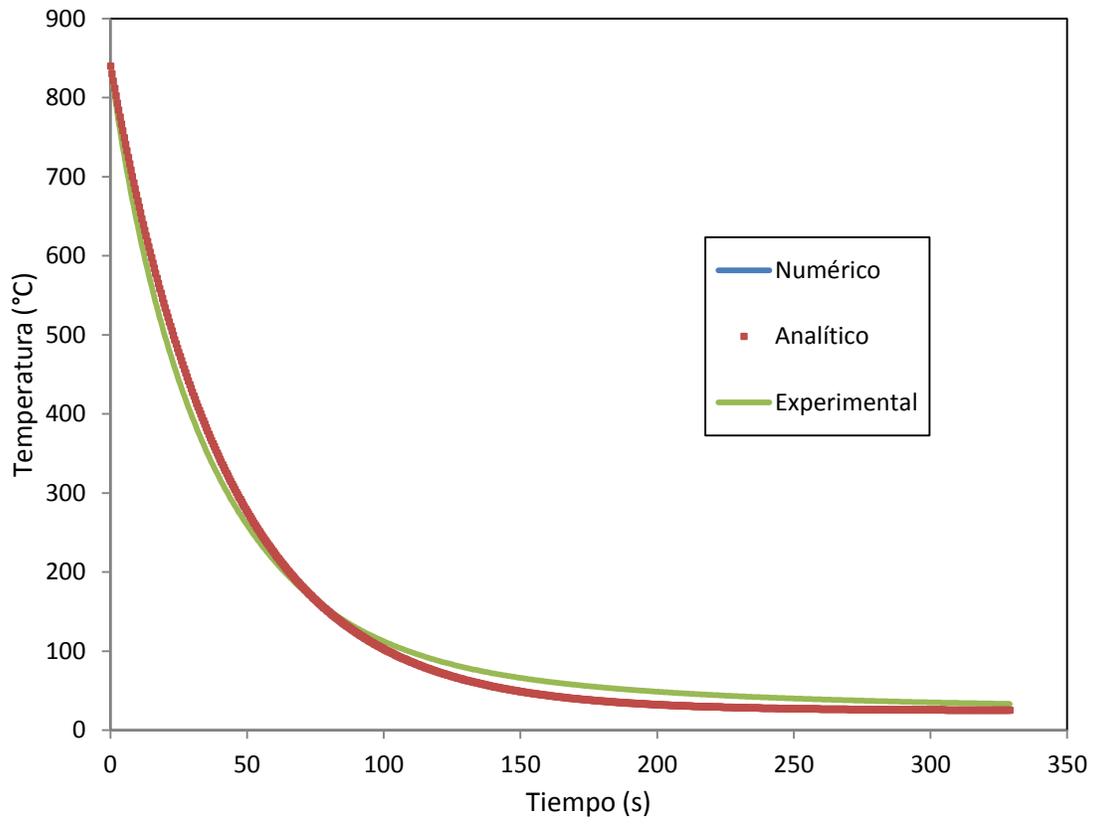
Se calcula la pendiente (A 2.4), y se sustituye el valor de temperatura para cada paso de tiempo.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{-\tilde{h} A (T_\infty - T(t))}{\rho C_p V_p} \quad (\text{A 2.4})$$

Finalmente se actualiza la temperatura para cada paso de tiempo y se vuelve a calcular la temperatura futura  $T_{(i+1)}$

$$T_{(i+1)} = T_0 + h \frac{dT}{dt} \quad (\text{A 2.5})$$

Como se puede observar en la Figura A 2.1, los valores calculados a partir de las ecuaciones del método numérico, analítico y los valores experimentales, son muy parecidas entre sí; por lo tanto se podría aseverar que los valores del coeficiente de transferencia de calor promedio (calculados) son correctos.



**Figura A 2.1** Respuestas térmicas calculadas (analítica y numéricamente) y determinadas experimentalmente.

**A 3 Cálculo del coeficiente de transferencia de calor:**

$$\bar{h} = - \frac{q_{estimado}}{(T_{\infty} - T_0)} \quad (A 3.1)$$

Donde:

$\bar{h}$  = coeficiente de transferencia de calor (W/m<sup>2</sup>K)

$q_{estimado}$  = flux de calor estimado (W/m<sup>2</sup>)

$T_0$  = temperatura de la superficie (°C)

$T_{\infty}$  = temperatura del fluido (°C)

Para la selección de las propiedades termofísicas del aire, se empleó la ecuación de la temperatura de película, la cual es la siguiente:

$$T_f = \frac{T_0 + T_{\infty}}{2} \quad (A 3.2)$$

Donde:

$T_f$  = Temperatura de película (°C)

Constantes empleadas:

| Constantes | Flujo (LPM) |       |
|------------|-------------|-------|
|            | 50 - 110    | 125   |
| <i>C</i>   | 0.683       | 0.193 |
| <i>n</i>   | 0.466       | 0.618 |

#### **A 4** *Determinación del tamaño de grano y del espacio interlaminar [24]*

Como parte de la determinación del tamaño de grano, debe conocerse la fracción volumen de la fase particular o constituyente microestructural. Una de las formas más simples para la estimación de la fracción del volumen consiste en observar la zona de interés y así estimar el área de fracción. Para esto se emplean patrones en donde se localizan los diferentes porcentajes de la fase o constituyente de interés. En la Figura A 4.1, se muestra el patrón empleado.

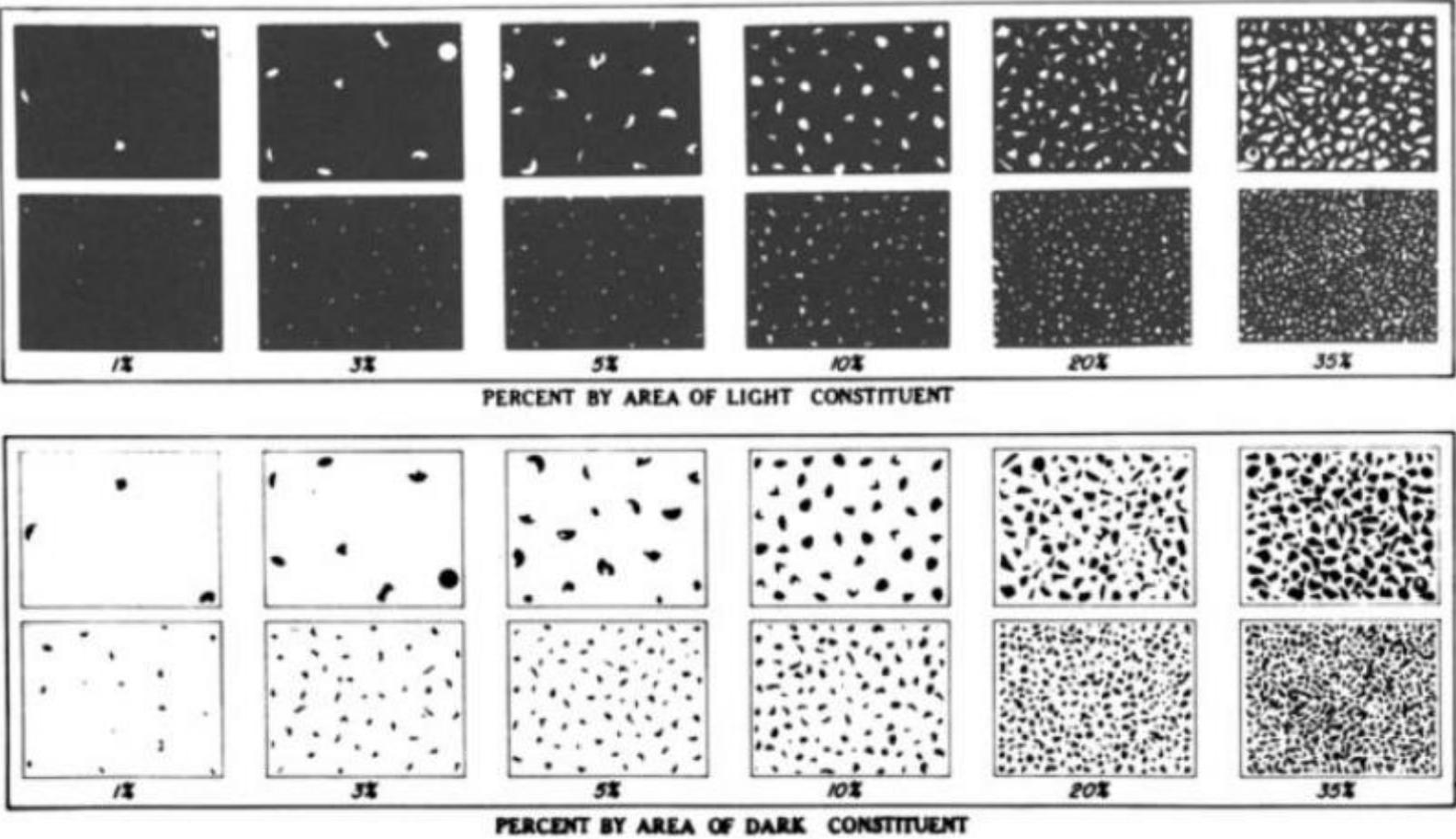
Para contar el número de granos se emplea el método para dos fases. Este método consiste en trazar tres círculos concéntricos, para mayor facilidad la longitud total se considera de 1 (considerar el perímetro del círculo de la misma magnitud que el aumento que se esté empleando). En la Figura A 4.2 se muestra un ejemplo de lo anteriormente mencionado.

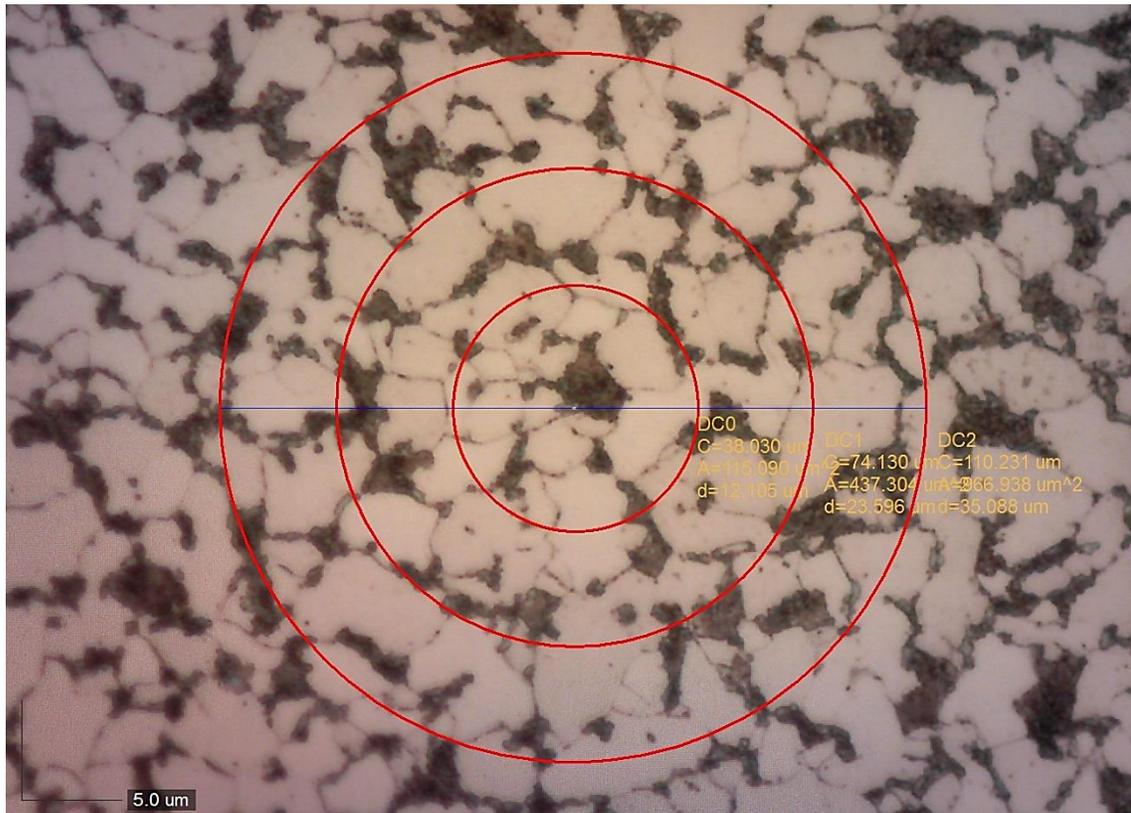
[21] Finalmente el tamaño de grano se calcula con las ecuaciones siguientes:

$$\overline{L_{3\alpha}} = \frac{V_V L_T}{N_\alpha} \quad (\text{A 4.1})$$

$$G [ASTM] = [-6.646 \log(L_{3\alpha})] - 3.298 \quad (\text{A 4.2})$$

Figura A 4.1 Patrones empleados para la estimación de la fracción de volumen





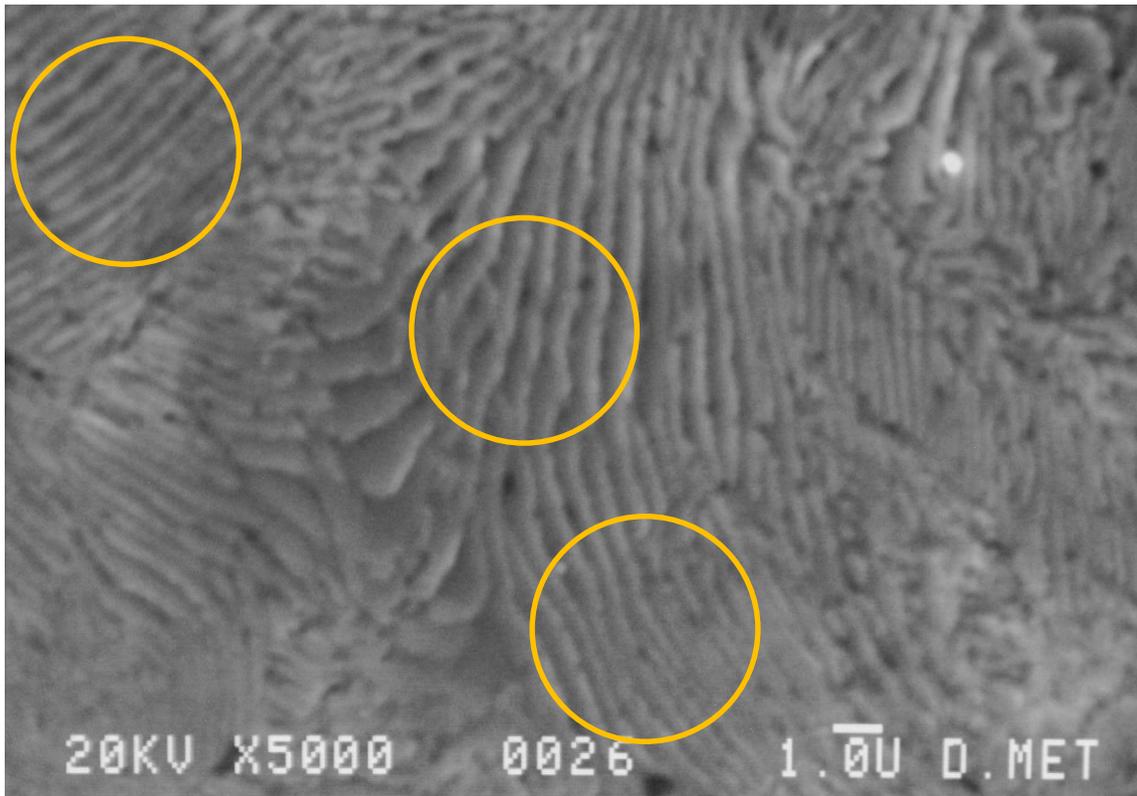
**Figura A 4.2** Micrografía de acero grado hipoeutectoide (500X).

### Espacio interlaminar

Una de las mejores aproximaciones para medir el espacio interlaminar consiste en trazar un círculo, cuyo diámetro sea 49.7 mm con un magnificación M. Posteriormente se cuentan el número de lamelas que sean interceptadas por la línea de prueba, N. Posteriormente se determina el valor de  $N_L$ , a partir del valor del número de lamelas y la longitud verdadera (relación entre el perímetro y la magnificación).

El inverso de este valor corresponde al promedio del espacio interlaminar  $\sigma$  y la mitad de este valor corresponde al promedio real del espacio interlaminar.

En la Figura A 4.3 se muestra un ejemplo de las zonas de interés.



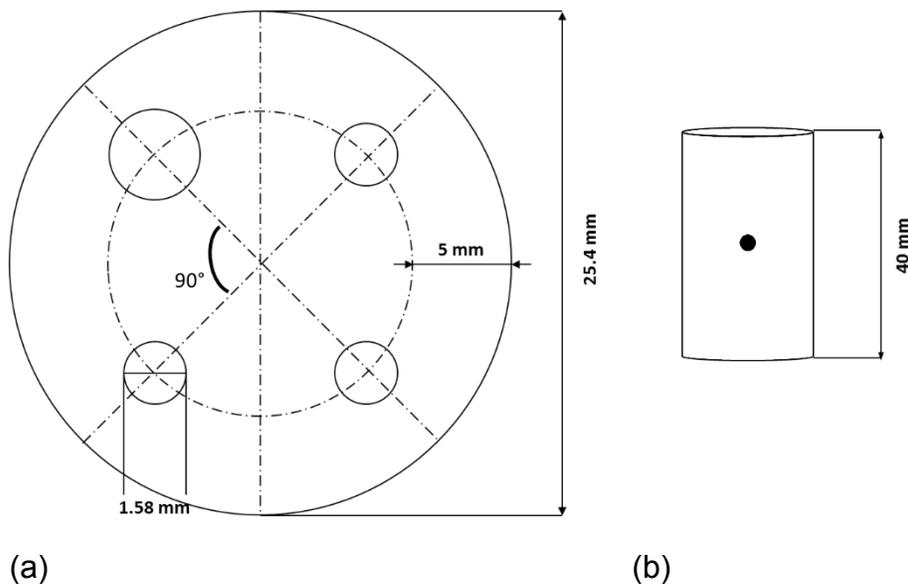
**Figura A 4. 3** Micrografía obtenida mediante MEB para el acero eutectoide. Se muestran tres círculos utilizados para estimar el espacio interlaminar.

## A 5 Calibración de termopares [27]

Este procedimiento tiene por objetivo establecer y definir un protocolo para realizar la calibración de termopares tipo K por comparación con un sensor de temperatura (*RTD*, por sus siglas en inglés) inmerso en un medio isotérmico de temperatura especificada.

### Geometría y dimensiones de la probeta

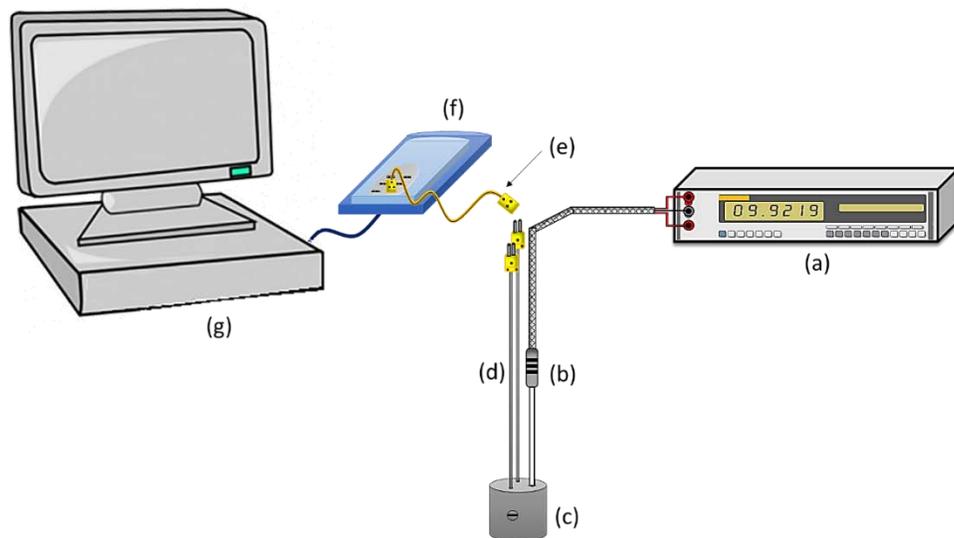
Las pruebas de calibración se realizaron con una probeta cilíndrica sólida de una longitud de 40 mm y un diámetro de 25.4 mm (1 in), fabricada con acero 4140. En una de las tapas tiene 4 barrenos equidistantes con una profundidad de 20 mm. En el centro de la cara lateral del cilindro se realizaron dos barrenos más para colocar dos puntos de sujeción (uno de cada lado) tal como se muestra en la Figura A 5.1.



**Figura A 5.1** Esquema de la probeta cilíndrica: (a) vista superior de la distribución de todos los barrenos para termopares, (b) vista lateral de los barrenos para colocar los puntos de sujeción [26].

## Equipo experimental

El equipo experimental, mostrado esquemáticamente en la Figura A 5.2, está compuesto de un calibrador portátil (*Yokogawa CA51/71 Handy CAL Calibrator*) al cual se conecta un detector de temperatura resistivo (*Resistance Temperature Detector*) PT100 de 3 hilos. Este sensor se coloca en la probeta al igual que los termopares (Tipo K). Para realizar las lecturas de temperatura de los termopares se empleó un sistema de adquisición de datos que consiste de una computadora y una adquirente de datos (marca Pico Technology modelo TC-08).



**Figura A 5.2** Representación esquemática del equipo experimental empleado para la calibración de termopares: (a) calibrador CA51/71, (b) sensor de temperatura PT100, (c) probeta, (d) termopares tipo K, (e) extensiones para termopar, (f) adquirente de temperatura y (g) computadora [26].

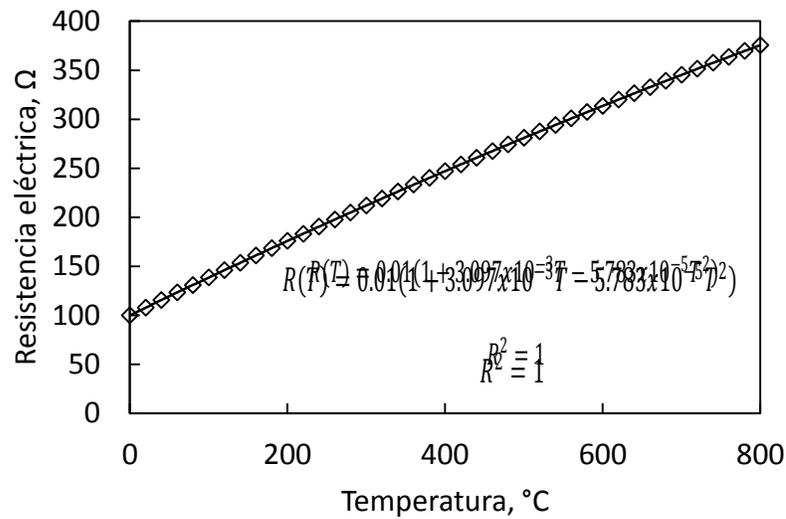
## Procedimiento experimental

A continuación se describe el procedimiento que se siguió para la realización de cada uno de los experimentos de calibración:

1. Se coloca el *RTD* y los termopares en los barrenos de la probeta revisando que correspondan a la profundidad especificada etiquetándolos debidamente para identificarlos durante los experimentos.
2. Se ajusta la probeta en el centro de la cámara de calentamiento del horno de resistencia ajustando la altura con un par de alambres sujetos a los barrenos laterales con tornillos.
3. Antes de comenzar la calibración, se conectan los equipos (computadora, calibrador y adquisidor) a un regulador de corriente para mantener un voltaje constante durante la prueba. Posteriormente se hacen las conexiones del *RTD* a las terminales del calibrador y los termopares con sus extensiones a los puertos del adquisidor.
4. El calentamiento del horno se hace de forma escalonada en intervalos de 50°C a partir de la temperatura ambiente y hasta 500°C para evitar daños en el *RTD*. Una vez alcanzada la temperatura a la cual se realiza la medición, es necesario dejar un tiempo de estabilización adecuado para tomar la lectura.

## Resultados

Un dispositivo termo-resistivo Pt100 consiste en un alambre de platino que a 0 °C tiene una resistencia de 100  $\Omega$  y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica. Este incremento de la resistencia no es lineal pero si creciente y característico del platino de tal forma que mediante tablas es posible encontrar la temperatura exacta a la que corresponde. En el gráfico de la Figura A 5.3 se muestra una la curva de resistencia en función de la temperatura para un *RTD* de platino de 100 W.



**Figura A 5.3** Gráfico de resistencia en función de la temperatura para un RTD de Platino de 100  $\Omega$  [26].

Los valores típicos de resistencia nominal para RTDs de platino de película delgada son 100  $\Omega$  y 1000  $\Omega$ . La relación entre resistencia y temperatura cumple con una ecuación cuadrática de la forma:

$$R(T) = R_0(1 + aT - bT^2)$$

Donde:

$R_0$ , es la resistencia nominal del RTD.

$a, b$ , son constantes usadas para escalar el RTD que se conocen como coeficientes Callendar-Van Dusen y se encuentran bajo la Norma DIN 43760.

## **Análisis estadístico**

Para determinar si existe diferencia significativa entre las mediciones de temperatura del *RTD* respecto de las lecturas de temperatura de los termopares se realiza una prueba t para muestras apareadas con nivel de confianza del 95%. Este tipo de prueba se utiliza cuando las muestras son dependientes; esto es, cuando se trata de una única muestra que ha sido evaluada dos veces (muestras repetidas) como es el caso. En la tabla A 5.1 se reportan los resultados obtenidos del análisis estadístico.

La hipótesis que se pone a prueba es:

*La diferencia de medias toma un determinado valor, cero si se asumen iguales.*

La hipótesis nula:

*No existe diferencia significativa entre la diferencia de medias, es decir no existe diferencia entre las mediciones de temperatura del sensor termo-resistivo y las mediciones de los termopares.*

La hipótesis alterna:

*Existe diferencia significativa entre las medias, es decir existe diferencia entre las mediciones de temperatura del sensor termo-resistivo y las mediciones de los termopares.*

**Tabla A 5.1** Valores estadísticos obtenidos de la prueba t para muestras apareadas.

| Medición | Valor estadístico t |
|----------|---------------------|
| T1       | 0.018               |
| T2       | 0.401               |
| T3       | 1.089               |
| T4       | 1.342               |
| T5       | 1.732               |
| T6       | 1.595               |
| T7       | 1.685               |
| T8       | 1.564               |
| T9       | 1.684               |
| T10      | 1.710               |

De una tabla de distribución t para un nivel de confianza del 95 % se obtiene una t crítica para una muestra de n valores (n=10) el valor correspondiente es:

$$t_{crítica} = 2.23$$

Dado que todos los valores reportados en la Tabla A 5.1 se encuentran por debajo del valor crítico de la tabla de distribución t la hipótesis nula se acepta, indicando que no existe diferencia significativa entre las lecturas de temperatura del RTD y las mediciones de temperatura registradas por los termopares con un nivel de confianza del 95% en un intervalo de (25-500°C). Por tanto, los cuatro termopares se consideran calibrados para ese rango de temperatura.

*a*