

de  $R^2$  de 0.99, lo cual indica que el método es confiable. Una vez realizado esto se procedió a calcular las temperaturas en la interfase a las distancias medidas en el análisis metalográfico.

Una vez calculadas las temperaturas en ambos lados de la interfase, la temperatura en la interfase se calculó por diferencia aritmética simple.

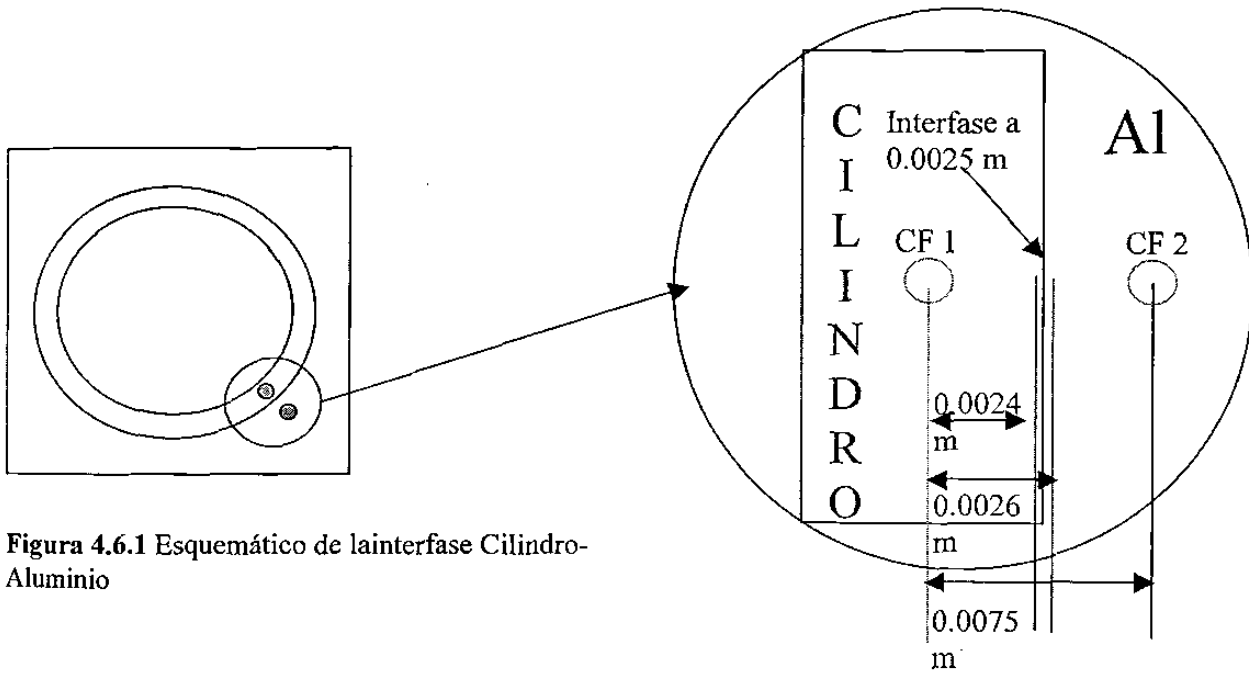


Figura 4.6.1 Esquemático de la interfase Cilindro-Aluminio

# CAPITULO 5

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Introducción

En este capítulo se presentan y discuten los datos obtenidos de las pruebas de calentamiento, la obtención de los polinomios que describen este calentamiento, la solución a la ecuación en el estado transitorio y su aplicación para el cálculo de la caída de temperatura en la interfase formada por la camisa y el cuerpo de aluminio.

### 5.2 Curvas de Temperatura vs. Tiempo y Ajuste de Polinomios

A continuación se presentan dos de las curvas de Temperatura vs. Tiempo obtenidas de las pruebas para la parte alta, muestra K (Cilindro con película de carbón, condición de superficie normal, parte alta) tanto en el cilindro como en el aluminio, así como el ajuste al polinomio de 7° orden utilizado en la ecuación de estado transitorio. Cabe aclarar que se analizaron varias posibles funciones que obtenían buena correlación con los datos experimentales, pero su complejidad fue superior al beneficio que presentaban, por lo cual fueron descartadas. En este capítulo se presenta el método utilizado para calcular las temperaturas a lo largo de los dos materiales. En el Apéndice B se muestran las veinticuatro curvas que componen el estudio.

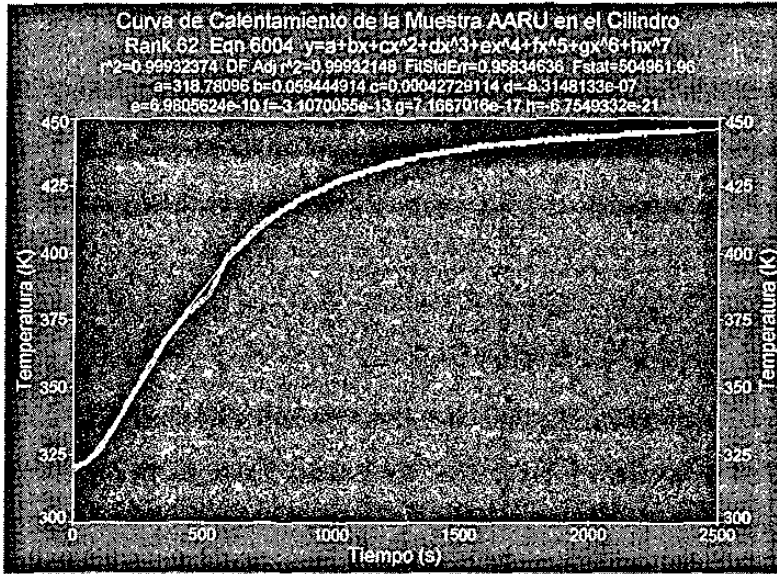


Figura 5.2.1 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra K parte alta en el cilindro

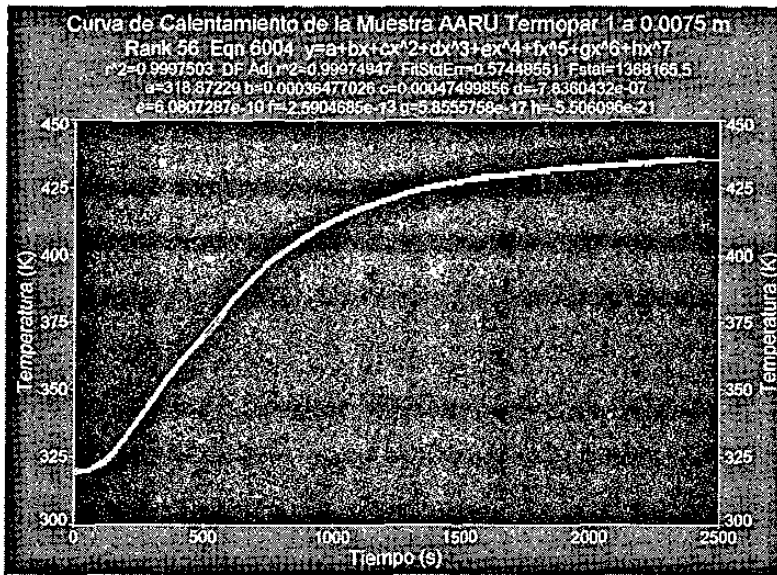


Figura 5.2.2 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra K parte alta en el aluminio

### 5.3 Solución de la Ecuación en Estado Transitorio

El primer paso es dividir la solución  $T(x,t)$  en  $T1(x,t)$  mas  $T2(x,t)$  dadas por las siguientes ecuaciones diferenciales parciales:

$$\frac{\partial T1}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T1}{\partial x^2} \quad [5.3.1]$$

Condición inicial.  $T1(x,0) = F(x)$

Condición frontera 1.  $T1(0,t) = 0$

Condición frontera 2.  $T1(L,0) = 0$

$$\frac{\partial T2}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T2}{\partial x^2} \quad [5.3.2]$$

Condición inicial.  $T2(x,0) = 0$

Condición Frontera 1.  $T2(0,t) = P(t)$

Condición Frontera 2.  $T1(L,0) = Q(t)$

Para resolver la ecuación [5.3.1], se utilizara el método de separación de variables. La solución propuesta es la ecuación [5.3.3], el cambio de variables esta dado por las ecuaciones[5.3.4] y [5.3.5]:

$$T1(x,t) = X(x)T(t) \quad [5.3.3]$$

$$T1_t(x) = X(x)T'(t) \quad [5.3.4]$$

$$T1_{xx}(x) = X''(x)T(t) \quad [5.3.5]$$

Al sustituir las ecuaciones [5.3.4] y [5.3.5] en la [5.3.1] ésta quedará escrita de la siguiente manera.

$$X(x)T'(t) = \alpha X''(x)T(t) \quad [5.3.6]$$

$$\frac{T'(t)}{\alpha T(t)} = \frac{X''(x)}{X(x)} = -\lambda^2 \quad [5.3.7]$$

La solución para  $T(t)$  será:

$$T(t) = C1 \exp(-\lambda^2 \alpha t) \quad [5.3.7]$$

La solución para  $X(x)$  será:

$$X(x) = C2 \cos(\lambda x) + C3 \sin(\lambda x) \quad [5.3.8]$$

Por lo tanto la solución de la ecuación [5.3.1] es la multiplicación de las ecuaciones [5.3.7] y [5.3.8].

$$T1(x,t) = \exp(-\lambda^2 \alpha t) [A \cos(\lambda x) + B \sin(\lambda x)] \quad [5.3.9]$$

Para conocer los coeficientes  $A$  y  $B$  de la ecuación [5.3.9], se aplica primeramente la condición frontera 1, resultando que  $A = 0$ . Por lo tanto la ecuación [5.3.9] se convertirá en:

$$T1(x,t) = B \exp(-\lambda^2 \alpha t) \sin(\lambda x) \quad [5.3.10]$$

La segunda condición frontera implica ahora que

$$T1(L,t) = B \exp(-\lambda^2 \alpha t) \sin(\lambda L) = 0 \quad [5.3.11]$$

De modo que  $B = 0$ , y  $T1(x,t) = 0$ . Para no obtener una solución trivial de  $T1(x,t)$ , se debe de tener  $B \neq 0$  y entonces la ecuación [5.3.11] se satisface cuando  $\sin(\lambda L) = 0$ . Esto implica que  $\lambda L = n\pi$ , de modo que  $\lambda = n\pi/L$ , para  $n = 1, 2, 3, \dots$

Por consiguiente la nueva solución para  $T_1(x,t)$  es:

$$T_1(x,t) = B_n \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \exp\left(-\alpha\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t\right) \quad [5.3.12]$$

Esto es usualmente una secuencia infinita  $T_{11}, T_{12}, T_{13} \dots T_n$  estas ecuaciones satisfacen las condiciones frontera 1 y 2. Sin embargo, aplicando el principio de superposición, la función que se obtiene es una serie infinita

$$T_{1n}(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \exp\left(-\alpha\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t\right) \quad [5.3.13]$$

Ahora solamente falta determinar los coeficientes  $B_n$  y por lo tanto se aplica la condición inicial en la ecuación [5.3.13], se desprende que:

$$B_n = \frac{2}{L} \int_0^L F(x) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{L}x\right) dx \quad [5.3.14]$$

Concluyendo que la solución para la ecuación [5.3.1] está dada por la serie infinita:

$$T_{1n}(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left( \int_0^L F(x) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{L}x\right) dx \right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \exp\left(-\alpha\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t\right) \quad [5.3.15]$$

Para resolver la ecuación [5.3.2], se utilizará el método de cambio de variable dependiente y el de separación de variables. La solución propuesta es la ecuación [5.3.16], el cambio de variables está dado por las ecuaciones [5.3.17] y [5.3.18]:

$$T_2(x,t) = W(x,t) + Y(x) \quad [5.3.16]$$

$$T_{2t}(x,t) = W_t(x,t) \quad [5.3.17]$$

$$T_{2xx}(x,t) = W_{xx}(x,t) + Y_{xx}(x) \quad [5.3.18]$$

Al sustituir las ecuaciones [5.3.17] y [5.3.18] en [5.3.2], se obtiene que:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \alpha \left[ \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} \right] \quad [5.3.19]$$

Para que exista solución se requiere que  $\alpha \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} = 0$  y por lo tanto:

$$Y(x) = C3x + C4 \quad [5.3.20]$$

Para conocer los valores de los coeficientes C3 y C4, se requiere hacer homogéneas las condiciones frontera 1 y 2 de la ecuación [5.3.2]. Obteniendo de este modo que:

$$Y(x,t) = P(t) \left[ 1 - \frac{x}{L} \right] + Q(t) \frac{x}{L} \quad [5.3.21]$$

La nueva solución será la ecuación [5.3.22], el cambio de variables está dado por las ecuaciones [5.3.23] y [5.3.24]:

$$T2(x,t) = W(x,t) + Y(x,t) \quad [5.3.22]$$

$$T2_t(x,t) = W_t(x,t) + Y_t(x,t) \quad [5.3.23]$$

$$T2_{xx}(x,t) = W_{xx}(x,t) + Y_{xx}(x) \quad [5.3.24]$$

Al sustituir las ecuaciones [4.3.23] y [4.3.24] en la ecuación [5.3.22] se obtiene que

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \frac{\partial Y}{\partial t} \quad [5.3.25]$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = P'(t) \left[ 1 - \frac{x}{L} \right] + Q'(t) \frac{x}{L} = -F(x,t) \quad [5.3.26]$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + F(x,t) \quad [5.3.27]$$

La nueva solución será:

$$W_n(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n(t)\phi_n(t) \quad [5.3.28]$$

Para encontrar los valores de  $A_n(t)$  y  $\phi_n(t)$ , hay que considerar que la ecuación diferencial parcial es homogénea

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \quad [5.3.29]$$

$$W_n(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} D_n \text{sen}\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \exp\left(-\alpha\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t\right) \quad [5.3.30]$$

Igualando las ecuaciones [5.3.28] y [5.3.30] se obtiene que:

$$A_n(t) = D_n \exp\left(-\alpha\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t\right) \quad [5.3.31]$$

$$\phi_n(t) = \text{sen}\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \quad [5.3.32]$$

$$W_n(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n(t)\text{sen}\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \quad [5.3.33]$$

donde

$$D_n = \frac{2}{L} \int_0^L F_2(x)\text{sen}\left(\frac{n\pi}{L}x\right)dx \quad [5.3.34]$$

La ecuación [5.3.33], se sustituye en la ecuación [5.3.27], de modo que  $A_n(t)$  será



$$A_n(t) = \exp\left(-\alpha\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t\right) \left[ \int_0^t F_n(t) \exp\left(\alpha\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t\right) dt + \frac{2}{L} \int_0^L F_2(x) \text{sen}\left(\frac{n\pi}{L} x\right) dx \right] \quad [5.3.35]$$

donde

$$F_n(t) = \frac{2}{L} \int_0^L F(x,t) \text{sen}\left(\frac{n\pi}{L} x\right) dx$$

La solución para la ecuación [5.3.2] será:

$$\begin{aligned} T2_n(x,t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\alpha\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t\right) \left[ \int_0^t F_n(t) \exp\left(\alpha\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t\right) dt + \frac{2}{L} \int_0^L F_2(x) \text{sen}\left(\frac{n\pi}{L} x\right) dx \right] \text{sen}\left(\frac{n\pi}{L} x\right) \\ &+ P(t) \left[ 1 - \frac{x}{L} \right] + Q(t) \frac{x}{L} \end{aligned} \quad [5.3.36]$$

La solución para T(x,t) será T1(x,t) mas T2(x,t)

$$\begin{aligned} T_n(x,t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \left( \int_0^L F(x) \text{sen}\left(\frac{n\pi}{L} x\right) dx \right) \text{sen}\left(\frac{n\pi}{L} x\right) \exp\left(-\alpha\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t\right) \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\alpha\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t\right) \left[ \int_0^t F_n(t) \exp\left(\alpha\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t\right) dt + \frac{2}{L} \int_0^L F_2(x) \text{sen}\left(\frac{n\pi}{L} x\right) dx \right] \text{sen}\left(\frac{n\pi}{L} x\right) \\ &+ P(t) \left[ 1 - \frac{x}{L} \right] + Q(t) \frac{x}{L} \end{aligned} \quad [5.3.37]$$

En esta ecuación se sustituyen los polinomios calculados como condiciones frontera para cada una de las muestras analizadas, obteniendo así las temperaturas en ambos materiales a todo tiempo y distancia, interpolando a la frontera para calcular su correspondiente caída. El proceso completo se describe a continuación.

## 5.4 Determinación de la Temperatura en la Interfase

Primeramente, en el caso de las camisas de aluminio, se midieron físicamente las muestras para introducir el valor real de la interfase a la ecuación de estado transitorio. En el caso de las camisas de hierro se encontró que la interfase es constante a un promedio de 100  $\mu\text{m}$ . En la Tabla 5.4.1 se muestran los valores obtenidos del análisis en las muestras preparadas con camisas Silitec™.

Muestra	Adherencia Metalúrgica	Espacio Promedio / distancia a Interfase ( $\mu\text{m}$ )
<b>K</b>		
U	No	130
M	No	60
L	No	35
<b>M</b>		
U	No	48
M	No	48
L	Si	32
<b>L</b>		
U	Si	20
M	Si	Sin espacio/2555
L	Si	Sin espacio/2682
<b>J</b>		
U	Si	Sin espacio/2669
M	Si	Sin espacio/2683
L	Si	Sin espacio/2384

Tabla 5.4.1 Distancia promedio de Interfase

Otro parámetro requerido por la ecuación son los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) para ambos materiales. Los valores utilizados son de  $7.311 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  para el aluminio [15] y  $43.1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  para la camisa [11].

Con estos datos se alimenta al programa en Maple IV (El programa completo puede ser revisado en el Apéndice C) y se obtienen los perfiles de temperatura entre los dos primeros termopares. A continuación se muestran los resultados de caída de temperatura en la interfase para cada una de las muestras analizadas, así como una tabla de resumen para las mismas. Se incluye también la correlación entre los valores calculados por el método y los valores experimentales de la prueba J parte alta (camisa en condición normal parte alta) a manera de comprobación.

Este método probó ser preciso cuando los materiales involucrados tienen coeficientes de conductividad térmica similares; que no es el caso entre camisas de hierro y aluminio, por lo tanto se desarrolló el método que se describe a continuación para analizar el caso de las piezas vaciadas con camisas de hierro gris.

La caída de temperatura en la interfase hierro-aluminio se calculó suponiendo que el flujo de calor es unidireccional.

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (\text{Ec. 5.4.1})$$

donde  $q$  es el flujo de calor,  $k$  la conductividad térmica y  $dT/dx$  es el gradiente térmico dentro de la pieza. En el caso presente, si  $q$  es constante, se tiene que:

$$k_{Al} \left. \frac{dT}{dx} \right|_{Al} = k_{Fe} \left. \frac{dT}{dx} \right|_{Fe} \quad (\text{Ec. 5.4.2})$$

donde los subíndices  $Al$  y  $Fe$  se refieren a la aleación de aluminio y al hierro gris.

La Ec. (5.4.1) es válida sólo cuando se ha alcanzado el estado estacionario, en este caso, el cambio en temperatura en función del tiempo es cero. El método empleado para determinar la temperatura en el estado estacionario ( $T_s$ ) se obtiene al graficar el valor instantáneo de la tasa de calentamiento ( $dT/dt$ ) en función de la temperatura y extrapolando hasta el valor cero en la tasa. El valor numérico de  $dT/dt$  se obtiene al ajustar un número non de datos de la curva de calentamiento a un polinomio de segundo grado y derivarlo en el punto intermedio.

En la Fig. 5.4.1 se muestra la evolución térmica registrada por los termopares introducidos a las distancias que se enlistan a mano derecha de la gráfica (se considera que el cero es la superficie interior de la camisa). Con estos datos se procedió a la determinación de los valores de temperatura en el estado estacionario, tal y como se ejemplifica en la Fig. 5.4.2 para el termopar localizado en el interior de la camisa.

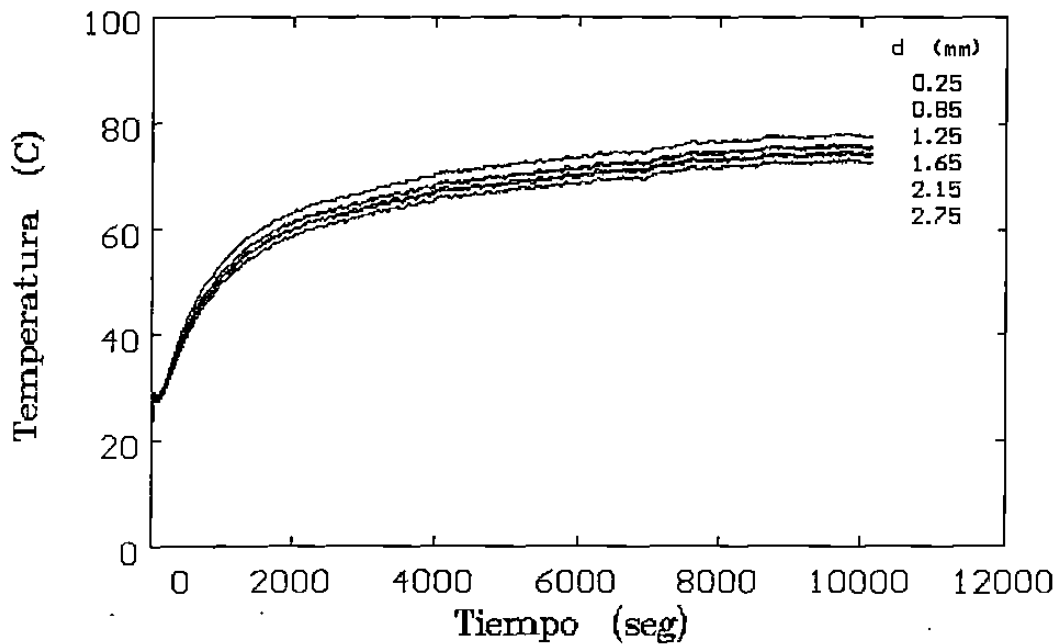
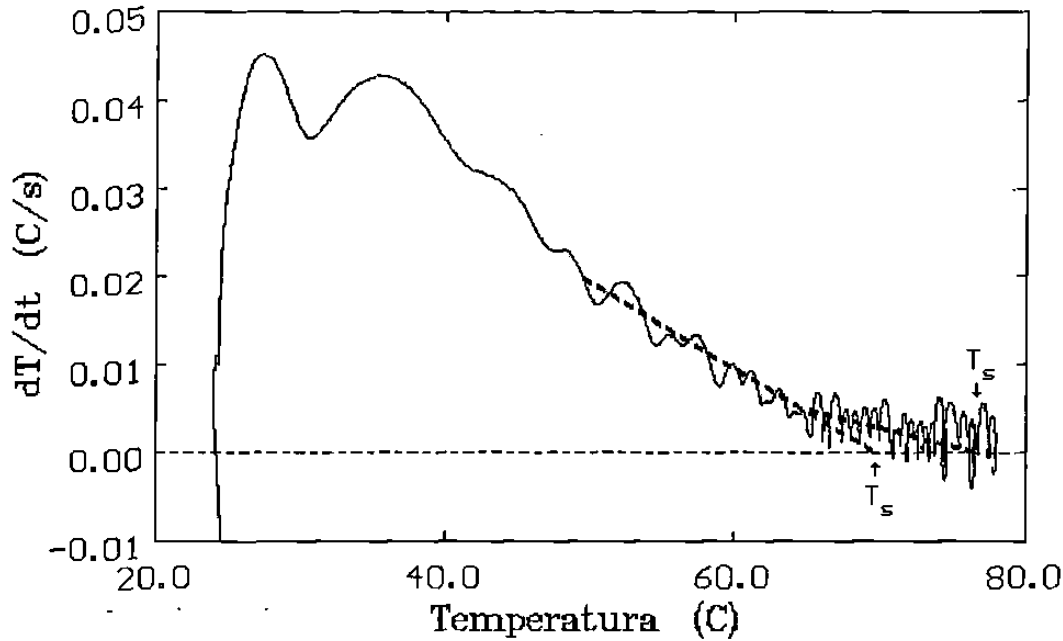


Fig. 5.4.1 Evolución térmica obtenida durante la ejecución de una de las pruebas..



ig. 5.4.2 Obtención de dos temperaturas en el estacionario ( $T_s$ ) para el termopar colocado en el interior de la camisa durante una de las pruebas.

La diferencia en temperatura en la interfase se obtiene al ajustar los valores determinados en la aleación de aluminio a una línea recta, que se extrapola a la interfase. La posición correspondiente al otro lado de la interfase se obtiene al hacer pasar una línea recta por el valor obtenido en el cilindro (las dimensiones del mismo sólo permitieron la inserción de un termopar), con una pendiente correspondiente al cociente de la conductividad térmica del hierro sobre la del aluminio. En el presente trabajo se emplearon los valores de 46 y 120 W/mK para el hierro y el aluminio respectivamente. La Fig. 5.4.3 muestra, como ejemplo, el ajuste realizado con los datos obtenidos a partir de los datos de la figura 5.4.1.

En la Fig. 5.4.4 se grafica la variación de la diferencia de temperatura en la interfase en función de la temperatura registrada por el termopar inserto en la camisa. En este diagrama se presentan los datos obtenidos en las diferentes pruebas, así como los de una serie de estudios preliminares llevados a cabo y se puede apreciar la tendencia a que la diferencia en temperatura en la interfase se reduce conforme se incrementa la temperatura de la camisa, sin importar mucho las condiciones de proceso empleadas en la preparación de este componente

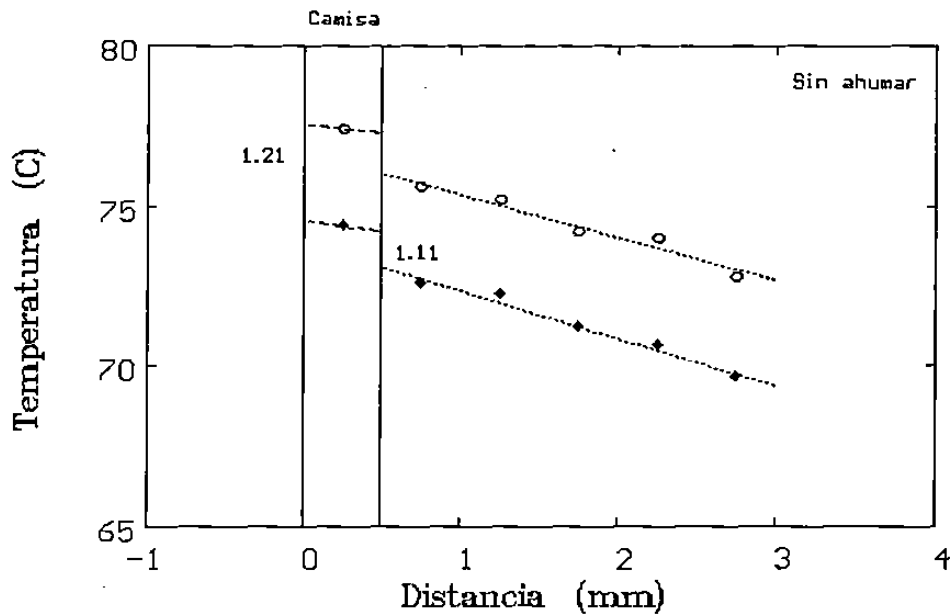


Figura 5.4.3 Determinación de la diferencia en temperatura en la interfase entre la aleación de aluminio del monoblock y la camisa de hierro en condición normal (sin recubrimientos)

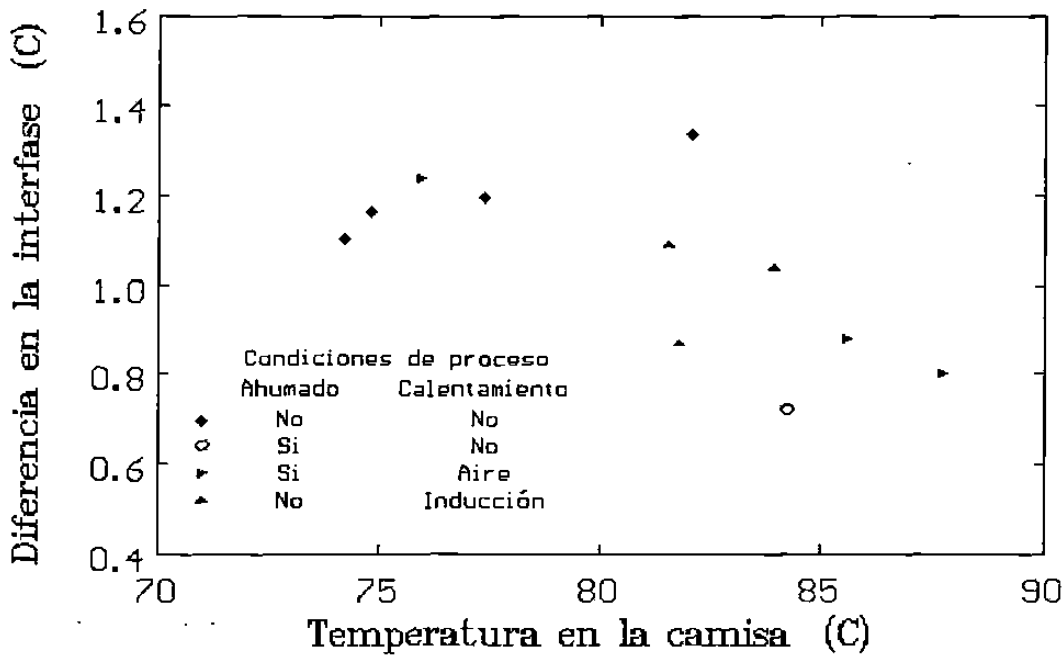
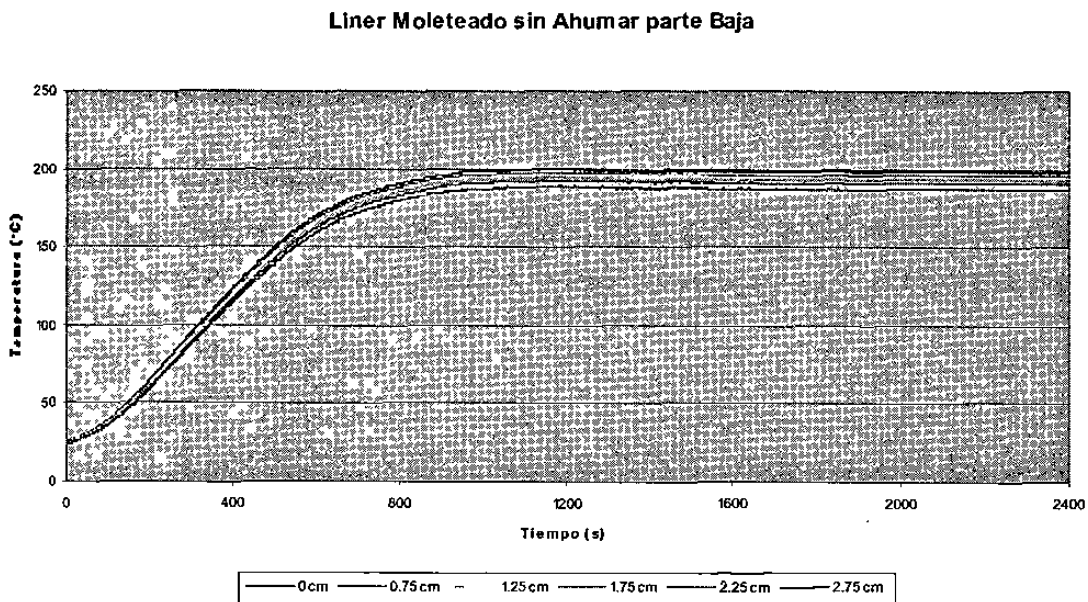


Fig. 5.4.4 Variación de la caída de temperatura en la interfase en función de la temperatura registrada en la camisa.

0150044

Se confirma, entre otras cosas, la existencia de una barrera térmica en la interfase de la camisa de hierro gris y el cuerpo de aluminio del monobloque. Además, no se encuentra una influencia significativa de las condiciones de proceso sobre la caída de temperatura. Se encuentra que ésta depende de la temperatura que alcanza la interfase.

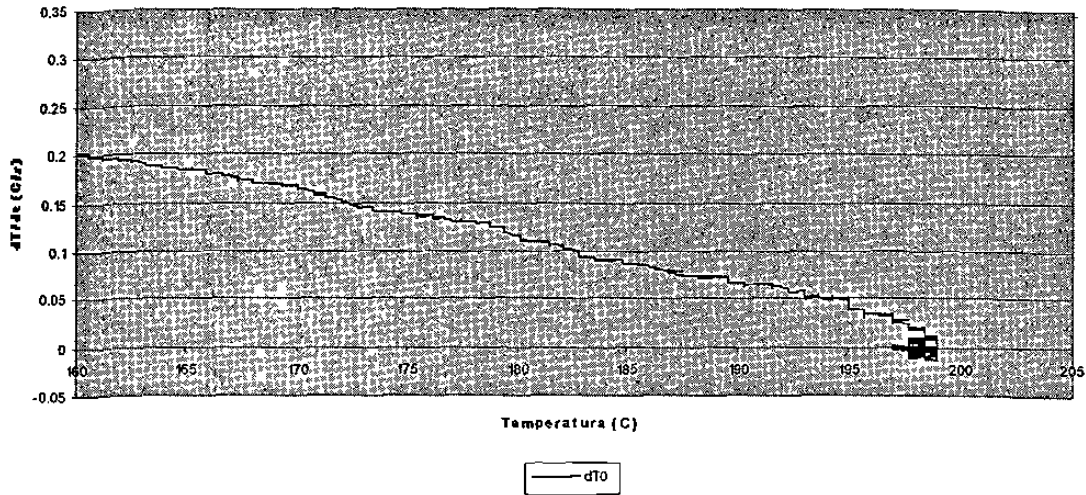
Un proceso similar se siguió para el caso de las piezas vaciadas con las camisas de aluminio que no presentaron una liga metalúrgica. En la figura 5.4.5, se presenta la evolución térmica de una de las pruebas con camisas de aluminio.



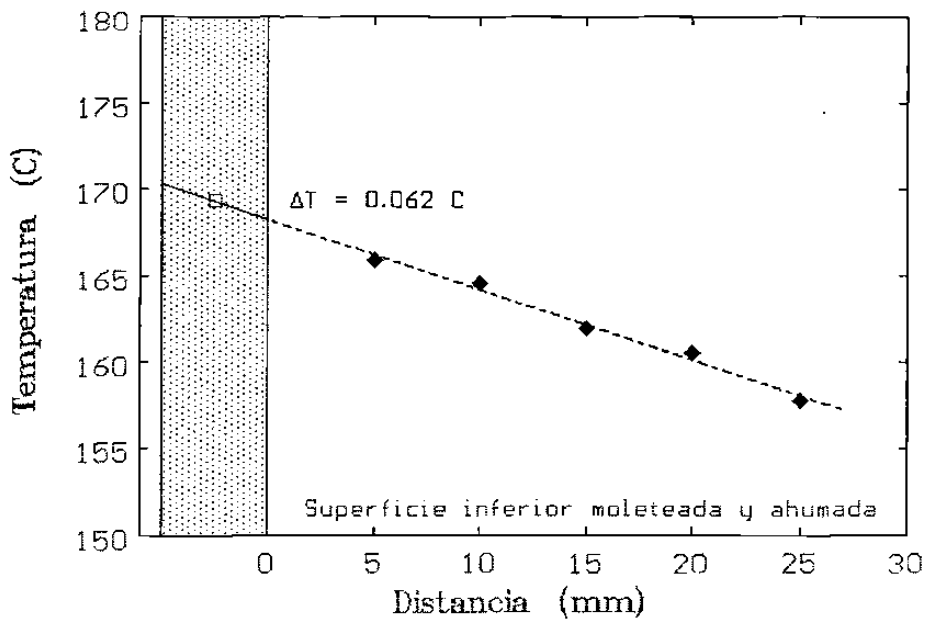
**Fig. 5.4.5** Evolución térmica obtenida durante la ejecución de una de las pruebas

De la misma manera, se calcula la temperatura del estacionario para las temperaturas en cada uno de los puntos medidos. En la figura 5.4.6 se muestra la obtención de este estacionario para el termopar instalado en la camisa de aluminio de la muestra de la Figura 5.4.5. Una vez obtenidas las temperaturas de los estacionarios, se procede a calcular una vez más la caída de temperatura en la interfase. En la figura 5.4.7 se presenta, la caída de temperatura registrada por una de las muestras.

**Derivada de la Temperatura con Respecto al Tiempo Vs Temperatura.  
Muestra Moleteada sin Ahumar para el Termopar en el Cilindro (X=0m)**



**Fig. 5.4.6** Obtención de dos temperaturas en el estacionario ( $T_s$ ) para el termopar colocado en el interior de la camisa durante una de las pruebas.



**Figura 5.4.7** Determinación de la diferencia en temperatura en la interfase entre la aleación de aluminio del monoblock y la camisa de hierro en condición normal (sin recubrimientos)



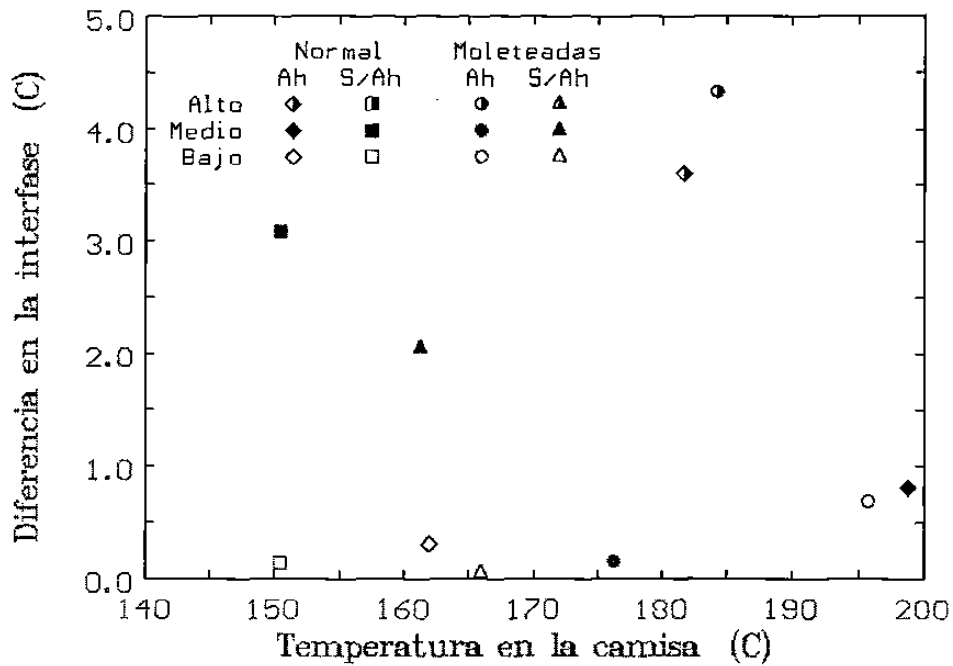


Fig. 5.4.8 Variación de la caída de temperatura en la interfase en función de la temperatura registrada en las camisas de aluminio.

Es evidente que las partes bajas en cada una de las muestras analizadas presentan la menor diferencia de temperatura en la interfase, esto es, la barrera térmica se minimiza como resultado de un contacto más íntimo entre los materiales. Es entonces de vital importancia el lograr condiciones de proceso que promuevan esta característica.

## CAPITULO 6

### CONCLUSIONES

1. Se confirma la existencia de una barrera térmica en la interfase de los materiales de las camisas y el cuerpo del monobloque. La magnitud de la misma esta relacionada directamente a la temperatura que alcanza la interfase.
2. El método de análisis de Beck, probó ser efectivo sí y sólo sí, los materiales involucrados tienen conductividades térmicas similares.
3. En el caso de las camisas de aluminio, el proceso de vaciado tiene una gran influencia en la formación de la interfase entre los materiales, siendo la temperatura y la velocidad de vaciado las más importantes de las variables involucradas.
4. Cuando se usan camisas de aluminio y se logra la formación de una liga metalúrgica completa, se obtienen los valores más bajos de diferencia de temperatura en la interfase.
5. En el caso de camisas de hierro, la barrera de aire formada entre los dos materiales es constante a lo largo de la camisa. Para las camisas de aluminio, la interfase depende de la temperatura de vaciado, por este motivo la caída de temperatura se incrementa hacia la parte alta de la misma.
6. La preparación de la superficie, en todos los casos, no tiene un efecto aparente en la magnitud de la diferencia de temperatura de la interfase.

## RECOMENDACIONES

El presente estudio exploratorio, deja claro la existencia de una correlación directa entre la temperatura que alcanza la interfase y la magnitud de la barrera térmica en la misma. Un estudio que sería recomendable realizar consiste en seleccionar un conjunto de variables de proceso que dieran una buena liga metalúrgica, en el caso de las camisas de aluminio, y vaciar muestras; posteriormente generar un flujo de calor direccional variando la temperatura de la camisa y midiendo la resultante caída en la interfase por medio del método inverso de Beck. Por último, tratar de establecer una ecuación que describa esta caída, para así poder utilizar estos valores para diseñar un motor en función de la temperatura máxima soportable en las cámaras de combustión y la velocidad de extracción del mismo por medio del sistema de enfriamiento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Frank King *"El Aluminio y sus Aleaciones"* México, 1992, pp (81-94, 105-106, 111, 131, 133, 190-191)
- 2 *ASM Handbook, Vol 2, 10<sup>a</sup> Edition, ASM International*. E.U 1992, pg (3-5, 21-30, 59, 74-75, 123, 135)
- 3 Donna L. Zalensas, *"Aluminum Casting Technology"*, AFS, E.U 1993, pp(56-84, 89-91, 94-99, 101-104,147,167-168,170, 177,186, 280)
- 4 L. Mondolfo *"Aluminum Alloys: Structure and Properties"*, Butterworth, Londres (1986)
- 5 Cesar Dimas *"Efecto de la Temperatura de solubilización sobre las propiedades mecánicas en una aleación Al-Si tipo A319.0"*, Tesis Maestría, U.A.N.L, México, 1999, pp(48-49, 51, 53-55).
- 6 Van Lancker, M., *"Metallurgy of Aluminium Alloys"*, Chapman & Hall, Londres, 1967.
- 7 *"Encyclopedia of Science and Technology "*, Mc Graw Hill, E.U, 1971,Vol. 1, pg (326-334)
- 8 I. J. Polmear *"Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals"*, Reino Unido, 1992. pg (102, 125).
- 9 Dietrich G. Altenpohl *"Aluminium: Technology, Applications, and Environment A Profile of a Modern Metal"*. TMS, Alemania,1998, pp(95-96, 279, 357-362)
- 10 <http://www.vwvortex.com/news>
- 11 P. Stocker, F. Rückert, K. Hummert, *"The new Aluminium Silicon Technology for Die Cast Aluminium Crankcases"* MTZ, Motortechnische Zeitschrift, Alemania 1997 pg (58, 502-508).
- 12 C. Peytor-Chansac, K. Hummert, *"High Performance Aluminium for Applications in Internal Combustion Engines"* Simposium organizado por la sociedad de ingenieros del automóvil de París, Francia, Nov. 1993.

- 13 R. Pürling, D. Zebrowski "*Spray Deposition Plant for Al-Alloys Technical Aspects*". Proceedings of 1992 Powder Metallurgy.
  
- 14 *Enciclopedia Encarta, Microsoft, 2003*
  
- 15 J P Holman, "*Heat Transfer*" 7th Ed in SI Units, McGraw-Hill Book Company, 1992.
  
- 16 J.H. Kuo, F.L. Hsu and W.S. Hwang, "*Effects of Mold Coating and Mold Material on the Heat Transfer Coefficient at the Casting/Mold Interface for Permanent Mold Casting of A356 Aluminum Alloy*". AFS Proceedings 2001.
  
- 17 Basil L. Coates, Stavros A. Argyropoulos and Blas Melissari "*The Effects of Surface Roughness on the Heat Transfer Metal-Mold Interface*". Light Metals 2002.
  
- 18 E. Velasco, J. Talamantes, R. Colás "*Heat Transfer Coefficients Associated with the Solidification of an Aluminum Alloy*". Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Non-Ferrous Processing and Technology, 10-12 March 1997, St. Louis Missouri.
  
- 19 T. Nguyen, D. Gunasegram, L. Luo, R. Esdaile, "*Heat Transfer in Permanent Mold Casting*". Proceedings from Materials Solutions Conference 1998 on Aluminum Casting Technology.
  
- 20 R. Colás, A González, "*Conductividad Térmica entre Camisas y Monoblock de Aluminio*". Comunicación Privada, Octubre 1998.
  
- 21 V. P. Páramo, R. Colás, "*Microstructural Effects on Thermal Conductivity in a Heat Treatable Cast Aluminum Alloy*".
  
- 22 B. Hernández Morales, R. Colás, "*On the Characterization of the Heat Transfer Boundary Condition During Quenching*".
  
- 23 M.N. Ozisik and H. Orlande, "*Experimental and Theoretical Investigation of Air Gap Formation and Interface Resistance During Metal Casting in Metal Molds*".
  
- 24 Kai Ho and R. Phelke, "*Metal – Mold Interfacial Heat Transfer*". Metallurgical Transactions B, Volume 16B, September 1985, pg 585.

- 25 Kai Ho and R. Phelke, "*Transient Methods for Determination of Metal – Mold Interfacial Heat Transfer*". AFS Transactions, Vol 91, 1983.
- 26 S. DAS and A.J. Paul, "*Determination of Interfacial Heat Transfer Coefficients in Casting and Quenching Using a Solution Technique for Inverse Problems Based on the Boundary Element Method*". Metallurgical Transactions B, Volume 24B, December 1993, pg 1077.
- 27 Y. Nishida, W. Droste and S. Engler, "*The Air – Gap Formation Process at the Casting – Mold Interface and the Heat Transfer Mechanism through the Gap*". Metallurgical Transactions B, Volume 17B, December 1986, pg 833.
- 28 John B. Heywood, "*Internal Combustion Engine Fundamentals*". McGraw-Hill Book Company, 1989 pg 668-671.
- 29 K S Chana, T S Wilson, P Bryanston-Cross, M Burnett, T Jones, "*High Bandwidth Heat Transfer Measurements in a Internal Combustion Engine under Low Load and Motored Conditions*". Heat Transfer and Cooling in Propulsion and Power Systems, Norway 7-11 May 2001.
- 30 Takashi Suzuki, Yasufumi Oguri and Masatake Yoshida, "*Heat Transfer in the Internal Combustion Engines*", SAE 2000 World Congress, Detroit Michigan, March 6-9, 2000.
- 31 T S Wilson, P J Bryanston-Cross, K S Chana, P Dunkley, T V Jones, P Hannah, "*High Bandwidth Heat Transfer and Optical Measurements in a Instrumented Spark Ignition Internal Combustion Engine*", SAE 2002 World Congress, Detroit, Michigan, March 4-7, 2002.
- 32 Se-Jong Yoo, Eung-Seo Kim, "*A Study of In-Cylinder Local Heat Transfer Characteristics of a Spark Ignition Engine*", Seventh International Pacific Conference and Exposition on Automotive Engineering, Phoenix, Arizona, November 15-19, 19993.

## Índice de Tablas y Figuras

	<b>Pág.</b>
Tabla 2.1.1 Propiedades atómicas y nucleares del aluminio puro. <sup>[1]</sup>	5
Tabla 2.1.2 Propiedades físicas del aluminio puro. <sup>[1]</sup>	5
Figura 2.3.1 Puerta con barras para impactos, de aluminio <sup>[9]</sup>	9
Figura 2.3.2 Ilustración de las partes de una suspensión de BMW serie 5 completamente ensamblado, incluyendo el eje trasero de aluminio <sup>[9]</sup>	10
Figura 2.3.3 Carrocería fabricada de perfiles de aluminio <sup>[10]</sup>	10
Figura 2.4.1 Método Ospray <sup>TM</sup> <sup>[13]</sup>	13
Figura 2.4.2 a) Micro estructura aleación SAE 390, vaciada por gravedad. 100X. b) Misma micro estructura a 500X. <sup>[11]</sup>	14
Figura 2.4.3 a) Micro-estructura con distribución homogénea de partículas de silicio, vaciada por el método Ospray <sup>R</sup> . 100X. b) Misma microestructura a 500X <sup>[11]</sup>	14
Figura 2.4.4. Formación de lingotes <sup>[13]</sup>	15
Figura 2.4.5. Equipo de ondas ultrasónicas para medir la liga metálica <sup>[11]</sup>	16
Figura 2.4.6 Representación de liga metálica por colores, donde el color rojo representa mala liga metálica y azul buena liga metálica <sup>[11]</sup> .	16

Figura 2.4.7 a) Topografía de la camisa vista con microscopio electrónico de barrido después de exponerse a NaOH, vista en ángulo alto (a). ( b) Misma topografía vista en ángulo bajo <sup>[11]</sup>	17
Figura 2.4.8 Monobloque de aluminio con camisas de aluminio <sup>[11]</sup>	17
Figura 3.2.1 Placa infinita sujeta a un enfriamiento súbito de sus superficies <sup>[15]</sup>	23
Tabla 4.1.1. Pruebas realizadas con camisas de hierro.	30
Figura 4.2.1 Dibujo Esquemático del molde empleado.	31
Tabla 4.3.1. Pruebas realizadas con camisas de Aluminio.	32
Figura 4.3.1 Modelo de madera utilizado en la fabricación de los moldes	32
Figura 4.3.2 Secuencia de fabricación del molde de arena.	33
Figura 4.3.3 Ubicación de filtro cerámico	33
Figura 4.3.4 Molde listo para vaciado	33
Figura 4.3.5 Aplicación del negro de humo	34
Figura 4.4.1 Secciones utilizadas para la medición y distribución de taladros	34
Figura 4.4.2 Secciones listas para el ensayo y colocación de termopares	35
Figura 4.4.2 Secciones listas para el ensayo y colocación de termopares	35

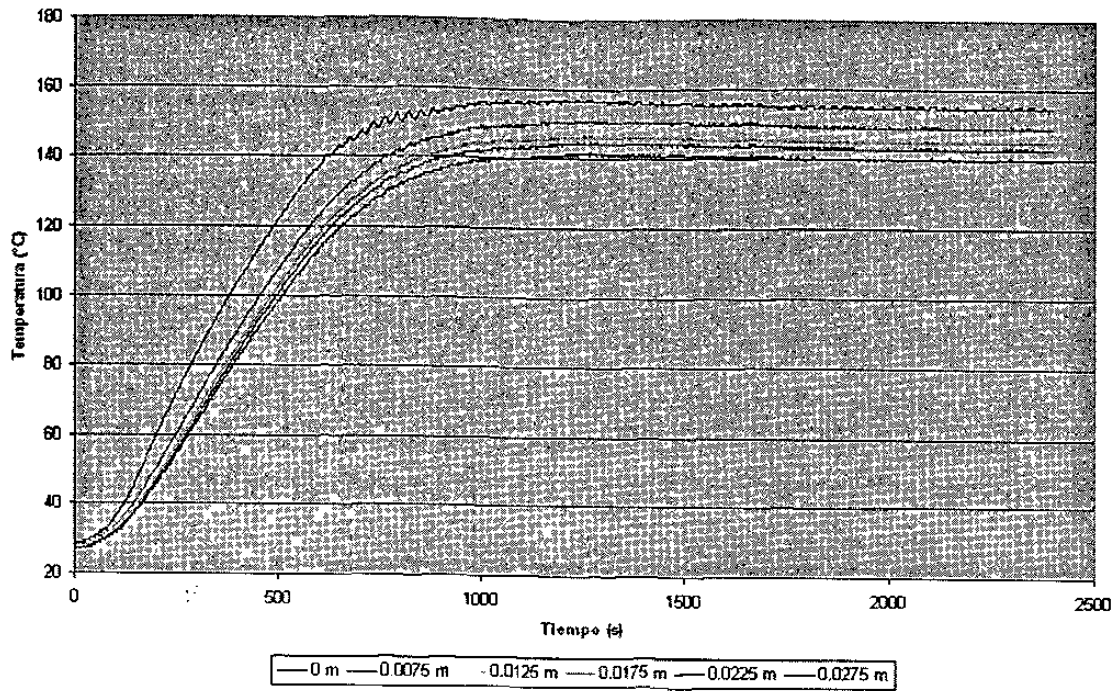


Figura 4.4.3 Arreglo general del experimento.	35
Figura 4.4.4 Control de Temperatura.	35
Figura 4.4.5 Sistema de adquisición de datos.	36
Figura 4.4.6 Resistencia eléctrica.	36
Figura 4.5.1 Interfase muestra J Parte baja.	37
Figura 4.5.2 Interfase muestra J Parte media.	37
Figura 4.5.3 Interfase muestra K parte alta.	37
Figura 4.5.4 Interfase muestra K parte baja.	37
Figura 4.6.1 Esquemático de la interfase Cilindro-Aluminio	38
Figura 5.2.1 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra K parte alta en la camisa.	40
Figura 5.2.2 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra K parte alta en el aluminio.	40
Tabla 5.4.1 Distancias promedio de Interfase.	47
Fig. 5.4.1 Evolución térmica obtenida durante la ejecución de una de las pruebas.	49
Fig. 5.4.2 Obtención de dos temperaturas en el estacionario ( $T_s$ )	

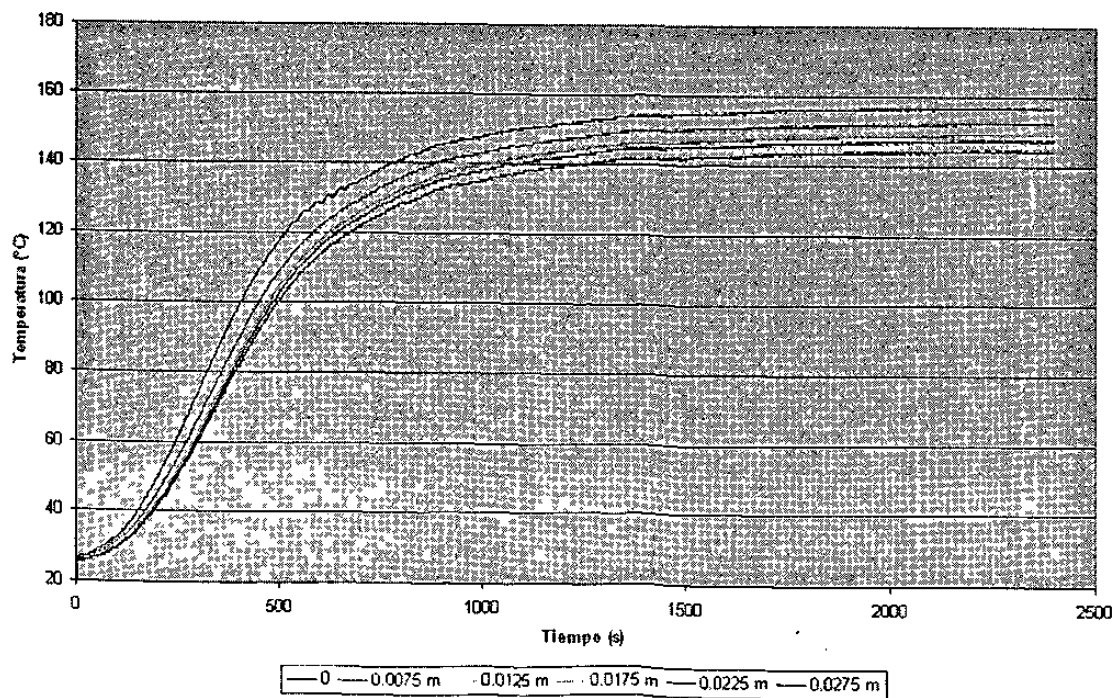
para el termopar colocado en el interior de la camisa durante una de las pruebas.	50
Figura 5.4.3 Determinación de la diferencia en temperatura en la interfase entre la aleación de aluminio del monoblock y la camisa de hierro en condición normal (sin recubrimientos)	51
Fig. 5.4.4 Variación de la caída de temperatura en la interfase en función de la temperatura registrada en la camisa.	52
Fig. 5.4.5 Evolución térmica obtenida durante la ejecución de una de las pruebas.	52
Fig. 5.4.6 Obtención de dos temperaturas en el estacionario (Ts) para el termopar colocado en el interior de la camisa durante una de las pruebas.	53
Figura 5.4.7 Determinación de la diferencia en temperatura en la interfase entre la aleación de aluminio del monoblock y la camisa de hierro en condición normal (sin recubrimientos).	54
Fig. 5.4.8 Variación de la caída de temperatura en la interfase en función de la temperatura registrada en las camisas de aluminio.	55

# Apéndice A: Curvas de Calentamiento para las Muestras con Camisas de Aluminio

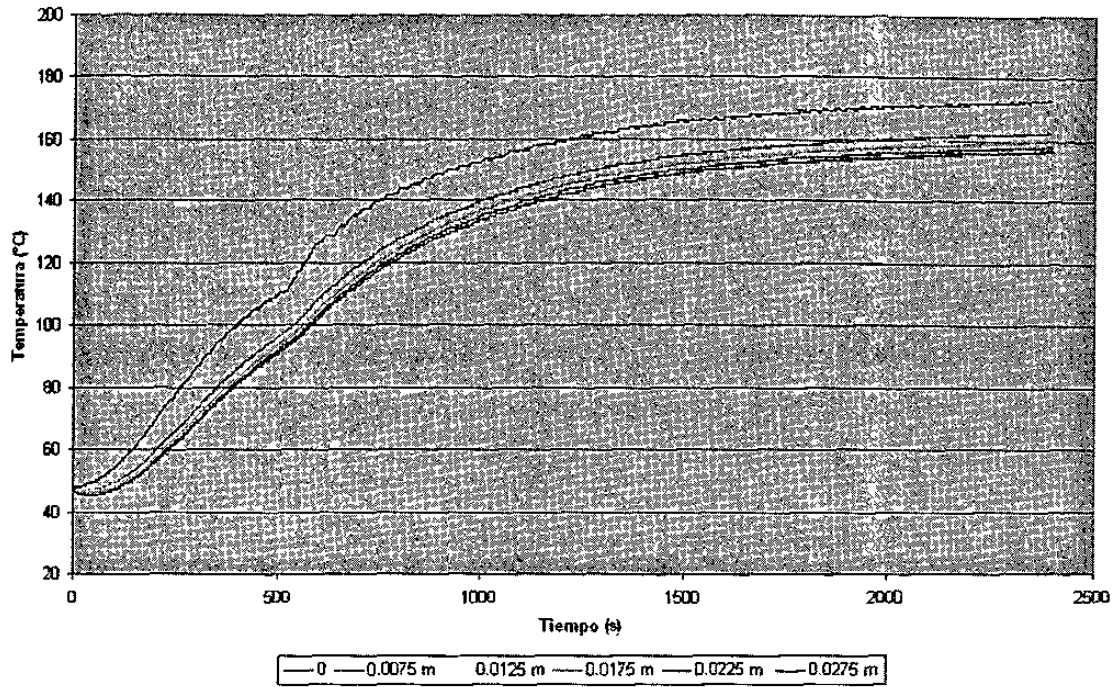
## Perfil de Calentamiento de la Muestra K Parte Baja



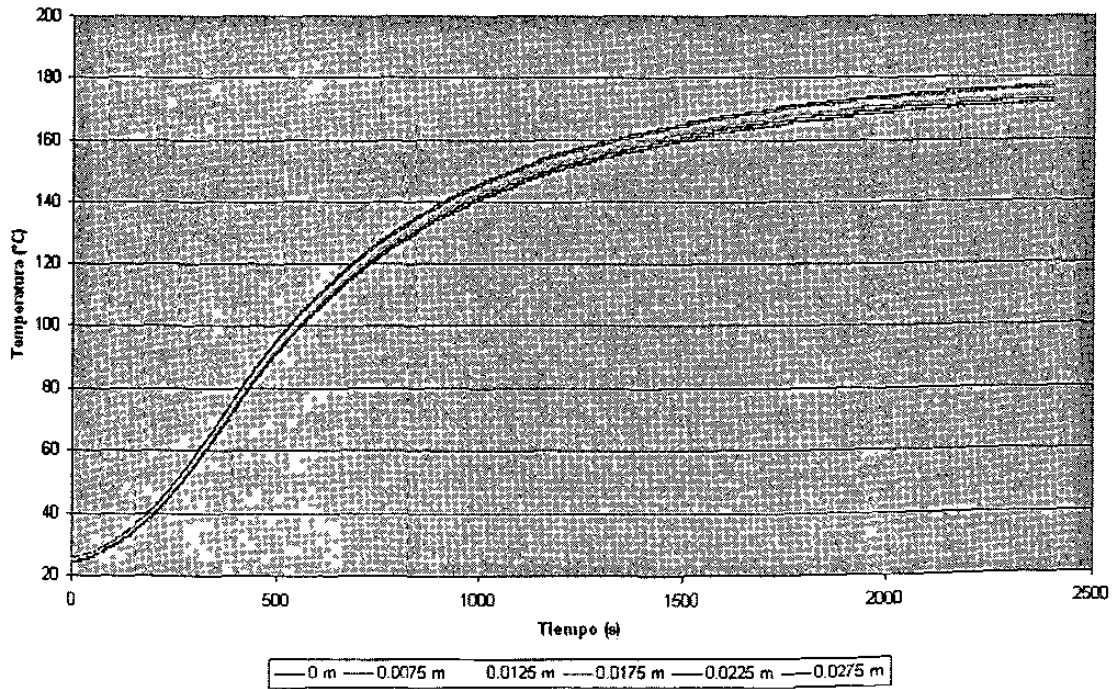
## Perfil de Calentamiento de la Muestra K Parte Media



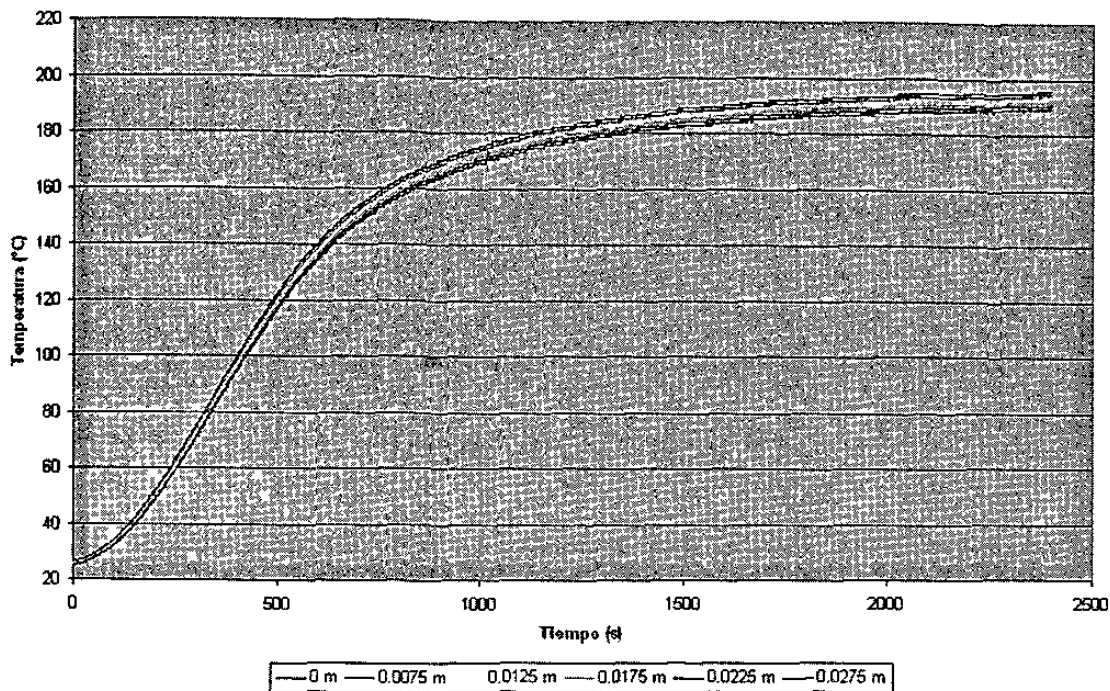
Perfil de Calentamiento de la Muestra K Parte Alta



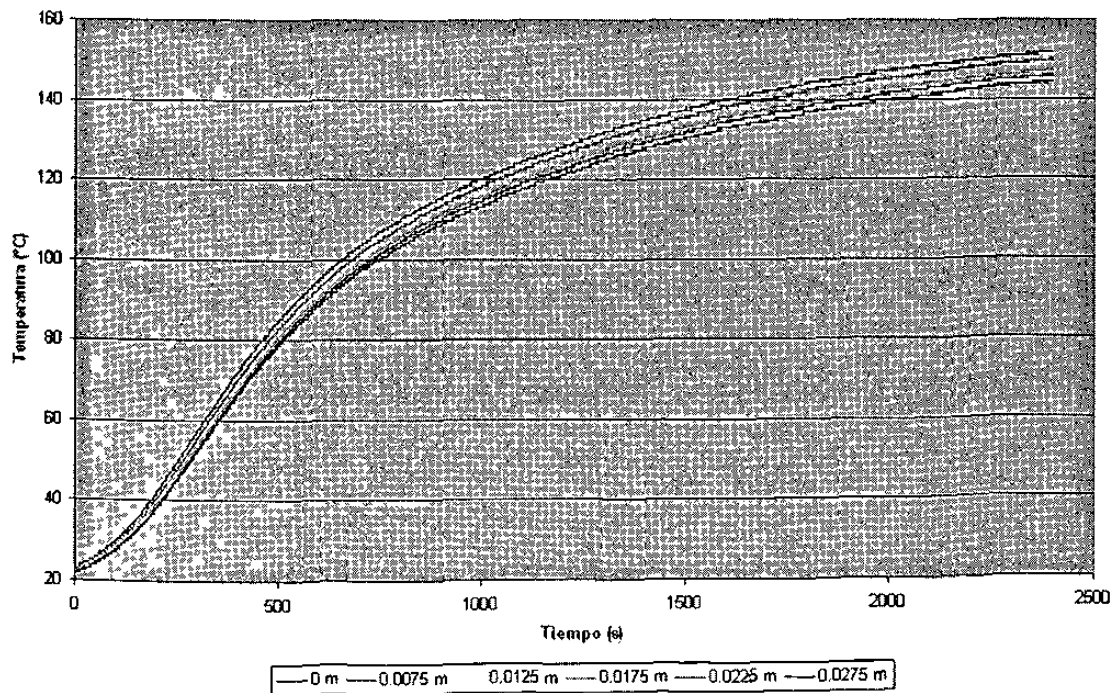
Perfil de Calentamiento de la Muestra J Parte Baja



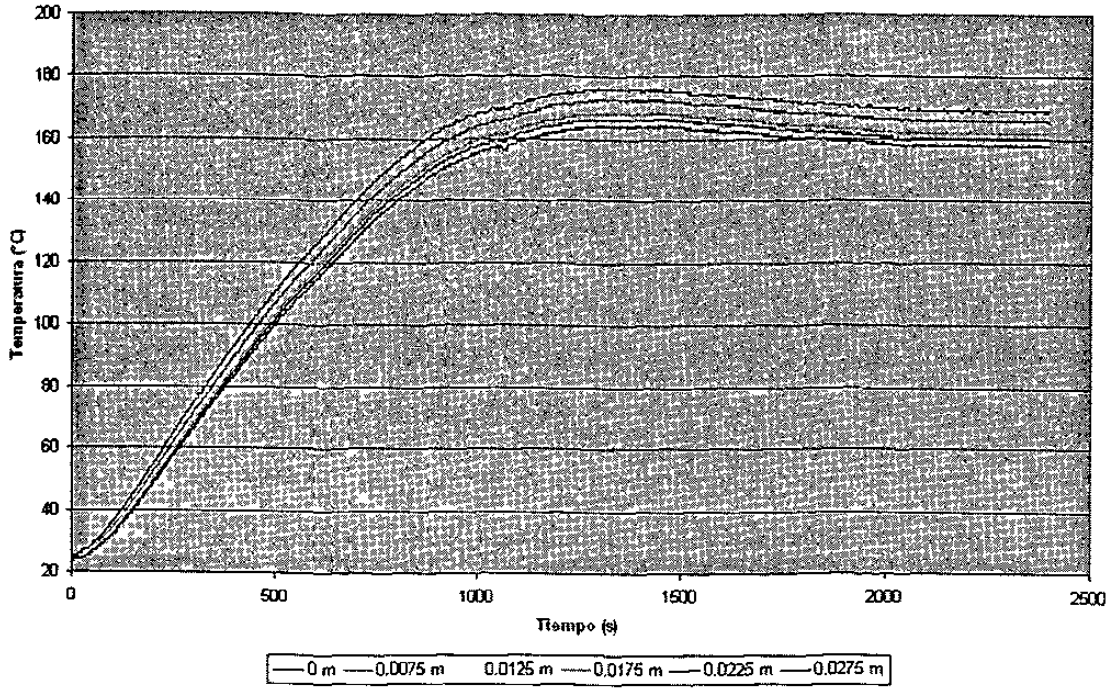
Perfil de Calentamiento de la Muestra J Parte Media



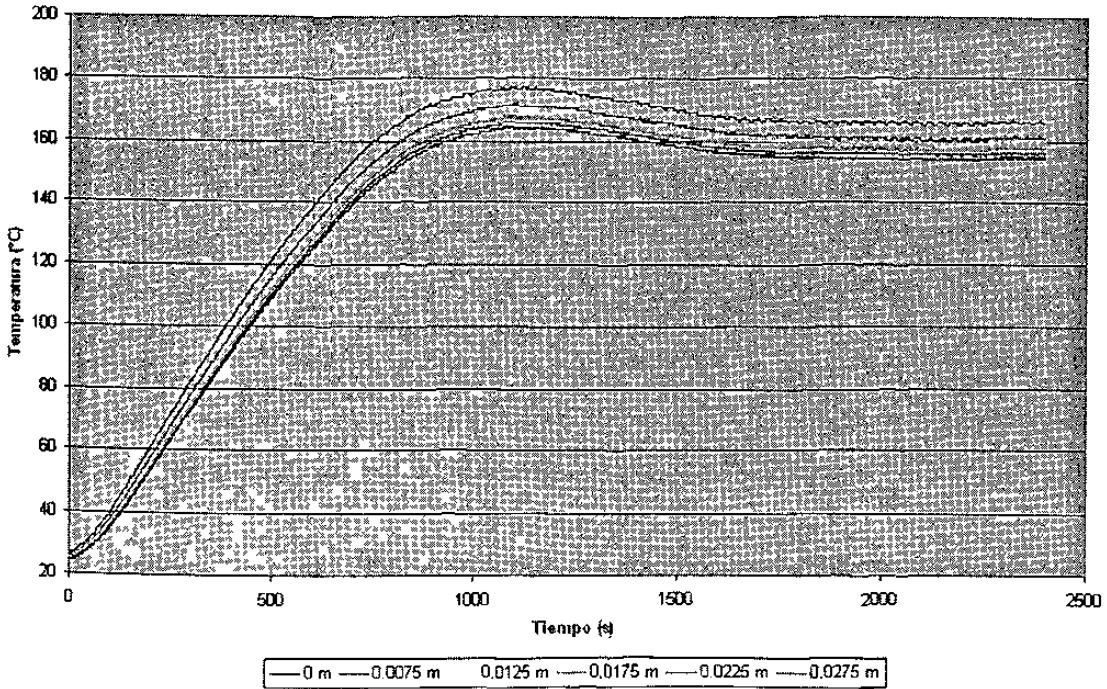
Perfil de Calentamiento de la Muestra J Parte Alta



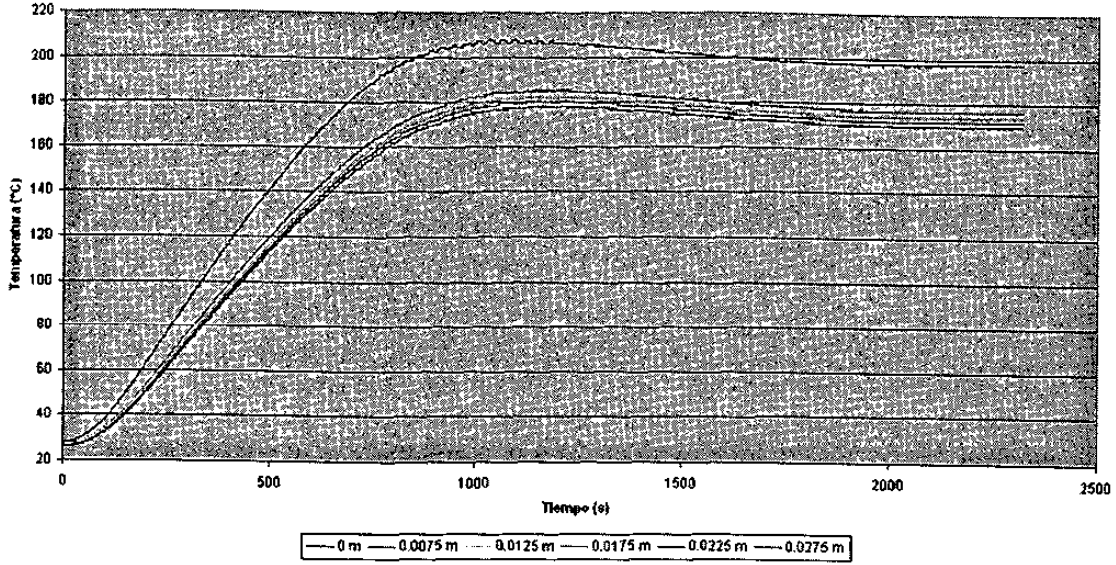
Perfil de Calentamiento de la Muestra M Parte Baja



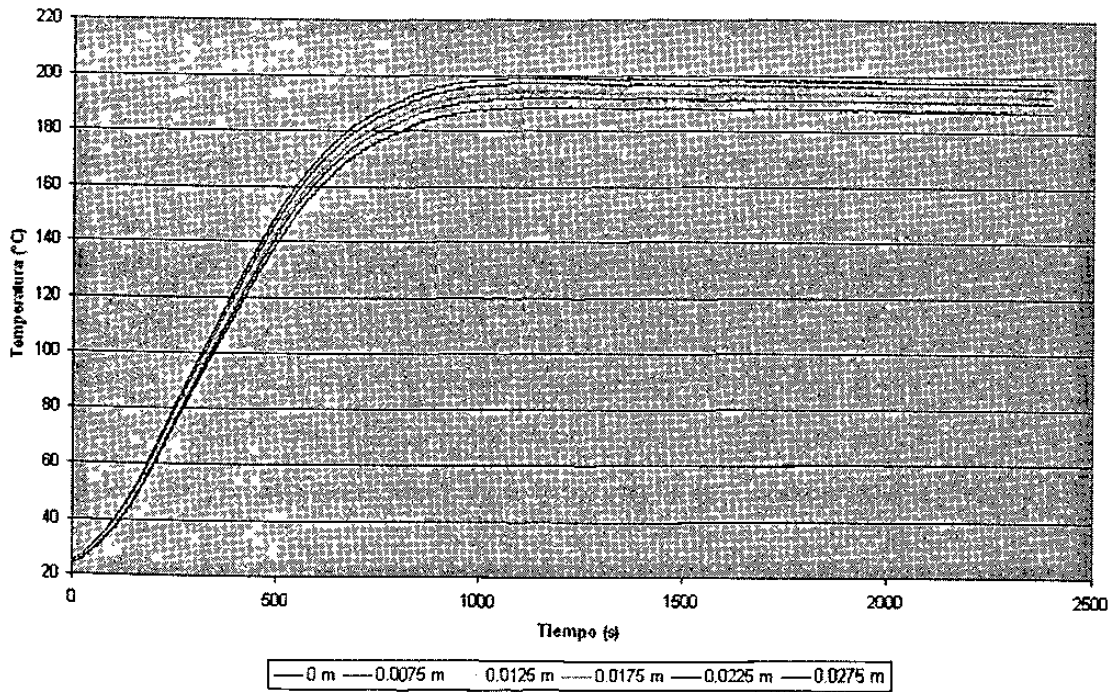
Perfil de Calentamiento de la Muestra M Parte Media



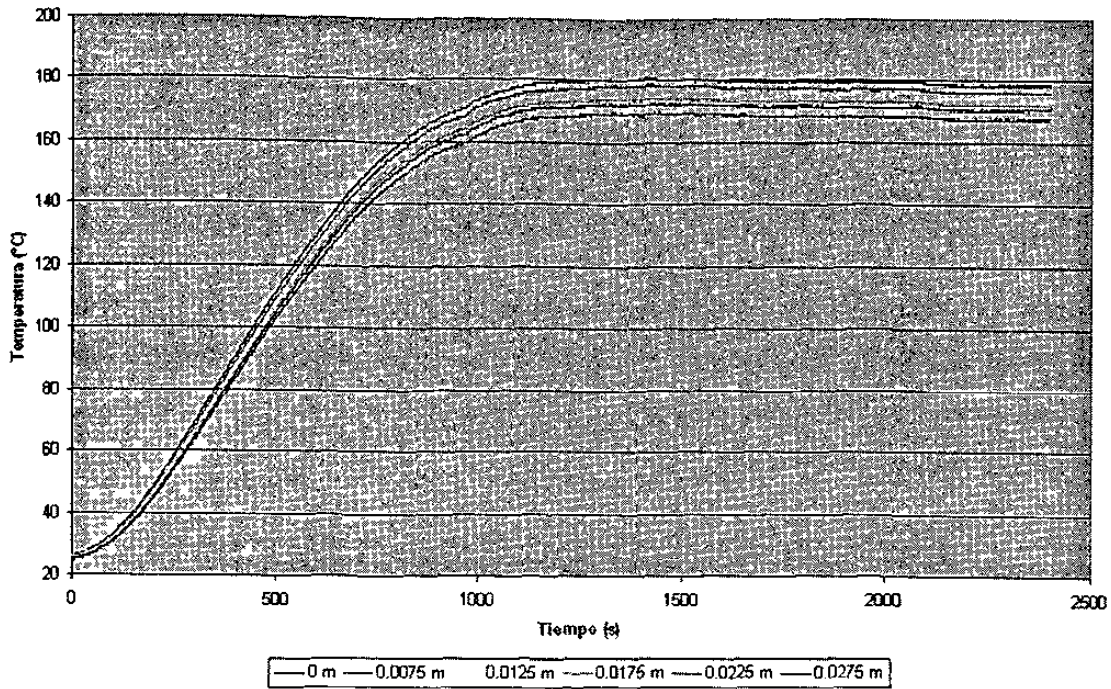
Perfil de Calentamiento de la Muestra M Parte Alta



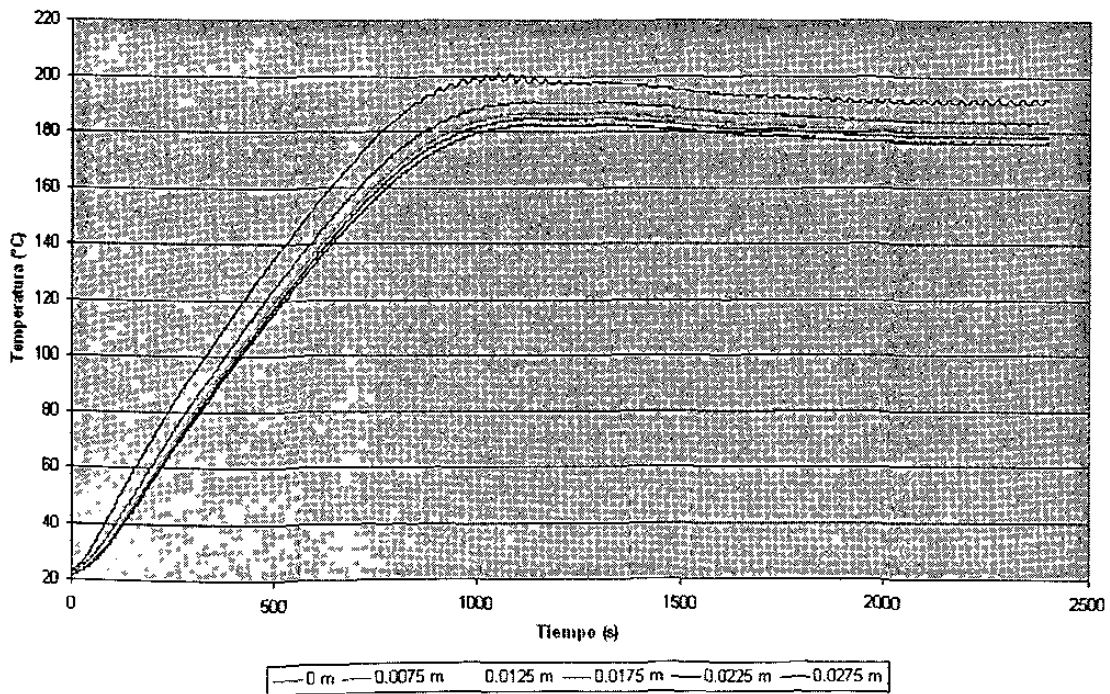
Perfil de Calentamiento de la Muestra L Parte Baja



Perfil de Calentamiento de la Muestra L. Parte Media



Perfil de Calentamiento de la Muestra L. Parte Alta





Apéndice B Ajuste de Polinomios

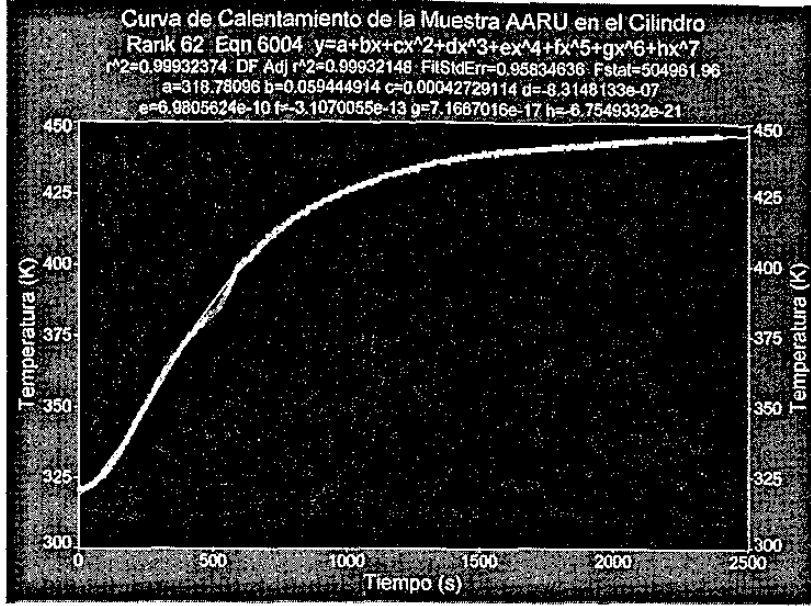


Figura 4.2.1 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra AARU en el cilindro

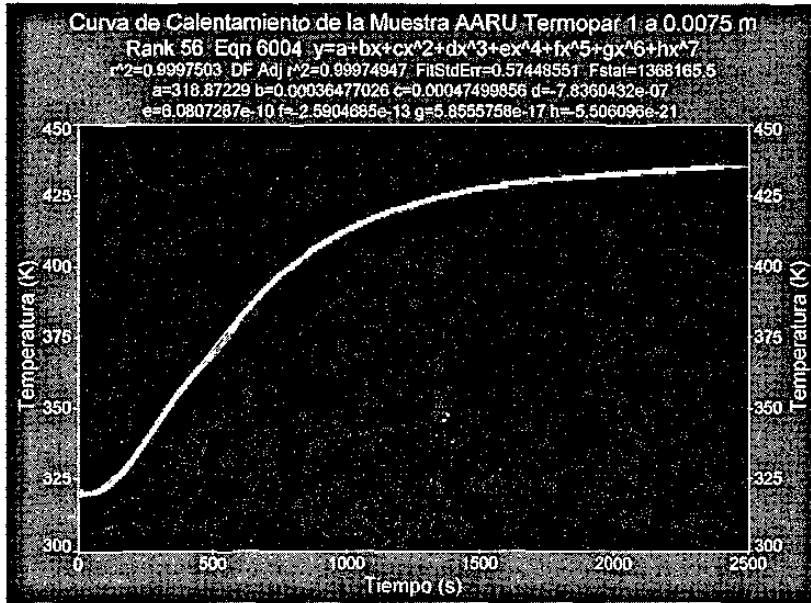


Figura 4.2.2 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra AARU en el aluminio

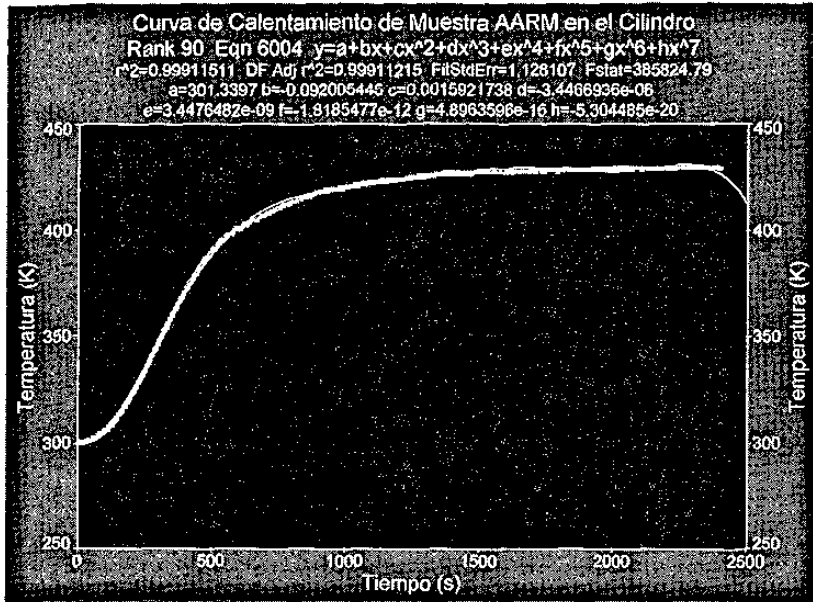


Figura 4.2.3 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra AARM en el cilindro

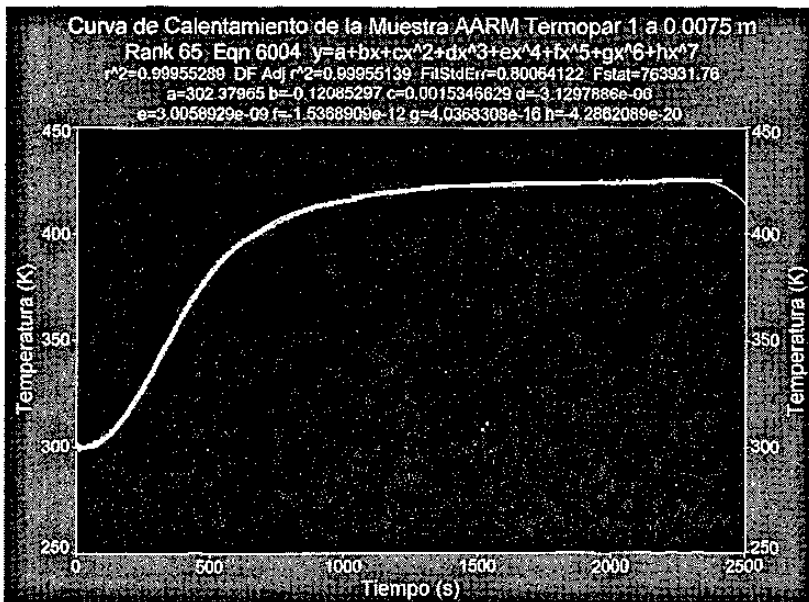


Figura 4.2.4 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra AARM en el aluminio

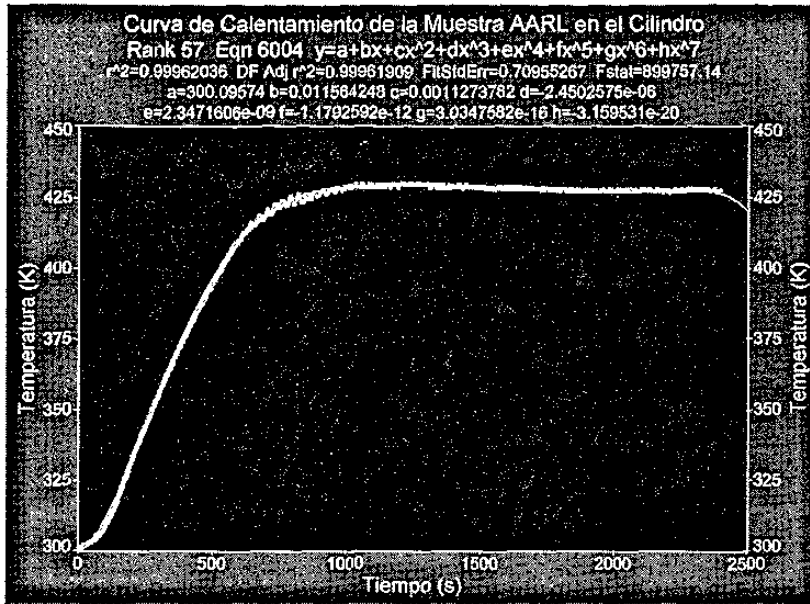


Figura 4.2.5 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra AARL en el cilindro

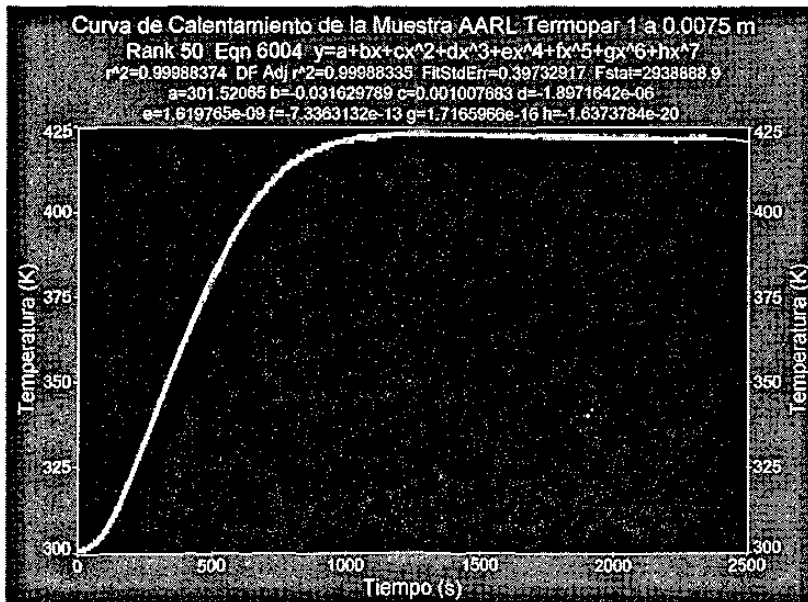


Figura 4.2.6 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra AARL en el aluminio

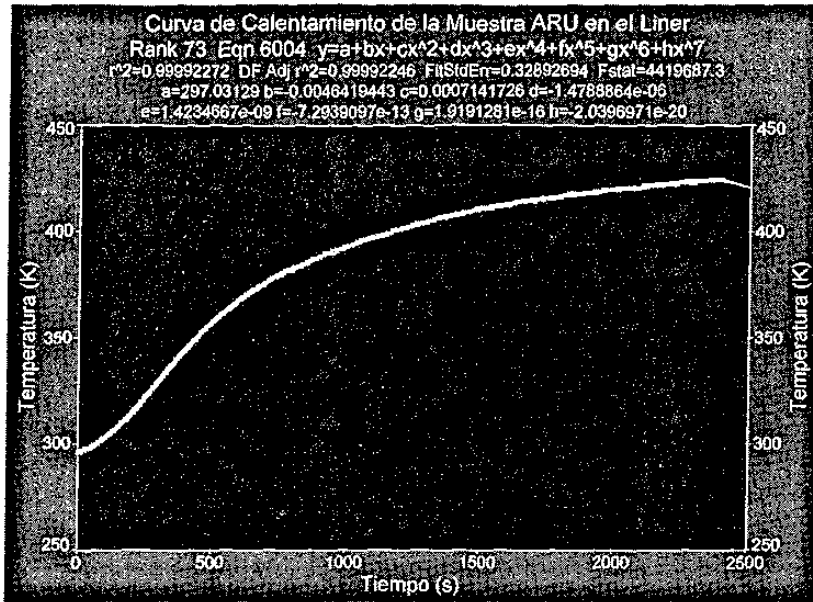


Figura 4.2.7 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra ARU en el cilindro

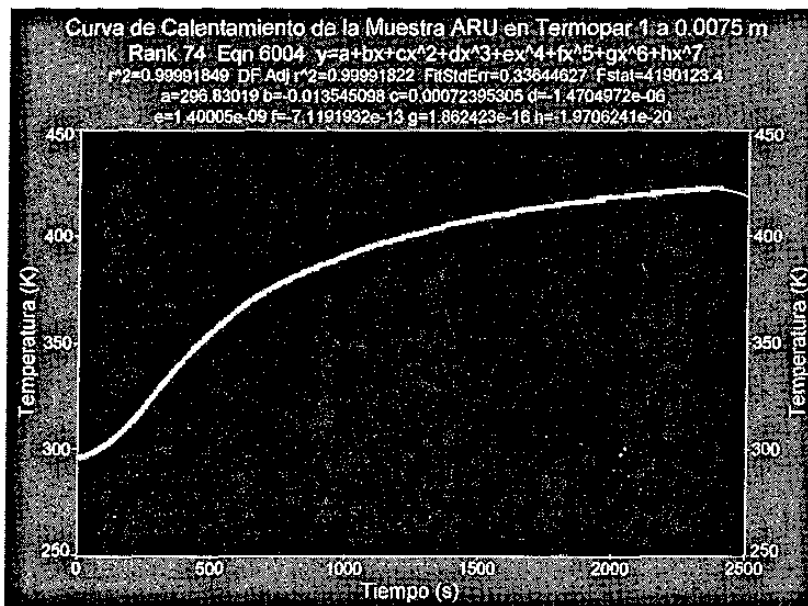


Figura 4.2.8 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra ARU en el aluminio

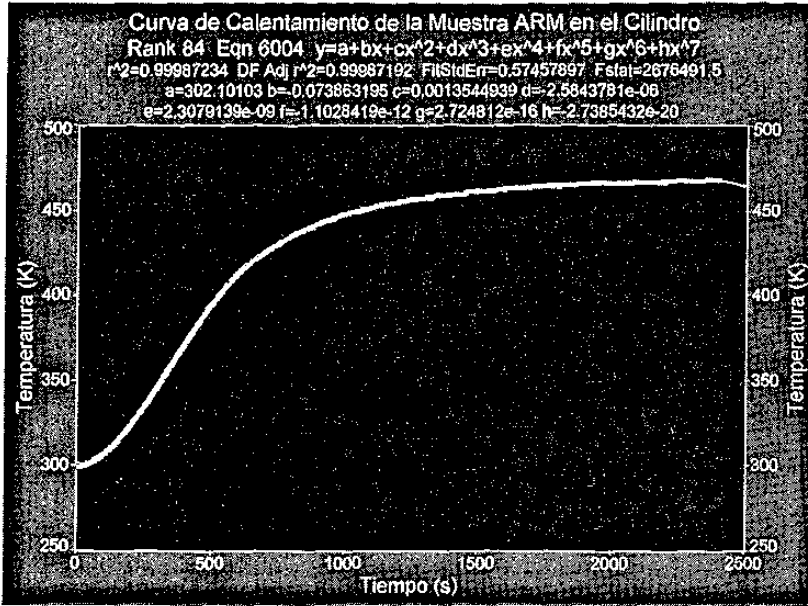


Figura 4.2.9 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra ARM en el cilindro

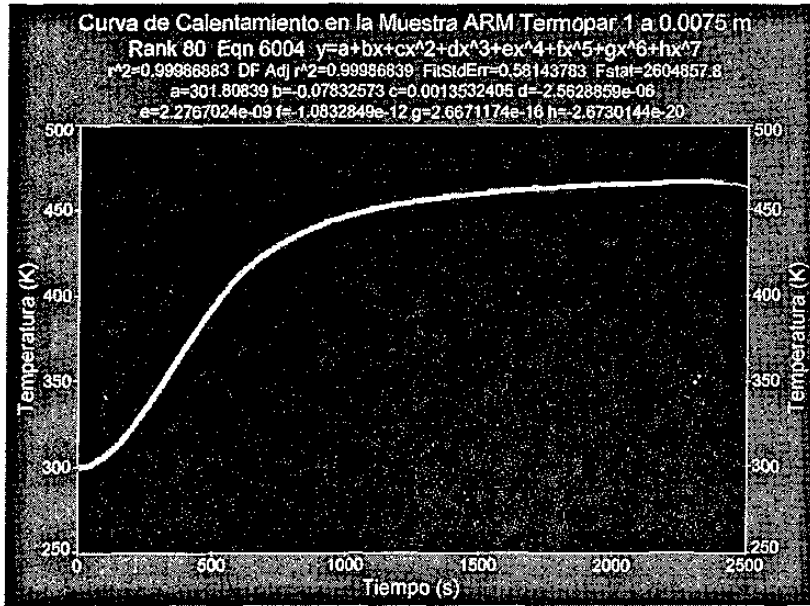


Figura 4.2.10 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra ARM en el aluminio

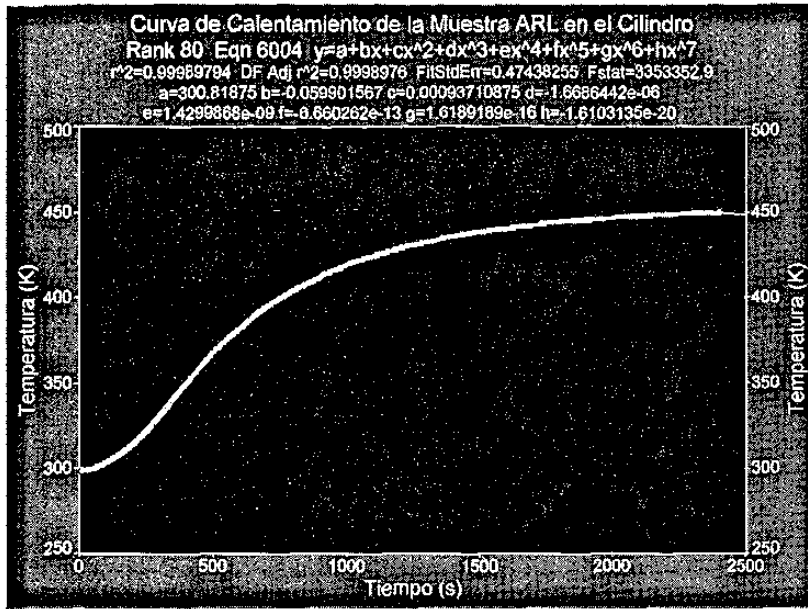


Figura 4.2.11 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra ARL en el cilindro

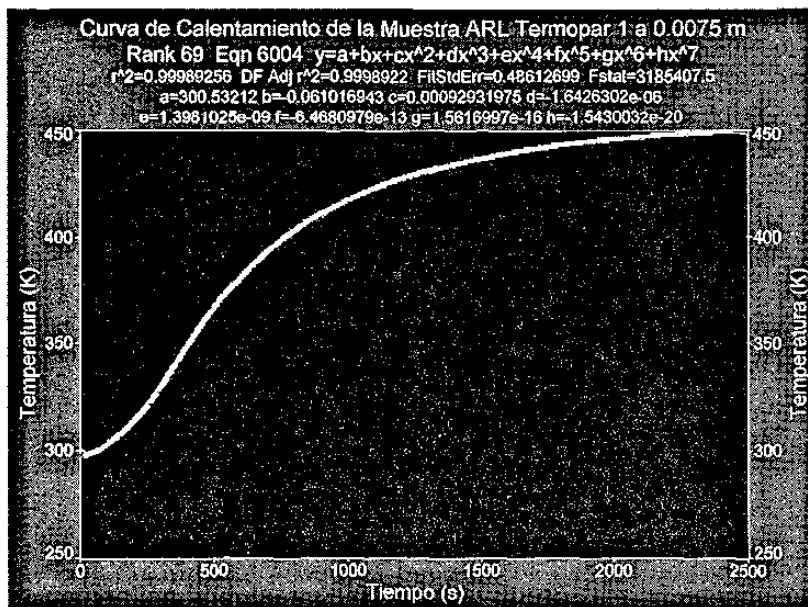


Figura 4.2.12 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra ARL en el aluminio

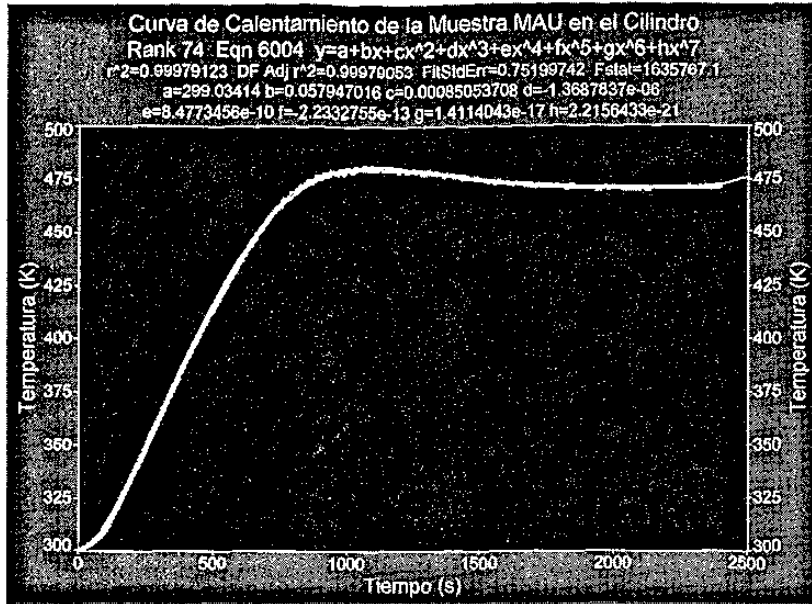


Figura 4.2.13 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra MAU en el cilindro

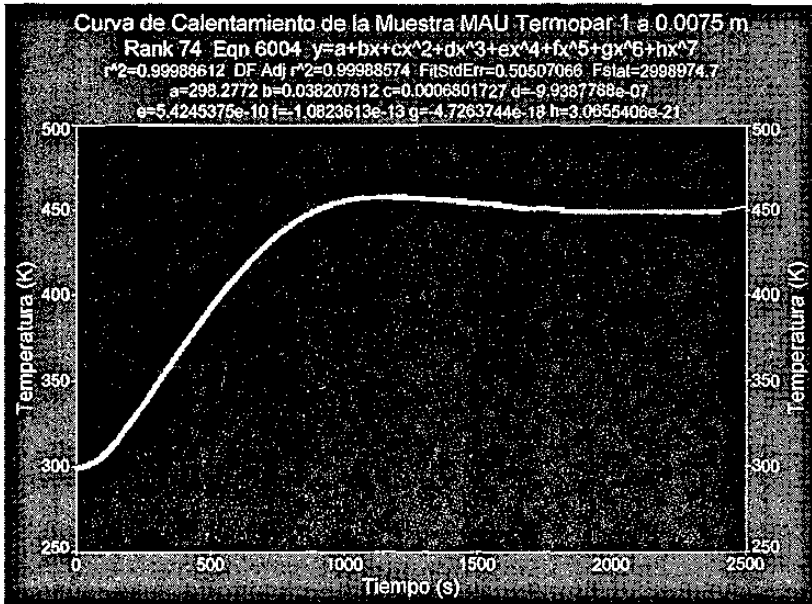


Figura 4.2.14 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra MAU en el

aluminio

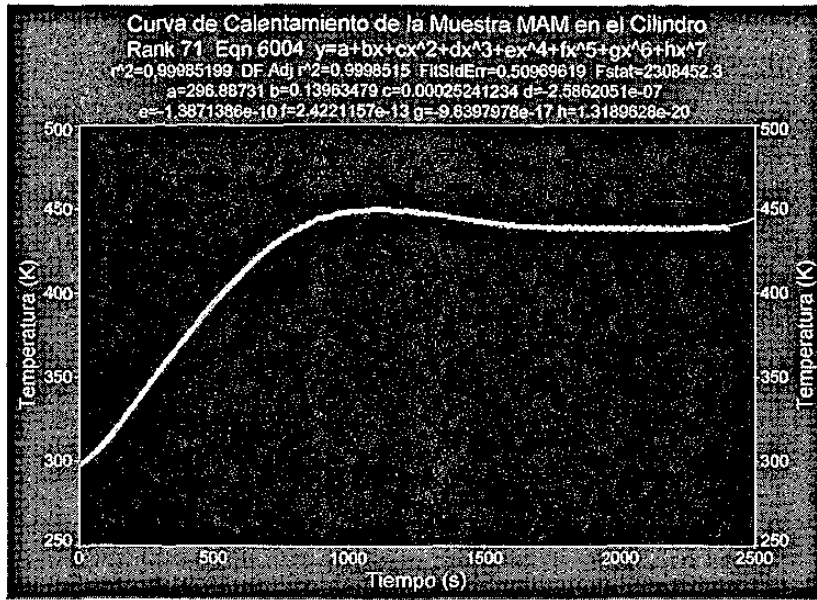


Figura 4.2.15 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra MAM en el cilindro

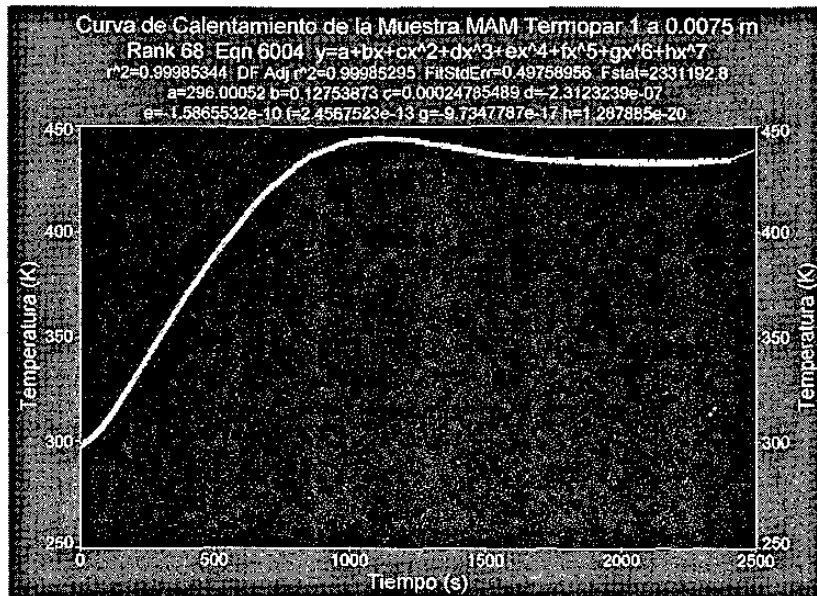


Figura 4.2.16 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra MAM en el aluminio



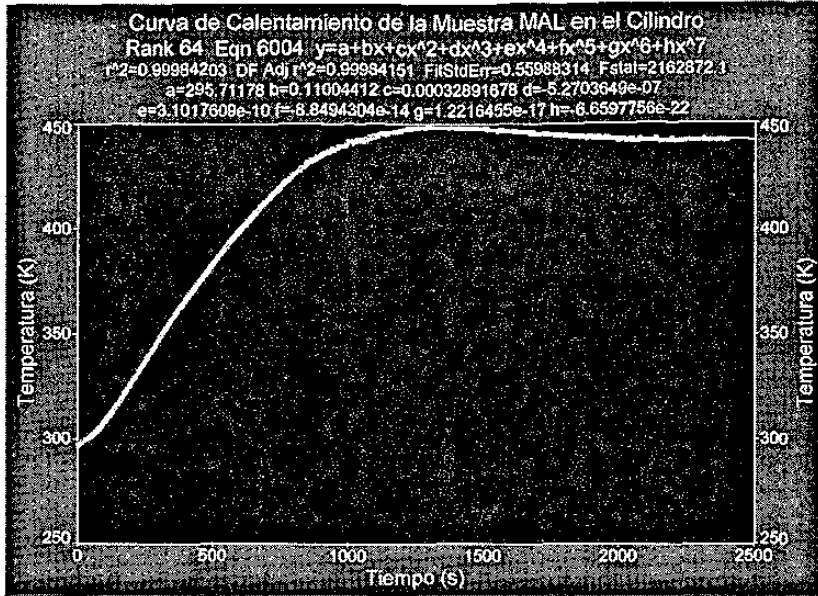


Figura 4.2.17 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra MAL en el cilindro

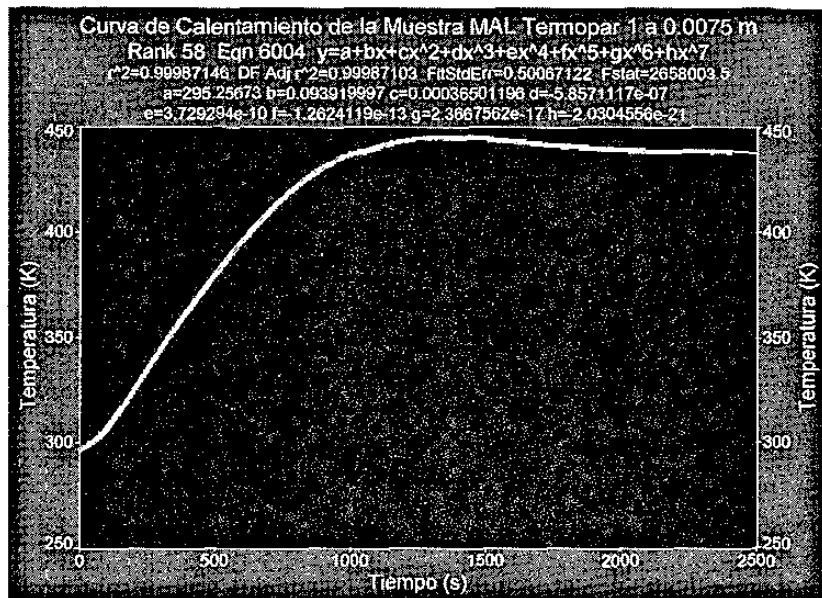


Figura 4.2.18 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra MAL en el aluminio

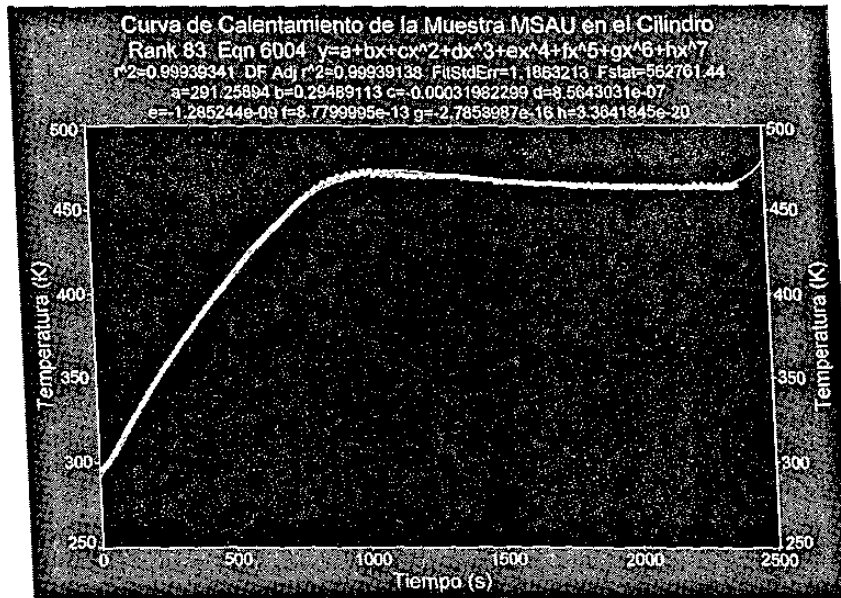


Figura 4.2.19 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra MSAU en el cilindro

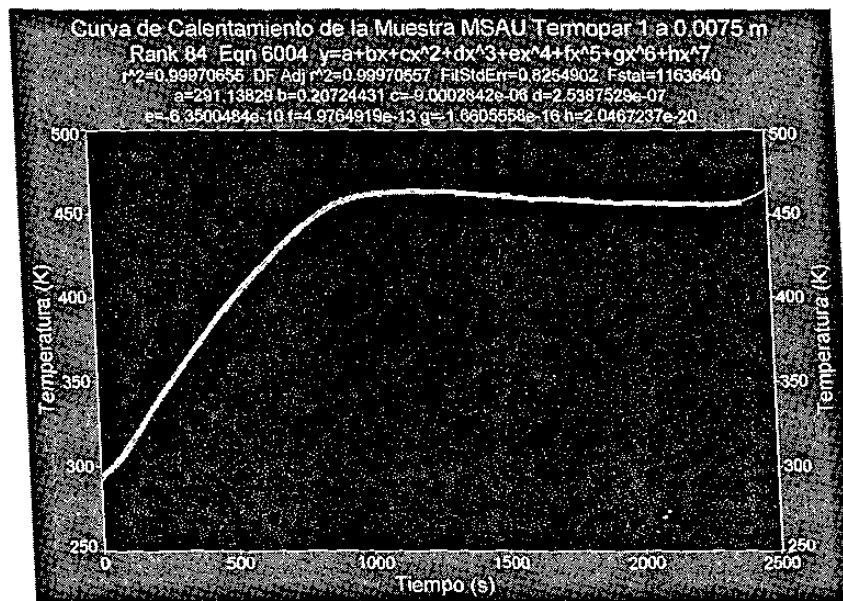


Figura 4.2.20 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra MSAU en el aluminio

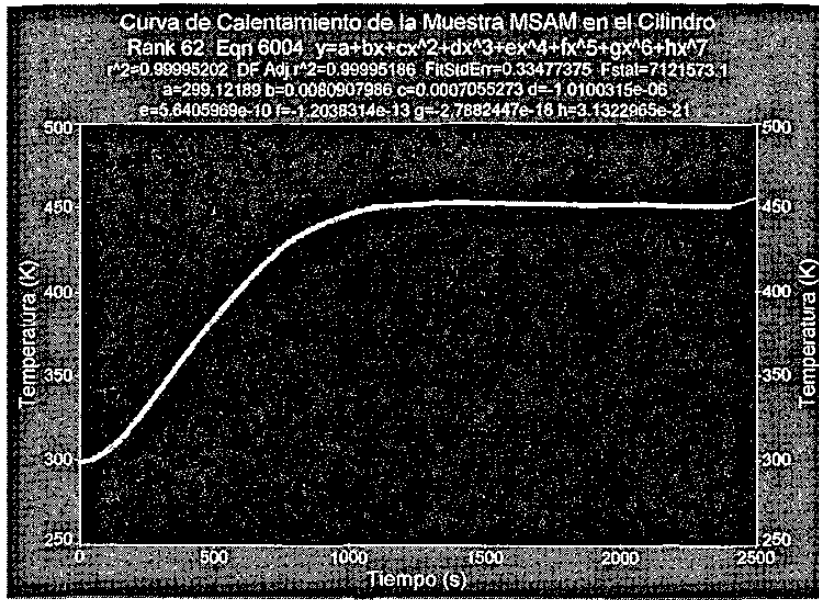


Figura 4.2.21 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra MSAM en el cilindro

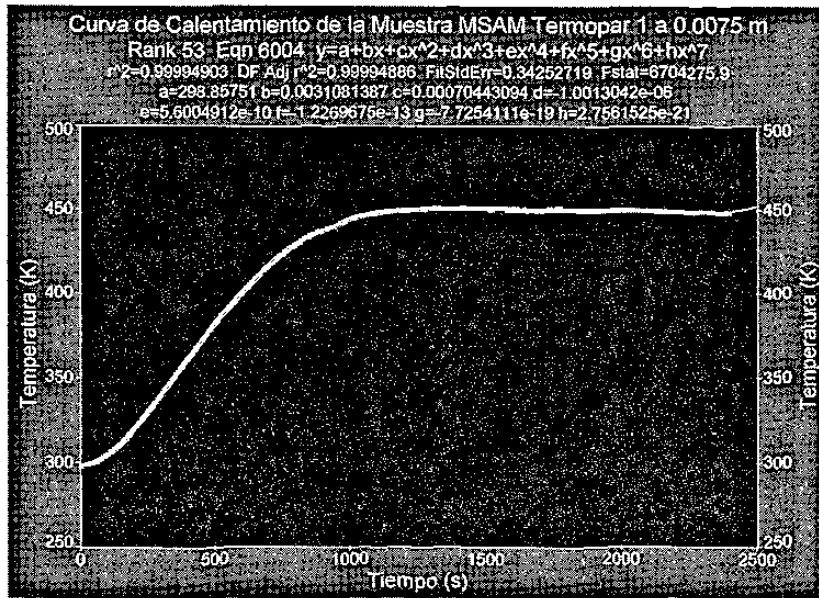


Figura 4.2.22 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra MSAM en el aluminio

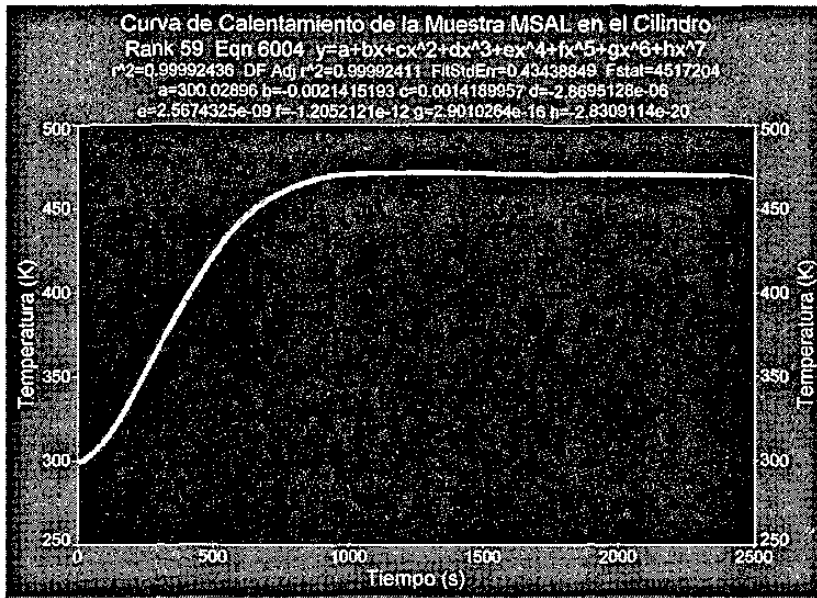


Figura 4.2.23 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra MSAL en el cilindro

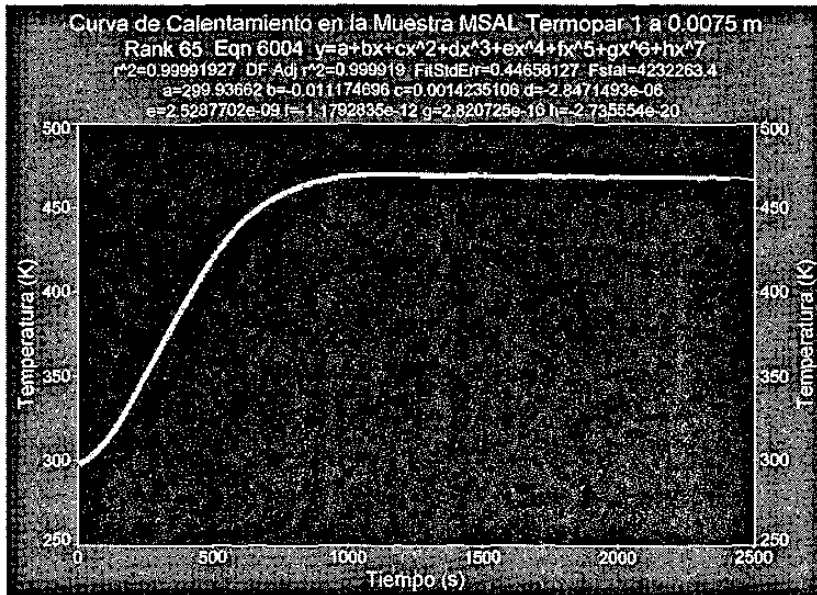


Figura 4.2.24 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra MSAL en el aluminio

### Apéndice C: Programación en Maple IV

Solución de la ecuación de transferencia de calor en estado inestable para el material del Liner.

$$T_t = \alpha T_{xx}$$

$$T(x,0) = 293^\circ\text{K}$$

$$T(0,t) = P(t)$$

$$T(L,t) = Q(t)$$

El primer paso es dividir la solución  $T(x,t)$  en  $T1(x,t) + T2(x,t)$  dadas por las siguientes EDP

Esta es la primera solución de  $T(x,t)$

Longitud Total entre el termopar del liner y el del aluminio (m):

```
> L:=0.0075:
```

Temperatura inicial promedio (K):

```
> Fx:=301:
```

Difusividad Térmica del Material del Liner (m2/seg):

```
> alpha:=43.1e-6:
```

Número de términos a calcular de la solución  $T(x,T)$ :

```
> i:=10:
```

```
> Bn:=(n)->2/L*int(Fx*sin(n*Pi*x/L),x=0..L):
```

```
> T1:=(x,t)->sum('Bn(n)*sin(n*Pi*x/L)*exp(-alpha*(n*Pi/L)^2*t)', 'n'=1..i);
```

$$T1 := (x, t) \rightarrow \sum_{n=1}^i Bn(n) \sin\left(\frac{n \pi x}{L}\right) e^{\left(-\frac{\alpha n^2 \pi^2 t}{L^2}\right)}$$

Esta es la segunda parte de la solución de  $T(x,t)$

Condición Frontera 1 (Ecuación de Temperatura Vs Tiempo del Termopar del Liner)

```
> Pt:=(t)->300.09574+0.011564248*t+0.0011273782*t^2-2.4502575e-6*t^3  
+2.3471606e-9*t^4-1.1792592e-12*t^5+3.0347582e-16*t^6-3.159531e-20  
*t^7;
```

$$Pt := t \rightarrow 300.09574 + .011564248 t + .0011273782 t^2 - .24502575 10^{-5} t^3 + .23471606 10^{-8} t^4 \\ - .11792592 10^{-11} t^5 + .30347582 10^{-15} t^6 - .3159531 10^{-19} t^7$$

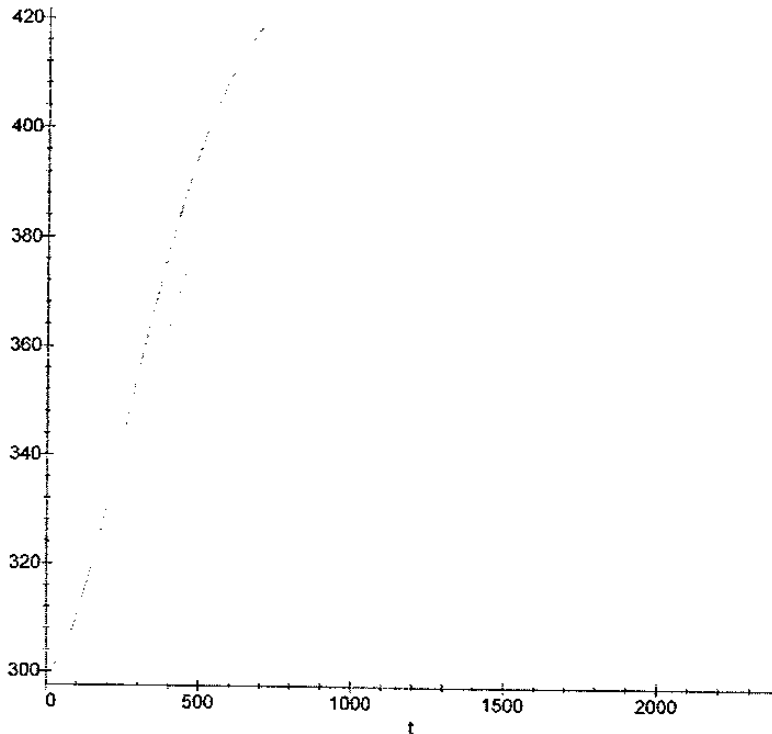
Condición Frontera 2 (Ecuación de Temperatura Vs Tiempo del Termopar del Aluminio)

```
> Qt:=(t)->301.52065-0.031629789*t+0.001007683*t^2-1.8971642e-6*t^3+  
1.619765e-9*t^4-7.3363132e-13*t^5+1.7165966e-16*t^6-1.6373784e-20*  
t^7;
```

$$Qt := t \rightarrow 301.52065 - .031629789 t + .001007683 t^2 - .18971642 10^{-5} t^3 + .1619765 10^{-8} t^4 \\ - .73363132 10^{-12} t^5 + .17165966 10^{-15} t^6 - .16373784 10^{-19} t^7$$

Gráfica de Temperatura Vs Tiempo para los termopares de las condiciones frontera.

```
> plot({Pt(t),Qt(t)},t=0..2400,title='CF 1 y CF2');
```



```

> Fixt := (x, t) -> Pt(t) * (1-x/L) + Qt(t) * x/L:
> Fxt := (x, t) -> -diff(Fixt(x, t), t):
> F2x := (x) -> -Fixt(x, 0):
> Dn := (n) -> 2/L * int(F2x(x) * sin(n*Pi*x/L), x=0..L):
> Fnt := (t, n) -> 2/L * int(Fxt(x, t) * sin(n*Pi*x/L), x=0..L):
> Ant := (t1, n) -> exp(-alpha*(n*Pi/L)^2*t1) * (int(Fnt(t, n) * exp(alpha*(n*
  Pi/L)^2*t), t=0..t1) + Dn(n)):
> T2 := (x, t1) -> sum('Ant(t1, n) * sin(n*Pi*x/L)', 'n'=1..i) + Fixt(x, t1);

```

$$T2 := (x, t1) \rightarrow \left( \sum_{n=1}^i \text{Ant}(t1, n) \sin\left(\frac{n \pi x}{L}\right) \right) + \text{Fixt}(x, t1)$$

La solución Total sera

$$T(x, t) = T1(x, t) + T2(x, t)$$

```

> T := (x, t1) -> T1(x, t1) + T2(x, t1);

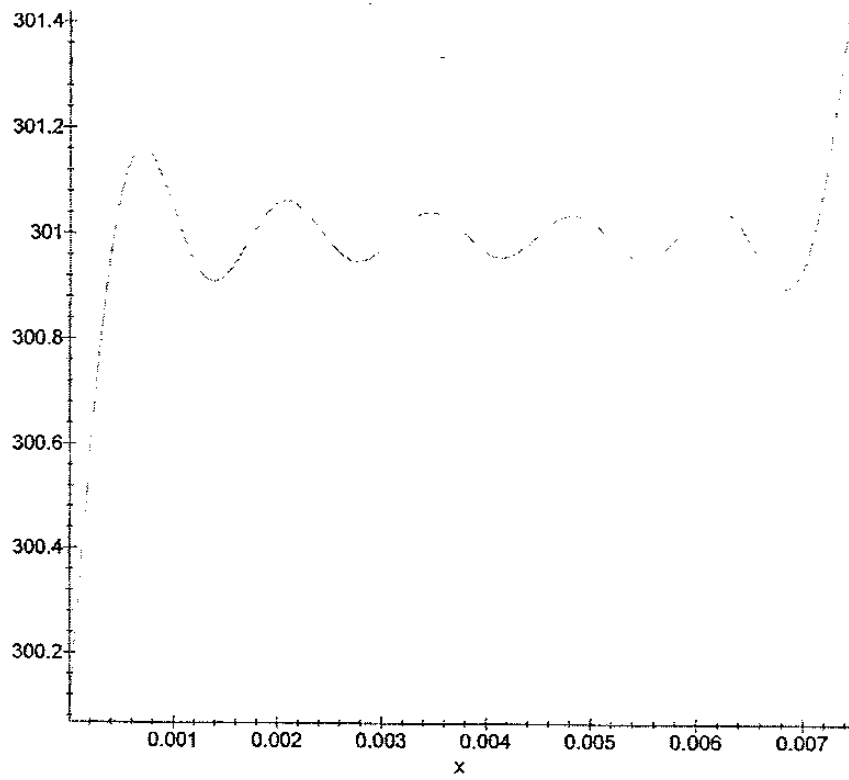
```

$$T := (x, t1) \rightarrow T1(x, t1) + T2(x, t1)$$

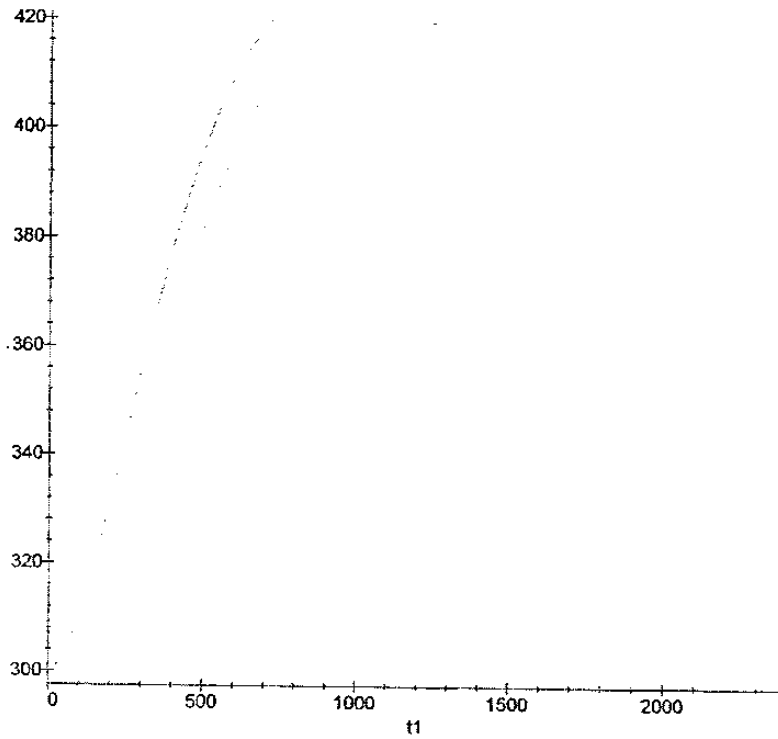
```

> plot(T(x, 0), x=0..L, axes=boxed, title='CI');

```



```
plot({T(0,t1),T(L,t1)},t1=0..2400,axes=boxed,title='CF1 y CF2');
```

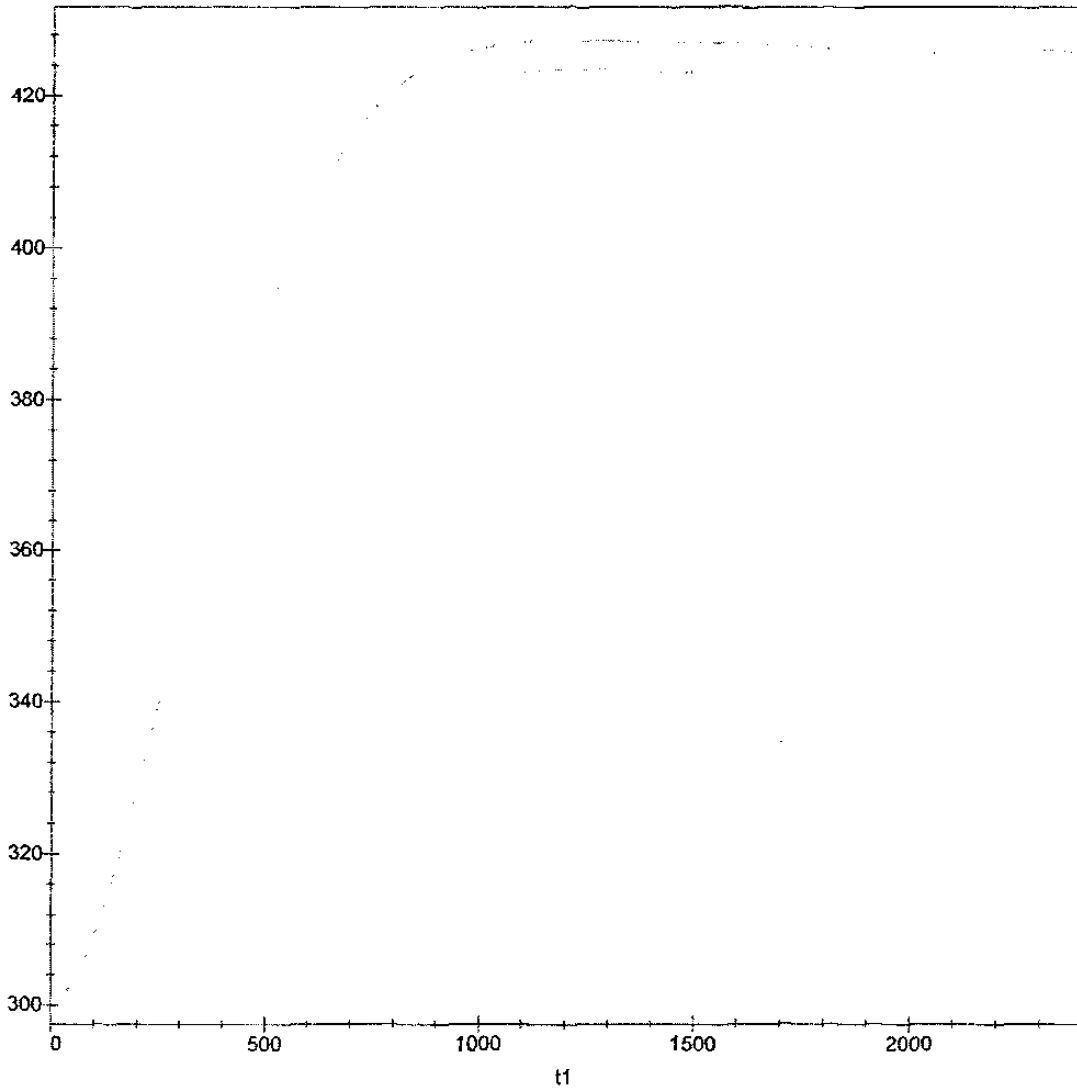


Interpolación del Termopar Ubicado a 0.0024m en el liner:

```
> plot((T(0,t1),T(0.0024,t1),T(L,t1)),t1=0..2400,axes=boxed,title=`I  
nterpolación de Termopar a 0.0024m`);
```



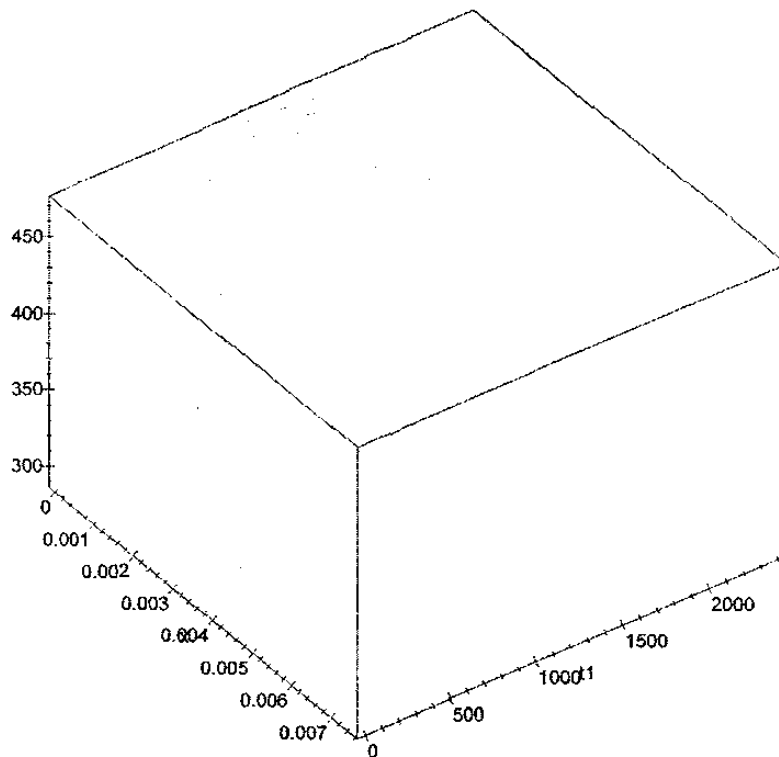
## Interpolación de Termopar a 0.0024m



Gráfica de T, t, d para los tres termopares.

```
> plot3d(T(x, t1), x=0..L, t1=0..2400, axes=boxed, title='Perfil de  
Temperaturas entre el Liner y el Aluminio');
```

### Perfil de Temperaturas entre el Liner y el Aluminio



Datos calculados para el termopar en el liner a 0m

```
> T(0,0);evalf(T(0,100.01));evalf(T(0,200.03));evalf(T(0,400.02));evalf(T(0,600));evalf(T(0,800.04));evalf(T(0,1000.02));evalf(T(0,1200.01));evalf(T(0,1400.05));evalf(T(0,1600.03));evalf(T(0,1800.01));evalf(T(0,2000));evalf(T(0,2200.04));evalf(T(0,2400.02));
```

Datos calculados para el termopar "Virtual" a 0.0024m.

```
> evalf(T(0.0024,0));evalf(T(0.0024,100.01));evalf(T(0.0024,200.03))
;evalf(T(0.0024,400.02));evalf(T(0.0024,600));evalf(T(0.0024,800.0
4));evalf(T(0.0024,1000.02));evalf(T(0.0024,1200.01));evalf(T(0.00
24,1400.05));evalf(T(0.0024,1600.03));evalf(T(0.0024,1800.01));eva
lf(T(0.0024,2000));evalf(T(0.0024,2200.04));evalf(T(0.0024,2400.02
));
```

296.3001975

316.7156272

339.7770604

383.9830562

424.1250296

452.9579290

467.2585174

469.9744531

467.1891022

464.1309640

462.7627247

462.1449000

461.2557392

462.5164314

Datos calculados para el termopar en aluminio a 0.0075m.

```
> evalf(T(0.0075,0));evalf(T(0.0075,100.01));evalf(T(0.0075,200.03))
;evalf(T(0.0075,400.02));evalf(T(0.0075,600));evalf(T(0.0075,800.0
4));evalf(T(0.0075,1000.02));evalf(T(0.0075,1200.01));evalf(T(0.00
75,1400.05));evalf(T(0.0075,1600.03));evalf(T(0.0075,1800.01));eva
lf(T(0.0075,2000));evalf(T(0.0075,2200.04));evalf(T(0.0075,2400.02
));
```

464.5417239  
462.7193589  
459.7361217  
458.1151872  
457.4302747  
456.2940500  
457.4055940

**Anexo D: Medición de Temperatura en la Interfase para las Camisas de Aluminio.**

