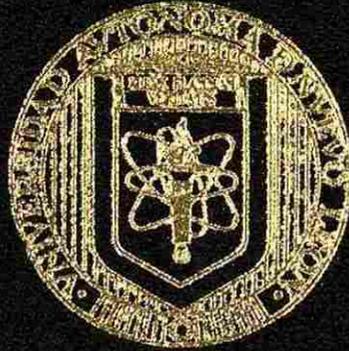


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



ESTUDIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN
COMPONENTES AUTOMOTRICES DE
ALTA TECNOLOGIA

POR

JOSE ALEJANDRO GONZALEZ VILLARREAL

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE
LA INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD
EN MATERIALES

CD. UNIVERSITARIA

AGOSTO DE 2004

ESICUOROC DE IYANAYASREKOCINA ERE CALOROR EN

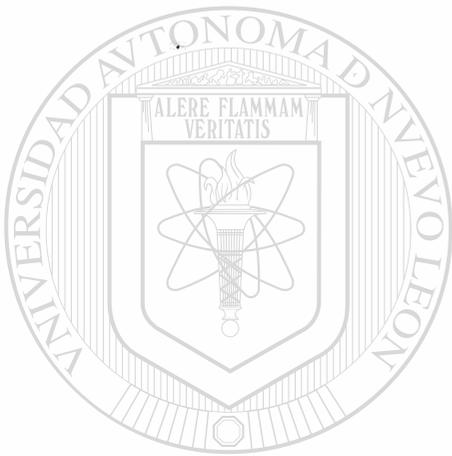
JANOVY COMPANY AUTOMOTRICES DE
ALTA TECNOLOGIA

TM
Z5853
FINE
2004
G668

AA



1020150044



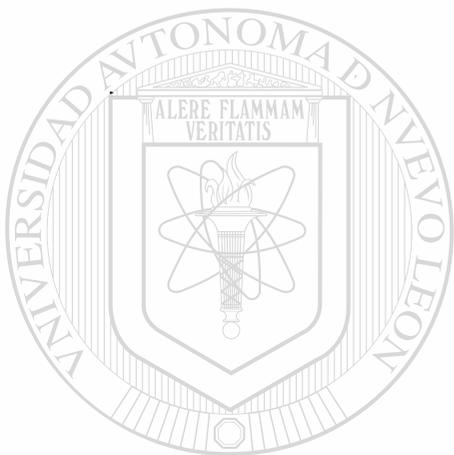
UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

2020



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

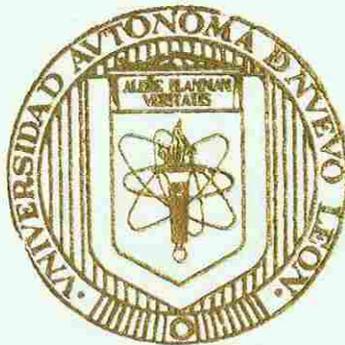
®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



ESTUDIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN
COMPONENTES AUTOMOTRICES DE
ALTA TECNOLOGIA

POR

UANL

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN

JOSE ALEJANDRO GONZALEZ VILLARREAL

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
TESIS

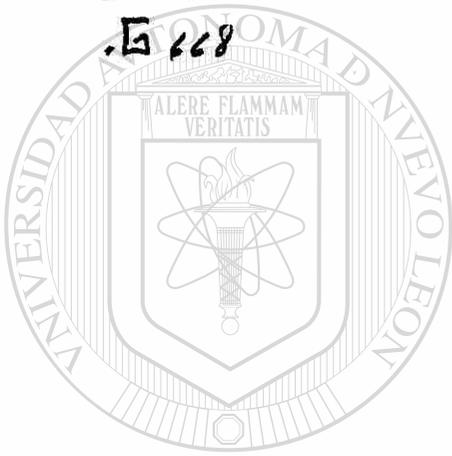
EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE
LA INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD
EN MATERIALES

CD. UNIVERSITARIA

AGOSTO DE 2004

989413

TH
Z5853
.M2
FHE
2004
.G 668

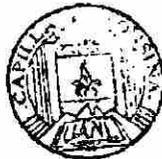


UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

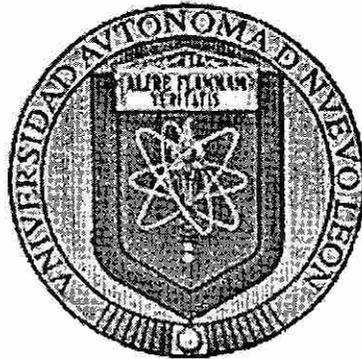


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**ESTUDIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN
COMPONENTES AUTOMOTRICES DE ALTA TECNOLOGÍA**

POR

JOSÉ ALEJANDRO GONZÁLEZ VILLARREAL

TESIS

**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE
LA INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD EN
MATERIALES**

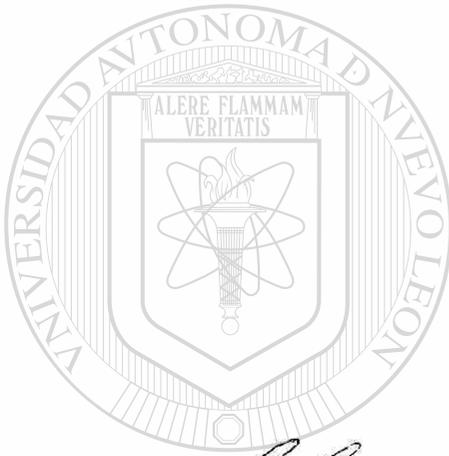
CD UNIVERSITARIA

AGOSTO DEL 2004

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Estudio de Transferencia de Calor en Componentes Automotrices de Alta Tecnología" realizada por el alumno José Alejandro González Villarreal, matrícula 787687 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis

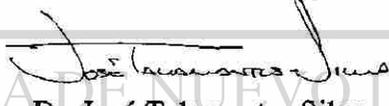



Dr. Rafael Colás Ortiz

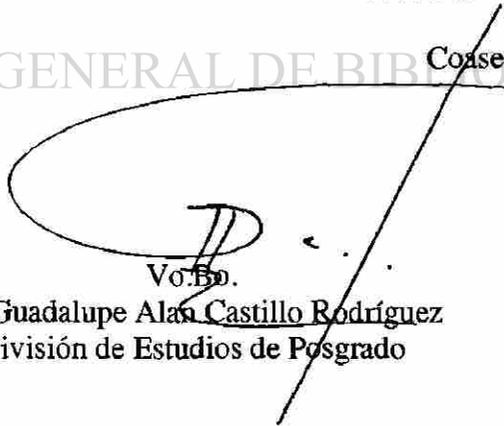
Asesor


Dr. Salvador Valtierra Gallardo

Coasesor


Dr. José Talamantes Silva

Coasesor


Vo.Bo.

Dr. Guadalupe Alán Castillo Rodríguez
División de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, N.L. Agosto del 2004

AGRADECIMIENTOS

A Nematik, por el apoyo en la realización de este trabajo.

Al DIMAT y a la mejor planta de Profesores, Dr. Martha Guerrero, Dr. Alan Castillo, Dr. Alberto Pérez, Dr. Abraham Velasco, Dr. Moisés Hinojosa, les debo mi formación profesional.

Muy en especial a los Doctores Rafael Colás Ortiz, Salvador Valtierra Gallardo y José Talamantes Silva por todos los consejos y tiempo invertidos en este trabajo y en mi persona, les estaré eternamente agradecido.

A la raza de R&D Nematik, en especial al MC Fernando Morales Rendón por su apoyo durante el desarrollo de los experimentos de la presente Tesis, Ing. Miguel Ángel Ramírez Tobanche, Ing. Alejandro Martínez Ramírez, MC Andrés Fernando Rodríguez Jasso, MC Alberto Esquivel, MC Rodrigo González, a la raza tesista, Efrén, Lalo, Julián Jacobo, Rocío, Moy, por su ayuda, consejo y amistad (si no fuera por ustedes y las quincenas la vida sería horrible!).

A Dios y a mis Padres, María Cristina Villarreal de González y Valdemar González Villarreal por darme la vida y la oportunidad de estudiar, no tengo palabras para agradecerles su apoyo incondicional siempre que los necesité.

A mis hermanos, María Cristina González Villarreal y Valdemar Zacarías González Villarreal, gracias por estar ahí.

Por último, quiero dedicar este trabajo a la persona que le vino a dar sentido a mi vida, Aminta Garza Pinal, eres mi ΔG , gracias por aceptar compartir el resto de tu vida conmigo, Te Amo!

Y a todos los que se me olvidaron... Gracias..... Totales

PRÓLOGO

La industria automotriz ha evolucionado hasta poder ofrecer unidades de alta potencia, pero con motores de un tamaño mucho más pequeño que los que se encontraban disponibles hace apenas una o dos décadas. Este desempeño ha sido posible gracias a mejoras en el diseño de los motores de combustión interna y en el uso de mejores aleaciones. Así ha sido posible incrementar la temperatura de operación y la relación de compresión en las cámaras de combustión, lo que incrementa al mismo tiempo la eficiencia del motor, la demanda por aleaciones con mejores propiedades físicas y mecánicas, así como la eficiencia en la transferencia de calor desde la cámara de combustión.

En esta Tesis se estudian las condiciones de transferencia de calor que se presentan entre las camisas y la aleación empleada en la producción de motores de combustión interna al introducir un elemento calefactor a la cámara de combustión. El estudio contempla la evaluación de camisas de hierro gris y de aluminio-silicio hipereutéctica sometidas a diferentes tipo de recubrimiento y tratamiento de superficie. El análisis de las condiciones de transferencia de calor hace uso del método inverso y de la extrapolación al estado estacionario. Los resultados del trabajo concluyen la importancia de la temperatura de la cámara, del tipo de material de la camisa y de la interfase entre la camisa y la aleación del motor sobre las condiciones de transferencia de calor.

El resultado de la implementación de esta tecnología, es de gran utilidad tanto para el fabricante como para el diseñador de los motores, puesto que el primero puede optimizar las condiciones de vaciado para mejorar las condiciones de transferencia y el diseñador, por su parte, puede saber desde un principio las condiciones aceptables para el motor sobre la base del proceso de fabricación de la pieza.

Salvador Valtierra

Monterrey, N.L., Agosto 2004.

INDICE GENERAL

| | Pág. |
|---|------|
| Capítulo 1: Introducción | 1 |
| 1.1 Objetivo | 3 |
| 1.2 Hipótesis | 3 |
| | |
| Capítulo 2: Uso de Aleaciones de Aluminio en la Industria Automotriz | |
| 2.1 El Aluminio | 4 |
| 2.2 Aleaciones para Fundición | 6 |
| 2.3 El Aluminio en la Industria Automotriz | 9 |
| 2.4 Materiales Convencionales y Tecnología Silitec™ | 11 |
| | |
| Capítulo 3: Transferencia de Calor | |
| 3.1 Generalidades | 18 |
| 3.1.1 Conducción | 18 |
| 3.1.2 Convección | 19 |
| 3.1.3 Radiación | 20 |
| 3.2 Conducción en Estado Transitorio | 23 |
| 3.3 Transferencia de Calor en Interfases | 25 |
| 3.4 Transferencia de Calor en Máquinas de Combustión Interna | 26 |
| 3.4.1 Modos de Transferencia de Calor en Máquinas de Combustión Interna | 26 |
| 3.4.2 Métodos de Medición de Transferencia de Calor en Máquinas de Combustión Interna | 27 |

Capítulo 4: Procedimiento Experimental

| | |
|--|----|
| 4.1 Introducción | 29 |
| 4.2 Diseño del Molde para el Vaciado de las Camisas Silitec™ | 30 |
| 4.3 Fabricación del Molde y Condiciones | |
| Superficiales de las Camisas | 32 |
| 4.4 Transferencia de Calor | 34 |
| 4.5 Inspección Metalográfica | 36 |
| 4.6 Análisis Matemático | 37 |

Capítulo 5: Resultados y Discusión

| | |
|---|----|
| 5.1 Introducción | 39 |
| 5.2 Curvas de Temperatura Vs. Tiempo y Ajuste de Polinomios | 39 |
| 5.3 Solución de la Ecuación de Estado Transitorio | 41 |
| 5.4 Determinación de la Temperatura en la Interfase | 47 |

Capítulo 6: Conclusiones

| | |
|-----------------|----|
| Recomendaciones | 56 |
|-----------------|----|

Referencias Bibliográficas

| | |
|----------------------------|----|
| Índice de Tablas y Figuras | 60 |
|----------------------------|----|

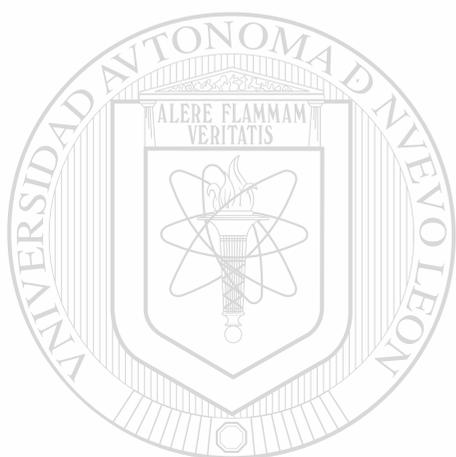
| | |
|---|----|
| Apéndice A: Curvas de Calentamiento para las Camisas de Aluminio | 64 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| Apéndice B: Ajuste de Polinomios | 70 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| Apéndice C: Programación en Maple IV | 82 |
|---|----|

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

90



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO 1

INTRODUCCION

La industria automotriz es y ha sido una de las principales promotoras de los más importantes avances en la ciencia de materiales. La búsqueda continua de reducir peso en los vehículos, la migración de los componentes de aleaciones de hierro a aleaciones de aluminio ha sido un paso de suma importancia. Desde la década de los 70, la migración de las cabezas de motor hacia aleaciones de aluminio ha sido incesante.

Requerimientos tales como resistencia mecánica a alta temperatura, mejor resistencia tanto a la fatiga mecánica como térmica son cada vez más altos, sin embargo el desarrollo de nuevas aleaciones lograron cumplir y sobrepasar las nuevas especificaciones de los fabricantes de vehículos automotores. Hasta este punto todo parecía indicar que las nuevas aleaciones de aluminio, con relaciones de resistencia-peso cada vez más altas, habrían de sustituir, al menos en el motor, a las aleaciones de hierro de manera irreversible.

El problema surge cuando estas aleaciones son probadas en monobloques, donde las condiciones de operación de las cámaras de combustión exigen altas propiedades tribológicas a altas temperaturas, aleaciones típicas para cabezas como la 319, 356 y sus variantes no soportan el desgaste a que estos componentes están sujetos. Surge así la necesidad de incorporar en esta zona específica de la máquina, un material que cumpla con esta exigencia. En este sentido, las viejas aleaciones de hierro tomaron el lugar del ligero metal, y mediante los procesos disponibles, tales como gravedad en molde semi-permanente, baja presión en arena y alta presión en molde permanente los monobloques se vacían con insertos de hierro gris comúnmente llamados camisas, o bien son insertados a presión después del maquinado final de la pieza, el cual es complejo y de costo elevado,

haciendo del vaciado el proceso de incorporación preferido por la mayoría de los fabricantes en el mundo.

Una desventaja de este proceso radica en la formación de una interfase entre ambos materiales, que actúa como una barrera térmica bloqueando el flujo de calor desde las cámaras de combustión hasta el líquido o gas refrigerante. Más aun, la diferencia en los coeficientes de expansión térmica genera un alto nivel de esfuerzos residuales que en casos extremos llegan a exceder el límite último del material del monobloque resultando en la fractura del puente existente entre los cilindros, limitando así a los diseñadores el espesor de estas paredes. Existen aleaciones de aluminio capaces de soportar las condiciones de desgaste, pero no son fáciles de vaciar, especialmente en procesos en donde la velocidad de enfriamiento después del vaciado es lenta, tales como los vaciados en arena a baja presión. Estas aleaciones del tipo hipereutécticas, con contenidos de silicio arriba del 11.7%, con fases primarias de silicio, están actualmente siendo investigadas para una vez más reemplazar a las aleaciones de hierro en la fabricación de camisas. La barrera térmica formada por la interfase de ambos materiales sigue formándose, pero la similitud entre ambos minimiza su efecto. Por otro lado, al tener puntos de fusión por debajo de las temperaturas de vaciado del monobloque, estas aleaciones podrían fundirse y generar una liga metalúrgica, que resultaría en una caída de temperatura en la interfase menor a la que se tendría si las camisas fueran de hierro gris. En este escenario, el problema de esfuerzos residuales es minimizado dado que ambos materiales cuentan con un coeficiente de expansión similar.

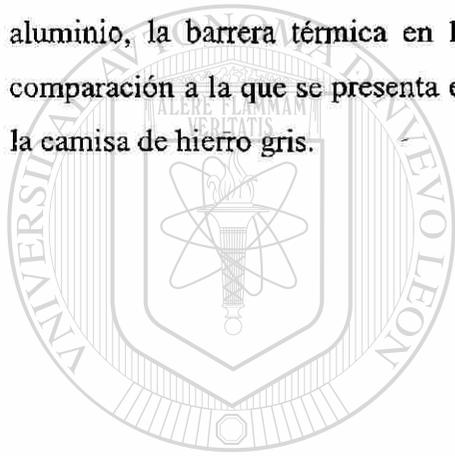
Es entonces de vital importancia desarrollar procesos que permitan el vaciado de estas camisas y evaluar su comportamiento térmico en las condiciones de operación de los motores armados con esta nueva tecnología. Este es el punto de partida del presente trabajo.

1.1 Objetivo

El objetivo de la presente tesis es determinar la magnitud de la barrera térmica entre los materiales involucrados en la transferencia de calor de la cámara de combustión, como son la camisa y la aleación del monobloque, utilizada en la manufactura de motores de combustión interna.

1.2 Hipótesis

Debido a una liga metalúrgica parcial y a la mejor conductividad térmica del cilindro de aluminio, la barrera térmica en la interfase entre los dos materiales será mínima en comparación a la que se presenta en el caso convencional del monobloque de aluminio y la camisa de hierro gris.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO 2

USO DE ALEACIONES DE ALUMINIO EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

2.1 El Aluminio

Hace 117 años, Paul Louis Heroult en Francia y Charles Martín Hall en los Estados Unidos de América describieron en sus patentes de 1886 el proceso electrolítico que se emplea hoy día para reducir óxido de aluminio y obtener aluminio metálico. La aleación de aluminio-cobre fue una de las primeras en ser utilizadas, debido principalmente a que el aluminio puro presenta propiedades mecánicas pobres, lo cual limitaba su uso a utensilios de cocina y otros artículos que no requieren resistencias excepcionales.^[1]

En 1907, Wilm descubre que ciertas aleaciones de aluminio con cobre y magnesio eran sensibles al tratamiento térmico a temperaturas del orden de 500 °C, seguido por un templado en agua fría y envejecido a temperatura ambiente por unos cuantos días, obteniendo así un aumento significativo de la dureza y las propiedades mecánicas.^[1]

Este es el punto de partida para la incursión de las aleaciones de aluminio en la fabricación de estructuras y piezas de aeroplanos y, en los últimos 20 años, en la industria automotriz, sustituyendo a las aleaciones de hierro en componentes desde estructurales hasta cabezas y monobloques en los motores.

La Tabla 2.1.1, presenta las propiedades atómicas y nucleares del aluminio puro, la Tabla 2.1.2 enumera las propiedades físicas de este metal.

Tabla 2.1.1 Propiedades atómicas y nucleares del aluminio puro.^[1]

| Propiedad | Valor |
|-------------------------------|------------|
| Número atómico | 13 |
| Peso atómico | 26.9901 |
| Radio atómico a 25°C | 1.42885 nm |
| Isótopos | Ninguno |
| Valencia | 3 |
| Radio iónico Al ⁺³ | 0.57 nm |

Tabla 2.1.2 Propiedades físicas del aluminio puro.^[1]

| Propiedad | Valor |
|--|----------------------------|
| Color-luz reflejada | Blanco plateado |
| Estructura cristalográfica | Cubo centrado en las caras |
| Constante reticular a 25°C | 0.40414 nm |
| Plano de deslizamiento | {111} |
| Densidad a 20°C | 2.699 g/cm ³ |
| Cambio de volumen en la solidificación | 6.7% |
| Contracción por vaciado (lineal) | 1.7-1.8% |
| Temperatura de fusión | 660.2 °C |
| Conductividad térmica a 100 °C | 213 W/mK |
| Conductividad eléctrica a 20°C | 65.5% IACS |

2.2 Aleaciones para Fundición

Las aleaciones para fundición se encuentran estandarizadas por diferentes organismos ^[2]. En los Estados Unidos de América, las aleaciones de aluminio se agrupan de acuerdo a los límites de composición registrados por “The Aluminium Association”. Las agencias gubernamentales (militares, federales y otras) tienen sus propias especificaciones, de igual forma lo hacen las sociedades técnicas como “The American Society for Testing and Materials (ASTM)” y “The Society of Automotive Engineers (SAE)”.

En términos de composición química, “The Aluminium Association” presenta los grupos de aleación de la siguiente manera:

1xx.x (99.0% de aluminio mínimo) Generalmente estas aleaciones tienen composiciones controladas que no llevan aleantes, con purezas del 99.00% de Al o más. Tienen muchas aplicaciones, especialmente en el campo químico y eléctrico en las que destaca especialmente los rotores de motores eléctricos. En general esta aleación es usada donde se requiera conductividad eléctrica, aleaciones usadas para estas aplicaciones incluyen la 100.0 y 170.0 ^[3].

2xx.x (Al-Cu) Esta aleación tiene contenidos del 4-8% de cobre, con algunas impurezas. Son tratables térmicamente y pueden alcanzar alta resistencia y ductilidad, especialmente si se preparan a partir de un lingote que contenga menos de 0.15 % de hierro. Las aleaciones Al-Cu son de fase única. El principal atributo de las aleaciones altas en cobre (7 a 8%) es su insensibilidad a las impurezas. Esta aleación es utilizada donde se requiera esfuerzo a la cedencia y elongación moderada. Las aplicaciones de esta aleación incluyen: cabezas automotrices, pistones, engranes, carcazas de bombas. Las aleaciones usadas son la 201.0, A201.0, A206.0, 208.0 222.0, etc ^[3].

3xx.x (Al-Si-Mg), (Si-Cu) o (Si-Mg-Cu) De este tipo de aleaciones, las más ampliamente utilizadas son las que contiene silicio y cobre ^[2]. En estas aleaciones el cobre proporciona resistencia y el silicio facilita el vaciado, reduciendo defectos en el material al ir

solidificando; por lo tanto, las aleaciones con contenidos altos de silicio se utilizan para producir piezas de formas intrincadas. Las aleaciones cuando contienen más de 3 % de cobre son tratables térmicamente, aunque normalmente estos tratamientos se realizan cuando la aleación contiene también magnesio, el cual incrementa la respuesta al tratamiento. Las aleaciones de alto silicio (mayor al 10%) presentan baja expansión térmica y presentan algunas ventajas en operaciones a altas temperaturas. Cuando el contenido de silicio excede del 12 ó 13% (puede ser tan alto como el 22%), se presentan cristales primarios de silicio y si se encuentran apropiadamente distribuidos, imparten excelente resistencia al desgaste ^[4]. En general este tipo de aleaciones presentan buena fluidez, resistencia al agrietamiento en caliente, buena soldabilidad, bajos rechupes por solidificación, resistencia a corrosión y resistencia mecánica moderada. Dentro de las aplicaciones están las aplicaciones ornamentales, reflectores, partes de suspensión, pistones, y principalmente, monobloques y cabezas automotrices. Las aleaciones más comunes son las siguientes: 308.0, 319.0, A319.0, B319.0, 320.0, 332.0, 333.0, A333.0, A336.0, 354.0, 356.0 ^[3].

4xx.x (Al-Si) Cuando estas aleaciones no contienen cobre, son utilizadas donde se requiere buena resistencia a la corrosión y buenas características de vaciado. Las aleaciones con menos del 12% de silicio se denominan hipoeutécticas, las cercanas al 12% de silicio son eutécticas y aquellas que sobrepasan el 12% son llamadas hipereutécticas. En caso de que se requiera alta resistencia y dureza, la adición de magnesio provoca que estas aleaciones sean tratables térmicamente. Se han utilizado aleaciones con contenidos de silicio tan bajo como un 2%, pero normalmente este elemento se emplea en porcentajes de entre un 5 y un 13%; la resistencia y ductilidad de estas aleaciones, especialmente aquellas con alto silicio, se mejoran sustancialmente mediante la modificación de la fase eutéctica aluminio-silicio ^[5]. Este tipo de aleaciones son de uso general, teniendo buenas características para vaciar en grandes cantidades, piezas con partes intrincadas de secciones delgadas. Se presentan buenas propiedades mecánicas además de una excelente resistencia a la corrosión y muy buena soldabilidad. Las aplicaciones de esta aleación son utensilios de cocina, aplicaciones marinas, ornamentales, propelas, defensas, etc ^[1].

5xx.x (Al-Mg) En este tipo de aleaciones el magnesio es el principal elemento aleante; son esencialmente aleaciones binarias de una sola fase con resistencia entre moderada y alta, lo mismo que su tenacidad. La principal ventaja de estas aleaciones es su alta resistencia a la corrosión, especialmente en atmósferas marinas ^[5], algunas de las aleaciones usadas en ambientes corrosivos son las siguientes: 512.0, 513.0, 514.0 y 535.0 ^[3]. Para la alta resistencia a la corrosión se requiere un bajo contenido de impurezas, por lo cual estas aleaciones se deben de preparar con metal de alta calidad. Estas aleaciones son adecuadas para ensambles soldados y son frecuentemente utilizadas para acabados arquitectónicos, en la construcción. En general estas aleaciones poseen buena maquinabilidad, de apariencia atractiva cuando se anodizan; pero la baja característica de vaciado y la tendencia del magnesio a oxidarse, aumenta la dificultad de manejo y por lo tanto su costo ^[6].

7xx.x (Al-Zn) Generalmente el contenido de cinc se encuentra en mayor proporción de los elementos aleantes, pero también tiene contenidos de cobre, magnesio, cromo o combinaciones de éstos ^[7]. Este tipo de aleaciones envejecidas en forma natural, alcanza su máxima resistencia a temperatura ambiente después de los 20-30 días de ser vaciadas. En estas aleaciones no es necesaria una temperatura demasiado alta de solubilizado ni un temple drástico para obtener propiedades óptimas, sin embargo puede ocurrir micro-segregación de las fases Mg-Zn, lo cual se contrapone a la regla de que a mayor rapidez de solidificación se obtienen mejores propiedades en la condición de vaciado ^[5]. En la condición de vaciado estas aleaciones presentan propiedades en tensión entre moderadas y buenas. Con tratamiento de recocido se obtiene buena estabilidad dimensional de la pieza de trabajo; poseen buena maquinabilidad, buena resistencia a la corrosión generalizada ^[3], pero no son recomendables para servicio a altas temperaturas porque se provoca un sobre-envejecimiento, el cual causa ablandamiento ^[8]. Entre las aleaciones comerciales se encuentran las siguientes: 710.0, 711.0, 712.0, 771.0 y 772.0 ^[3].

8xx.x (Al-Sn) Este tipo de aleaciones presentan un contenido de estaño de 6%, generalmente se utilizan para la fabricación de bujes y chumaceras, debido a la

lubricación impartida por el estaño. Estas aleaciones fueron desarrolladas para satisfacer las demandas de los equipos que requieren bujes, en donde la capacidad de carga, la resistencia a la fatiga y la resistencia a la corrosión sea alta (corrosión provocada por los aceites lubricantes en motores de combustión interna). Los bujes fabricados con estas aleaciones son superiores en lo general a los contruidos con la mayoría de los aceros. Las aleaciones más usadas son las siguientes 850.0, 851.0, 852.0, 853.0 [3].

2.3 El Aluminio en la Industria Automotriz

Las aleaciones de aluminio en vehículos automotores han logrado desplazar a las aleaciones ferrosas en un gran número de componentes. Primero en los llamados estructurales, tales como marcos para tablero, asientos, puertas y en últimas fechas a los componentes del tren motriz. La primera incursión se da en las cabezas de motor, que desde los últimos años de la década de los 80 empezaron a suplir a las pesadas unidades

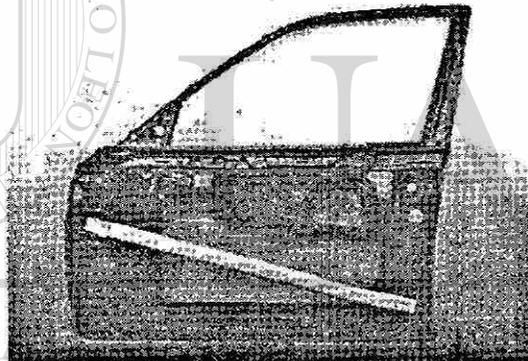


Figura 2.3.1 Puerta con barras para impactos, de aluminio [9]

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
de hierro gris. A partir de los 90, esta sustitución alcanzó a los monoblocks, que se utilizan actualmente en vehículos de alto desempeño debido a su alto costo de fabricación. Estas aleaciones, principalmente las de la serie 3XX, Al-Si-Cu-Mg, cuentan con una relación resistencia-peso bastante buena, son tratables térmicamente lo cual hace posible obtener resistencias mecánicas de hasta 240 MPa en tensión y hasta de 110 MPa de límite de fatiga, en procesos tales como gravedad en molde permanente lo cual coloca al aluminio como el material preferido por los diseñadores no sólo de la industria automotriz, sino de la aeroespacial, ferroviaria e incluso, en algunos casos, de la construcción. El principal beneficio de la migración de motores de hierro gris a motores

de aluminio es la considerable reducción en peso, con una densidad de sólo 2.7 g/cm^3 , comparados con los 7.8 g/cm^3 del hierro, estas aleaciones logran entre otras cosas incrementar las potencias y eficiencias de los vehículos; esto en un mundo cada vez más consciente del medio ambiente logra la reducción de emisiones y el consumo de combustibles fósiles.

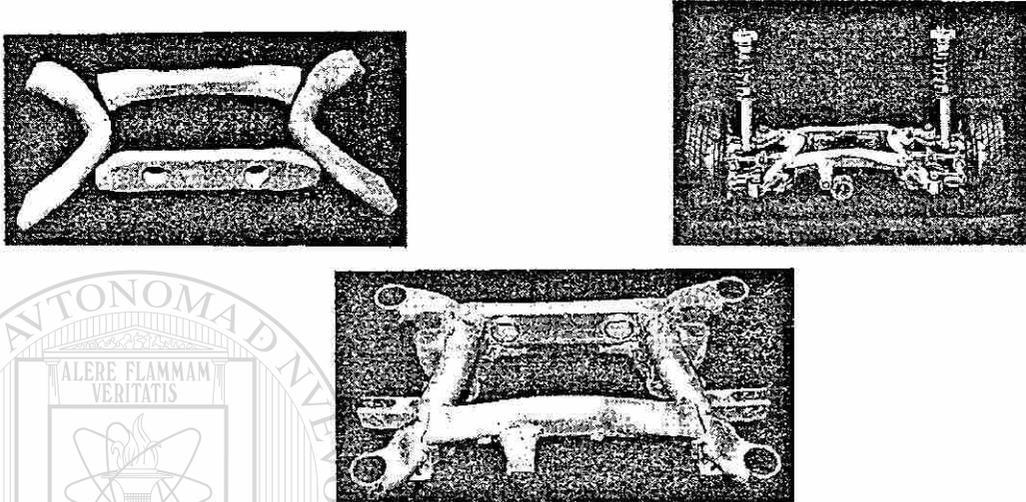


Figura 2.3.2 Ilustración de las partes de una suspensión de BMW serie 5 completamente ensamblado, incluyendo el eje trasero de aluminio ^[9]

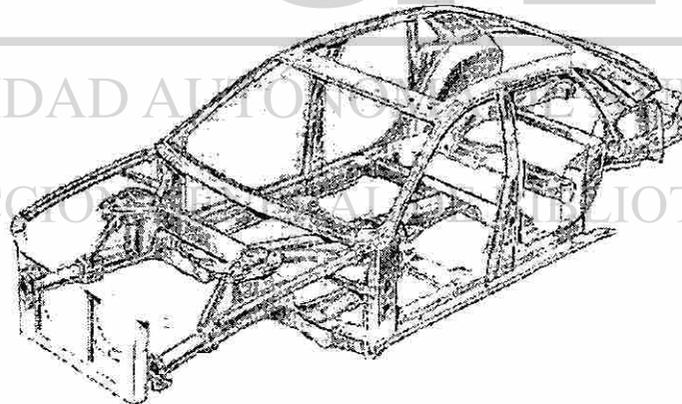


Figura 2.3.3 Carrocería fabricada de perfiles de aluminio ^[10]

2.4 Materiales Convencionales y Tecnología Silitec™

La migración de las cabezas de motor de hierro a aluminio no planteó un problema mayor a los ingenieros y diseñadores ya que las demandas de resistencia mecánica y transferencia de calor de estos componentes podían ser obtenidas de manera relativamente sencilla.

Con los monobloques es una historia distinta. El principal problema encontrado por los ingenieros de producto de todas las armadoras fue las propiedades tribológicas de las aleaciones de aluminio, variable clave durante la operación ya que la fricción del cilindro contra el pistón presenta un problema mayor. Para resolver esta situación se utilizaron varios métodos, el primero consiste en la inserción de cilindros de hierro dentro del monobloques después del vaciado, técnica conocida como “pressed in”. Esta técnica presenta varios inconvenientes, el más significativo es el alto costo de maquinado, ya que la precisión requerida es muy alta lo cual lleva a un alto índice de desperdicio. Otro de los métodos consiste en vaciar los cilindros junto con el monoblock, conocido como “cast-in”. Este método presenta un problema de proceso mayor, la diferencia en conductividad térmica del hierro contra el aluminio provoca que durante el enfriamiento de la pieza, se generen altos esfuerzos residuales en las zonas entre cilindros. Estos esfuerzos llegan a ser tan altos que en ocasiones fracturan los monoblocks.

Por otro lado, existe la posibilidad de generar una barrera térmica entre la cámara de combustión y el sistema de enfriamiento por la formación de un hueco entre los dos materiales durante la operación del motor.

Otra de las opciones consiste en vaciar los monoblocks sin cilindros y posteriormente aplicar un recubrimiento en la superficie con altas propiedades tribológicas, normalmente por medio de plasma, una vez más el proceso y el nivel de desperdicio son altos.

En este trabajo se explora la última tendencia en materiales para cilindros. Este nuevo material, conocido como Silitec™, desarrollado en Europa está siendo utilizado por primera vez en vaciado a alta presión en molde semipermanente en motores V8. Este material consiste en una aleación hipereutéctica aluminio-silicio que se fabrica por el proceso de aspersión de metal líquido y ha mejorado significativamente las propiedades mecánicas en comparación con los métodos actuales. Los cilindros de aluminio han probado tener muchas ventajas en comparación con los tradicionales de hierro gris, que actualmente siguen siendo utilizados. Entre las ventajas destacables de este material se tiene la reducción de peso de 500 g por cilindro (ya que el mismo cilindro, en hierro tiene un peso de 1.5 Kg.) y no se forman grietas en los puentes entre cilindros como sucede con las camisas de hierro al momento del enfriamiento.

Hay una óptima transferencia de calor, lo cual repercute en una disminución de temperatura. La composición química de la aleación asegura que el tamaño de las partículas de silicio sea entre 2 a 15 μm , lo cual permite el mejorar el desempeño tribológico^[11].

El proceso utilizado para fabricar los cilindros de aluminio se conoce como Osprey™ (aspersión de metal líquido) el cual, comparado con la técnica de vaciado normal, tiene las características de una estructura isotrópica homogénea de grano fino, libre de segregación y de grietas. También posee buenas propiedades mecánicas a temperatura ambiente y a alta temperatura. Alta resistencia a la abrasión, ya que el contenido de silicio es alto y se encuentra en forma de cristales primarios, además de buena maquinabilidad^[12].

El proceso se muestra en la Figura 2.4.1 y comienza fundiendo y sobrecalentando la aleación que se alimenta a una tobera cerámica en la cámara de pulverizado, en donde el líquido se atomiza con nitrógeno, las partículas se aceleran hacia un disco rotatorio y posteriormente se compactan en este disco. Los parámetros del proceso son fijados de tal forma que cerca del 80% de las partículas solidifica completamente durante la fase en que las partículas están en el aire.

El resto de las partículas son todavía líquidas cuando se impactan en la superficie del sustrato y se usan para crear el compuesto particulado. Como resultado de la rápida solidificación se forma una estructura homogénea de grano muy fino, con partículas de la fase de silicio de un tamaño promedio de $10\ \mu\text{m}$ [13].

El uso del nitrógeno como gas de proceso asegura el mínimo contenido de oxígeno e hidrógeno en la aleación, para cumplir con las especificaciones de porosidad en el cilindro una vez vaciado. La Figura 2.4.2 muestra la microestructura de aleación SAE390 vaciada por gravedad, la cual tiene una distribución heterogénea de partículas de silicio primario de tamaño entre 40 y $70\ \mu\text{m}$.

Esta microestructura se puede comparar con la que se muestra en la Figura 2.2.3, que presenta una estructura en la que las partículas de silicio están distribuidas en forma homogénea con un tamaño aproximado de 3 a $20\ \mu\text{m}$ [31].

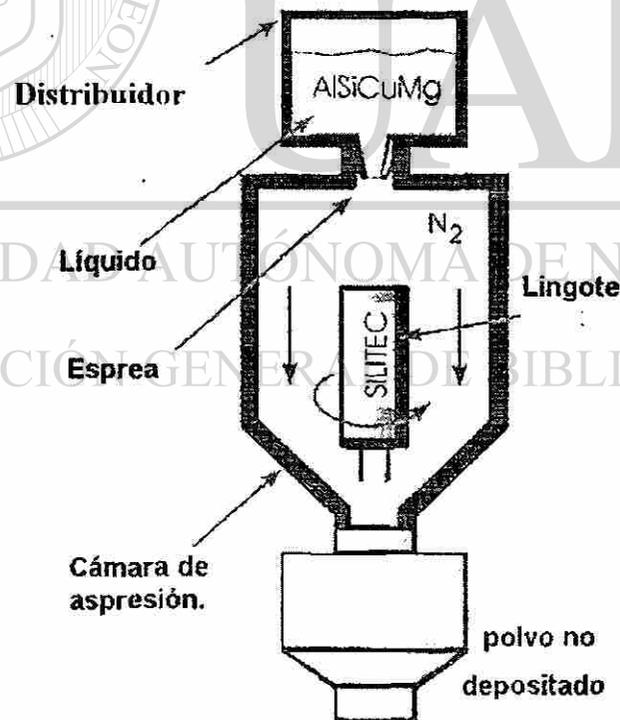


Figura 2.4.1 Método Ospray™ [13]

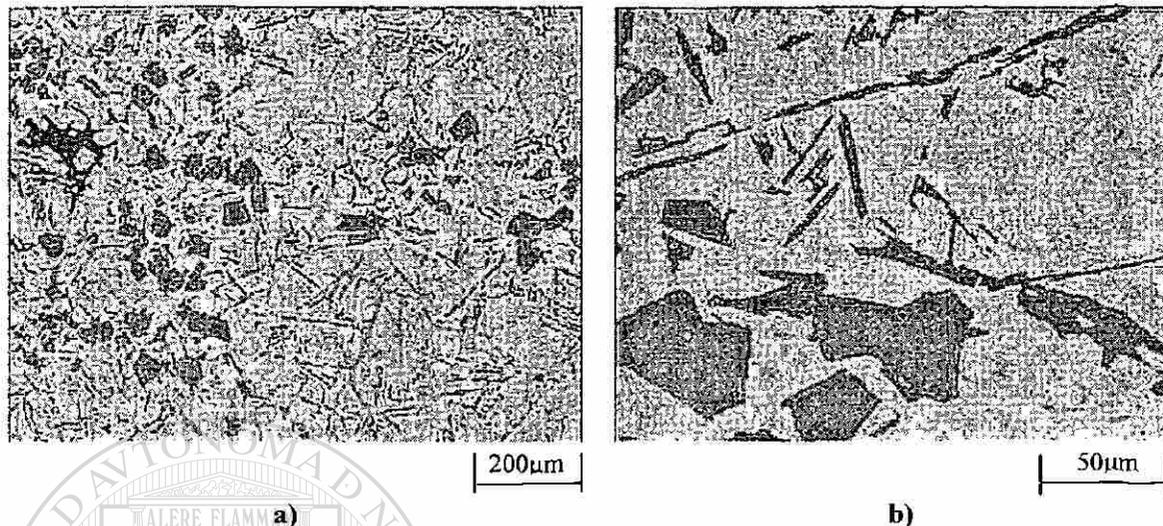


Figura 2.4.2 a) Micro estructura aleación SAE 390, vaciada por gravedad.100X. b) Misma micro estructura a 500X. ^[11]

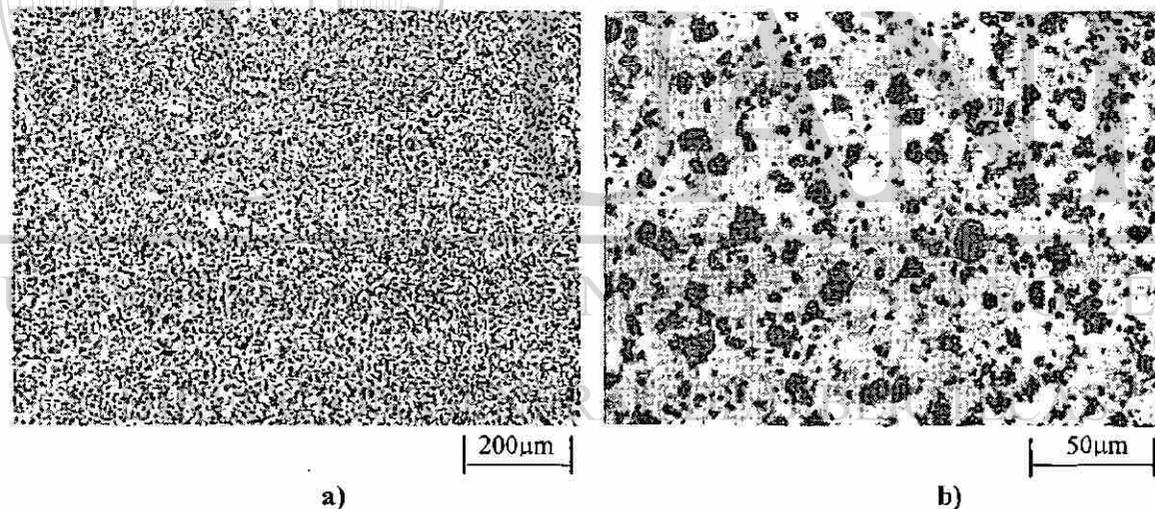


Figura 2.4.3 a) Micro-estructura con distribución homogénea de partículas de silicio, vaciada por el método Ospray^R. 100X. b) Misma microestructura a 500X ^[11]

El proceso que se lleva a cabo para la fabricación de las camisas, después de que se forman los tochos o lingotes (ver Figura 2.4.4) es el de extruido para formar tubos con espesores de pared de 10 a 15 mm. Debido a la alta resistencia a ser deformados se utiliza

extrusión indirecta. Una vez ya formados, se cortan en segmentos y se maquinan. Posteriormente se activa la superficie con el fin de propiciar la liga metálica ^[11].



Figura 2.4.4. Formación de lingotes ^[13]

Una vez vaciados el monobloque con la camisa, se prueba la adhesión que hay entre ambos. Para esto se utiliza un sistema de inmersión ultrasónica como el que se muestra en la Figura 2.4.5. La prueba se basa en los impulsos ultrasónicos reflejados. Los espacios de aire que hay en la interfase camisa-aluminio (si existen) son un obstáculo para dichas ondas y, por lo tanto, se reflejan. Este es el caso cuando no hay liga metálica entre la camisa y el aluminio. En el caso de tener una buena liga, las ondas de ultrasonido continúan su camino y no se reciben señales de impulsos reflejados. Debido a las altas frecuencias y a la geometría del monobloque es necesario transmitir los impulsos de ultrasonido a través del agua.

El monobloque se acopla a un disco rotatorio, de tal manera que cuando la prueba esta en curso éste se mueve y se recibe una señal de eco decodificada en una computadora, de tal modo que se presenta una imagen de la camisa. De este modo los cambios en tonalidad indican espacios de aire en la interfase de 0.5 μm mínimo y 20 μm

máximo y las áreas con buena liga metálica se representan coloreadas con tonalidades azul oscuro (ver Figura 2.4.6) ^[11].

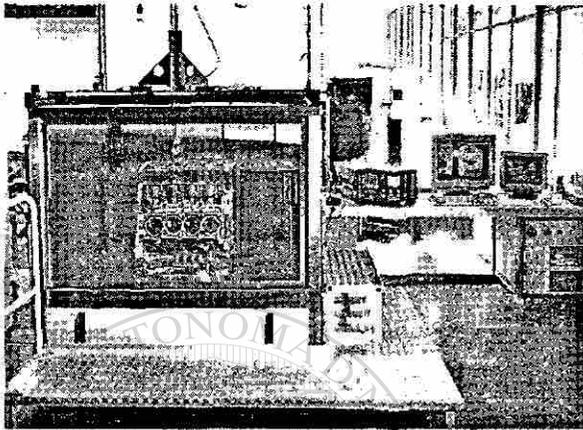


Figura 2.4.5. Equipo de ondas ultrasónicas para medir la liga metálica ^[11]

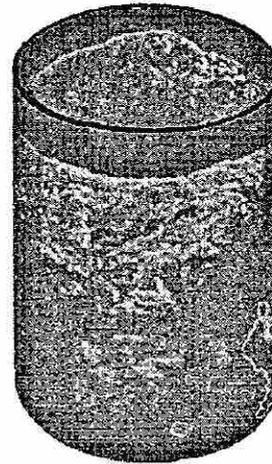


Figura 2.4.6 Representación de liga metálica por colores, donde el color rojo representa mala liga metálica y azul buena liga metálica ^[11]

La topografía final de la camisa se determina por un proceso de exposición con sosa cáustica de baja concentración (2%), el objetivo de este tratamiento es el de disolver la matriz de aluminio de tal manera que sólo los cristales de silicio resistentes a la abrasión estén en la pared del cilindro junto con el pistón y los anillos. En la Figura 2.2.7 se observa la topografía de la camisa una vez expuesta a sosa cáustica, los cristales de silicio levantados, sirven como retén de aceite de los anillos del pistón, mejorando la lubricación ^[11].

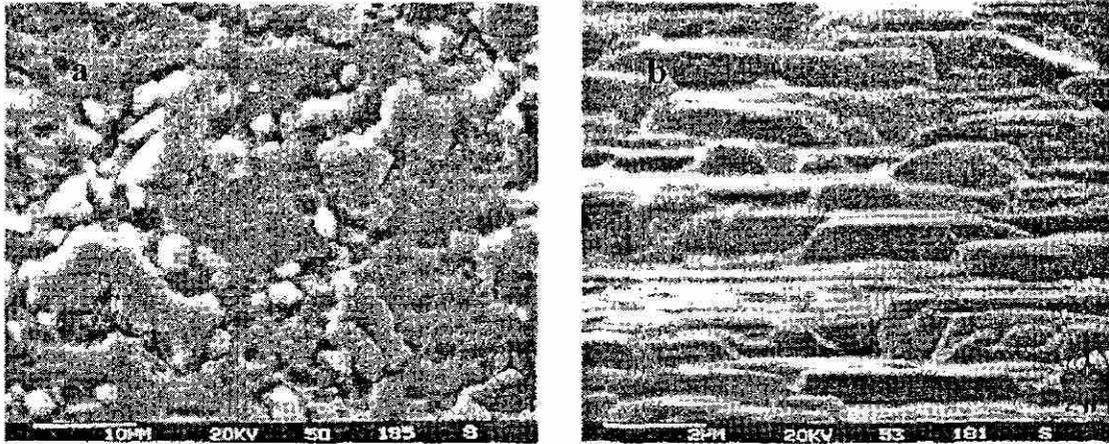


Figura 2.4.7 a) Topografía de la camisa vista con microscopio electrónico de barrido después de exponerse a NaOH, vista en ángulo alto (a). (b) Misma topografía vista en ángulo bajo ^[11]

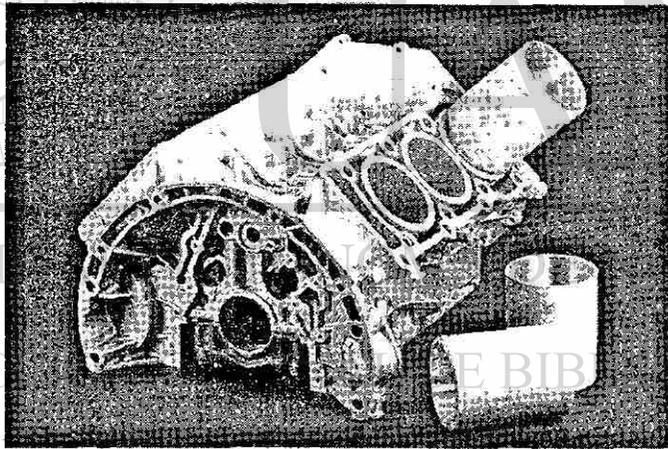


Figura 2.4.8 Monobloque de aluminio con camisas de aluminio ^[11]

CAPITULO 3

TRANSFERENCIA DE CALOR

3.1 Generalidades

La transferencia de calor es el proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura. El calor se transfiere mediante convección, radiación o conducción. Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos. Por ejemplo, el calor se transmite a través de la pared de una casa fundamentalmente por conducción, el agua de una cacerola situada sobre un quemador de gas se calienta en gran medida por convección y la tierra recibe calor del sol casi exclusivamente por radiación^[14].

3.1.1 Conducción

La única forma de transferencia de calor en los sólidos es la conducción. Si se calienta un extremo de una varilla metálica, de forma que aumente su temperatura, el calor se transmite hasta el extremo más frío por conducción. No se comprende en su totalidad el mecanismo exacto de la conducción de calor en los sólidos, pero se cree que se debe, en parte, al movimiento de los electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura. Esta teoría explica por qué los buenos conductores eléctricos también tienden a ser buenos conductores del calor. En 1822, el matemático francés Joseph Fourier dio una expresión matemática precisa que hoy se conoce como ley de Fourier de la conducción del calor. Esta ley afirma que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo (con el signo cambiado)^[14].

El factor de proporcionalidad se denomina conductividad térmica del material. Los materiales como el oro, la plata o el cobre tienen conductividades térmicas elevadas y conducen bien el calor, mientras que materiales como el plástico o el amianto tienen conductividades cientos e incluso miles de veces menores; conducen muy mal el calor, y se conocen como aislantes. En ingeniería resulta necesario conocer la velocidad de conducción del calor a través de un sólido en el que existe una diferencia de temperatura conocida. Para averiguarlo se requieren técnicas matemáticas complejas, sobre todo si el proceso varía con el tiempo; en este caso, se habla de conducción térmica transitoria. Con la ayuda de computadoras analógicas y digitales, estos problemas pueden resolverse en la actualidad incluso para cuerpos de geometría complicada^[14].

3.1.2 Convección

Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección. El movimiento del fluido puede ser natural o forzado. Si se calienta un líquido o un gas, su densidad (masa por unidad de volumen) suele disminuir. Si el líquido o gas se encuentra en el campo gravitatorio, el fluido más caliente y menos denso asciende, mientras que el fluido más frío y más denso desciende. Este tipo de movimiento, debido exclusivamente a la no-uniformidad de la temperatura del fluido, se denomina convección natural. La convección forzada se logra sometiendo el fluido a un gradiente de presiones, con lo que se fuerza su movimiento de acuerdo a las leyes de la mecánica de fluidos^[14].

Supóngase, por ejemplo, que se calienta desde abajo una cacerola llena de agua. El líquido más próximo al fondo se calienta por el calor que se ha transmitido por conducción a través de la cacerola. Al expandirse, su densidad disminuye y como resultado de ello el agua caliente asciende y parte del fluido más frío baja hacia el fondo, con lo que se inicia un movimiento de circulación. El líquido más frío vuelve a calentarse por conducción, mientras que el líquido más caliente situado arriba pierde parte de su calor por radiación y lo cede al aire situado por encima. De forma similar, en una cámara vertical llena de gas, como la cámara de aire situada entre los dos paneles de una ventana con doble vidrio, el aire situado junto al panel exterior —que está más frío— desciende,

mientras que al aire cercano al panel interior —más caliente— asciende, lo que produce un movimiento de circulación^[14].

El calentamiento de una habitación mediante un radiador no depende tanto de la radiación como de las corrientes naturales de convección, que hacen que el aire caliente suba hacia el techo y el aire frío del resto de la habitación se dirija hacia el radiador. Debido a que el aire caliente tiende a subir y el aire frío a bajar, los radiadores deben colocarse cerca del suelo (y los aparatos de aire acondicionado cerca del techo) para que la eficiencia sea máxima. De la misma forma, la convección natural es responsable de la ascensión del agua caliente y el vapor en las calderas de convección natural y del tiro de las chimeneas. La convección también determina el movimiento de las grandes masas de aire sobre la superficie terrestre, la acción de los vientos, la formación de nubes, las corrientes oceánicas y la transferencia de calor desde el interior del sol hasta su superficie^[14].

3.1.3 Radiación

La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío. La radiación es un término que se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas. Algunos fenómenos de la radiación pueden describirse mediante la teoría de ondas, pero la única explicación general satisfactoria de la radiación electromagnética es la teoría cuántica. En 1905, Albert Einstein sugirió que la radiación presenta a veces un comportamiento cuantizado en el efecto fotoeléctrico, la radiación se comporta como minúsculas partículas llamados fotones y no como ondas. La naturaleza cuántica de la energía radiante se había postulado antes de la aparición del artículo de Einstein y en 1900 el físico alemán Max Planck empleó la teoría cuántica y el formalismo matemático de la mecánica estadística para derivar una ley fundamental de la radiación. La expresión matemática de esta ley, llamada distribución de Planck, relaciona la intensidad de la energía radiante que emite un cuerpo en una longitud de onda determinada con la temperatura del cuerpo. Para cada temperatura y cada longitud de onda existe un máximo

de energía radiante. Sólo un cuerpo ideal (cuerpo negro) emite radiación ajustándose exactamente a la ley de Planck. Los cuerpos reales emiten con una intensidad algo menor [14].

La contribución de todas las longitudes de onda a la energía radiante emitida se denomina poder emisor del cuerpo y corresponde a la cantidad de energía emitida por unidad de superficie del cuerpo y por unidad de tiempo. Se demuestra a partir de la ley de Planck que el poder emisor de una superficie es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. El factor de proporcionalidad se denomina constante de Stefan-Boltzmann en honor a dos físicos austriacos, Joseph Stefan y Ludwig Boltzmann que, en 1879 y 1884 respectivamente, descubrieron esta proporcionalidad entre el poder emisor y la temperatura. Según la ley de Planck, todas las sustancias emiten energía radiante sólo por tener una temperatura superior al cero absoluto. Cuanto mayor es la temperatura, mayor es la cantidad de energía emitida. Además de emitir radiación, todas las sustancias son capaces de absorberla. Por eso, aunque un cubito de hielo emite energía radiante de forma continua, se funde si se ilumina con una lámpara incandescente porque absorbe una cantidad de calor mayor de la que emite [14].

Las superficies opacas pueden absorber o reflejar la radiación incidente. Generalmente, las superficies mates y rugosas absorben más calor que las superficies brillantes y pulidas y las superficies brillantes reflejan más energía radiante que las superficies mates. Además, las sustancias que absorben mucha radiación también son buenos emisores; las que reflejan mucha radiación y absorben poco son malos emisores. Por eso, los utensilios de cocina suelen tener fondos mate para una buena absorción y paredes pulidas para una emisión mínima, con lo que maximizan la transferencia total de calor al contenido de la cazuela [14].

Algunas sustancias, entre ellas muchos gases y el vidrio, son capaces de transmitir grandes cantidades de radiación. Se observa experimentalmente que las propiedades de absorción, reflexión y transmisión de una sustancia dependen de la longitud de onda de la radiación incidente. El vidrio, por ejemplo, transmite grandes cantidades de radiación ultravioleta, de baja longitud de onda, pero es un mal transmisor de los rayos infrarrojos,

de alta longitud de onda. Una consecuencia de la distribución de Planck es que la longitud de onda a la que un cuerpo emite la cantidad máxima de energía radiante disminuye con la temperatura. La ley de desplazamiento de Wien, llamada así en honor al físico alemán Wilhelm Wien, es una expresión matemática de esta observación, y afirma que la longitud de onda que corresponde a la máxima energía, multiplicada por la temperatura absoluta del cuerpo, es igual a una constante, $2.878 \mu\text{mK}$. Este hecho, junto con las propiedades de transmisión del vidrio antes mencionadas, explica el calentamiento de los invernaderos. La energía radiante del sol, máxima en las longitudes de onda visibles, se transmite a través del vidrio y entra en el invernadero. En cambio, la energía emitida por los cuerpos del interior del invernadero, predominantemente de longitudes de onda mayor, correspondiente al infrarrojo, no se transmiten al exterior a través del vidrio. Así, aunque la temperatura del aire en el exterior del invernadero sea baja, la temperatura que hay dentro es más alta porque se produce una transferencia de calor neta hacia su interior^[14].

Además de los procesos de transmisión de calor que aumentan o disminuyen las temperaturas de los cuerpos afectados, la transmisión de calor también puede producir cambios de fase, como la fusión del hielo o la ebullición del agua. En ingeniería, los procesos de transferencia de calor suelen diseñarse de forma que aprovechen estos fenómenos. Por ejemplo, las cápsulas espaciales que regresan a la atmósfera de la tierra a velocidades muy altas están dotadas de un escudo térmico que se funde de forma controlada en un proceso llamado ablación para impedir un sobrecalentamiento del interior de la cápsula. La mayoría del calor producido por el rozamiento con la atmósfera se emplea en fundir el escudo térmico y no en aumentar la temperatura de la cápsula^[14].

Con las condiciones frontera e iniciales

$$\theta = \theta_i = T_i - T_1 \quad \text{en } \tau = 0, 0 \leq x \leq 2L \quad \text{(a)}$$

$$\theta = 0 \quad \text{en } x = 0, \tau > 0 \quad \text{(b)}$$

$$\theta = 0 \quad \text{en } x = 2L, \tau > 0 \quad \text{(c)}$$

Suponiendo que la solución se puede expresar como un producto $\theta(x, \tau) = X(x)T(\tau)$, se producen dos ecuaciones diferenciales ordinarias

$$\frac{d^2 X}{dx^2} + \lambda^2 X = 0 \quad \text{(Ec. 3.2.3)}$$

$$\frac{dT}{d\tau} + \alpha \lambda^2 T = 0 \quad \text{(Ec. 3.2.4)}$$

donde λ^2 es la constante de separación. Para poder satisfacer las condiciones de frontera es necesario que λ^2 sea > 0 así la solución es

$$\theta = (C_1 \cos \lambda x + C_2 \operatorname{sen} \lambda x) e^{-\lambda^2 \alpha \tau} \quad \text{(Ec. 3.2.5)}$$

De la condición frontera (b), $C_1 = 0$ para $\tau > 0$. Debido a que C_2 no puede ser también cero, de la condición frontera (c) $\operatorname{sen} 2L\lambda = 0$, o

$$\lambda = \frac{n\pi}{2L} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad \text{(Ec. 3.2.6)}$$

La serie final es entonces

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-[n\pi/2L]^2 \alpha \tau} \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{2L} \quad \text{(Ec. 3.2.7)}$$

Esta ecuación es una expansión de senos de Fourier con la constante C_n determinada por la condición inicial (a) y la siguiente ecuación

$$C_n = \frac{1}{L} \int_0^{2L} \theta_i \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{2L} dx = \frac{4}{n\pi} \theta_i \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad \text{(Ec. 3.2.8)}$$

La serie solución final es entonces

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_1}{T_i - T_1} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-[n\pi/2L]ax} \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{2L} \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (\text{Ec. 3.2.9})$$

Estas son las ecuaciones a desarrollar en la solución del problema presentado en esta Tesis.

3.3 Transferencia de Calor en Interfases

Existen diversos métodos para el cálculo de transferencia de calor en interfases, entre los más utilizados figuran las diferencias finitas y el Método Inverso de Beck (MIB) ^{[16], [17], [18]}. En este último, cuando el problema involucra propiedades termo-físicas, temperaturas, distancias y tiempos es posible encontrar cualquiera de las variables conociendo puntos de temperatura intermedios, incluidos aquellos que por geometría estén formando interfases. El concepto del método es sencillo, no siendo así la matemática que lo describe, es aquí donde las computadoras y los programas avanzados entran al problema. Teniendo las ecuaciones que describen la transferencia, las condiciones fronteras e iniciales, es posible calcular todos los puntos intermedios que sea necesario, para así obtener el perfil de temperaturas presente a lo largo del o los materiales involucrados.

Cuando existe una interfase entre materiales y éstos están sujetos a un flujo de calor siempre habrá una resistencia a este flujo, normalmente ocasionada por un hueco de aire, un recubrimiento o ambos ^[19]. Cuando el caso es el de un metal solidificando sobre otro, el efecto combinado entre la diferencia de contracción de los materiales durante el proceso, así como la incorporación de recubrimientos, ya sean de protección o para facilitar el vaciado, son los responsables de esta formación de intersticios entre los materiales involucrados. Una vez que el sistema se encuentra sólido, este hueco de aire permanece y es afectado por calentamientos y enfriamientos del sistema, especialmente si los materiales en contacto tienen coeficientes de expansión muy diferentes.

Cuando se trata de sistemas en los cuales la tasa de transferencia de calor determina las condiciones en las que opera una máquina, el cálculo de la caída de temperatura en estas interfases cobra suma importancia. En el presente estudio, la tasa de transferencia de calor entre la cámara de combustión y el sistema de refrigeración de un motor de combustión interna, afecta de manera significativa el desempeño de los vehículos en los cuales se utilizan. Factores como potencia, peso, eficiencia de combustible y vida del motor están íntimamente ligados a este fenómeno.

3.4 Transferencia de Calor en Máquinas de Combustión Interna

La temperatura pico de los gases de combustión en el cilindro de una máquina de combustión interna es del orden de los 2500 K de manera instantánea. La temperatura máxima a la que pueden operar los componentes del motor es mucho menor, de aquí la importancia de proveer un enfriamiento a la cabeza, los cilindros y pistones. Mediante estos sistemas es posible alcanzar tasas de transferencia de calor a través de las paredes de estos componentes de hasta 10 MW/m^2 durante el ciclo de combustión^[28]. Las zonas que están en contacto directo con los gases de la combustión, deben mantenerse por debajo del límite de fatiga térmica del material, en el caso de las aleaciones de aluminio esta temperatura no debe exceder los 300°C ^[28]. La temperatura de la pared interna del cilindro debe mantenerse por debajo de los 180°C para evitar la degradación de la película de lubricante. Las bujías y las válvulas deben mantenerse frías también para evitar problemas de pre-ignición y “cascabeleo”^[28]. Resolver esta situación es obviamente un problema mayor de diseño. Por otro lado la transferencia de calor afecta de manera directa el desempeño, eficiencia y las emisiones de un motor.

3.4.1 Modos de Transferencia de Calor en Máquinas de Combustión Interna

Conducción: El calor se transfiere por movimiento molecular en sólidos y líquidos en reposo debido a una diferencia de temperatura. Este es el mecanismo predominante en la transferencia a través de la cabeza, las paredes de los cilindros y el pistón, de los anillos de este último al monobloque y a los múltiples de escape^[28].

Convección: En este mecanismo, el calor se transmite a través de los fluidos en movimiento y entre un fluido y una superficie sólida con movimiento relativo. Cuando este movimiento se produce por una fuerza distinta a la gravedad, se utiliza el término *convección forzada*. Cabe mencionar que en los motores, todos los fluidos se mueven de manera turbulenta.

El calor se transfiere por convección forzada entre los gases en la cámara de combustión y la cabeza del motor, válvulas, paredes del cilindro y pistón durante los ciclos de inducción, compresión, expansión y durante la salida de los mismos por los ductos de escape. Este calor se transfiere por convección forzada a los fluidos refrigerantes (que pueden ser un líquido o un gas), y de los pistones al lubricante. Por último este calor es transferido también por convección del motor al ambiente ^[28].

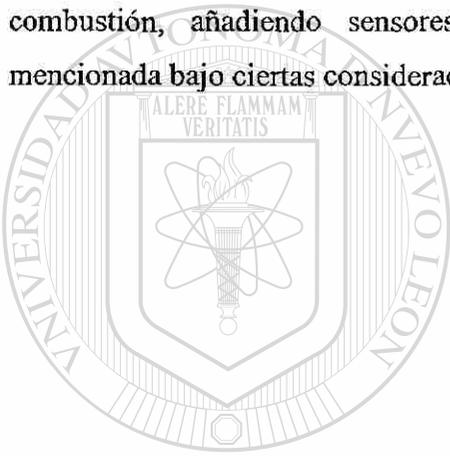
Radiación: La transferencia de calor por radiación ocurre a través de la emisión y absorción de ondas electromagnéticas. Las longitudes de onda a las cuales la energía es transformada en energía térmica son el rango visible (0.4 a 0.7 μm) y el infrarrojo (0.7 a 40 μm). La transferencia de calor por radiación ocurre desde los gases de combustión a alta temperatura y la región de la flama hacia las paredes de la cámara de combustión (sin embargo la magnitud de la transferencia por radiación es, en comparación con la convección, insignificante. (Sólo se vuelve importante en los motores diesel). Por el solo hecho de estar caliente, el motor emite calor por radiación al ambiente.

3.4.2 Métodos de Medición de Transferencia de Calor en Máquinas de Combustión Interna

Una vez entendida la importancia de la medición de la tasa de transferencia de calor en las máquinas de combustión interna, se necesitan desarrollar técnicas para poder medirlas. La mayoría de los proyectos de investigación a este respecto, se enfocan a la medición de la temperatura de los gases de combustión por medio de un método conocido como “Coherent Anti-Stokes Raman Scattering” o CARS usando termopares. La medición por medio de termopares implica un bajo ancho de banda y errores muy grandes ^[29].

Técnicas experimentales avanzadas, utilizadas en medición de temperatura de gases en sistemas de turbinas de gas, están utilizando termómetros de resistencia que consisten en láminas delgadas de platino. Por este método ha sido posible obtener la tasa de transferencia de calor, desde la superficie de la tapa del pistón y la cabeza de motor expuestas a los gases de combustión. La velocidad de respuesta de los termómetros de platino es de 100kHz, que ha probado ser adecuado para detectar los rápidos cambios en la temperatura interna de los componentes ^[29].

Otro método involucra una relación entre la tasa de transferencia de calor y la presión interna del cilindro. Se instalan sensores de presión dentro de la cámara de combustión, añadiendo sensores de temperatura es posible obtener la relación mencionada bajo ciertas consideraciones ^[30].



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO 4

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.1 Introducción

El objetivo de este trabajo es el de determinar la existencia y magnitud de la barrera térmica entre el material de un monobloque automotriz y las camisas de los cilindros. Se llevaron a cabo pruebas entre la aleación tipo A319 y camisas de hierro gris y de aluminio fabricadas por el proceso Silitec™. Así mismo se vaciaron cilindros de hierro gris convencionales, utilizados actualmente en ese tipo de motores.

Para las muestras con camisas de hierro gris, se vaciaron una serie de monobloques a los que se les retiraron los corazones destinados a dar origen a los ductos por los que fluyen los líquidos refrigerantes. Se produjeron varios monoblocks de 4 cilindros en línea, en algunos casos se emplearon camisas de hierro gris ahumadas y en otros se procedió al calentamiento de la misma previo al vaciado. La superficie de los monobloques se maquinó y se perforaron una serie de barrenos de 1.6 mm de diámetro en la camisa y la pieza de aluminio en los que se insertaron termopares tipo K. En la Tabla 4.1.1 se presentan las condiciones bajo las cuales se llevaron a cabo las pruebas, en la columna de calentamiento se indica el dispositivo o método usado para calentar las camisas.

El monobloque se seccionó y estas secciones se aislaron con fibra cerámica para posteriormente introducir una resistencia eléctrica, controlada por estado sólido, al interior de la camisa. Los termopares se conectaron a un sistema computarizado de captura de datos ^[2] y las pruebas se corrieron hasta que los termopares registraron el

Tabla 4.1.1. Pruebas realizadas con camisas de hierro.

| Prueba | Película de Carbón | Calentamiento | T. ambiente (C) |
|----------|--------------------------------|---------------|-----------------|
| A | No | No | 22 |
| B | Si | No | 20 |
| C | Si | Aire | 23 |
| D | Si | Aire | 22 |
| E | No | Inducción | 21 |
| F | No | Inducción | 20 |
| G | Si | No | 23 |
| H | Al ₂ O ₃ | Inducción | 25 |
| I | Al ₂ O ₃ | Inducción | 23 |

estado estacionario. La generación de un gradiente térmico unidireccional se aseguró mediante el enfriamiento por aire en una superficie de la sección.

4.2 Diseño del Molde para el Vaciado de las Camisas Silitec™

Debido a que el proceso actual no está diseñado para el vaciado de camisas de aleación de aluminio, se tuvo que utilizar otro método de vaciado para la obtención de las muestras con estas camisas. Para tal efecto, se utilizó un molde de arena^[1] en el cual se vaciaron las muestras con los cilindros de aleación Silitec™. Se utilizó la misma aleación de aluminio tipo A319 utilizada en el vaciado de las muestras con camisas de hierro gris; la geometría de las piezas se muestra en la figura 4.2.1. Una vez vaciadas, las piezas se cortaron en tres secciones, arriba (U), parte media (M) y abajo (L), esto bajo la sospecha de una adherencia diferente entre las alturas debido a la caída de temperatura del metal al subir por la pared del cilindro, posteriormente las secciones se enviaron a maquinar para obtener caras paralelas. Se fabricó una resistencia embebida en aluminio para utilizarla como fuente de calor. Un controlador digital mantuvo la temperatura estable durante el experimento. Por medio de un sistema digital de adquisición de datos^[2] se grabaron las temperaturas y los tiempos durante todas las pruebas.

El diseño del molde consiste en una geometría sencilla que a la vez genera una velocidad de solidificación lenta, semejante a la de un monobloque automotriz, consiste en una pirámide truncada invertida y hueca con un alimentador, Figura 4.2.1. Se implementó el uso de filtros cerámicos para evitar flujo turbulento y capturar la mayor cantidad de óxidos posibles que pudieran afectar la medición final.

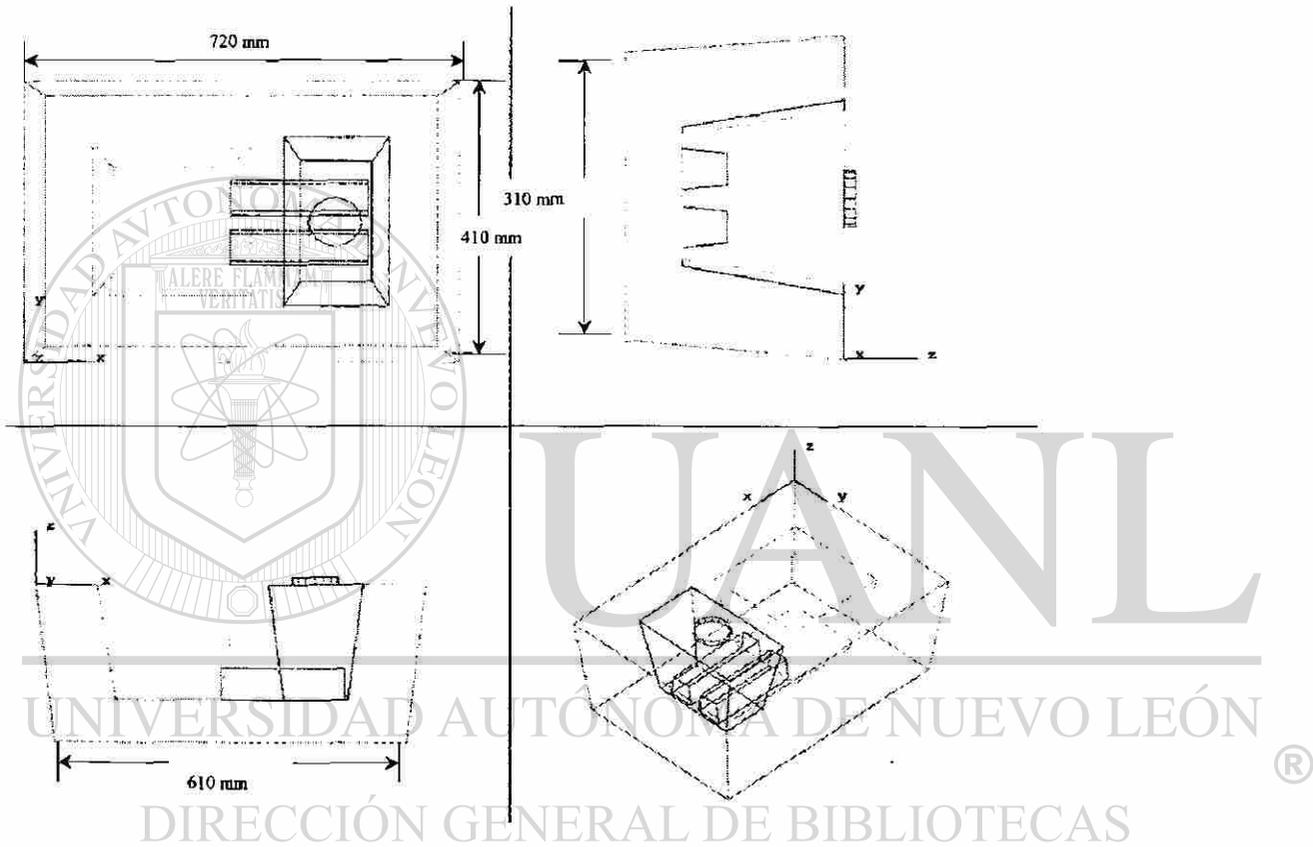


Figura 4.2.1 Dibujo Esquemático del molde empleado.

4.3 Fabricación del molde y condiciones de superficie de la camisa

El molde se fabricó por apisonamiento manual en cajas de madera. El cilindro se llenó de arena y se colocó en posición después del curado con ayuda de un pegamento especial para corazones de arena sílica. Los filtros se colocaron una vez completo el molde y se preparó la superficie del cilindro. Se utilizaron cuatro condiciones superficiales: 1. Como llega el cilindro del proveedor (J), 2. Como llega del proveedor y película de carbón (K), 3. Moleteado (L), 4. Moleteado y película de carbón (M) En la tabla 4.3.1 se muestran

Tabla 4.3.1. Pruebas realizadas con camisas de Aluminio.

| Prueba | Película de Carbón | Moleteado | T. ambiente (C) |
|--------|--------------------|-----------|-----------------|
| J | No | No | 22 |
| K | Si | No | 20 |
| L | No | Si | 23 |
| M | Si | Si | 22 |

estos experimentos. La película de carbón se aplicó directamente sobre la superficie del cilindro con ayuda de un soplete.

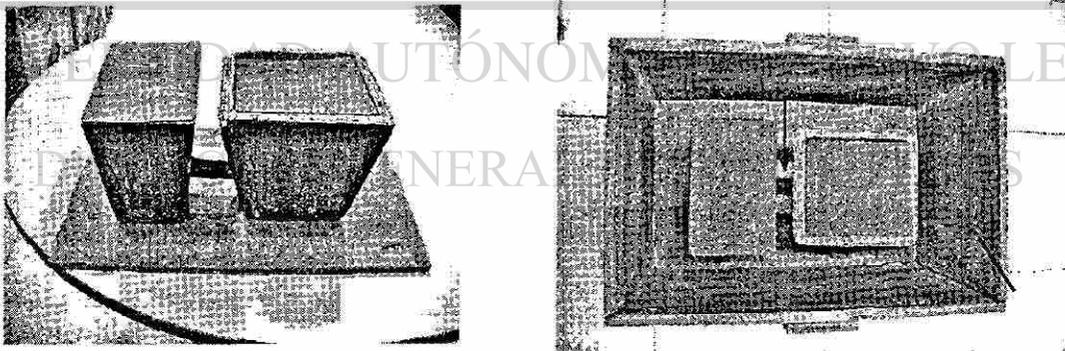


Figura 4.3.1 Modelo de madera utilizado en la fabricación de los moldes

La Figura 4.3.1 muestra el modelo de madera utilizado para la fabricación de los moldes de arena sílica, en ella se puede observar el sistema de alimentación (A), la

cavidad de vaciado (B) y la cavidad donde se coloca el cilindro (C) y la caja que forman las paredes del molde (D).

El primer paso en la elaboración del molde, Figura 4.3.2, es colocar dentro de la caja una cama de arena de aproximadamente 50 milímetros (a), sobre esta cama se colocan posteriormente las demás piezas del modelo (b) y se llena hasta el borde apisonando manualmente durante el proceso (c).

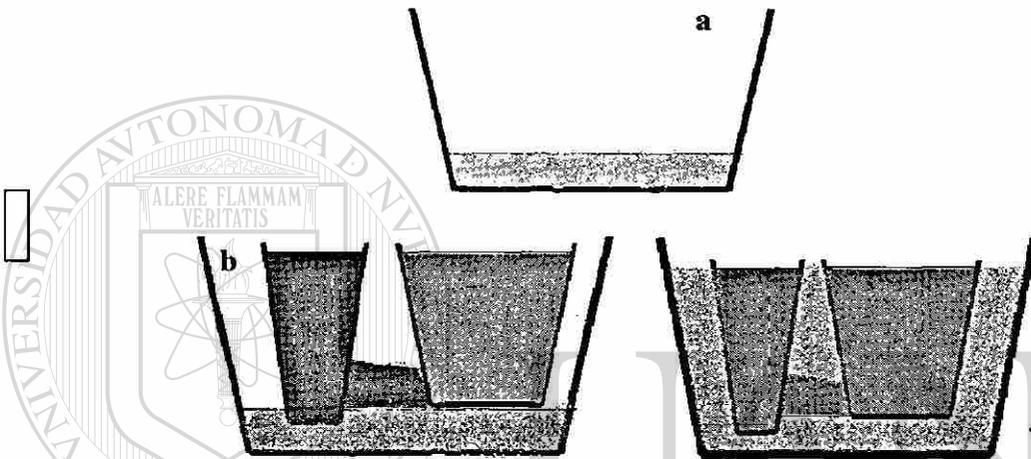


Figura 4.3.2 Secuencia de fabricación del molde de arena.

Una vez fraguada la mezcla de arena-resina se colocan los filtros y el cilindro, este último preparado simultáneamente al molde, Figura 4.3.3. En esta etapa se realiza la preparación de la superficie del cilindro.

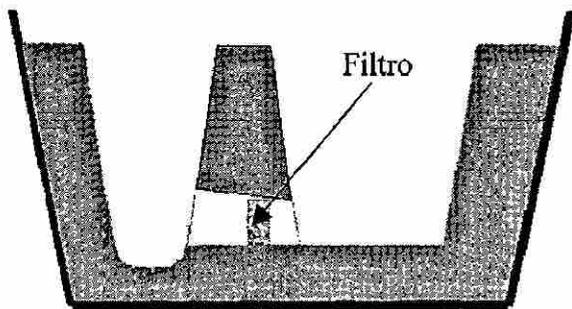


Figura 4.3.3 Ubicación de filtro cerámico

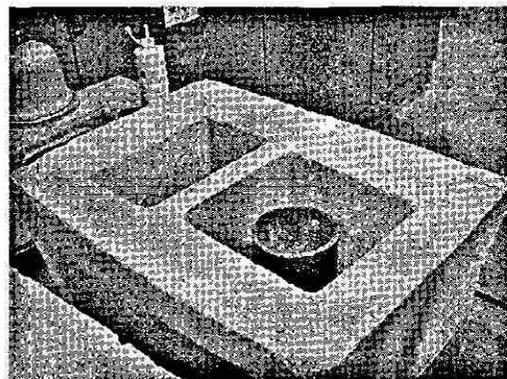


Figura 4.3.4 Molde listo para vaciado

4.4 Transferencia de Calor

Una vez vaciadas las muestras, éstas se seccionan en tres partes, desde la parte baja hasta la alta y se maquinan para obtener caras paralelas, Figura 4.4.2. Se perforaron barrenos de 1.6 mm desde una de las esquinas a 5 mm de distancia uno de otro a partir de la interfase entre los dos materiales como se ilustra en la Figura 4.4.1. En estos barrenos se colocaron termopares tipo K para registrar las temperaturas, Figura 4.4.2.

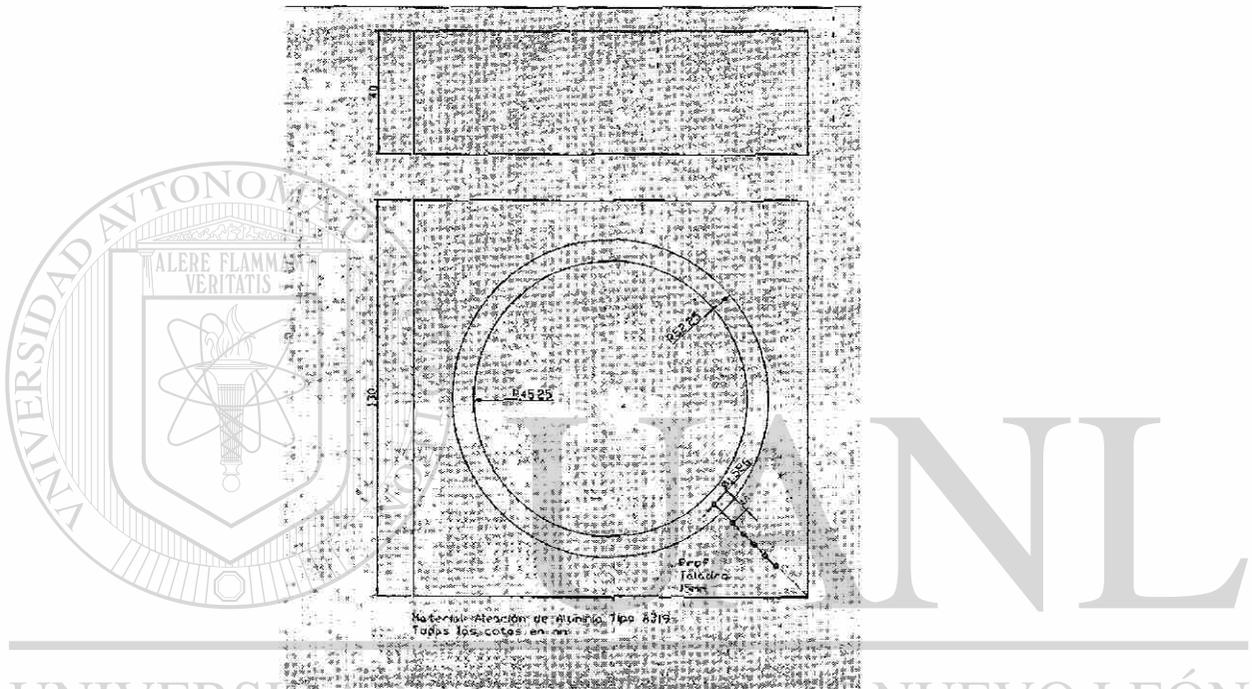


Figura 4.4.1 Secciones utilizadas para la medición y distribución de taladros

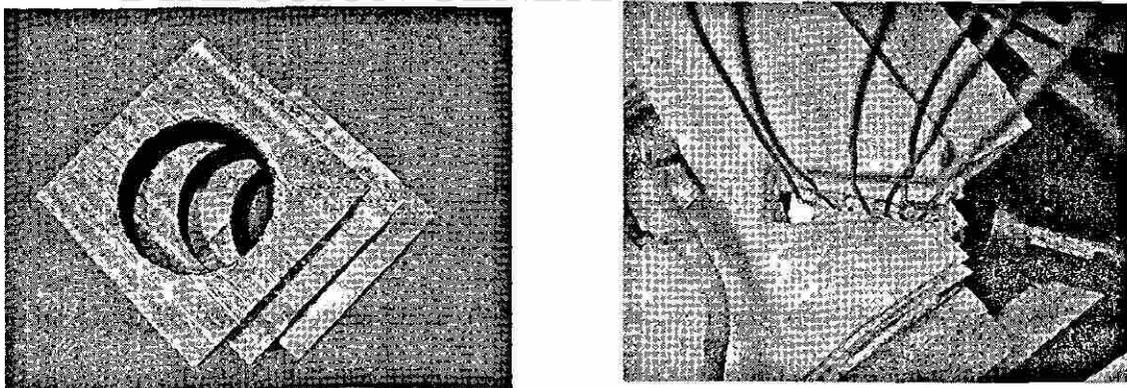


Figura 4.4.2 Secciones listas para el ensayo y colocación de termopares

Se utilizó un marco de madera relleno con fibra cerámica para aislar las caras de la pieza y así evitar el escape de calor. Se colocó una manguera con aire en línea con los termopares para forzar un flujo de calor unidireccional sobre la línea de medición de los termopares. Se utilizó como fuente de calor una resistencia eléctrica embebida en aluminio de 180 W. Esta resistencia se controló por medio de un dispositivo de control digital (Ver Figuras 4.4.3 a 4.4.6).

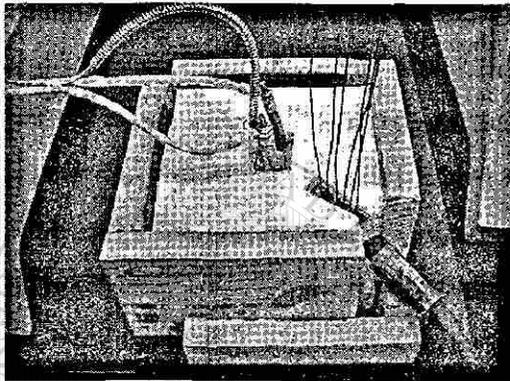


Figura 4.4.3 Arreglo general del experimento.

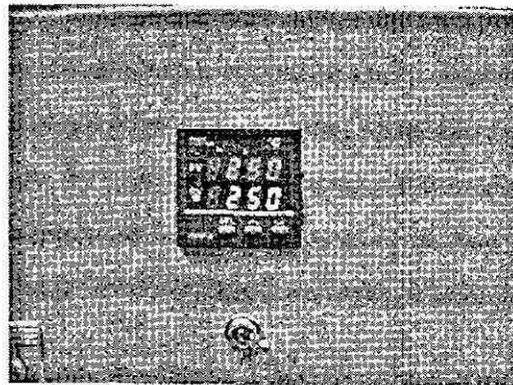


Figura 4.4.4 Control de Temperatura.

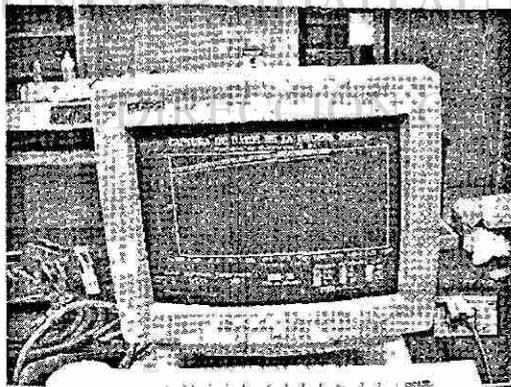


Figura 4.4.5 Sistema de adquisición de datos.

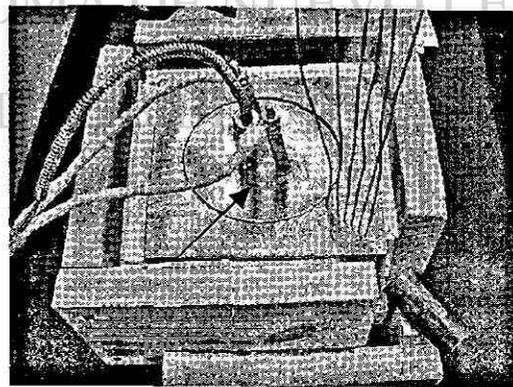


Figura 4.4.6 Resistencia eléctrica.

Una vez aislado el sistema y los termopares colocados en posición, se calentó a una temperatura de 250 °C y se dejó correr la prueba hasta lograr el estado estacionario en todos los termopares. Al finalizar se dejó enfriar la resistencia y se procedió a correr de la misma manera el resto de las muestras.

4.5 Inspección metalográfica

Una vez terminadas las pruebas, se procedió a seccionar el área con los termopares para caracterizar la interfase. Las muestras se prepararon para inspección metalográfica y medición del espacio entre el cilindro y la aleación de aluminio. En la medición se utilizó un estereoscopio Olympus y un microscopio óptico de la misma marca. Para la medición se tomó como referencia la línea de termopares en la parte superior de cada una de las muestras analizadas. Después de hacer varias mediciones en la zona se tomó la lectura más próxima a la línea de termopares, ver Figuras 4.5.1 a 4.5.4

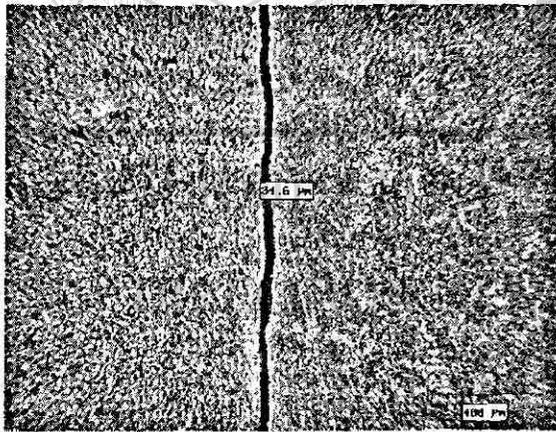


Figura 4.5.1 Interfase muestra J Baja

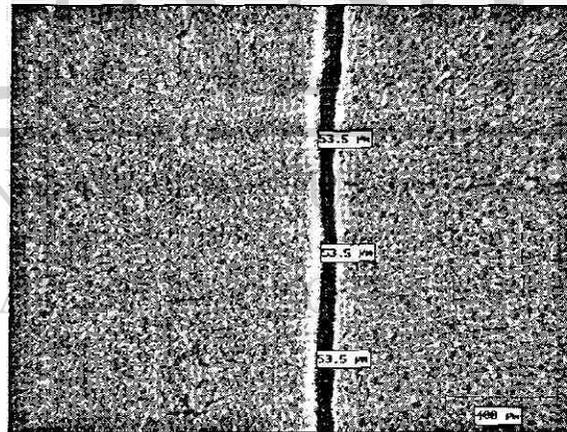


Figura 4.5.2 Interfase muestra J Media.

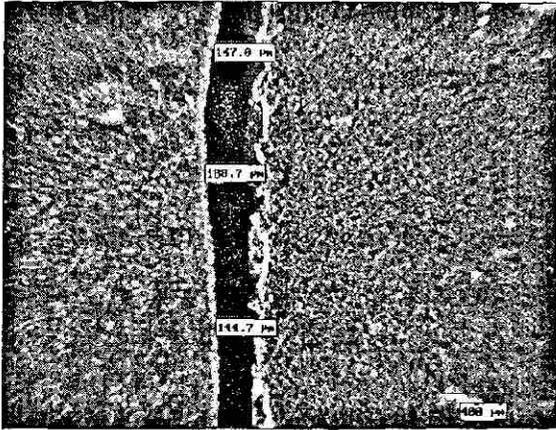


Figura 4.5.3 Interfase muestra K Alta.

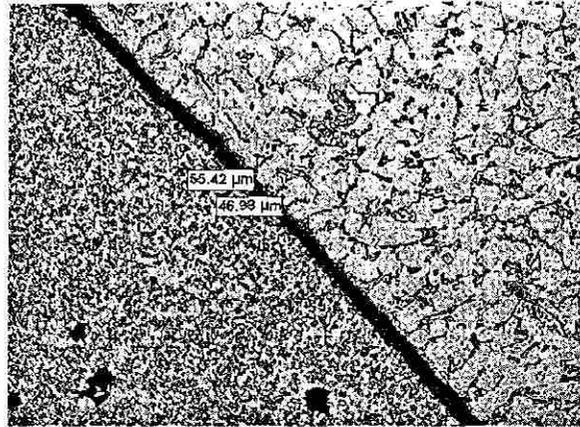


Figura 4.5.4 Interfase muestra K Baja.

4.6 Análisis Matemático

Para analizar los datos, primero se convirtieron los archivos originales en código ASCII para poder procesarlos en ExcelTM. Posteriormente se introdujeron los datos del espacio entre el cilindro y la aleación de Al obtenido de las metalografías y las difusividades térmicas de los materiales^{[3] [4]} en la ecuación de transferencia de calor en estado inestable, Ec 4.1, para posteriormente resolverla utilizando Maple Release IVTM de Waterloo Software Inc. El programa utilizado puede ser revisado en el Anexo C. Así mismo se ajustaron los juegos de datos a un polinomio de orden 7 para obtener los coeficientes que la ecuación utilizada en la serie de Fourier resultante. Estas funciones se ajustaron utilizando Table Curve 2DTM. La ecuación diferencial parcial que describe la transferencia de calor en estado transitorio es:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad [4.1]$$

Por el método de separación de variables se obtiene:

$$T = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-[n\pi/2L]^2 \alpha \tau} \sin \frac{n\pi x}{2L} \quad [4.2]$$

A manera de comprobación del método, se pidió al programa calcular las temperaturas en los puntos en los cuales se tenían datos de termopar, obteniendo un valor

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.

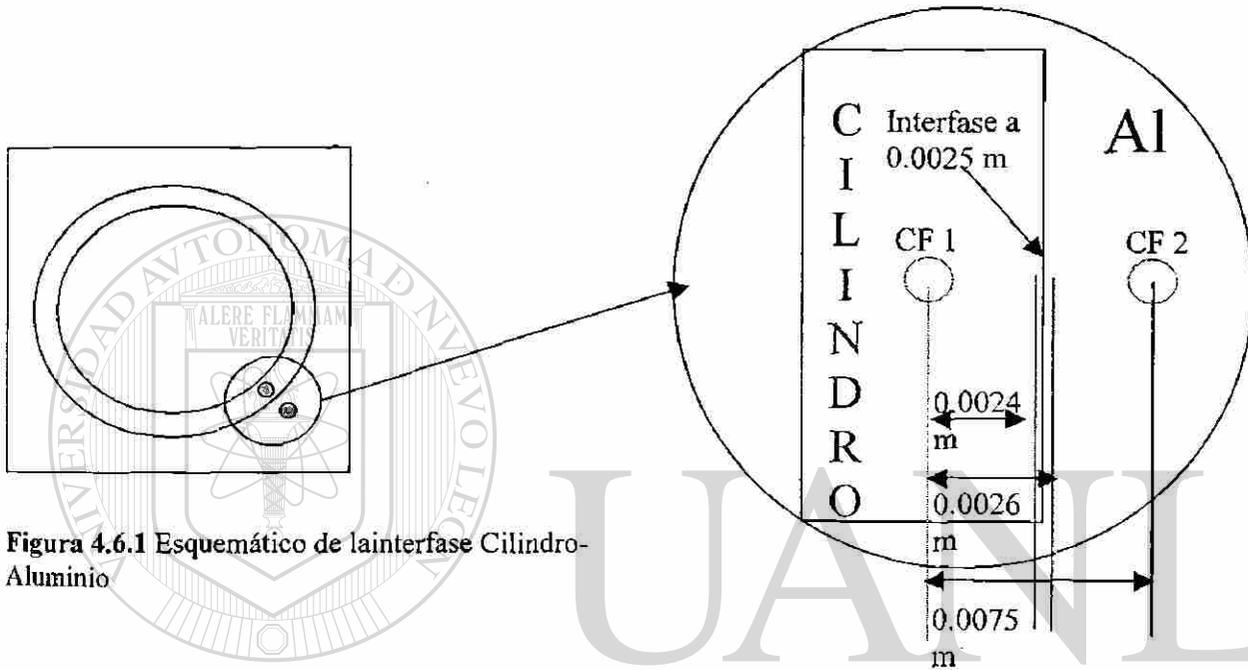


Figura 4.6.1 Esquemático de la interfase Cilindro-Aluminio

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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.

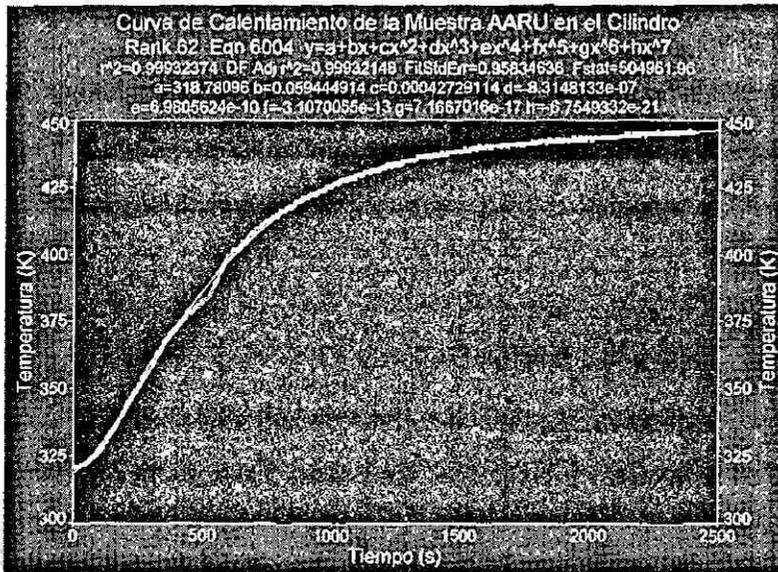


Figura 5.2.1 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra K parte alta en el cilindro

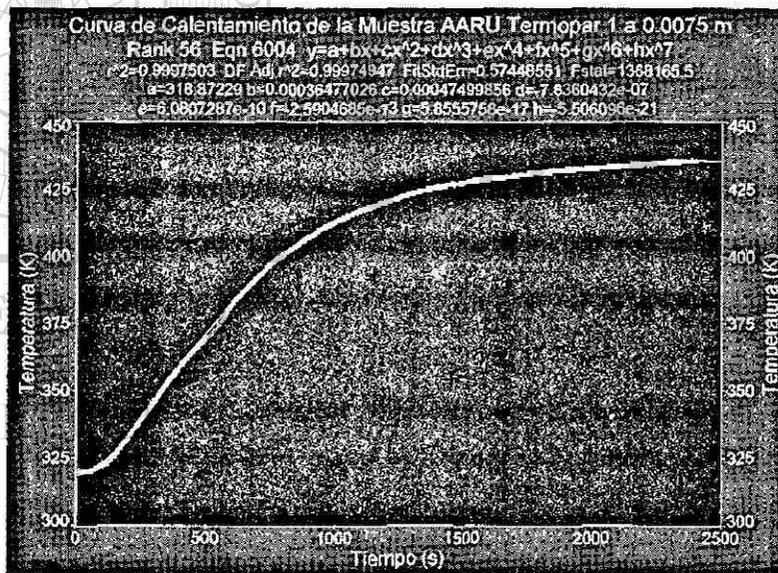


Figura 5.2.2 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra K parte alta en el aluminio

5.3 Solución de la Ecuación en Estado Transitorio

El primer paso es dividir la solución $T(x,t)$ en $T_1(x,t)$ mas $T_2(x,t)$ dadas por las siguientes ecuaciones diferenciales parciales:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \quad [5.3.1]$$

Condición inicial. $T_1(x,0) = F(x)$

Condición frontera 1. $T_1(0,t) = 0$

Condición frontera 2. $T_1(L,0) = 0$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \quad [5.3.2]$$

Condición inicial. $T_2(x,0) = 0$

Condición Frontera 1. $T_2(0,t) = P(t)$

Condición Frontera 2. $T_2(L,t) = Q(t)$

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]:

$$T_1(x,t) = X(x)T(t) \quad [5.3.3]$$

$$T_1(x) = X(x)T'(t) \quad [5.3.4]$$

$$T_{1,xx}(x) = X''(x)T(t) \quad [5.3.5]$$

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 $T1(x,t)$ es:

$$T1(x,t) = B_n \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{L} x\right) \exp\left(-\alpha\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t\right) \quad [5.3.12]$$

Esto es usualmente una secuencia infinita $T1_1, T1_2, T1_3 \dots T_n$ 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

$$T1_n(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{L} x\right) \exp\left(-\alpha\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t\right) \quad [5.3.13]$$

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:

$$T1_n(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\int_0^L F(x) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{L} x\right) dx \right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{L} x\right) \exp\left(-\alpha\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t\right) \quad [5.3.15]$$

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]:

$$T2(x,t) = W(x,t) + Y(x) \quad [5.3.16]$$

$$T2_t(x,t) = W_t(x,t) \quad [5.3.17]$$

$$T2_{xx}(x,t) = W_{xx}(x,t) + Y_{xx}(x) \quad [5.3.18]$$

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:

$$Y(x) = C_3 x + C_4 \quad [5.3.20]$$

Para conocer los valores de los coeficientes C_3 y C_4 , 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]:

$$T_2(x,t) = W(x,t) + Y(x,t) \quad [5.3.22]$$

$$T_{2i}(x,t) = W_i(x,t) + Y_i(x,t) \quad [5.3.23]$$

$$T_{2xx}(x,t) = W_{xx}(x,t) + Y_{xx}(x) \quad [5.3.24]$$

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

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

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

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

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

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

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

donde

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

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

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

donde

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

La solución para la ecuación [5.3.2] será:

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

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

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

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 μm . 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 (μm) |
|----------|------------------------|--|
| K | | |
| U | No | 130 |
| M | No | 60 |
| L | No | 35 |
| M | | |
| U | No | 48 |
| M | No | 48 |
| L | Si | 32 |
| L | | |
| U | Si | 20 |
| M | Si | Sin espacio/2555 |
| L | Si | Sin espacio/2682 |
| J | | |
| 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 (α) 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.

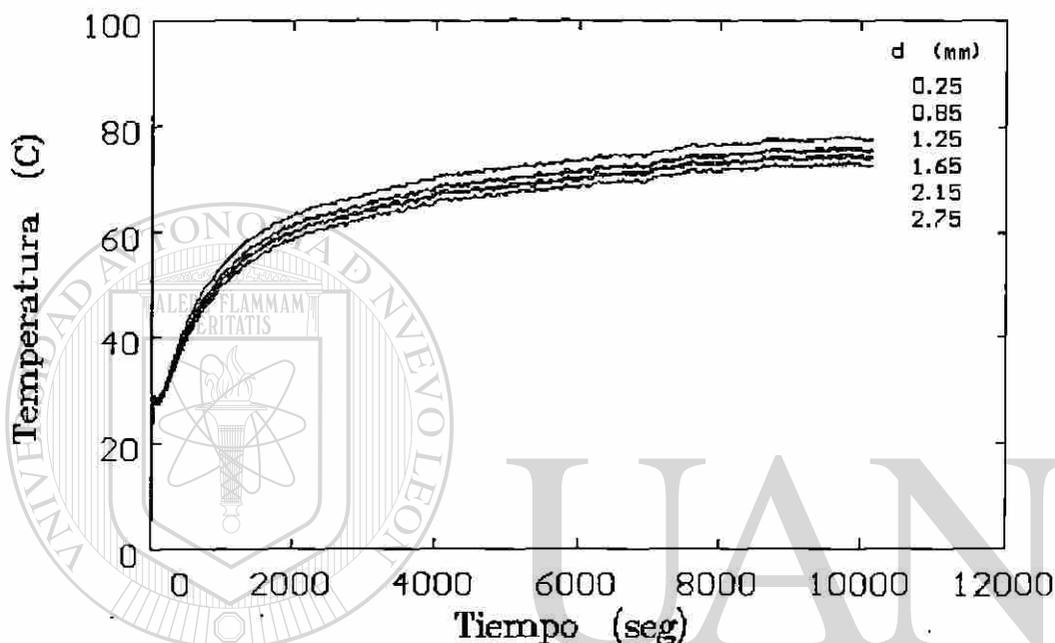
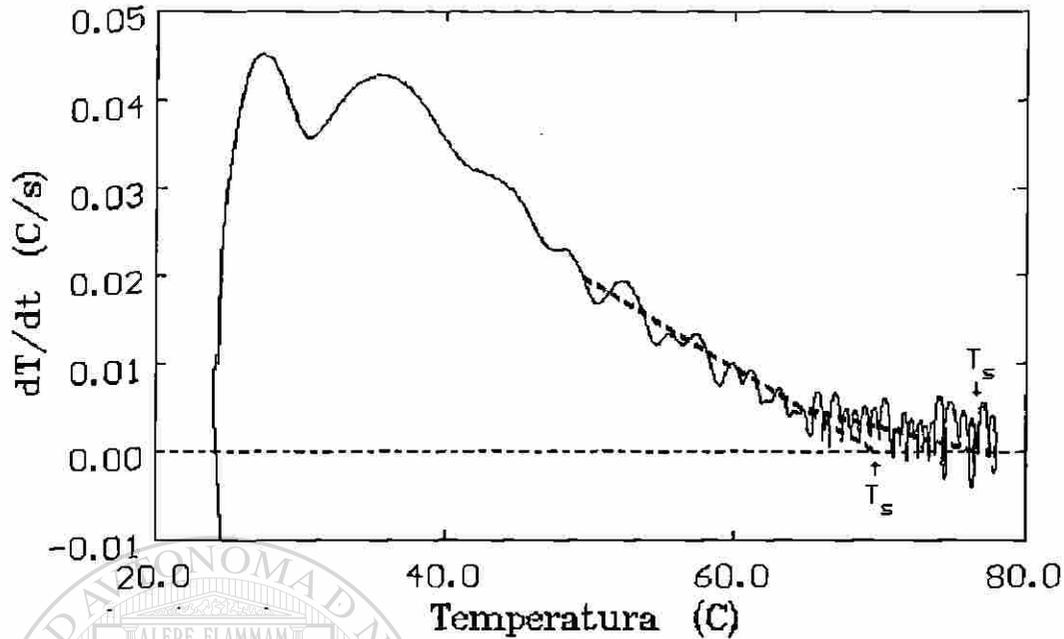


Fig. 5.4.1 Evolución térmica obtenida durante la ejecución de una de las pruebas..

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



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

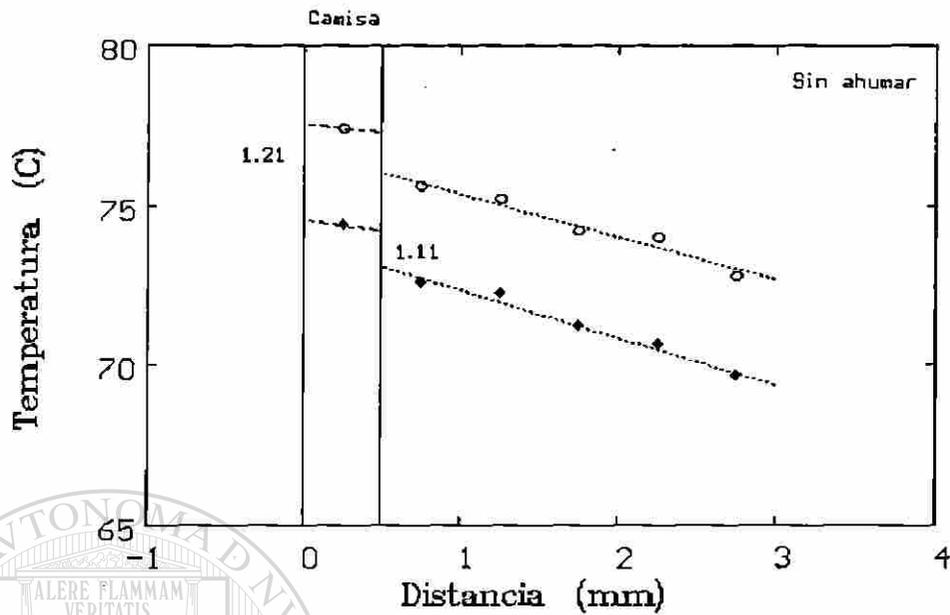


Figura 5.4.3 Determinación de la diferencia en temperatura en la interfase entre la aleación de aluminio del monoblock y la camisa de hierro en condición normal (sin recubrimientos)

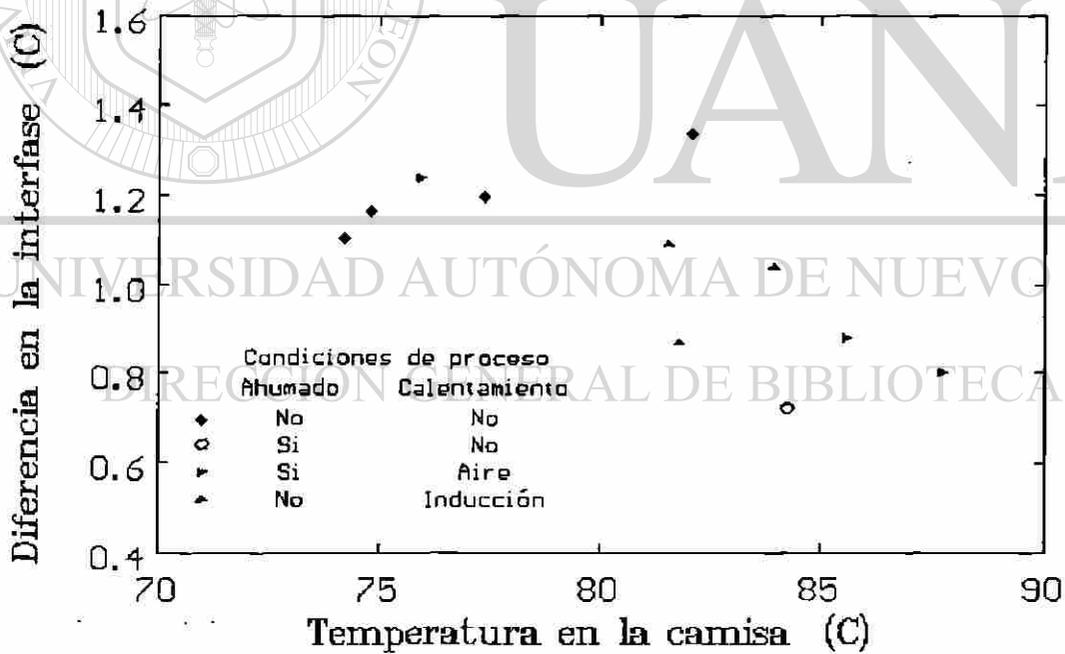


Fig. 5.4.4 Variación de la caída de temperatura en la interfase en función de la temperatura registrada en la camisa.

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.

Liner Moleteado sin Ahumar parte Baja

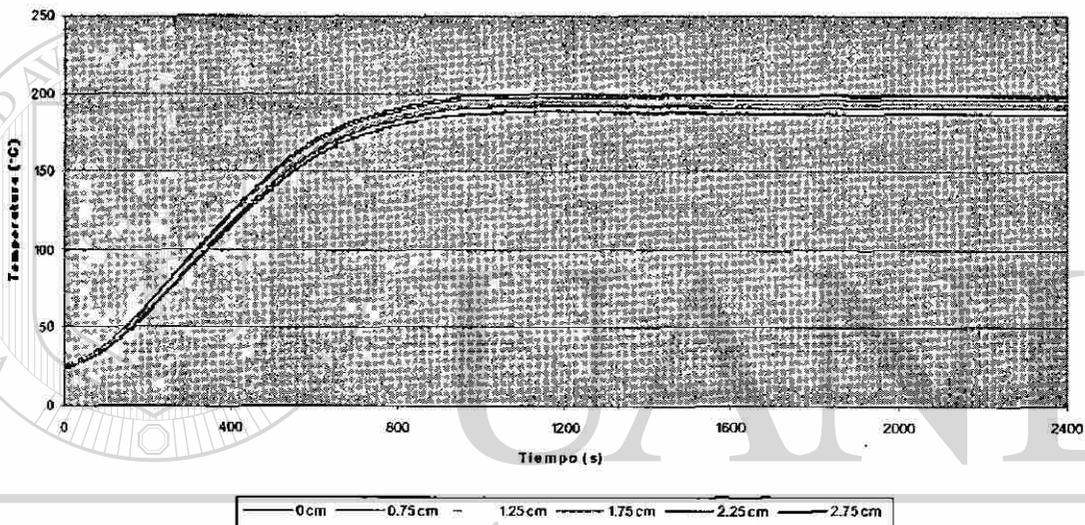


Fig. 5.4.5 Evolución térmica obtenida durante la ejecución de una de las pruebas

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)**

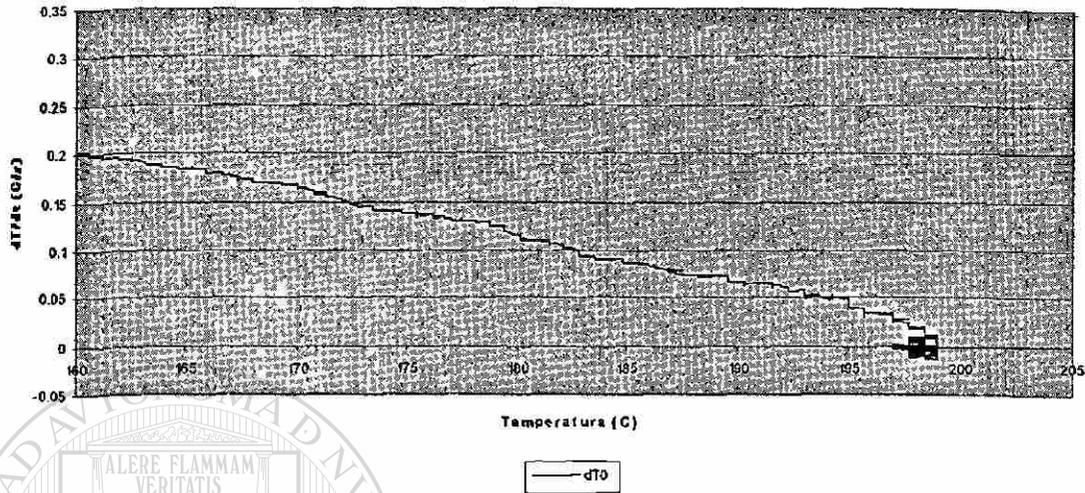


Fig. 5.4.6 Obtención de dos temperaturas en el estacionario (T_s) para el termopar colocado en el interior de la camisa durante una de las pruebas.

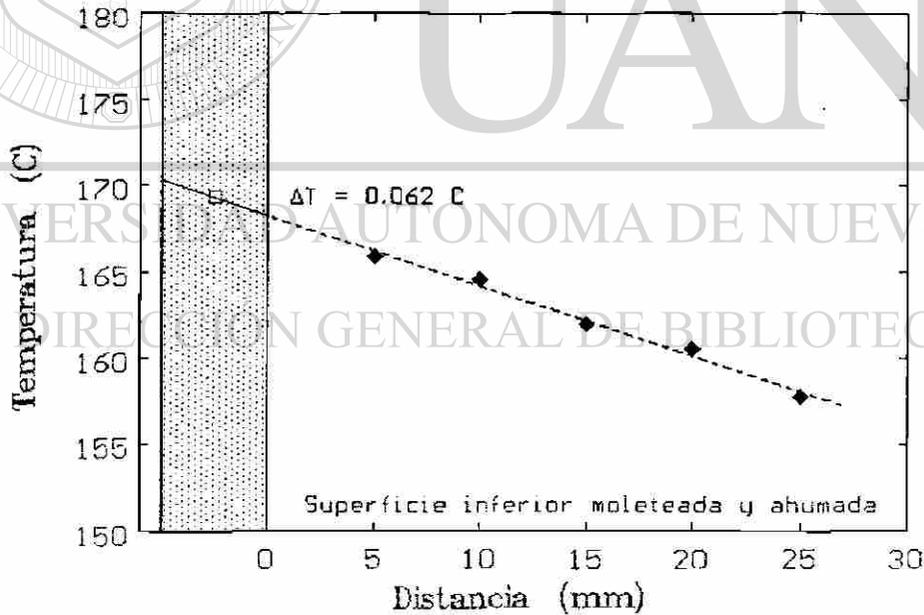


Figura 5.4.7 Determinación de la diferencia en temperatura en la interfase entre la aleación de aluminio del monoblock y la camisa de hierro en condición normal (sin recubrimientos)

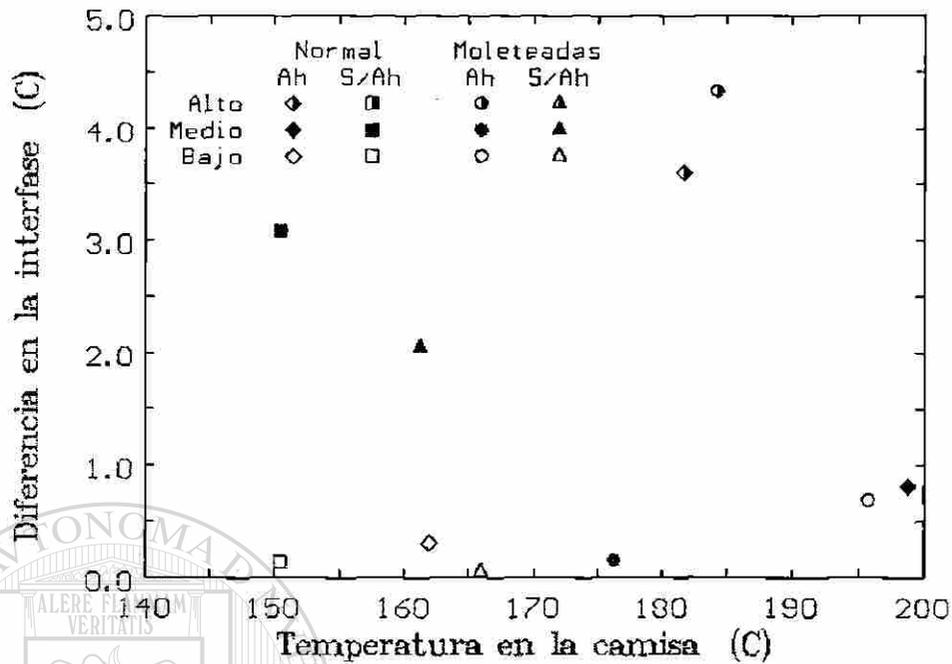


Fig. 5.4.8 Variación de la caída de temperatura en la interfase en función de la temperatura registrada en las camisas de aluminio.

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.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO 6

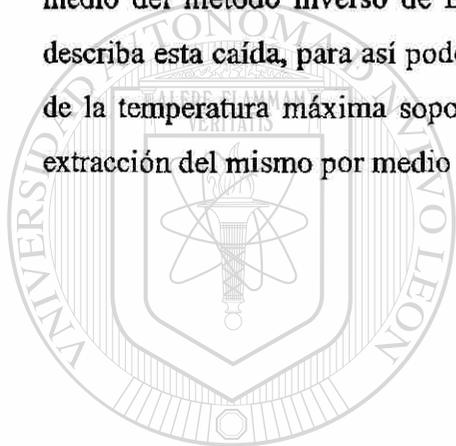
CONCLUSIONES

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.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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^a 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 Environmet 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 Cranckcases"* 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 1st 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, Yasufimi 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

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 2.1.1 Propiedades atómicas y nucleares del aluminio puro. ^[1] | 5 |
| Tabla 2.1.2 Propiedades físicas del aluminio puro. ^[1] | 5 |
| Figura 2.3.1 Puerta con barras para impactos, de aluminio ^[9] | 9 |
| Figura 2.3.2 Ilustración de las partes de una suspensión de BMW serie 5 completamente ensamblado, incluyendo el eje trasero de aluminio ^[9] | 10 |
| Figura 2.3.3 Carrocería fabricada de perfiles de aluminio ^[10] | 10 |
| Figura 2.4.1 Método Ospray TM ^[13] | 13 |
| Figura 2.4.2 a) Micro estructura aleación SAE 390, vaciada por gravedad. 100X. b) Misma micro estructura a 500X. ^[11] | 14 |
| Figura 2.4.3 a) Micro-estructura con distribución homogénea de partículas de silicio, vaciada por el método Ospray ^R . 100X. b) Misma microestructura a 500X ^[11] | 14 |
| Figura 2.4.4. Formación de lingotes ^[13] | 15 |
| Figura 2.4.5. Equipo de ondas ultrasónicas para medir la liga metálica ^[11] | 16 |
| Figura 2.4.6 Representación de liga metálica por colores, donde el color rojo representa mala liga metálica y azul buena liga metálica ^[11] . | 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 ^[11] 17

Figura 2.4.8 Monobloque de aluminio con camisas de aluminio ^[11] 17

Figura 3.2.1 Placa infinita sujeta a un enfriamiento súbito de sus superficies ^[15] 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

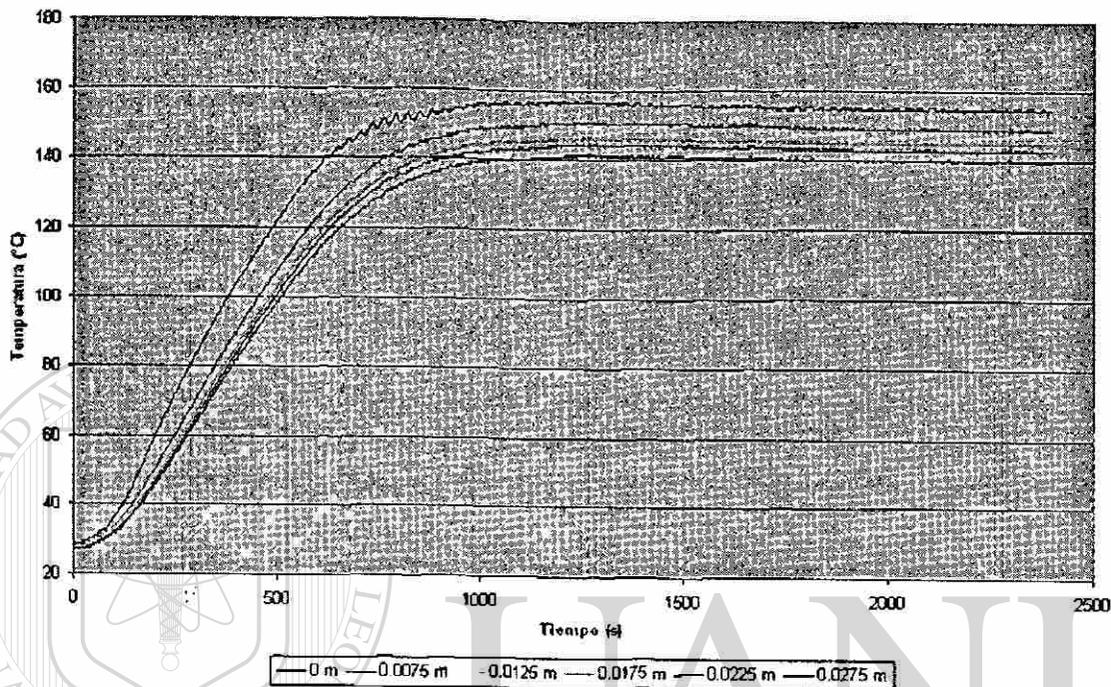
Fig. 5.4.6 Obtención de dos temperaturas en el estacionario (T_s) para el termopar colocado en el interior de la camisa durante una de las pruebas. 53

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

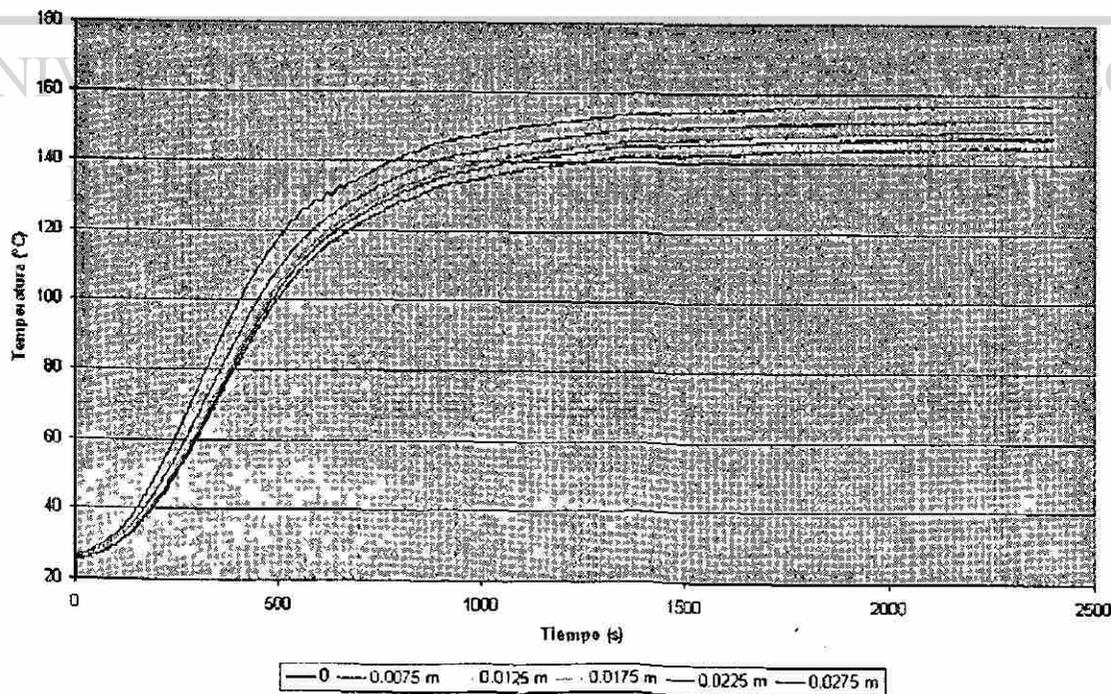
Fig. 5.4.8 Variación de la caída de temperatura en la interfase en función de la temperatura registrada en las camisas de aluminio. 55

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

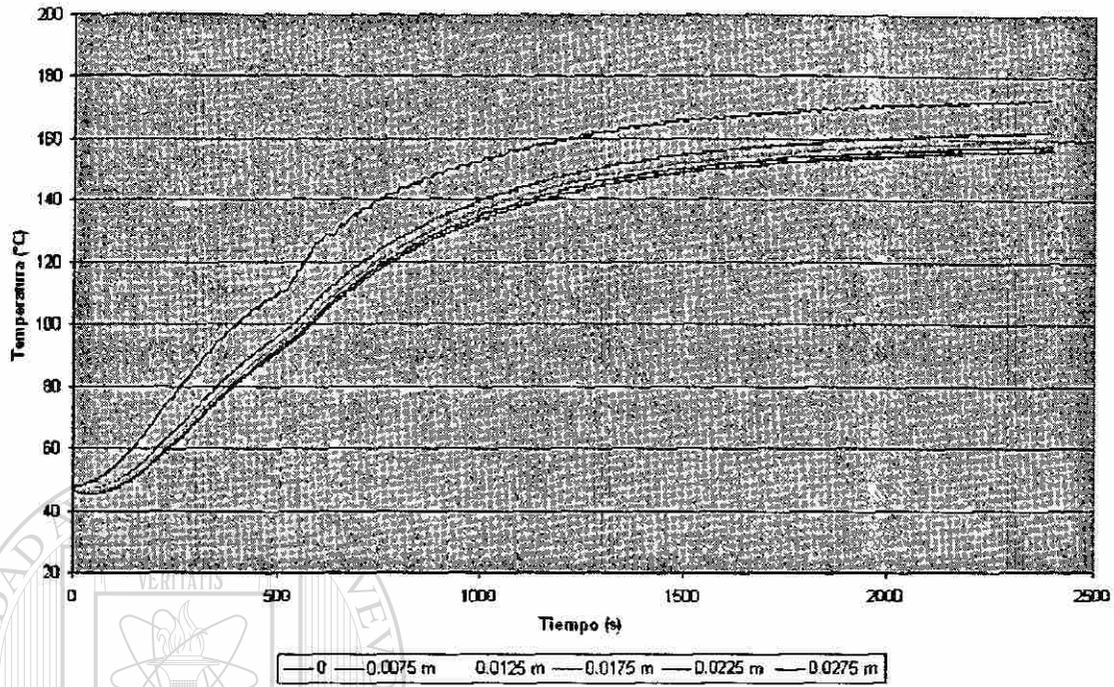
Perfil de Calentamiento de la Muestra K Parte Baja



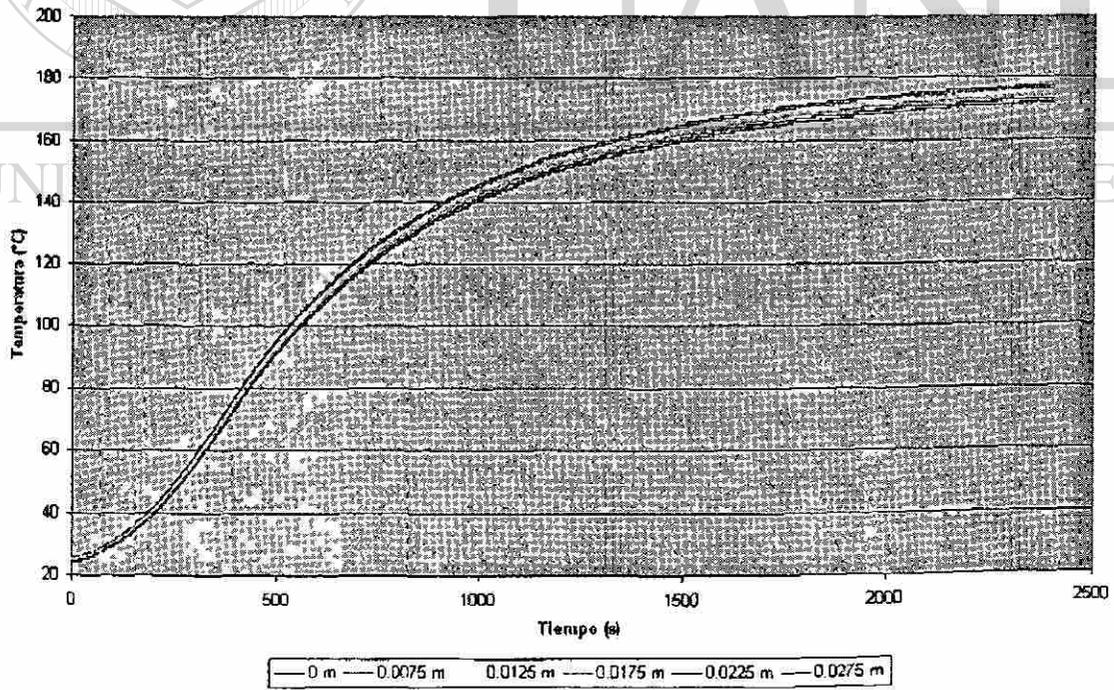
Perfil de Calentamiento de la Muestra K Parte Media



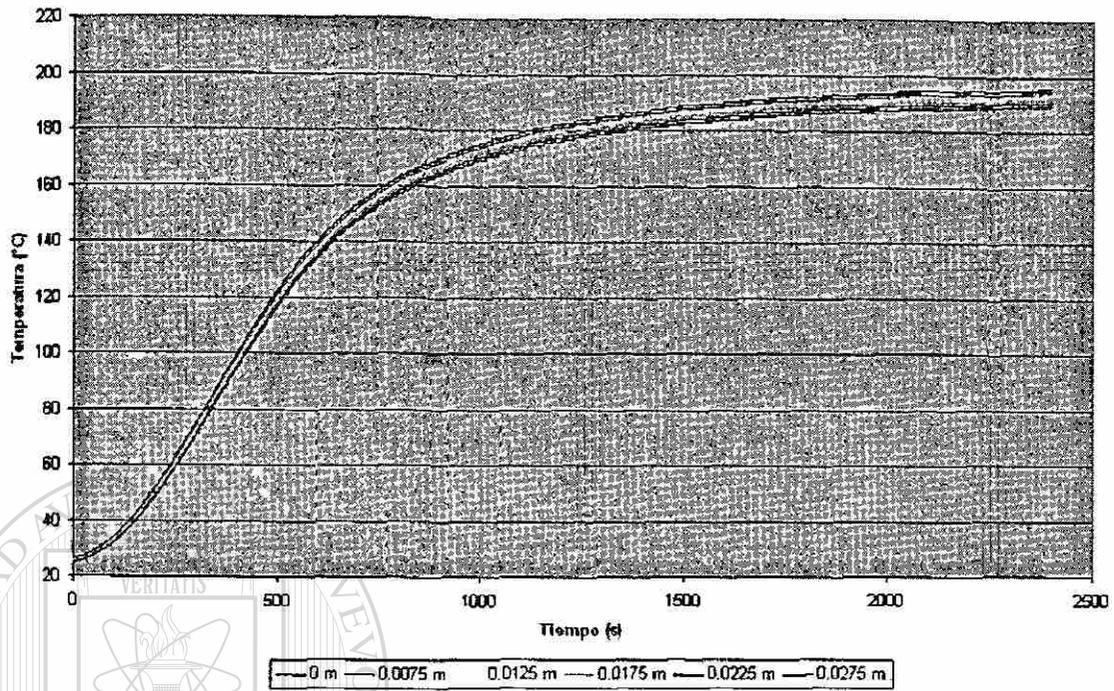
Perfil de Calentamiento de la Muestra K Parte Alta



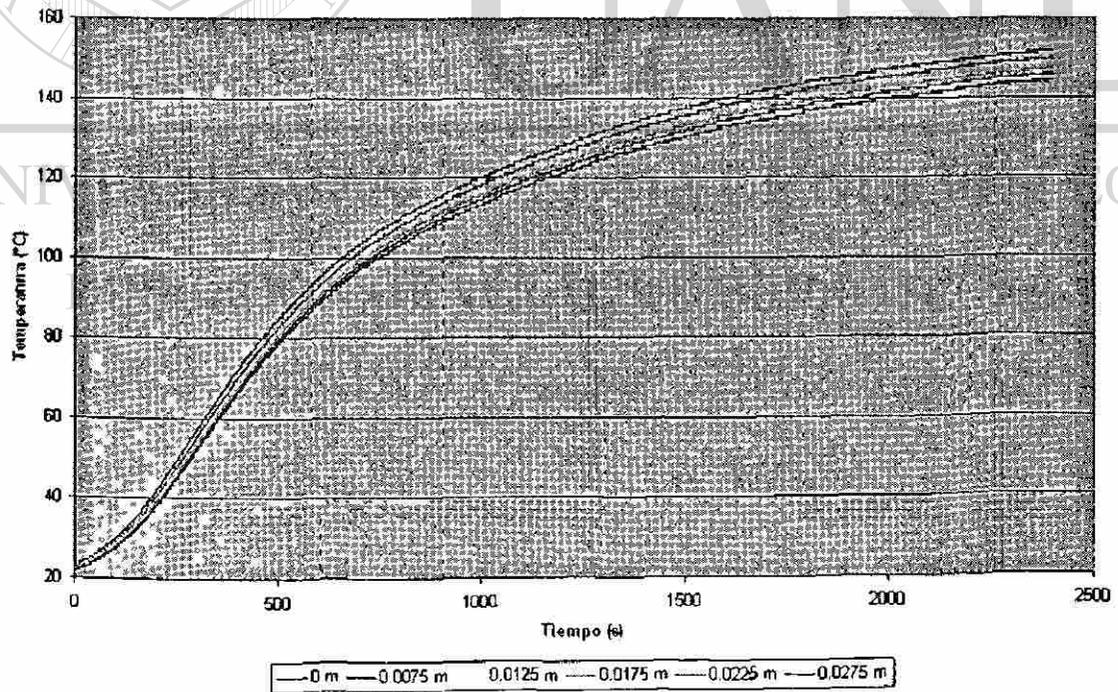
Perfil de Calentamiento de la Muestra J Parte Baja



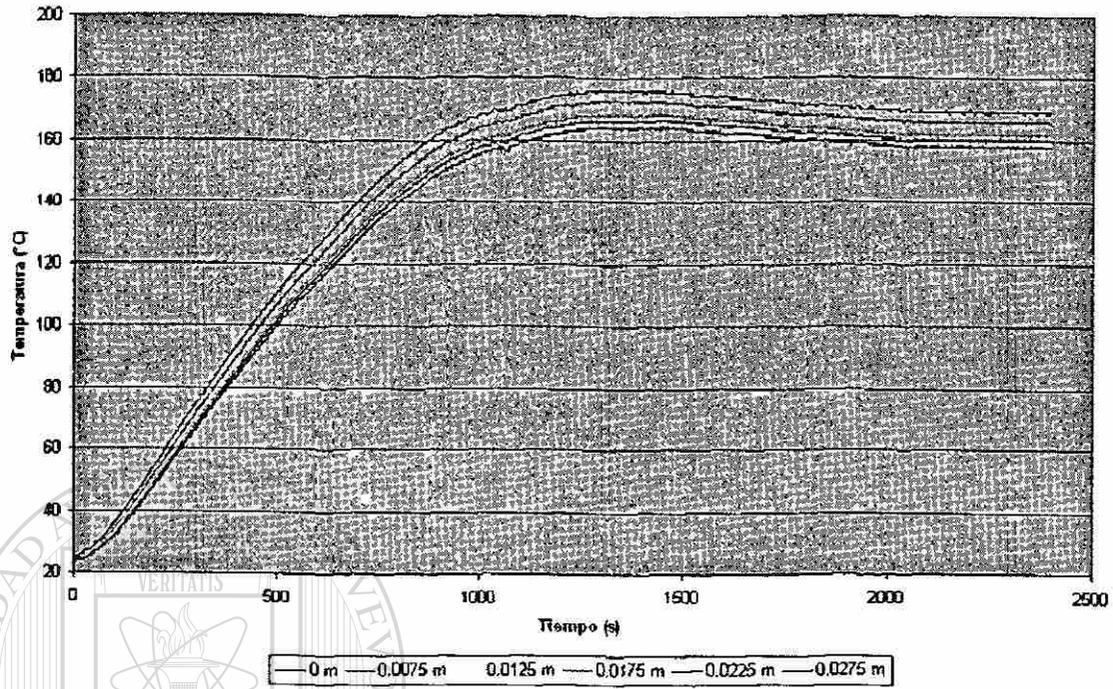
Perfil de Calentamiento de la Muestra J Parte Media



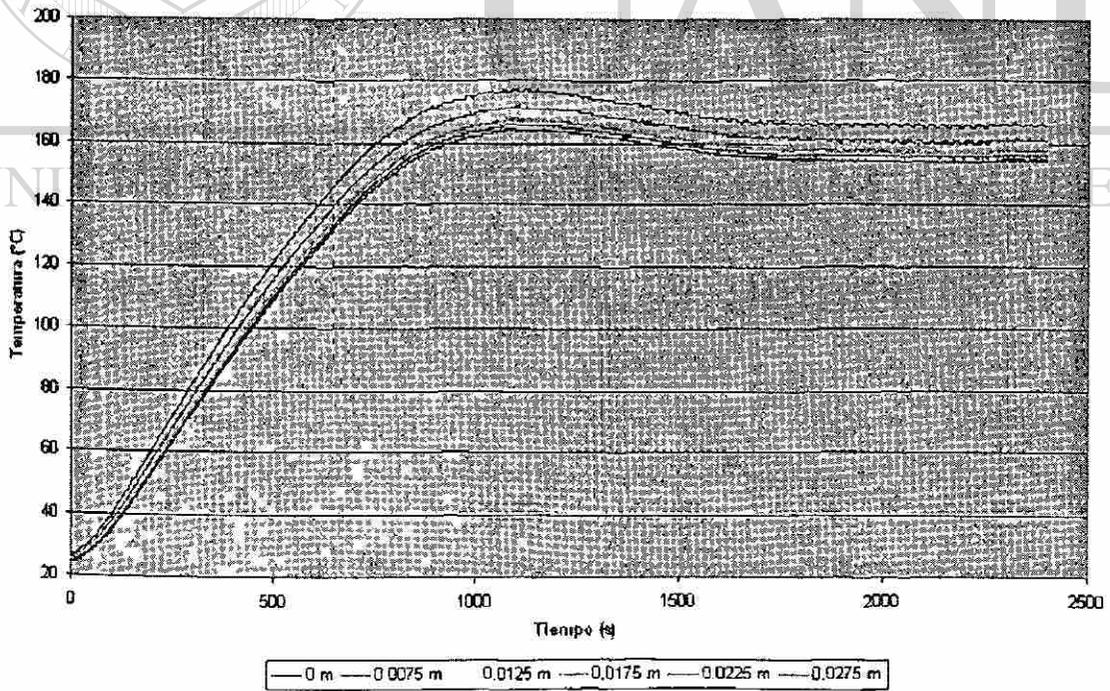
Perfil de Calentamiento de la Muestra J Parte Alta



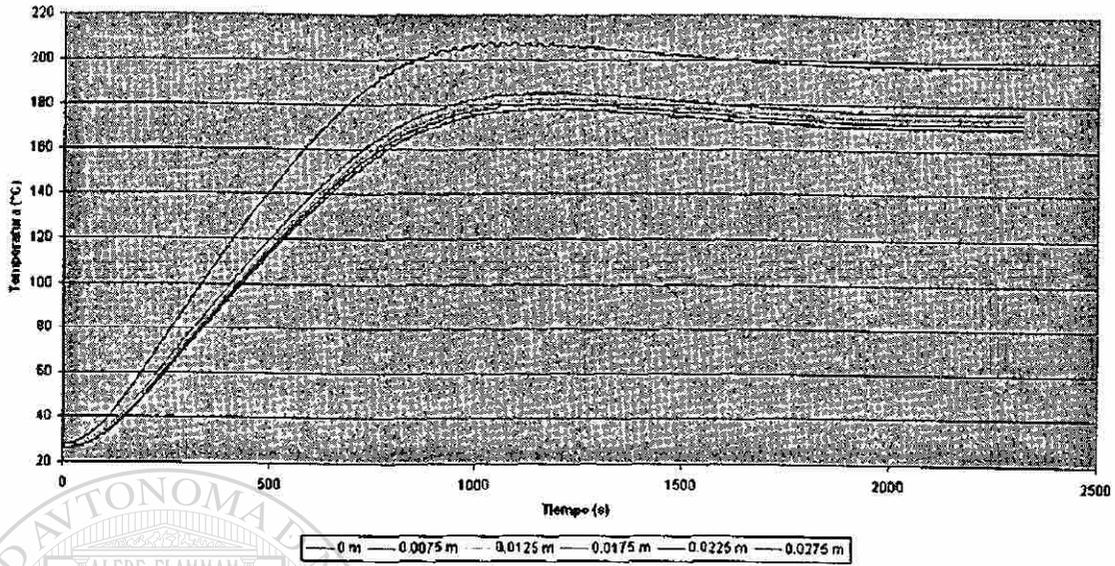
Perfil de Calentamiento de la Muestra M Parte Baja



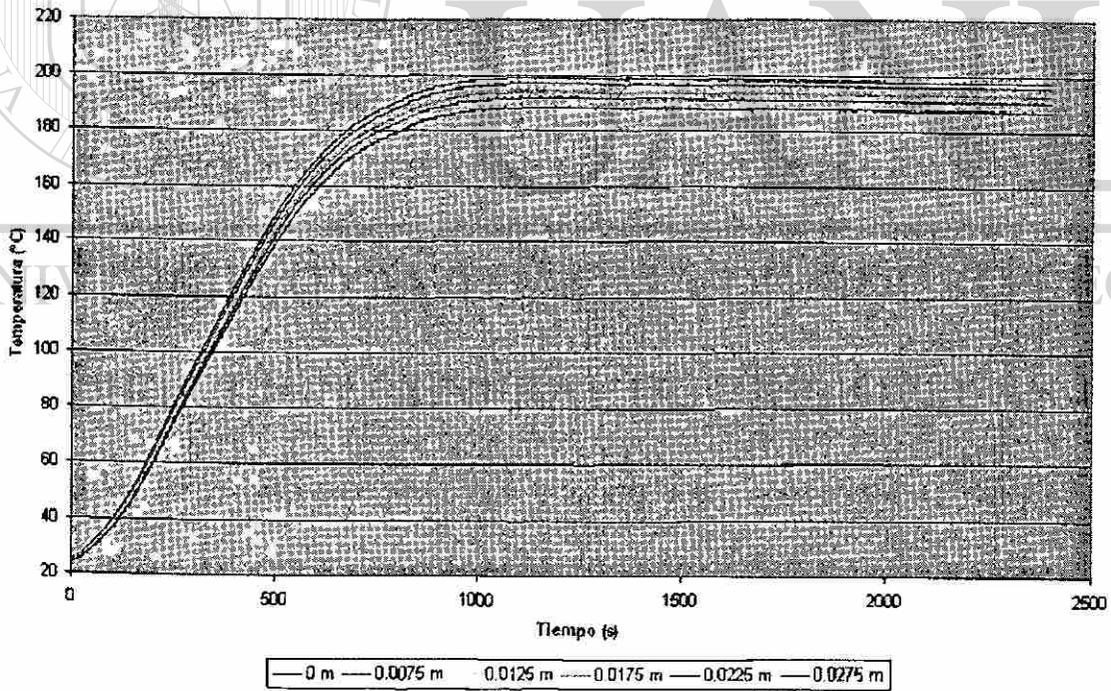
Perfil de Calentamiento de la Muestra M Parte Media



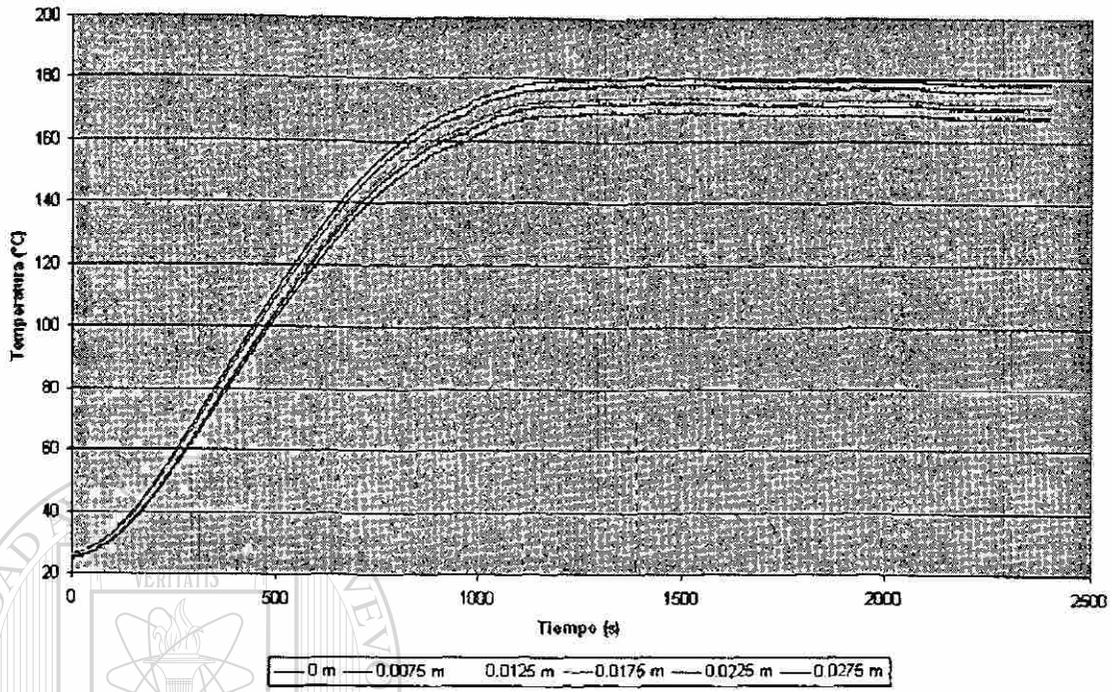
Perfil de Calentamiento de la Muestra M Parte Alta



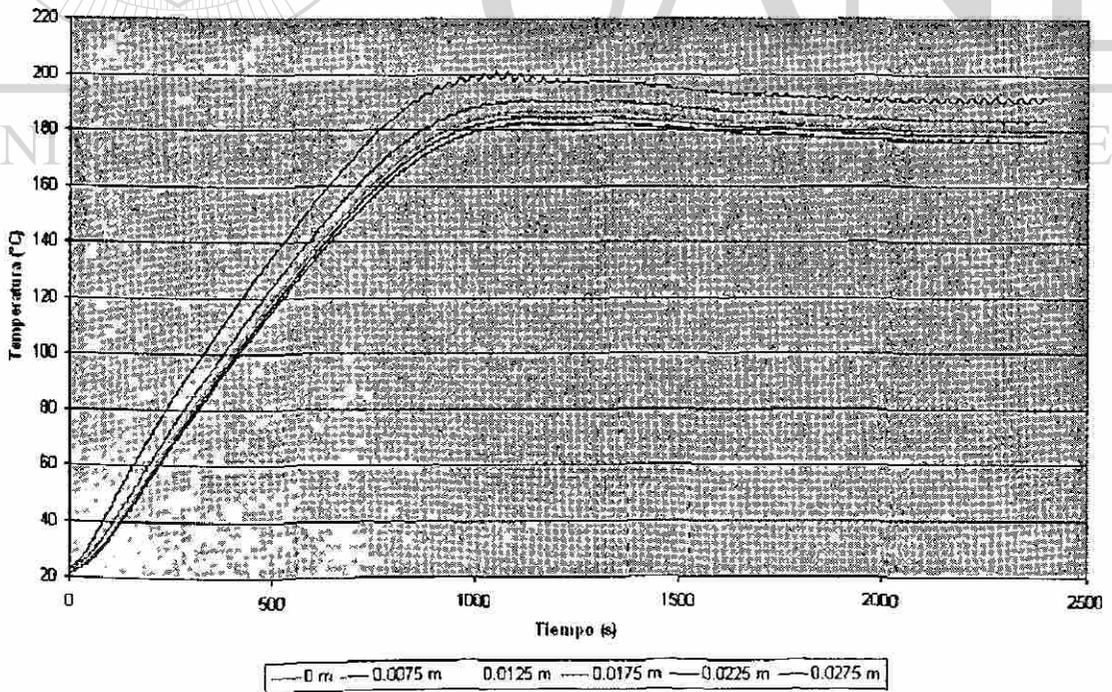
Perfil de Calentamiento de la Muestra L Parte Baja



Perfil de Calentamiento de la Muestra L Parte Media



Perfil de Calentamiento de la Muestra L Parte Alta



Apéndice B Ajuste de Polinomios

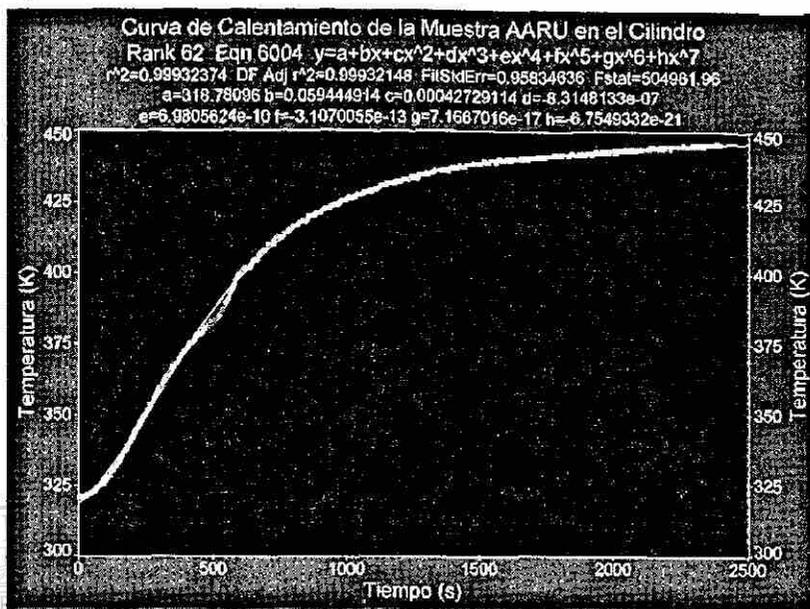


Figura 4.2.1 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra AARU en el cilindro

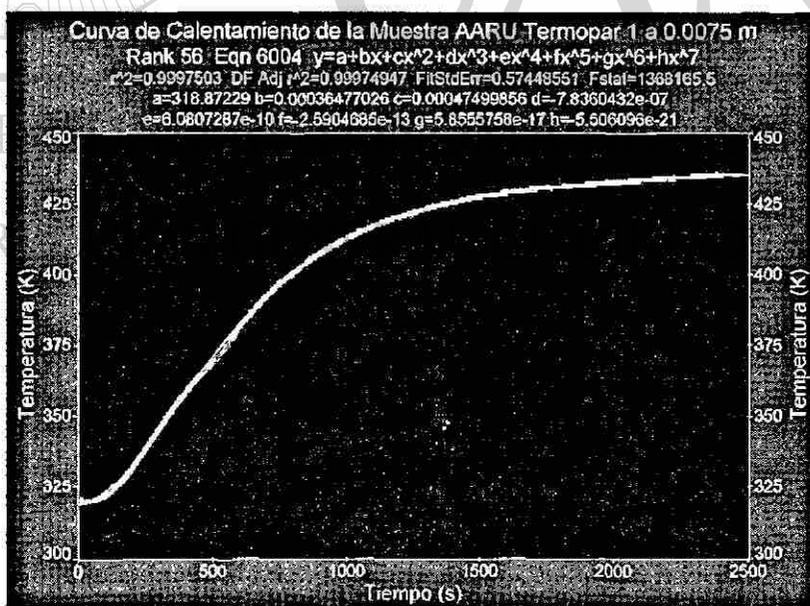


Figura 4.2.2 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra AARU en el aluminio

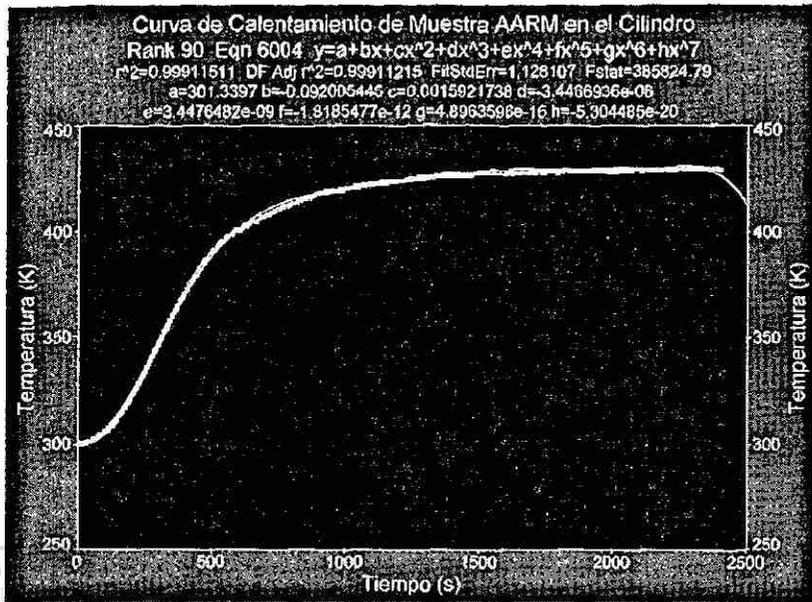


Figura 4.2.3 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra AARM en el cilindro

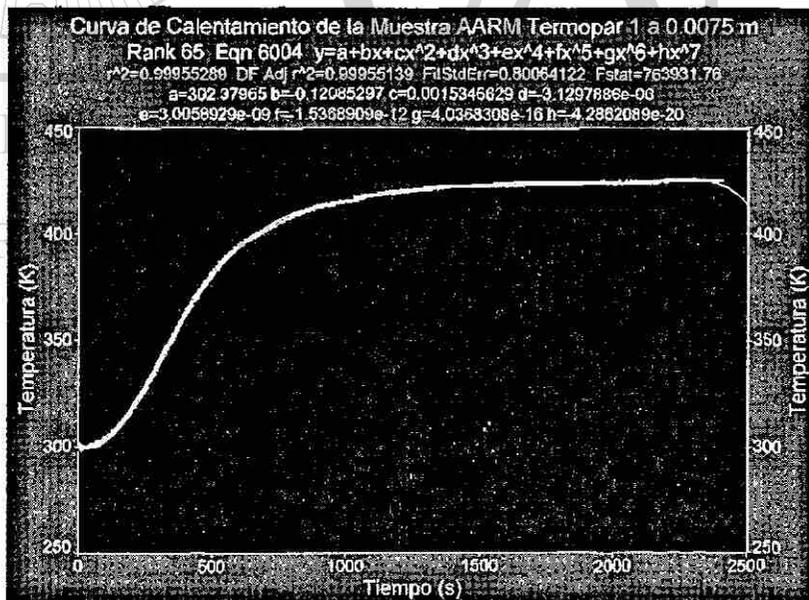


Figura 4.2.4 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra AARM en el aluminio

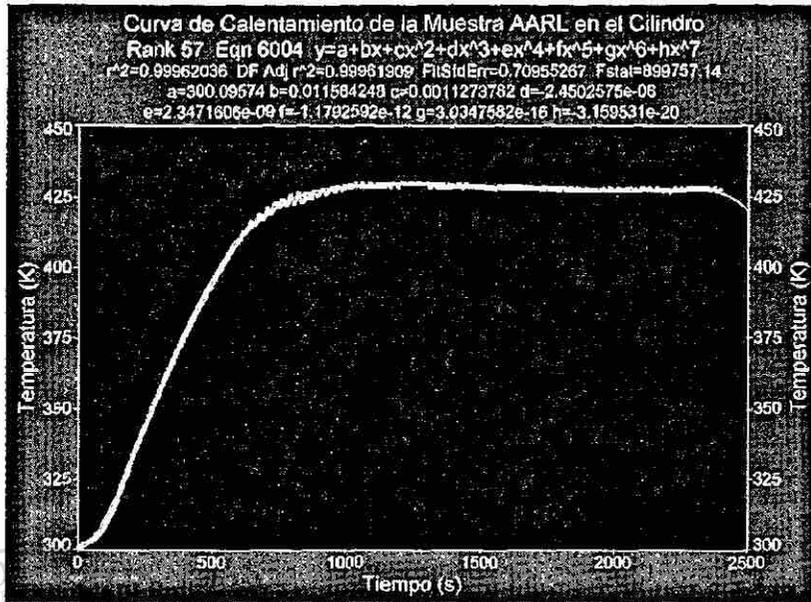


Figura 4.2.5 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra AARL en el cilindro

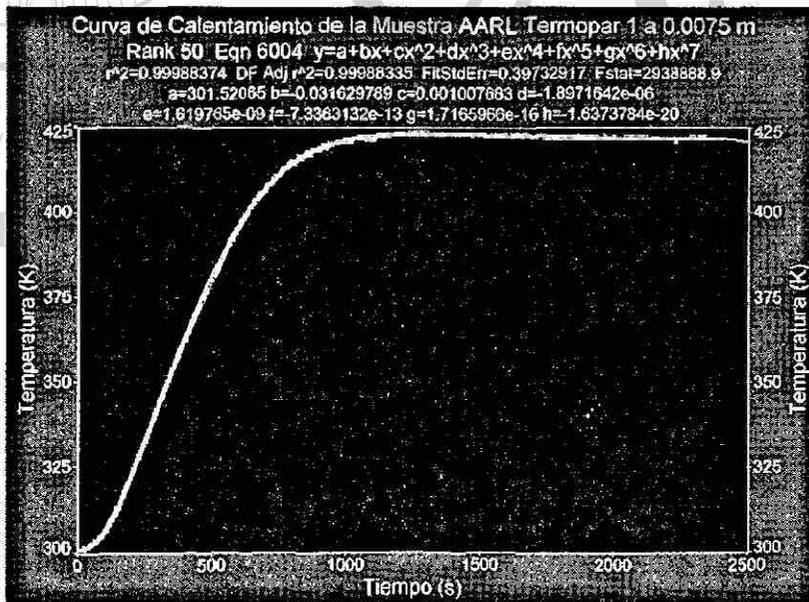


Figura 4.2.6 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra AARL en el aluminio

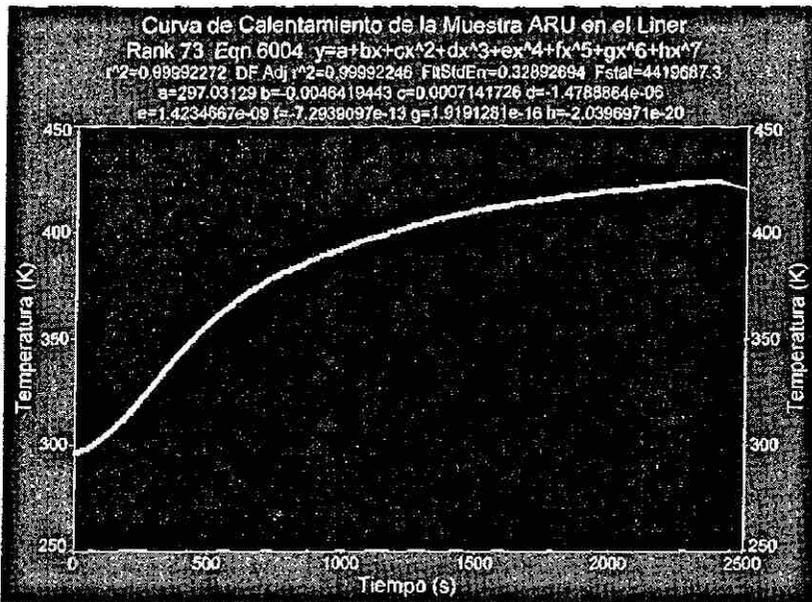


Figura 4.2.7 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra ARU en el cilindro

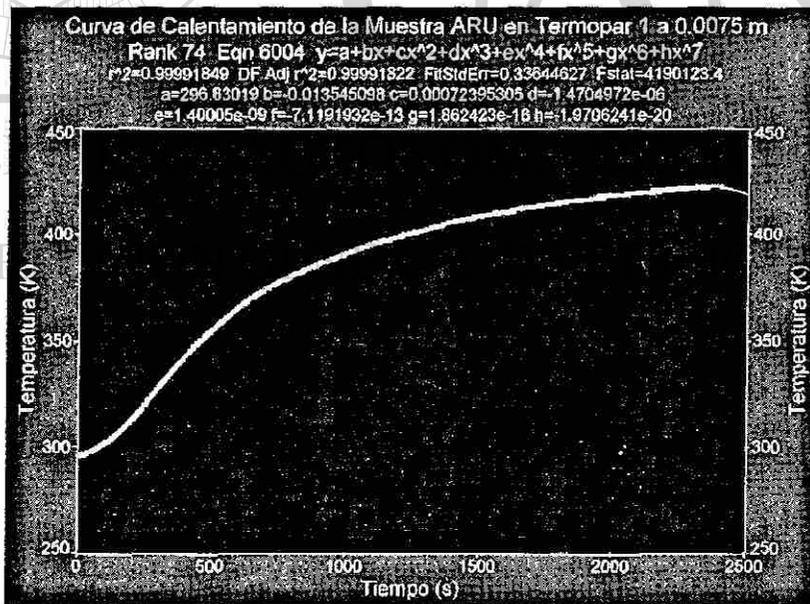


Figura 4.2.8 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra ARU en el aluminio

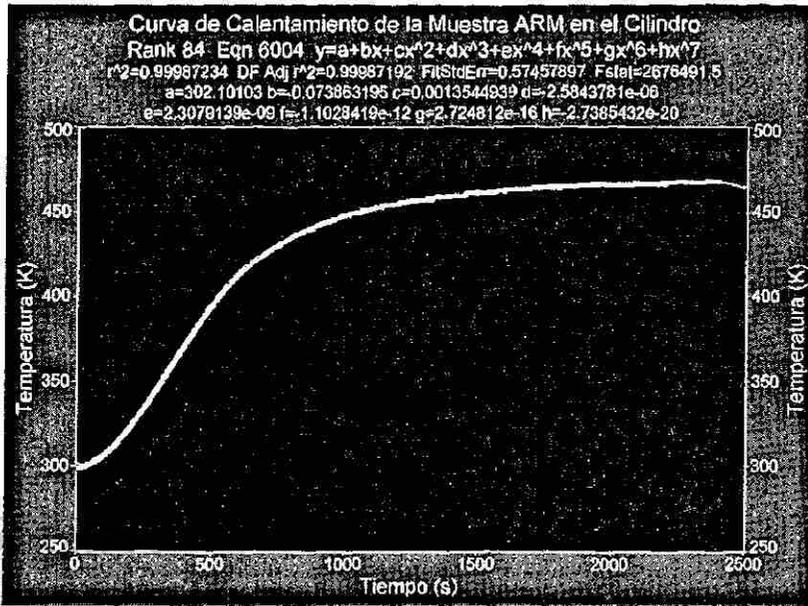


Figura 4.2.9 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra ARM en el cilindro

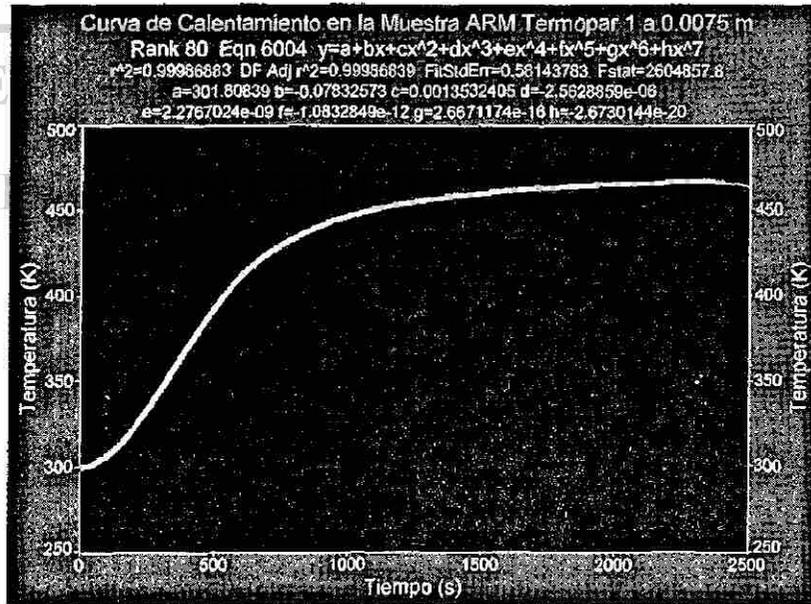


Figura 4.2.10 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra ARM en el aluminio

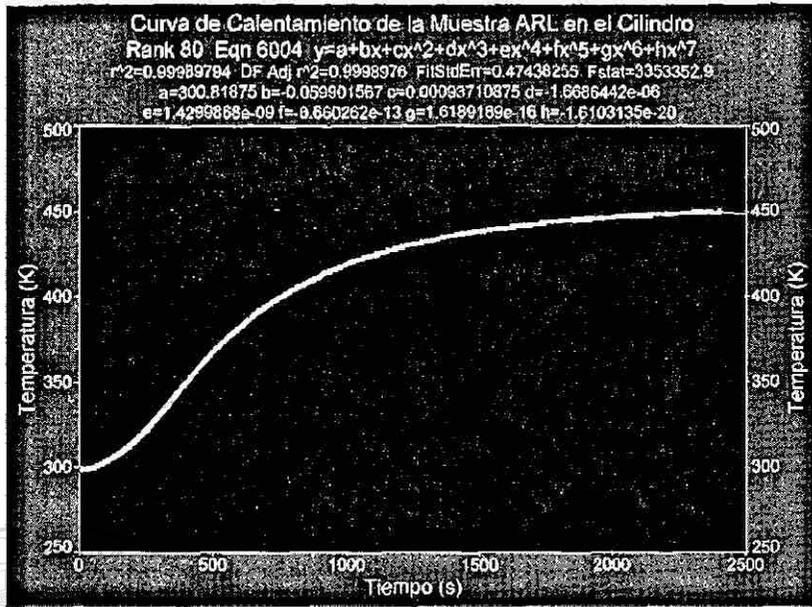


Figura 4.2.11 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra ARL en el cilindro

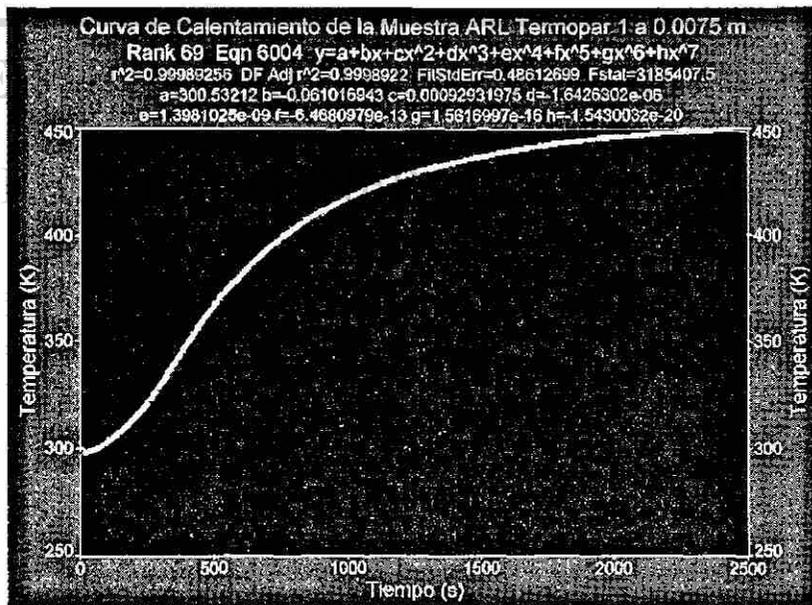


Figura 4.2.12 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra ARL en el aluminio

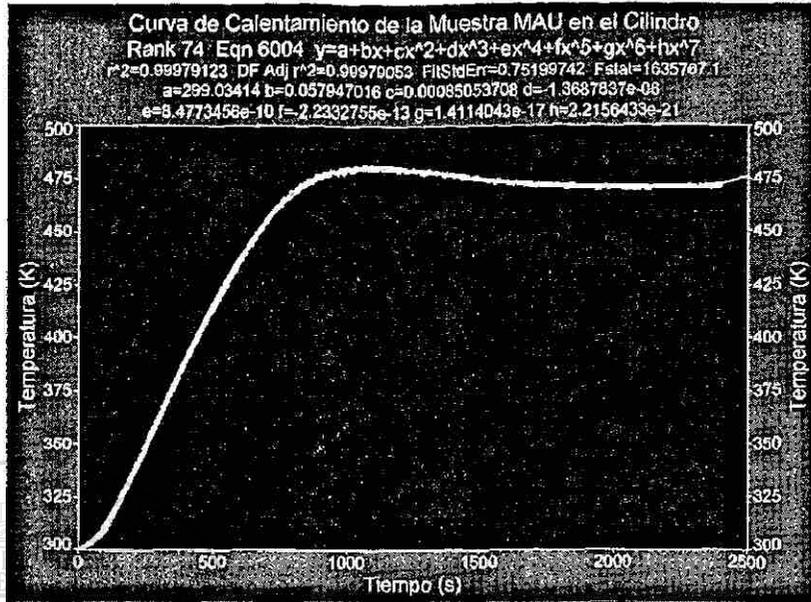


Figura 4.2.13 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra MAU en el cilindro

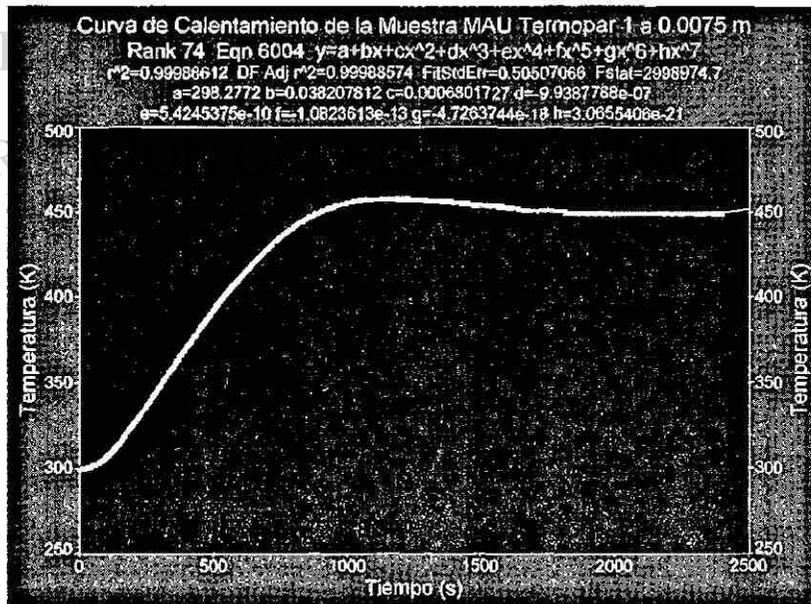


Figura 4.2.14 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra MAU en el

aluminio

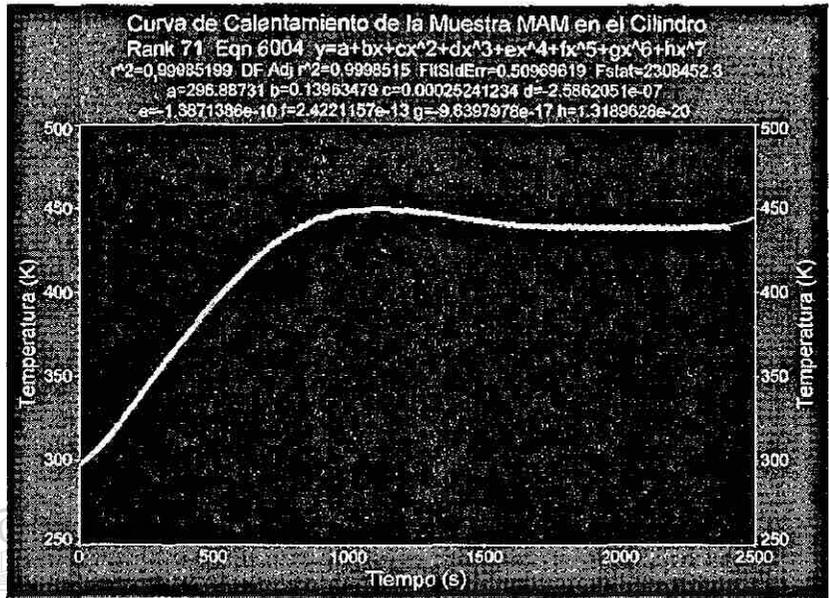


Figura 4.2.15 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra MAM en el cilindro

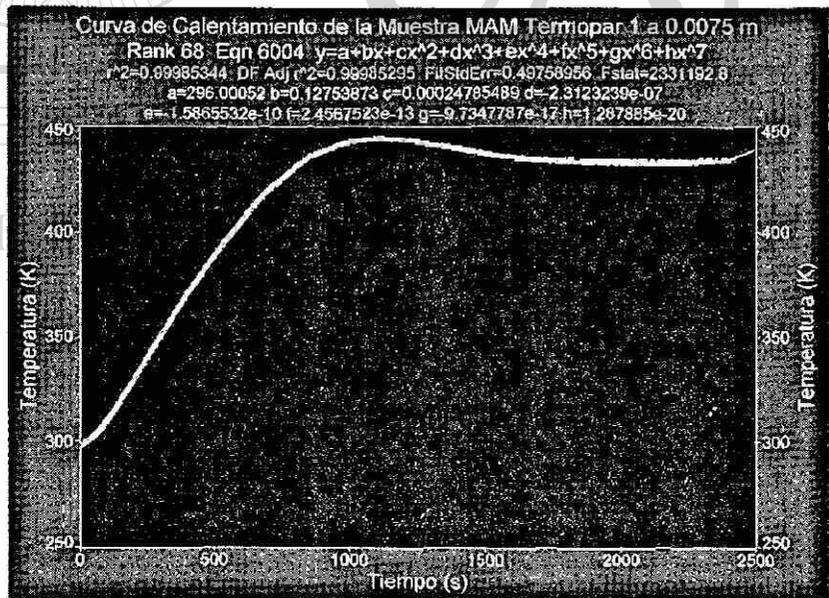


Figura 4.2.16 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra MAM en el aluminio

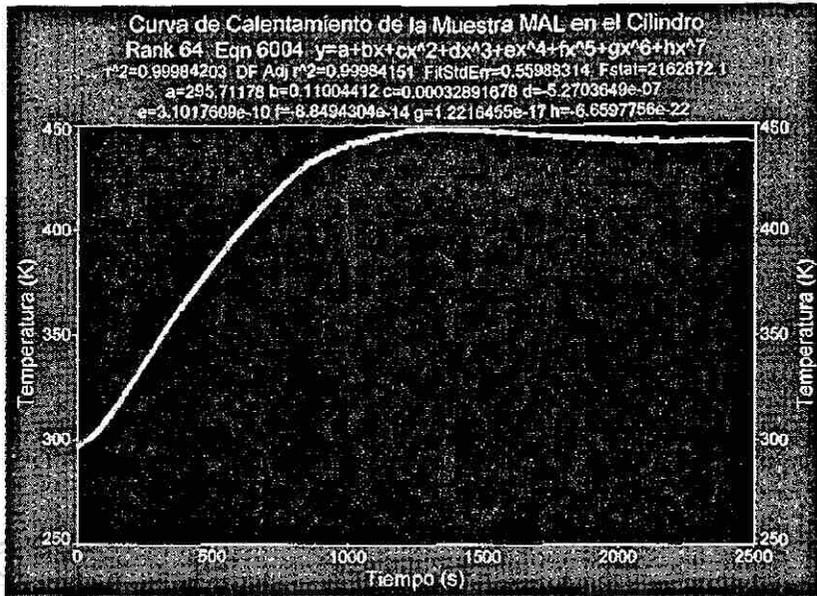


Figura 4.2.17 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra MAL en el cilindro

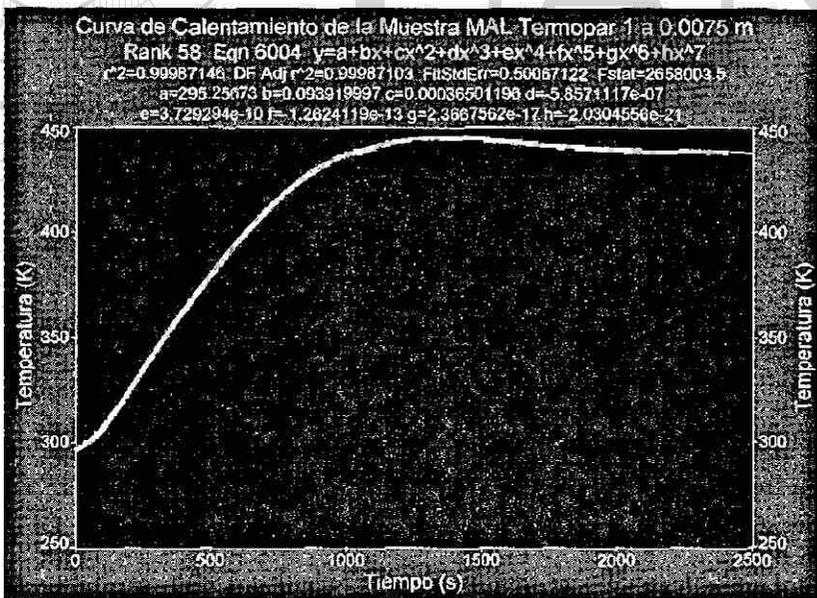


Figura 4.2.18 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra MAL en el aluminio

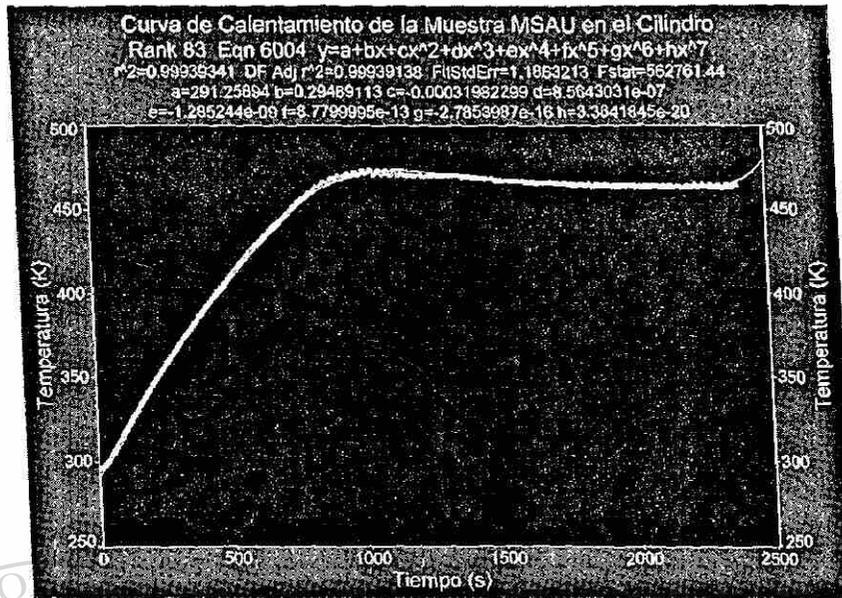


Figura 4.2.19 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra MSAU en el cilindro

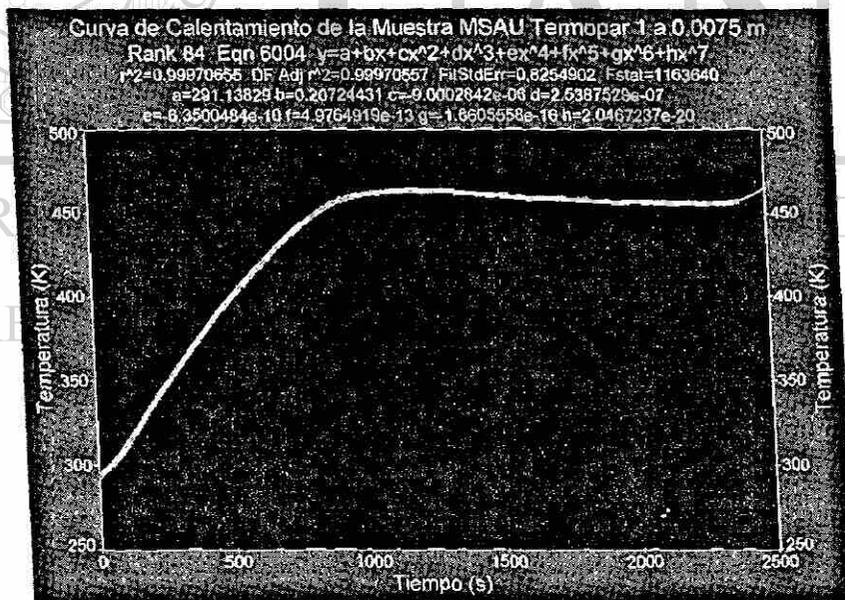


Figura 4.2.20 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra MSAU en el aluminio

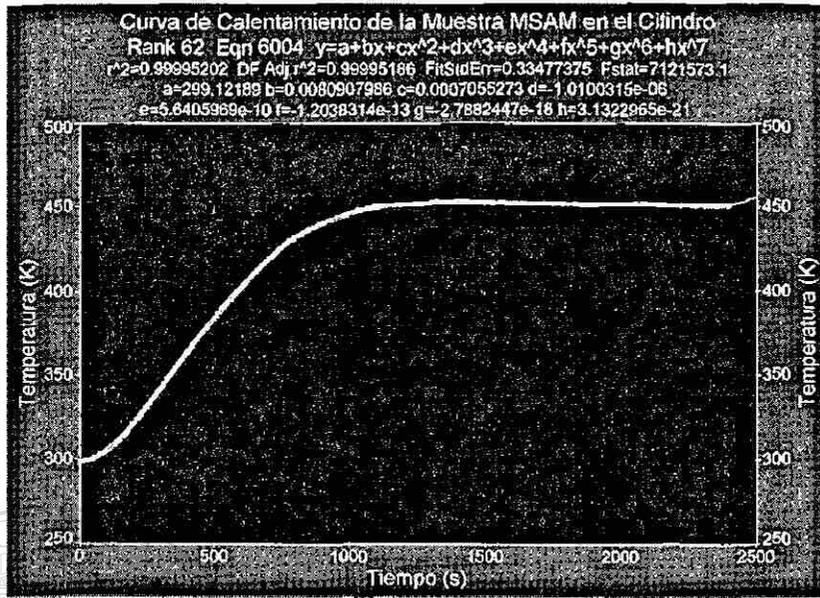


Figura 4.2.21 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra MSAM en el cilindro

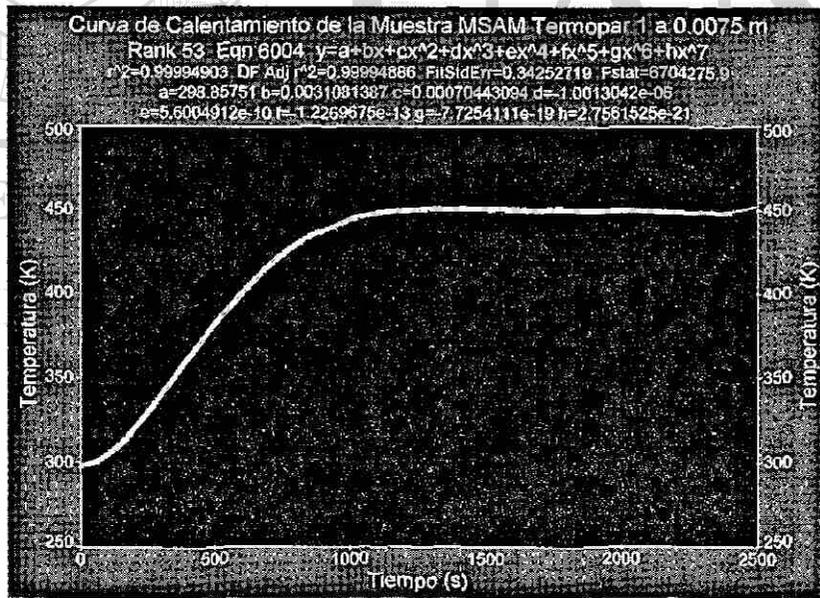


Figura 4.2.22 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra MSAM en el aluminio

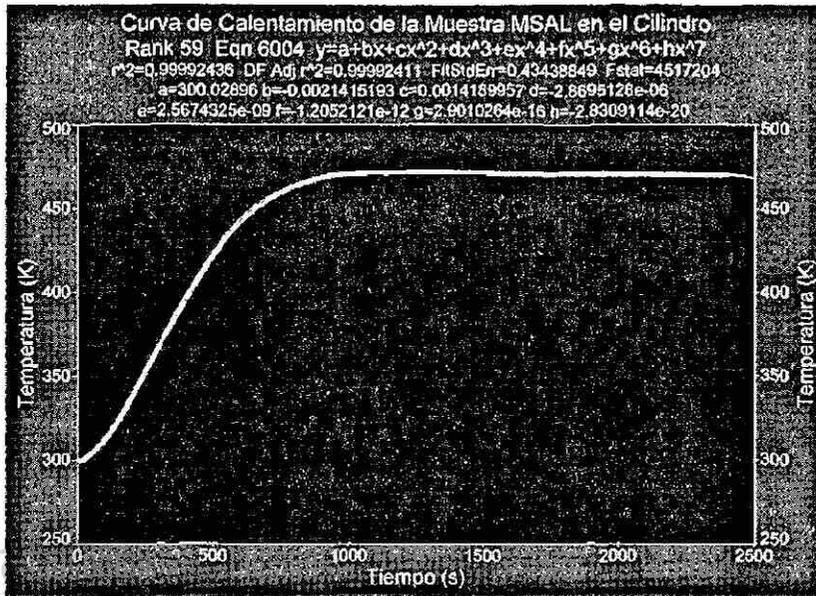


Figura 4.2.23 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra MSAL en el cilindro

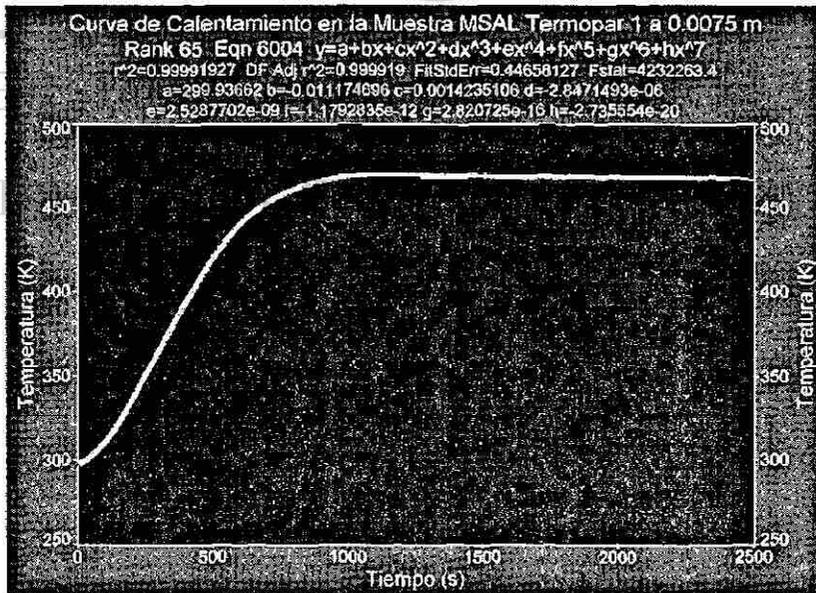


Figura 4.2.24 Curva de Calentamiento y polinomio para la muestra MSAL en el aluminio

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 $T(x,t)$:

> $i := 10$:

> $Bn := (n) \rightarrow 2/L \int_0^L Fx \sin(n \cdot \pi \cdot x / L), x=0..L$:

> $T1 := (x, t) \rightarrow \text{sum}('Bn(n) * \sin(n \cdot \pi \cdot x / L) * \exp(-\alpha * (n \cdot \pi / L)^2 * t)', 'n' = 1..i)$;

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

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

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

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

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

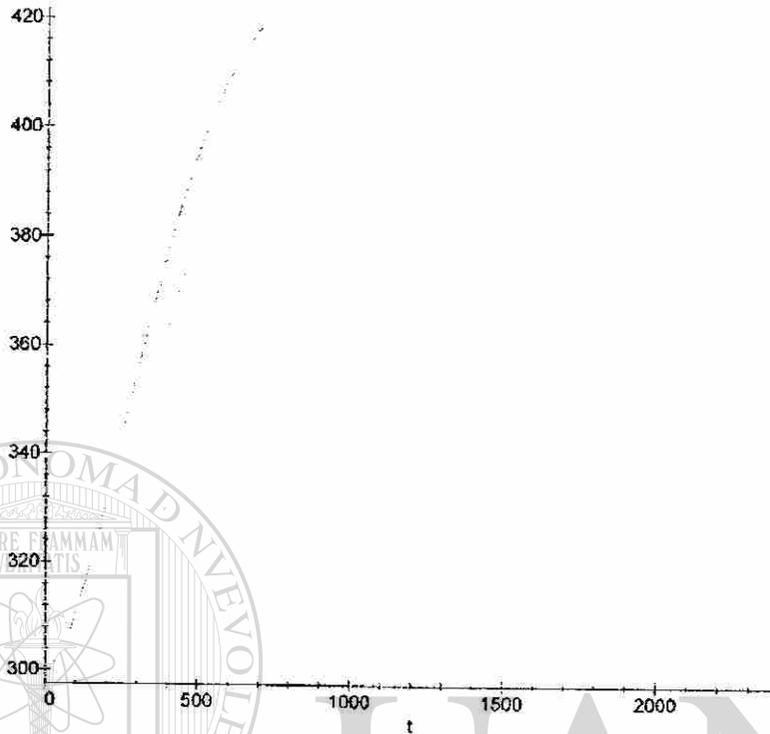
Condición Frontera 2 (Ecuación de Temperatura Vs Tiempo del Termopar del Aluminio)

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

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

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

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



```

> 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);

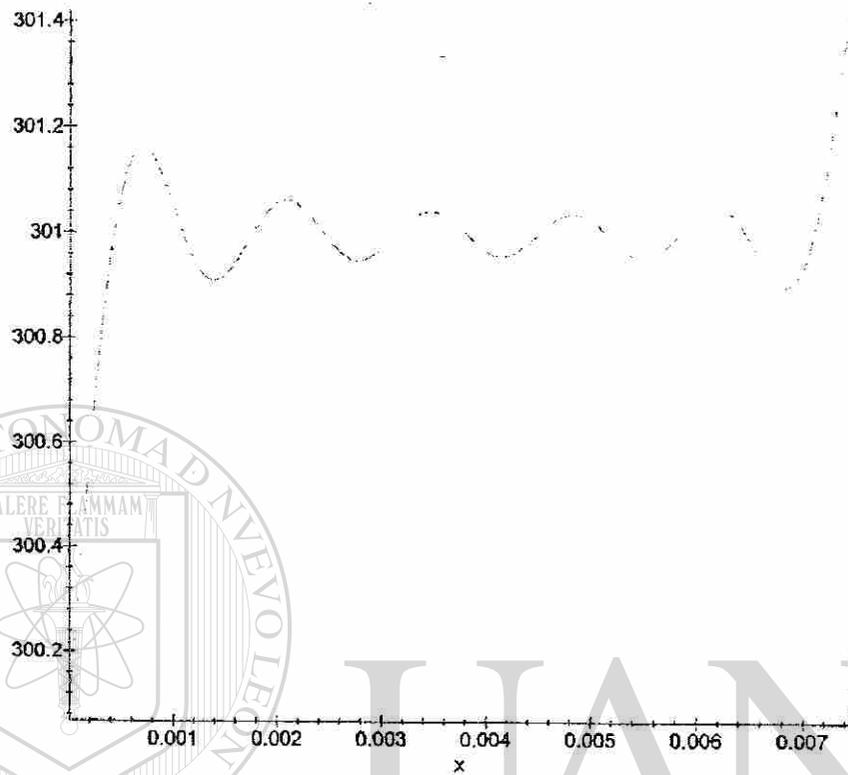
```

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

```

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

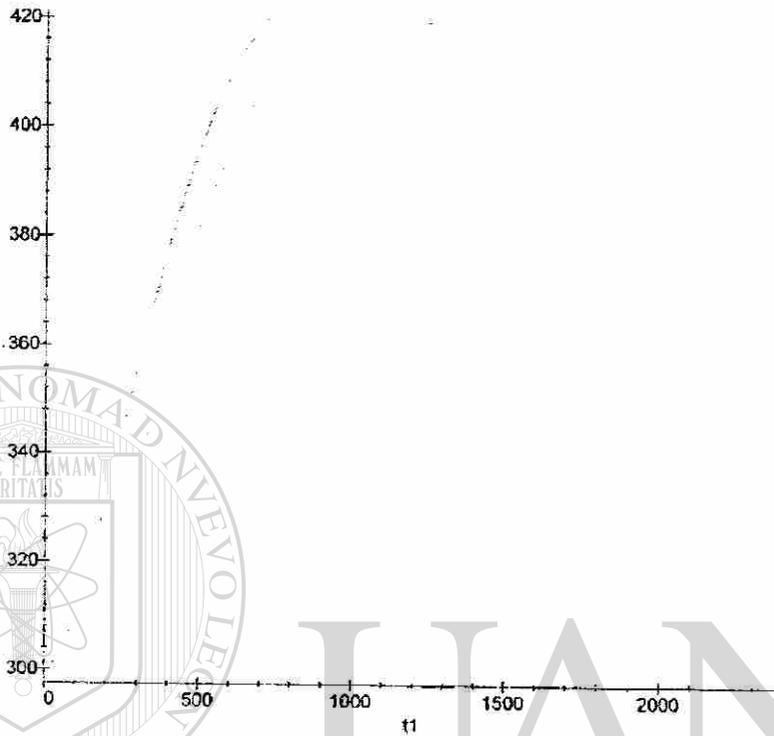
```



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

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



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');
```

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

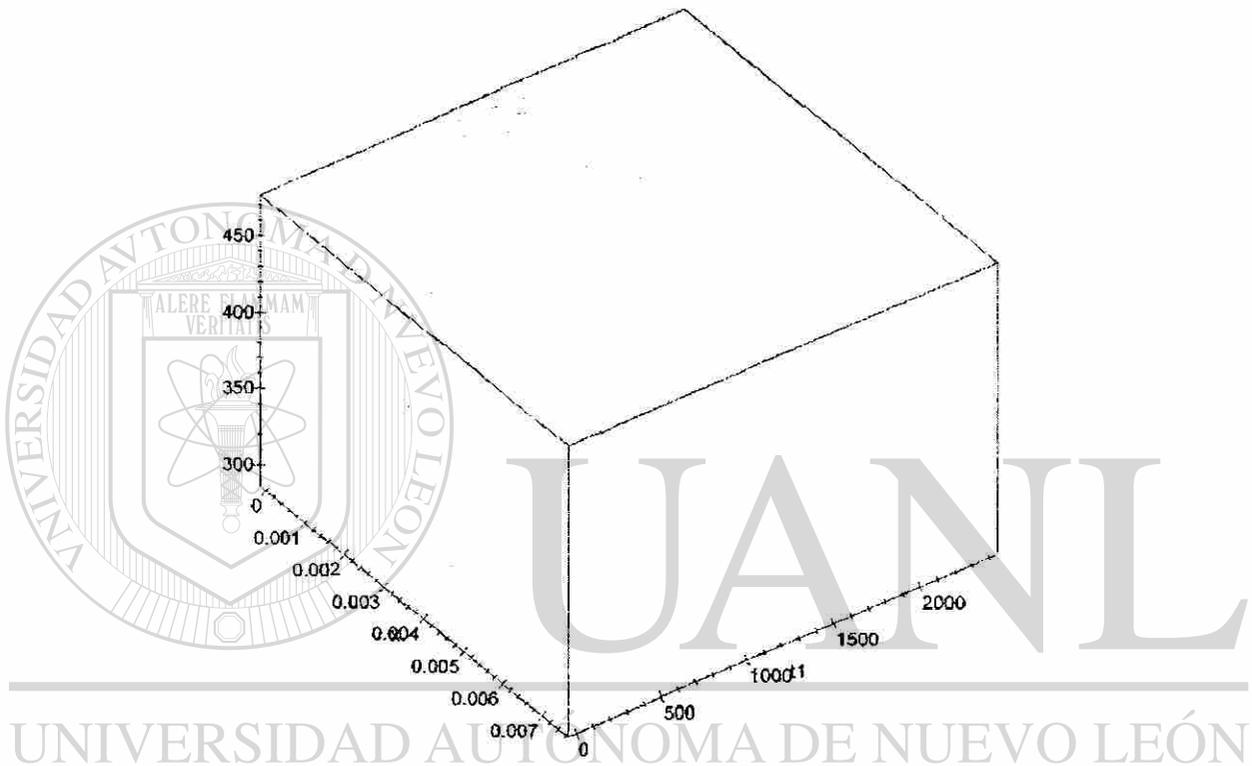
Interpolación de Termopar a 0.0024m



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

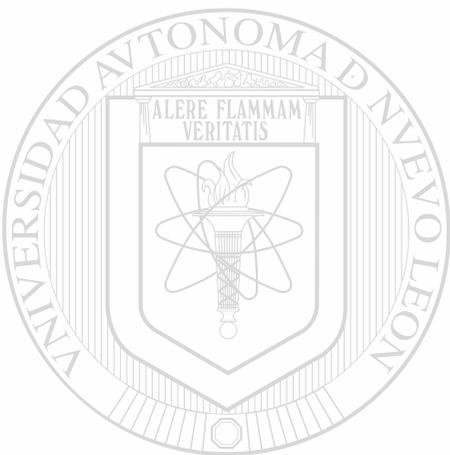
464.1309640

462.7627247

462.1449000

461.2557392

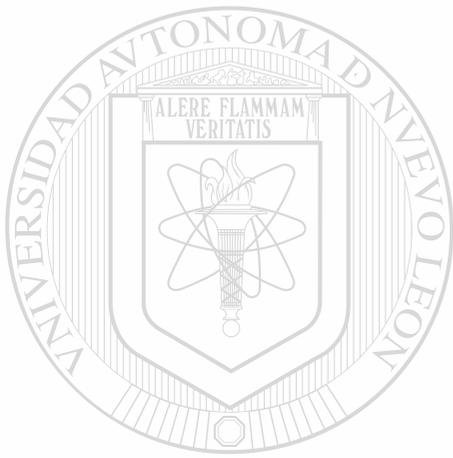
462.5164314



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

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

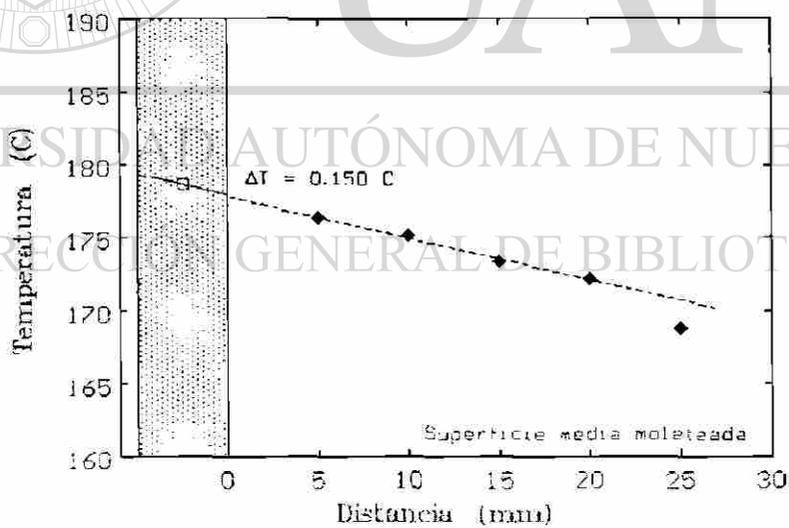
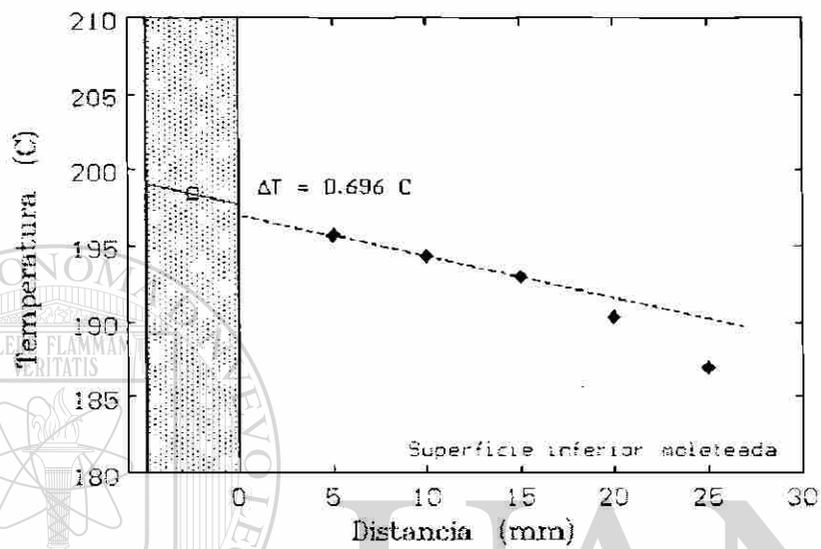
UANL

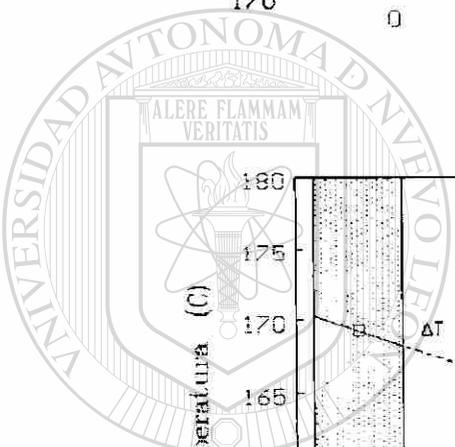
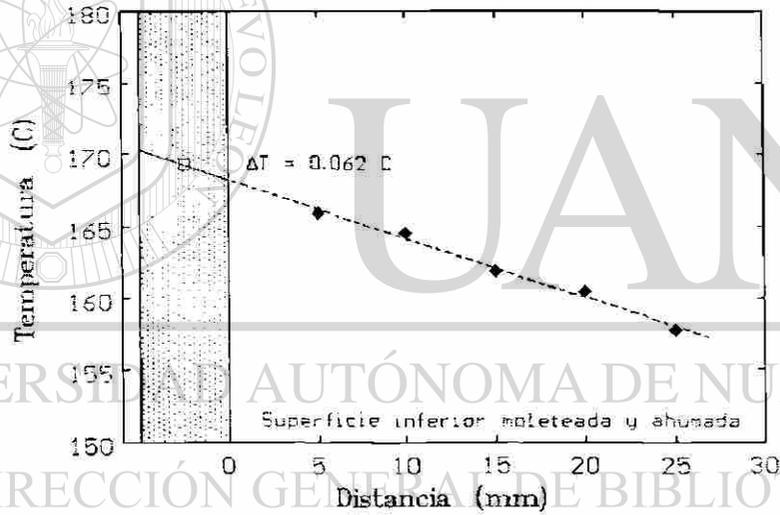
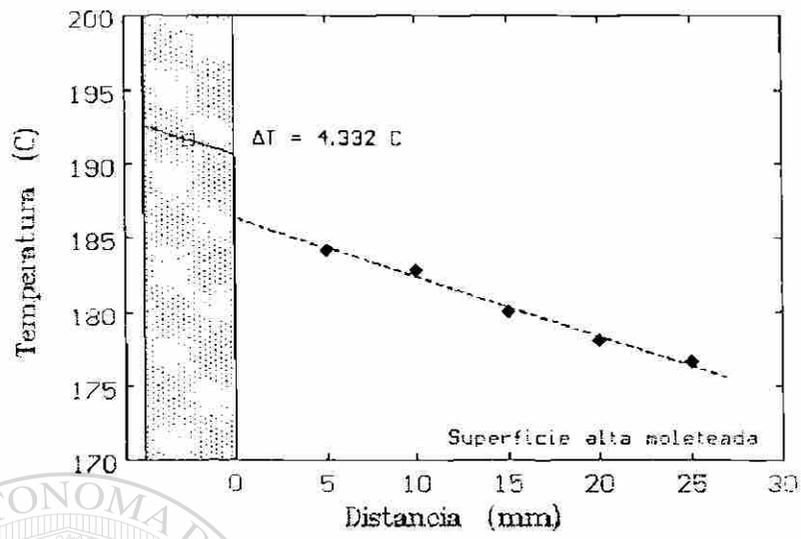
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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

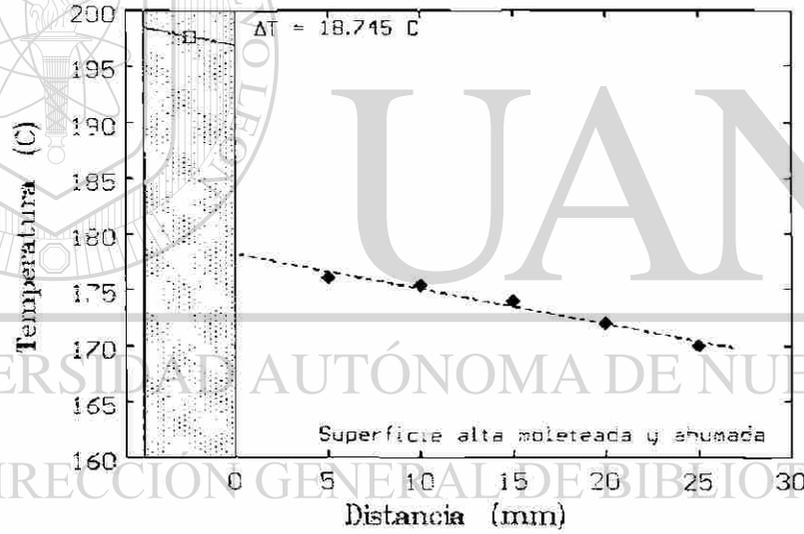
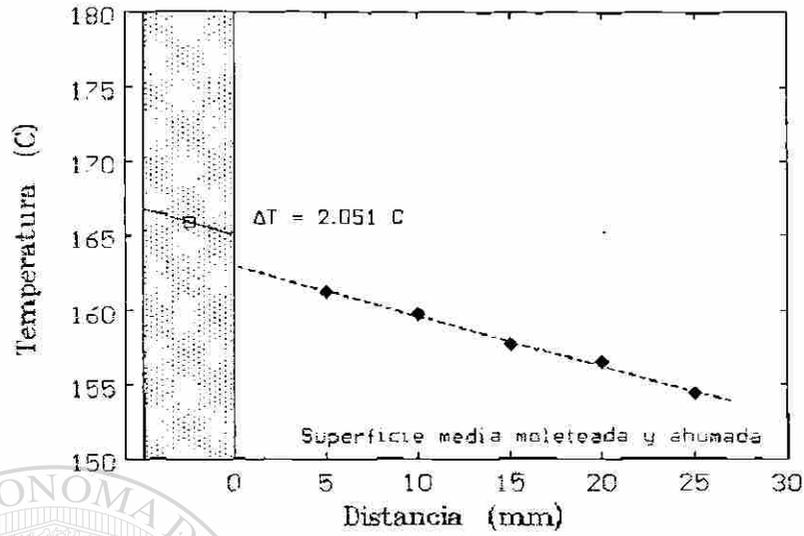


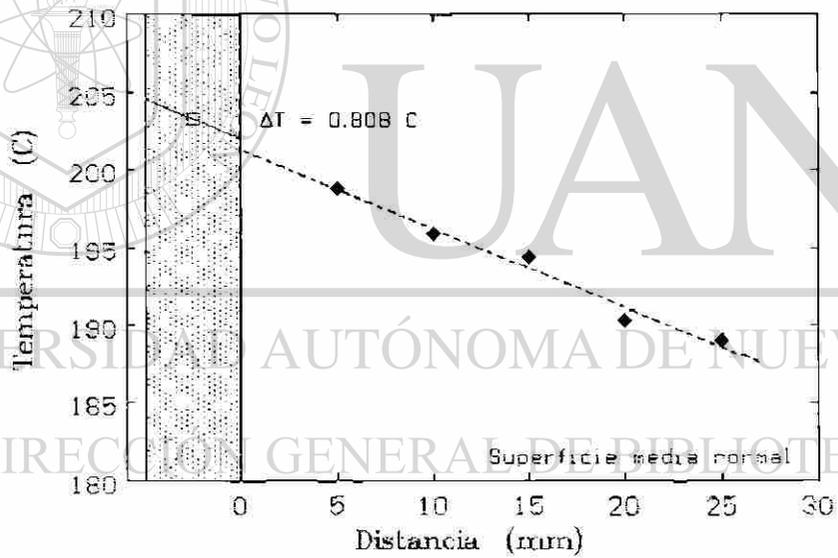
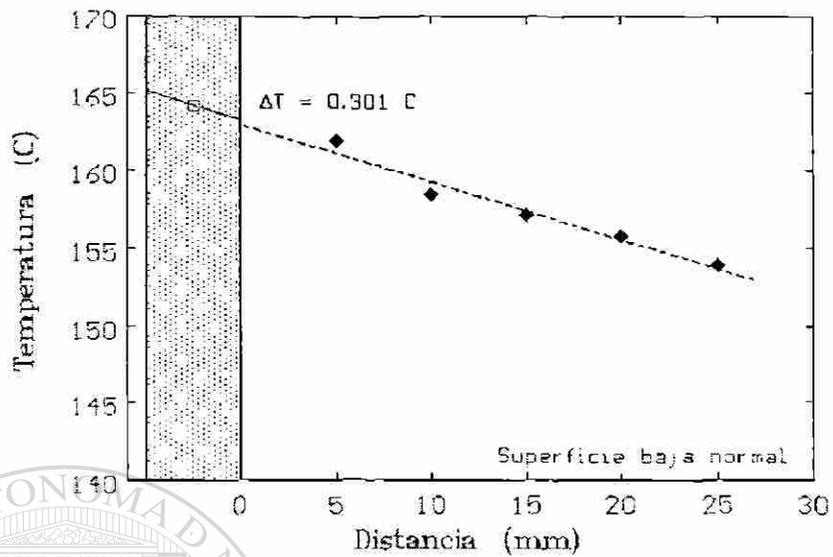


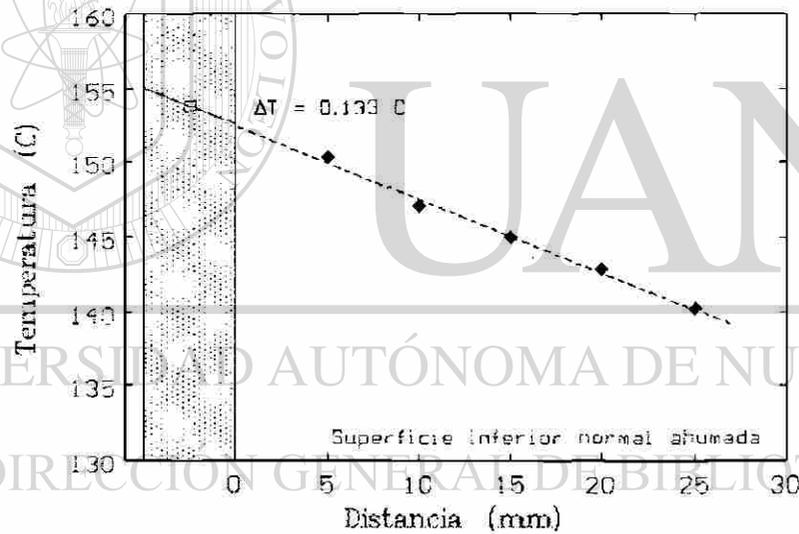
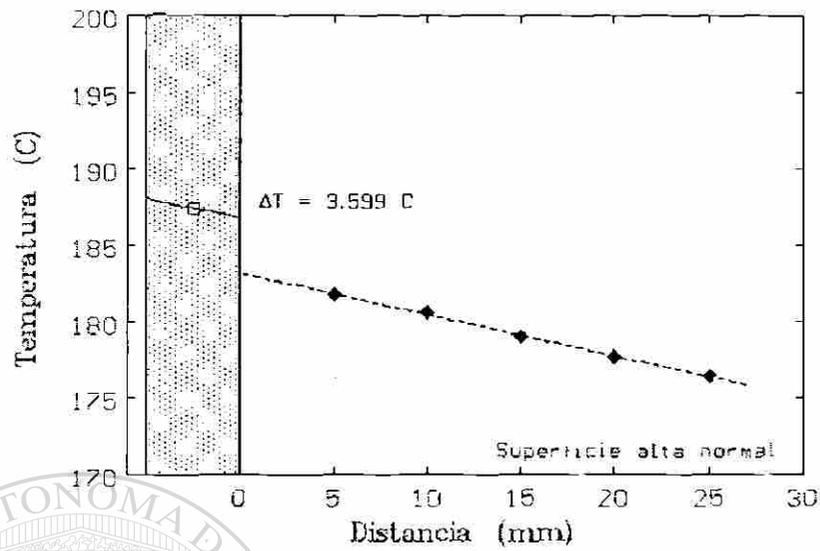
U A N L

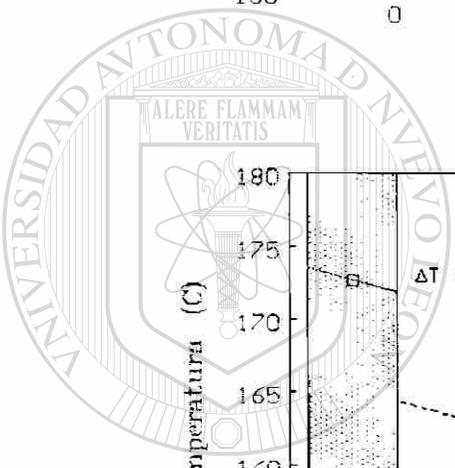
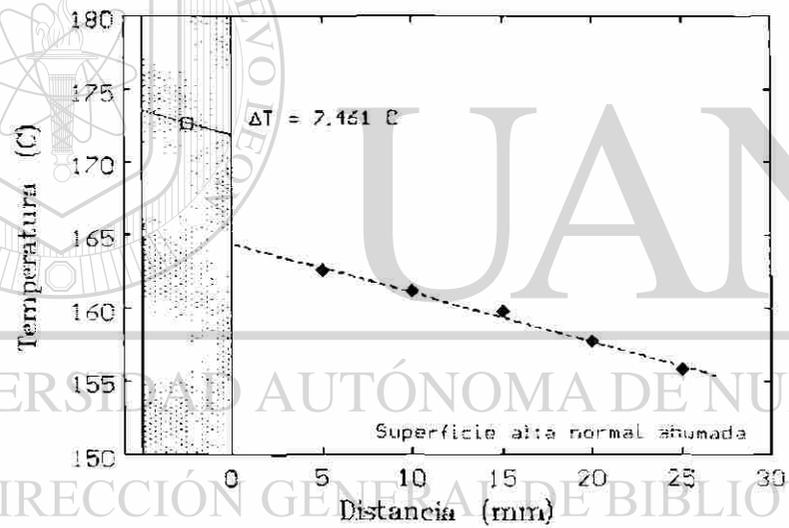
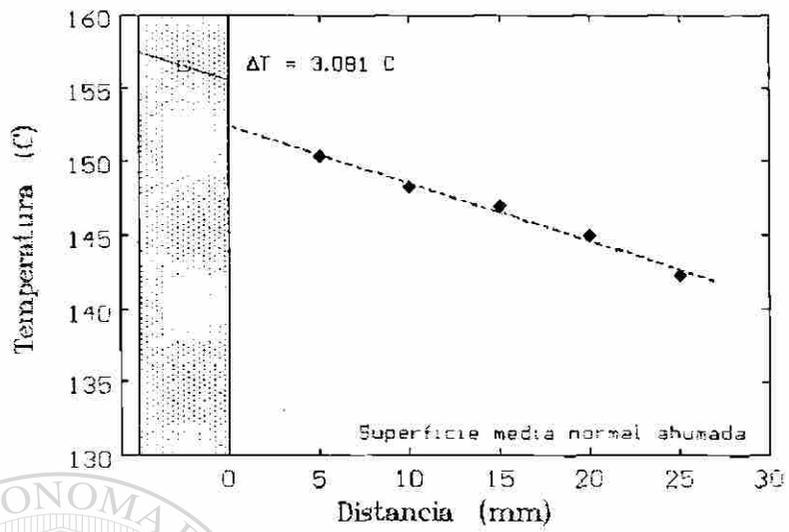
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS









UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

