



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**Análisis de la extracción de calor en el temple de
aleaciones de aluminio en un lecho fluidizado**

TESIS

**Que para obtener el título de ingeniero químico
metalúrgico**

Presenta:

JUAN MANUEL JULIAN DE LA CRUZ



México, DF.

2008



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

El mayor de mis agradecimientos para la UNAM por proporcionarme esta oportunidad de formarme como persona y profesionista.

A mi familia por apoyarme en todo momento, además de tolerar todas mis ideas y actitudes.

A la banda por su apoyo y solidaridad en momentos buenos y malos.

A los profesores que me permitieron colaborar con ellos y con ello obtener algo de su conocimiento.

Al “Macroproyecto Tecnologías para la Universidad de la Información y la Computación” el apoyo económico en el desarrollo del programa *Quench*.

Dedicado a:
Manuel y Carmen.

	Contenido
Capítulo	Página
1.-Introducción	1
2.-Antecedentes	3
Objetivos	12
3.-Metodología	13
3.1.- Trabajo experimental	13
3.2.-Trabajo computacional	17
4.-Resultados	19
4.1.-Experimentales	19
4.2.-Computacionales	28
4.2.1.-Historia de flux de calor e historias térmicas	28
4.2.2.- Predicción de historias térmicas	35
5.-Aplicaciones	41
5.1 Curvas de enfriamiento y ensayo Jominy	41
5.2 Curvas de enfriamiento y diagramas TTT	42
6.-Conclusiones	45
Referencias	46
Apéndice	48

Capítulo 1. Introducción

Los tratamientos térmicos de piezas metálicas representan una etapa muy importante para la obtención de las características mecánicas especificadas para un componente. En particular, la etapa de temple durante el tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación de las aleaciones de aluminio comerciales tiene como objetivo retener elementos de aleación en la matriz, para su posterior precipitación. Variables como la composición química de la aleación, la temperatura y el tiempo de solubilización, así como la capacidad de extracción de calor por parte del medio de temple determinan el impacto que tendrá el proceso de templado en la subsecuente modificación de las propiedades.

Existen diversos medios de temple utilizados comercialmente. Uno que ha llamado la atención recientemente es el lecho fluidizado. Un lecho consiste en una columna formada por partículas sólidas, a través de las cuales pasa un fluido (líquido o gas) provocando una caída de presión. Si el fluido se mueve a velocidades bajas a través del lecho no produce movimiento de las partículas, pero al ir incrementando gradualmente la velocidad llega un punto donde las partículas no permanecen estáticas sino que se separan y remueven, dicho proceso recibe el nombre de fluidización.

Entre los medios de temple típicamente usados en la industria del aluminio están: el agua, algunos tipos de aceites, y soluciones acuosas de polímeros; por lo que el lecho fluidizado presenta una alternativa como sustituto de los anteriores. La versatilidad de los lechos fluidizados para la obtención de distintas rapidezces de enfriamiento en un proceso de temple es una de las ventajas del empleo de éstos ya que el flujo volumétrico de gas empleado para la fluidización es la variable principal del sistema. La disminución de problemas de contaminación es otra ventaja que presentan los lechos fluidizados. Sin embargo, no hay mucha información experimental disponible para describir el comportamiento de una pieza de aleación de aluminio templada en un lecho fluidizado.

Para este trabajo se realizaron ensayos de enfriamiento rápido de probetas de aluminio 6061 utilizando un lecho fluidizado (alúmina-aire) como medio de temple para obtener curvas de enfriamiento correspondientes a distintas temperaturas de solubilización y números de fluidización, con las que se obtendrán familias de datos que se procesarán a fin de caracterizar el enfriamiento de la pieza metálica y poder predecir curvas de enfriamiento en lechos fluidizados.

Aunque la temperatura de solubilización de la aleación de aluminio 6061 es de alrededor de 480 °C este fue otro de los parámetros variados en el proceso, utilizando 450, 500 y 550 °C como temperaturas iniciales para distintas prueba de temple.

Con el empleo de programas de cómputo diseñados para la modelación de procesos de extracción de calor durante el temple, se estimaron las historias de densidad de flujo de calor en la superficie metal/lecho fluidizado y se calcularon las historias térmicas correspondientes. Los resultados arrojados por los programas de cómputo se compararon contra los valores experimentales para validar la metodología.

Como resultado de este trabajo, se logró describir matemáticamente a la relación que existe entre la extracción de calor y las dos variables estudiadas en la experimentación: la temperatura de solubilización y el nivel de fluidización del medio de temple. Además, se ilustra el posible uso de los resultados obtenidos en el diseño de temples de aleaciones de aluminio.

Capítulo 2. Antecedentes

Tratamientos térmicos de aleaciones de aluminio

Para obtener las propiedades óptimas del aluminio y sus aleaciones, generalmente es necesario someterlas a tratamientos térmicos. Un tratamiento térmico es un proceso industrial de mejora de propiedades mecánicas mediante el control de las temperaturas, los tiempos de permanencia y las rapidezces de enfriamiento del ciclo térmico. Cuando se aplica a aleaciones de aluminio, el término tratamiento de envejecimiento se refiere usualmente a las operaciones empleadas para incrementar la resistencia y la dureza de las aleaciones de forja o de moldeo endurecibles por precipitación.

Las propiedades mecánicas de determinadas aleaciones de aluminio pueden mejorarse por medio del tratamiento térmico denominado T6 [1], que consta de tres fases:

- Recocido por solubilización. El término “solubilización” indica que se calienta la aleación a una temperatura en la que aumenta la cantidad de soluto en la disolución sólida. “Recocido” indica que el calentamiento también reblandece la aleación
- Temple para formar una solución sobresaturada. Ésta es la etapa más crítica de la serie de procedimientos de este tratamiento térmico. La rapidez de temple debe ser mayor que la rapidez de enfriamiento crítica para retener la composición base a la temperatura de recocido por disolución y así formar una disolución sobresaturada del soluto o de alguna fase de interés. Esto crea la fuerza impulsora de la precipitación del soluto o fase en exceso.
- Precipitación del exceso de soluto o fase. El endurecimiento de la aleación se consigue precipitando el exceso de soluto o fase en forma de un precipitado transitorio, metaestable y coherente. El endurecimiento se debe a la formación de la red (deformación coherente) inducido por el precipitado coherente.

La precipitación puede ocurrir a temperatura ambiente (envejecimiento natural) o a elevada temperatura (envejecimiento artificial).

Los requisitos fundamentales para que una aleación presente endurecimiento por envejecimiento son los siguientes:

- Que la aleación presente solubilidad creciente de un soluto o de una segunda fase a medida que la temperatura aumenta.
- Que el material a alta temperatura, en el cual hay más solutos en disolución, pueda ser templado cuando la aleación se enfría a la temperatura ambiente o por debajo de ella. Puesto que la aleación templada contiene más soluto a temperatura ambiente que cuando está en equilibrio, se trata de una solución sobresaturada, inestable, que tiende a precipitar el exceso de solución o fase.

En la figura 2.1 se muestra, como ejemplo, el diagrama de fases para una aleación de aluminio 6061 en el que se muestra la cantidad máxima de solubilización del Mg_2Si que se puede obtener a una temperatura de $550^\circ C$ (1.6 %peso), siendo esta cantidad la máxima que se puede obtener en forma de precipitado posterior al temple.

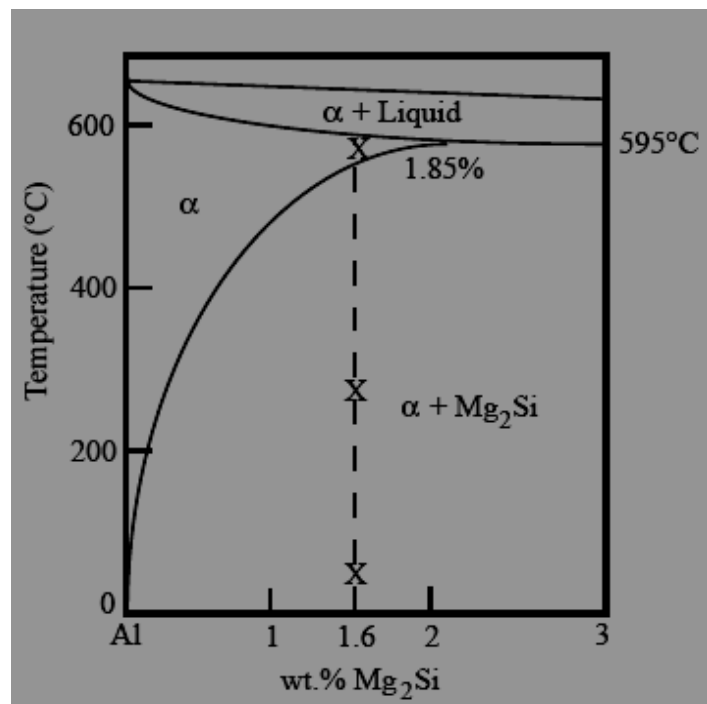


Figura 2.1 Diagrama de equilibrio para el sistema Al-Mg₂Si en una aleación de aluminio 6061 [1].

Con base a estos requisitos, el proceso de tratamiento térmico para conseguir el endurecimiento por precipitación de la aleación de aluminio 6061 consiste en las etapas que se ilustran en la Figura 2.2, donde el termino “maduración” es equivalente a “envejecimiento”.

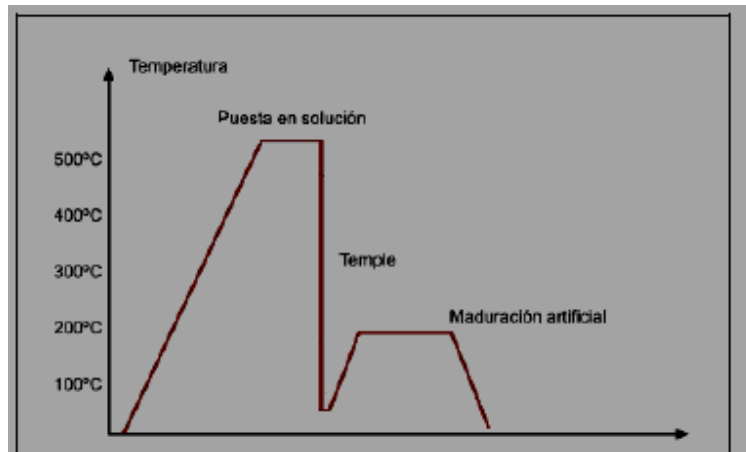


Figura 3.3. Esquema con las etapas del tratamiento térmico T6. [24]

Figura 2.2. Etapas del endurecimiento por precipitación [1].

La variación de solubilidad de los elementos de aleación con la temperatura es la causa fundamental del efecto de los tratamientos térmicos en las propiedades de la aleación. En una aleación Al-Si-Mg (como lo es la aleación 6061) la temperatura de solubilización está dentro del intervalo de 500° C y 570° C. Poniendo el material entre estas temperaturas, se conseguirá tener una concentración máxima de silicio y de magnesio en la red del aluminio, sin que se haya llegado al punto de fusión. [1].

Solubilización.

La finalidad del tratamiento de solubilización es obtener una disolución sólida con la máxima concentración del elemento de aleación endurecedor; esto se consigue a una temperatura elevada (de entre 520° C y 570° C para las aleaciones de aluminio de la serie 6XXX) durante un tiempo determinado que puede ir desde 2 hasta 8 horas.

Existe una temperatura óptima de solubilización. Si la temperatura es superior a la óptima las características mecánicas no serán las mejores, ya que la aleación sufre lo que se llama quemado de la aleación, que es una fusión parcial de los constituyentes eutécticos en los límites de grano. Por el contrario si la temperatura es inferior a la óptima las características mecánicas tampoco serán las mejores ya que no se habrá conseguida una solubilización completa de los constituyentes activos de la aleación [1].

La solubilización de las aleaciones de aluminio tiene la característica de que su cinética no depende de la temperatura; así, si se aumenta la temperatura de solubilización no se consigue reducir el tiempo de solubilización.

Temple

Una vez realizada la puesta en solución, la aleación debe ser enfriada rápidamente para obtener la solución sólida sobresaturada a temperatura ambiente.

El temple es muy importante ya que es un factor que afecta directamente a la última fase del tratamiento térmico; el envejecimiento. Si se enfría de forma suficientemente rápida se conseguirá retener en la solución el máximo de elementos endurecedores.

Los factores que influyen en la rapidez de enfriamiento son diversos. El calor específico del material, su conductividad térmica y la temperatura del fluido refrigerante son algunos de los más importantes.

La velocidad de enfriamiento requerida para una retención de soluto óptima, debe ser superior a la velocidad de enfriamiento crítica; ésta última determinada a partir de las curvas-C, en las cuales se tiene el grado de retención de soluto en función de la rapidez de enfriamiento (Figura 2.2) [3]. La determinación de la velocidad crítica se realiza a partir de encontrar las condiciones de enfriamiento tales que no toquen la curva-C correspondiente a la aleación de interés; así, bajo estas condiciones, se garantiza una retención de soluto máxima.

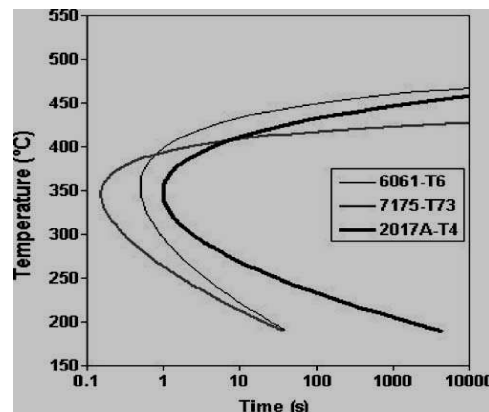


Figura 2.3. Curvas-C para tres distintas aleaciones de aluminio [3].

El agua a temperatura ambiente es el fluido refrigerante que más se utiliza, ya que proporciona rapidez de enfriamiento superiores a cualquier otro fluido.

Envejecimiento

Es la última etapa del tratamiento térmico de precipitación. Se puede realizar a temperatura ambiente (envejecimiento natural) o sometiendo la pieza a temperaturas moderadas superiores a la ambiente (envejecimiento artificial).

Consiste en una evolución estructural que se caracteriza por la formación de aglomeraciones submicroscópicas de átomos, coherentes y/o semicoherentes con la matriz de aluminio que dificultan las deformaciones plásticas y endurecen a la aleación [1].

El envejecimiento artificial consiste en someter la pieza a un calentamiento a una temperatura moderadamente superior a la ambiente, durante un periodo de tiempo. En esta etapa los procesos de precipitación son acelerados, consiguiendo una mejora en las propiedades mecánicas. En general se consigue un aumento de la carga de ruptura, del límite elástico y de la dureza, y una disminución del alargamiento.

En esta etapa la rapidez de envejecimiento sí depende del tiempo y de la temperatura a que se somete la pieza. Para cada temperatura de envejecimiento existe un tiempo óptimo, el cual proporciona las mejores propiedades mecánicas, si este tiempo se sobrepasa entonces se produce una pérdida de las propiedades, y se produce el

sobreenvejecimiento con la pérdida total de coherencia de los precipitados con la matriz de aluminio.

Una vez realizado el envejecimiento se puede enfriar con el método que se desee, con agua o a temperatura ambiente, ya que este enfriamiento no influye en las propiedades del material.

En la Figura 2.2 se representa la sucesión de precipitados durante las diversas etapas de tratamiento considerando también el sobreenvejecimiento.

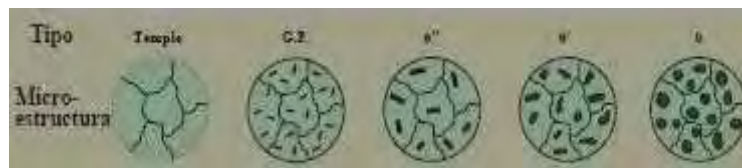


Figura 2.4. Etapas de la microestructura en el envejecimiento. [1]

Las fases GP (Guinier Preston) y θ'' pertenecen a la etapa de envejecimiento, mientras que las fases θ' y θ son específicas del sobreenvejecimiento[1]

Efecto de los elementos aleantes

Los elementos aleantes que encontramos en la composición de las aleaciones de aluminio de forja o de moldeo se clasifican en grupos muy diversos. Podemos distinguir tres categorías: [1]

- a) Elementos de adición más elevada, como el cobre, magnesio, manganeso, silicio y zinc, donde su composición varía en cada aleación.
- b) Elementos de adición inferior, el contenido de éstos no supera nunca el 1 %, como puede ser el cromo, hierro, zirconio, níquel y cobalto.
- c) Elementos de adición especial, normalmente no superan el 0,5 % y se destinan para aleaciones con uso particular, estos elementos son el antimonio, berilio, plomo, estaño y la plata.

A continuación se citarán algunas características de los elementos aleantes que forman parte de la composición de la aleación en estudio.

- *Magnesio*

Es la causa principal del endurecimiento y la ductilidad de las aleaciones de aluminio sometidas a tratamientos térmicos; se utiliza en aleaciones más complejas las cuales también contienen cobre, níquel y otros elementos con el mismo propósito.

- *Cobre*

El cobre aumenta la dureza y la ductilidad en piezas de fundición tratadas o no térmicamente. Reduce la resistencia a la corrosión en algunas composiciones y condiciones específicas del material.

- *Silicio*

Es un elemento presente en las aleaciones de fundición, ya que aporta un aumento en la fluidez del material además de proporcionarle una elevada capacidad de colabilidad.

- *Manganeso*

Se considera como una impureza en las aleaciones de fundición, y se controla en niveles bajos en muchas composiciones de moldeo por gravedad.

Lechos fluidizados como medio de enfriamiento [4].

La fluidización es un proceso por el cual una corriente ascendente de fluido (líquido, gas o ambos) se utiliza para suspender partículas sólidas. Desde un punto de vista macroscópico, la fase sólida (o fase dispersa) se comporta como un fluido, de ahí el origen del término "fluidización". Al conjunto de partículas fluidizadas se le denomina también "lecho fluidizado".

En estos sistemas de enfriamiento, variables como el flujo de aire alimentado, la altura de cama empacada y el tamaño y tipo de las partículas a fluidizar son de gran relevancia ya que alteran las condiciones de enfriamiento, siendo así un sistema muy

versátil en el cual se puede diseñar las condiciones que se desean en un tratamiento térmico.

El número de fluidización es un parámetro que se encuentra en función del flujo de aire alimentado al reactor siendo así el cociente de este último (Q) entre el flujo requerido para mínima fluidización (Q_{mf}).

$$N_f \equiv \frac{Q}{Q_{mf}} \quad (2.1)$$

La determinación del flujo de mínima fluidización (Q_{mf}) se realiza a partir del registro de caída de presión en el sistema en función del flujo de aire alimentado al reactor; este valor de mínima fluidización se encuentra relacionado a la cantidad de material a fluidizar y el diámetro de las partículas de este mismo. En la Figura 2.5 se muestra la relación de la caída de presión con el flujo de aire alimentado para la determinación del flujo de mínima fluidización [5].

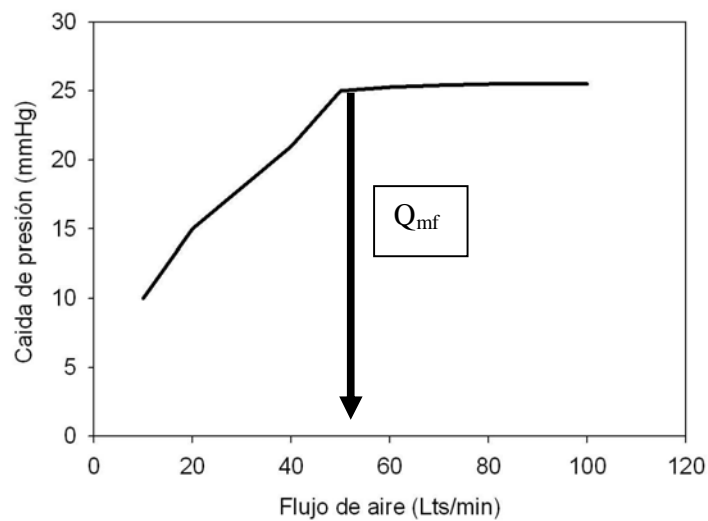


Figura 2.5. Caída de presión en función del flujo de aire alimentado al reactor de lecho fluidizado para un sistema con partículas de alúmina malla 54 [5].

Los modelos matemáticos en los tratamientos térmicos

En el campo de los tratamientos térmicos de componentes metálicos, el modelado de los campos térmico, microestructural y de esfuerzos es de gran importancia para predecir las propiedades mecánicas y el tiempo de vida útil de una pieza.

Para poder comprender los fenómenos que ocurren durante el procesamiento térmico de metales, es necesario resolver las ecuaciones diferenciales que describen a la transferencia de calor, ya que la evolución de la temperatura en los componentes metálicos controla en gran medida la evolución microestructural y la evolución de esfuerzos. Un ejemplo, para temple en lecho fluidizado, se describe en [6].

Para resolver los problemas de transferencia de calor es necesario conocer las condiciones de frontera térmica. Éstas no pueden ser medidas directamente en la mayoría de los casos y por lo tanto es necesario estimarlas.

La solución del problema inverso de conducción de calor (IHCP de sus iniciales en inglés) es una alternativa utilizada en diversos casos de estudio. Las estimaciones obtenidas con esta metodología generan muy buenas predicciones como lo muestran los resultados presentados en [7].

El problema directo de conducción de calor (DHCP por sus siglas en inglés) contempla la resolución de la ecuación general de energía para obtener historias térmicas en cualquier punto de un sólido en función del tiempo y la posición. Para ello se debe contar con la información del sistema: geometría, propiedades termofísicas, ecuación que representa el fenómeno, la condición inicial y las de frontera así como los términos de generación de calor.

En el problema directo de conducción de calor, el flux de calor en la superficie del sólido representa a la condición de frontera necesaria para resolver el perfil de temperatura en un punto cualquiera del sistema; en el problema inverso de conducción de calor se parte precisamente de un perfil de temperatura experimental para determinar la condición de frontera del sistema (por ejemplo flux de calor) [7].

El problema inverso de conducción de calor se puede resolver mediante soluciones de dominio completo y las de método secuencial como el método de Beck [8].

Objetivos

Este trabajo fue realizado con el fin de caracterizar térmicamente el proceso de temple en lecho fluidizado de probetas de aleación de aluminio 6061, variando parámetros como el número de fluidización (N_f) y temperatura inicial o de solubilización (T_0); condiciones como el tipo y dimensiones del material a tratar fueron mantenidas constantes. Se utilizaron *softwares* especiales para los cálculos del flux de calor e historias térmicas y con ello poder predecir enfriamientos sin antecedentes experimentales. El lecho fluidizado consiste de partículas de alúmina (malla 54) y aire a temperatura ambiente.

Como puntos específicos a alcanzar mediante el presente trabajo se tienen:

- Caracterizar el impacto que tienen el N_f y T_0 en el enfriamiento durante el temple de probetas de aleación de aluminio 6061 en lecho fluidizado.
- Evaluar las condiciones de flux de calor existentes durante el proceso de temple en lecho fluidizado de probetas de aleación de aluminio 6061.
- Mediante herramientas estadísticas poder describir el comportamiento del proceso experimental.
- Poder predecir el comportamiento del proceso para condiciones sin antecedente experimental dentro del rango de la experimentación.

Capítulo 3. Metodología

En éste capítulo se describen las etapas realizadas para desarrollar este trabajo de tesis. Son dos las etapas descritas: trabajo experimental y trabajo computacional. En la primera etapa se describen los procedimientos realizados para llevar a cabo las pruebas experimentales, así como las herramientas utilizadas para su realización. En la etapa computacional se utilizaron dos programas de cómputo (*Winprobe* y *Quench*) los cuales se describen, así como la forma en que se emplean para el sistema estudiado.

3.1 Trabajo experimental

La etapa experimental realizada para este trabajo se enfocó en la obtención de historias térmicas (curvas de enfriamiento) durante el temple de probetas de una aleación comercial de aluminio en un reactor de lecho fluidizado. La temperatura inicial de temple correspondió a temperaturas típicas de solubilización de aleaciones de aluminio. El trabajo se inició seleccionando una aleación comercial de aluminio adecuada. Se optó por utilizar una aleación de aluminio AISI 6061 dado que ya se contaba con curvas de enfriamiento en un ensayo tipo Jominy [9] para este material. La materia prima para la fabricación de las probetas fue una barra de 1 in de diámetro. De la barra se tomó una muestra para caracterizarla químicamente y así evaluar si se encontraba dentro de las especificaciones de la clasificación mencionada anteriormente; posteriormente se maquinó para obtener una probeta cilíndrica de las dimensiones indicadas en la Figura 3.1. Esta probeta tiene dos barrenos (para colocar termopares), ubicados: uno en el centro ($r = 0$ mm) y el otro en la subsuperficie (a 1.5 mm de la superficie), ambos a mitad de la altura.

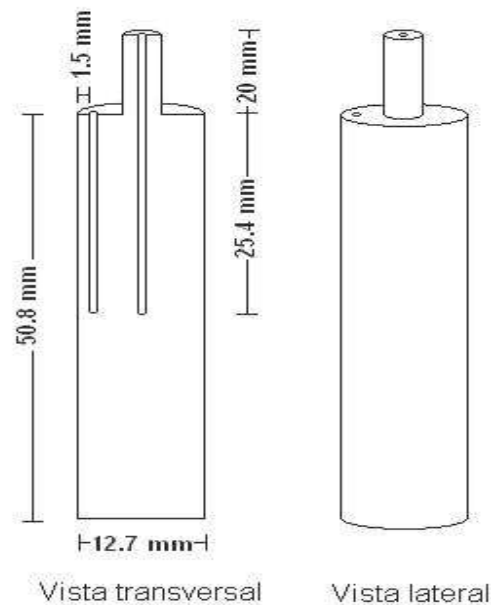


Figura 3.1. Representación esquemática de la probeta de aleación de aluminio 6061 utilizada en la experimentación.

Para realizar las operaciones de temple se utilizó el equipo mostrado en la Figura 3.2. El proceso se realizó calentando la probeta hasta la temperatura de solubilización (T_0) correspondiente a cada prueba, manteniéndola durante 15 minutos con el fin de homogenizar la temperatura en toda la pieza. El calentamiento se realizó en un horno cilíndrico de resistencias; una vez que la probeta alcanzaba la temperatura deseada se enfriaba en un reactor de lecho fluidizado el cual contenía alúmina malla 54 en una cantidad equivalente a 2.8 kg, y era alimentado con aire para fluidizar a las partículas sólidas, el sistema operaba a temperatura ambiente. El abastecimiento de aire fue proporcionado por un compresor de 120 litros de capacidad que trabaja en un rango de presión de entre 80 y 120 psi. El flujo de aire fue regulado con un rotámetro marca Cole Palmer, situado entre el reactor y el compresor y con un rango de medición de 0 a 140 LPM. Con el fin de medir la caída de presión dentro del reactor de fluidización, fue colocado un manómetro de mercurio. Con las mediciones de caída de presión se determinó el flujo de mínima fluidización para la cama de alúmina, tal como se explica en el Capítulo 1.

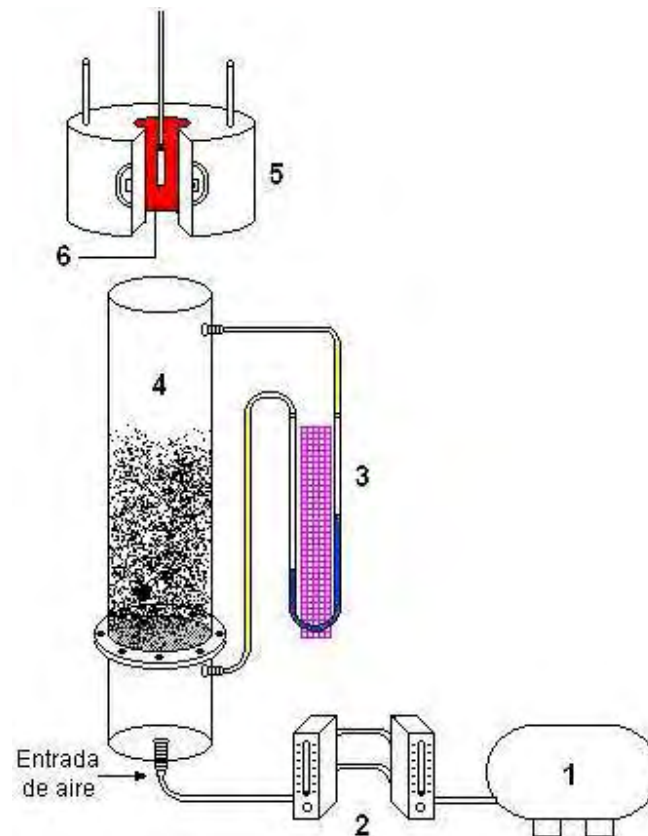


Figura 3.2. Esquema del equipo utilizado en el trabajo experimental. 1) Compresor de aire, 2) rotámetro, 3) manómetro de mercurio, 4) reactor de fluidización, 5) horno de resistencias.

Los termopares utilizados son tipo K, de 1/16 in de diámetro y 60 cm de longitud. Los datos de temperatura y tiempo fueron adquiridos mediante un adquisidor marca National Instruments modelo NI 60 de 12 canales, el cual fue conectado a una computadora portátil que contiene el software VIRTUAL BENCH-LOGGER 2.5, con el cual se obtuvo el registro de la historia térmica de los dos termopares durante la prueba de templado. Se configuró el adquisidor tal que la frecuencia de adquisición fue de 1.4 Hz.

Cabe señalar que, para todas las pruebas, se utilizó una sola probeta de aluminio, la cual era limpiada antes de cada experimento mediante un soplado de aire para la eliminación de partículas de alúmina alojadas en las uniones de la probeta y los termopares; al mismo tiempo se verificó que las conexiones y la posición de la probeta no

hubiesen sufrido modificación alguna. La cama del lecho fue la misma, acondicionándola antes de correr una prueba haciéndosele pasar aire hasta alcanzar la temperatura ambiente.

La secuencia de las acciones realizadas en cada experimento fue:

- Encendido del horno esperando hasta que alcanzase la temperatura inicial de trabajo
- Preparación del adquisidor. En este paso se checaron las conexiones eléctricas, así como la configuración y el nombre del archivo en el que se guardan los datos.
- Calentamiento de la probeta. La probeta se introdujo al horno de resistencias y se esperó a que alcanzara la temperatura de solubilización; a partir de ese momento se dejó 15 minutos más para homogeneizar la temperatura.
- Ajuste del flujo de aire acorde al número de fluidización requerido para cada prueba.
- Temple. Transcurridos los 15 min de homogenización térmica, la probeta era trasladada al reactor del lecho fluidizado para el enfriamiento. El adquisidor está en funcionamiento desde momentos antes.
- Extracción y limpieza de la probeta, así como acondicionamiento a temperatura ambiente de la cama del lecho para la prueba siguiente.

El diseño de los experimentos se realizó tomando en cuenta las variables del proceso que se estudiaron y que fueron: 1) el número de fluidización (N_f) y 2) la temperatura de solubilización (T_0) o de inicio de la prueba. Se seleccionaron tres temperaturas de inicio del enfriamiento (basándose en las temperaturas típicas de solubilización para aleaciones comerciales de aluminio) y cuatro números de fluidización (en función del máximo valor que puede utilizarse en el reactor de lecho fluidizado con el que se realizó la experimentación). Se realizaron un total de 12 pruebas, como muestra la Tabla 3.1; además se repitieron pruebas con el fin de comprobar la reproducibilidad de los experimentos. El flujo de aire necesario para fluidizar las partículas de alúmina (flujo de mínima fluidización) fue determinado por medio de una grafica de caída de presión

contra flujo de aire suministrado (ΔP vs. Q_{aire}), como se explica en los antecedentes; el valor de flujo de aire a temperatura ambiente para obtener una mínima fluidización ($N_f = 1.0$) para el sistema del reactor de fluidización, con una altura de cama de 18 cm, utilizando alúmina malla 54 como material a fluidizar fue de 53 LPM [5].

Tabla 3.1. Matriz experimental

T_0 , °C	Número de fluidización			
450	1.0	1.2	1.4	1.8
500	1.0	1.2	1.4	1.8
550	1.0	1.2	1.4	1.8

3.2 Trabajo computacional

El trabajo computacional constó de dos partes: 1) estimación de la condición de frontera térmica y 2) simulación de la respuesta térmica en el centro de la probeta. En cada caso se utilizó *software* ya existente: primero *Winprobe* y luego *Quench*.

El primero de estos paquetes es un programa que resuelve el modelo del problema inverso de conducción de calor (IHCP, por sus siglas en inglés) para el cálculo de la condición de frontera térmica en la frontera activa; fue creado en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica por Hernández-Morales *et al.* [7] y está desarrollado en Visual Basic. El código extiende el algoritmo secuencial de la función especificada (SFS por sus siglas en inglés) propuesto originalmente para geometría rectangular por Beck *et al.* [8]. Este programa requiere como entrada de datos el registro de temperaturas en función del tiempo durante el temple de la probeta de aluminio 6061 (además de la geometría y otros parámetros de cálculo) y entrega como resultado valores estimados de la densidad de flujo de calor y de la temperatura de la superficie activa asociados a cada tiempo de medición durante el proceso. Descripción del empleo del programa en el *apéndice*.

Para el empleo del programa *Quench* [6] se utilizaron los datos obtenidos con *Winprobe* ya que el primero requiere como entrada de datos el flux de calor en función

del tiempo para obtener, mediante el método de elemento finito, el historial térmico para las condiciones de enfriamiento de cada prueba. El empleo de este programa (Apéndice) fue con la finalidad de simular las historias térmicas y compararlas con los datos experimentales obtenidos para así validar las historias de flux de calor estimadas con *Winprobe*.

Cabe señalar que todos los valores obtenidos a partir del empleo de los programas de computo (*Winprobe* y *Quench*), fueron procesados a través de una hoja de calculo, para su posterior presentación gráfica. A su vez el empleo del programa *Sigmaplot* fue requerido, además de para la elaboración de los gráficos, para la obtención de datos estadísticos, aplicando regresiones no lineales a los datos con el fin de tener una ecuación representativa de los mismos. El programa se empleo para realizar una regresión no lineal utilizando como modelo a la ecuación de Weibull de 4 parámetros [10].

Una vez que se determinaron a los parámetros característicos de cada conjunto de datos (temple a varios valores e número de fluidización para una temperatura inicial dada), éstos fueron utilizados para la posterior estimación de curvas de enfriamiento sin antecedente experimental, es decir estimando la respuesta térmica para un número de fluidización para el cuál no se habían realizado experimentos.

Las propiedades termofísicas utilizadas para la estimación computacional de los resultados, se presentan en la Tabla 3.2, estos datos fueron requeridos como datos de entrada para el programa *Quench*. Cabe señalar que estos valores fueron alimentados al programa como constantes para todas las temperaturas del proceso.

Tabla 3.2 Propiedades termofísicas para la aleación de aluminio 6061 [2].

Conductividad térmica k	167 Wm ² /°C
Densidad ρ	2700 kg/m ³
Capacidad calorífica a presión constante C_p	900 J/kg °C

Capítulo 4. Resultados

4.1. Experimentales

En esta sección se presentan los datos obtenidos en la experimentación, los cuales fueron procesados mediante una hoja de cálculo.

La Figura 4.1 presenta parte del ciclo térmico que experimentó la probeta en cada prueba; en particular se trata de un experimento desde una temperatura inicial de 450 °C y un flujo de aire equivalente a $N_f = 1.8$. Nótese la pérdida de calor (relativamente pequeña) sufrida por la probeta desde el momento de la apertura del horno y hasta la entrada al lecho fluidizado; se trató que esta pérdida de calor fuese lo mas similar posible para todas las pruebas al intentar realizar los mismos tiempos en el desplazamiento de la probeta al reactor. La pérdida de calor para todas las pruebas fue de entre 4 a 10 °C.

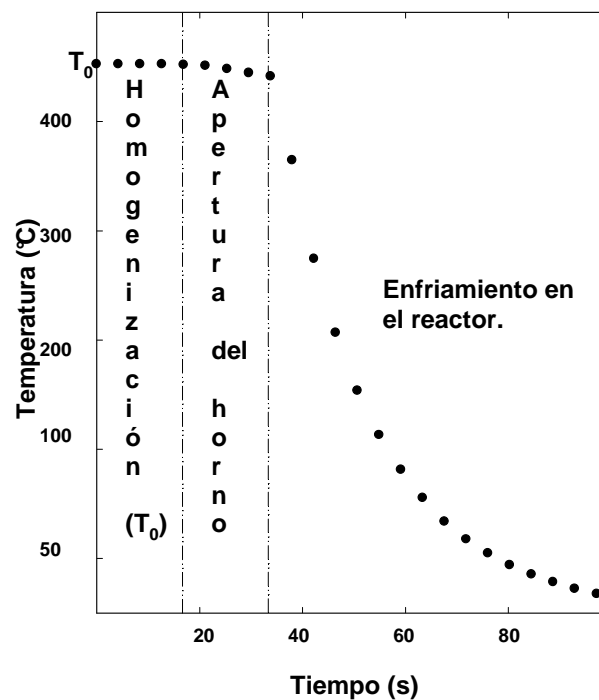


Figura 4.1. Ciclo térmico aplicado a la probeta de aleación de aluminio 6061.

La reproducibilidad de los experimentos se aprecia en la Figura 4.2, que muestra el enfriamiento de probetas de la aleación de aluminio en dos pruebas independientes realizadas bajo las mismas condiciones. Como se observa, la respuesta al enfriamiento es muy similar por lo que puede concluirse que se tiene una buena reproducibilidad en los resultados experimentales. En este caso la curva es presentada con los datos obtenidos a partir de la apertura del horno, con lo que se muestra que en el caso de la temperatura de salida del horno, así como la temperatura de entrada al reactor es prácticamente la misma para las dos pruebas, por lo que se considera que la técnica experimental empleada es lo suficientemente confiable ya que las pérdidas de calor sufridas por la probeta de aluminio 6061, en el desplazamiento de ésta del horno al reactor, es muy similar para ensayos independientes.

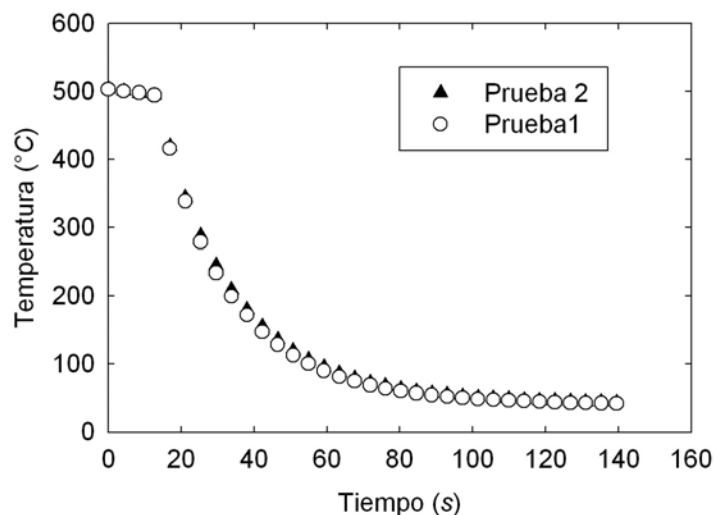


Figura 4.2. Curvas de enfriamiento durante el temple de probetas de la aleación de aluminio 6061, partiendo de una temperatura de 500°C y con $N_f = 1.4$.

En cuanto a la distribución de temperaturas al interior de la probeta, se observó que la diferencia entre los datos del termopar colocado en el *centro* y en la *subsuperficie* de la probeta no presenta variaciones significativas (ver Figura 4.3). La diferencia de temperatura entre estas dos posiciones a medida que transcurre la prueba experimental presenta variaciones no mayores a 3°C durante todo el tiempo del enfriamiento. En las

gráficas subsecuentes se muestra solamente la temperatura en la *subsuperficie* para la presentación y discusión de resultados.

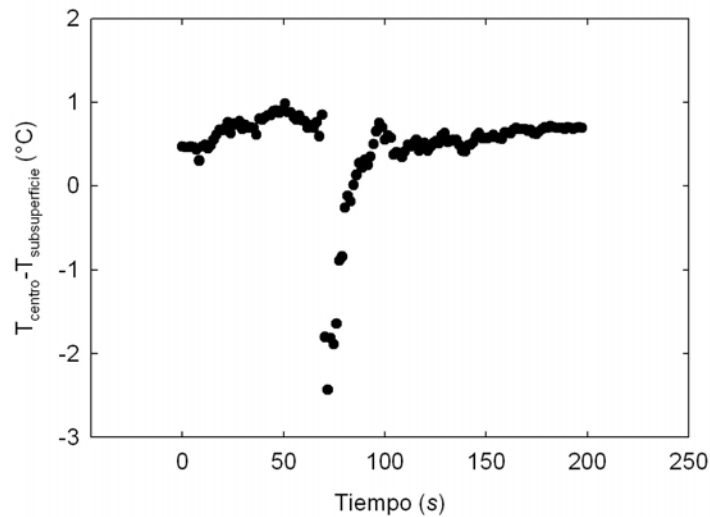


Figura 4.3. Diferencia entre la temperatura del *centro* y la de la *subsuperficie* como función del tiempo de temple.

Las curvas de enfriamiento (para cada valor de número de fluidización, N_f) obtenidas para los experimentos con temperatura inicial de 450 °C se presentan en la Figura 4.4. En esa figura se observa que el enfriamiento es mayor a medida que aumenta el número de fluidización. Así, el tiempo para llegar a temperatura ambiente fue de 500 s y de 150 s, para las condiciones de enfriamiento de número de fluidización 1.0 y 1.8, respectivamente. Nótese que en el caso del número de fluidización 1.0 la temperatura alcanzada al finalizar la prueba fue alrededor de 50 °C, sin alcanzar la temperatura ambiente (alrededor de 25 °C), al momento en el que se suspendió la adquisición de datos. También se aprecia que la variación en el enfriamiento es menor a medida que aumenta el valor del número de fluidización, de tal forma que no hay una diferencia significativa para números de fluidización de 1.4 y 1.8.

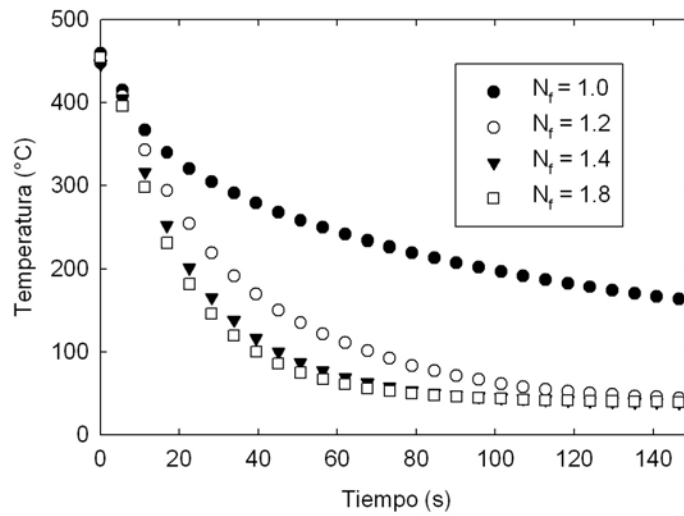


Figura 4.4. Efecto del número de fluidización sobre la historia térmica experimental durante el enfriamiento de la probeta de aluminio 6061. La temperatura inicial fue de 450°C

Las historias térmicas experimentales para temperaturas iniciales de 500°C se presentan en las Figura 4.5. En esta se aprecia un comportamiento similar al de la Figura 4.4, es decir, las rapidezces de enfriamiento para los números de fluidización extremos (1.0 y 1.8) son muy diferentes ya que para el N_f más bajo se tiene un tiempo superior a los 500 s para alcanzar la temperatura de 50 °C, mientras que para N_f mayor a 1.0 la probeta de aluminio tarda poco mas de 120 s en llegar a temperatura ambiente. En la misma figura se observa la tendencia de alcanzar los valores máximos de rapidez de enfriamiento al aumentar el flujo de aire alimentado al reactor, siendo así que la curva de $N_f = 1.4$ tiende a encimarse a la de $N_f = 1.8$

En el caso las condiciones de enfriamiento equivalentes a $N_f = 1.0$ para las tres distintas temperaturas iniciales (T_0) no se aprecia una variación en el enfriamiento ya que para un tiempo de alrededor de 80 s de transcurrido el enfriamiento la probeta ha alcanzado una temperatura de aproximadamente 200 °C, siendo así muy similar la rapidez de enfriamiento en los tres casos.

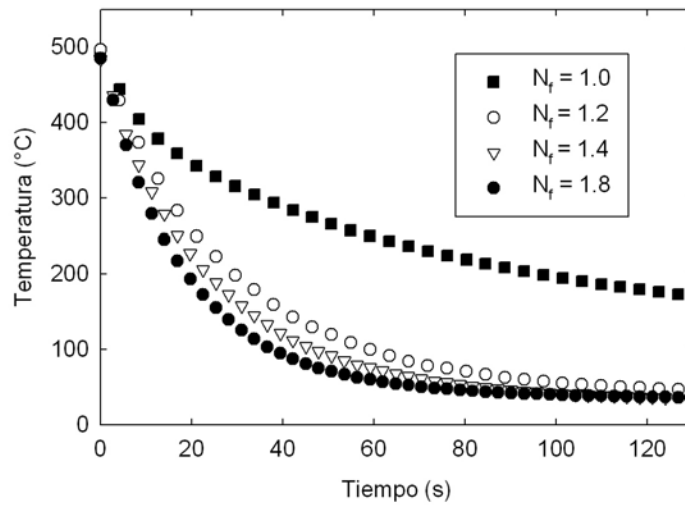


Figura 4.5. Efecto del número de fluidización sobre la historia térmica experimental durante el enfriamiento de la probeta de aluminio 6061. La temperatura inicial fue de 500°C.

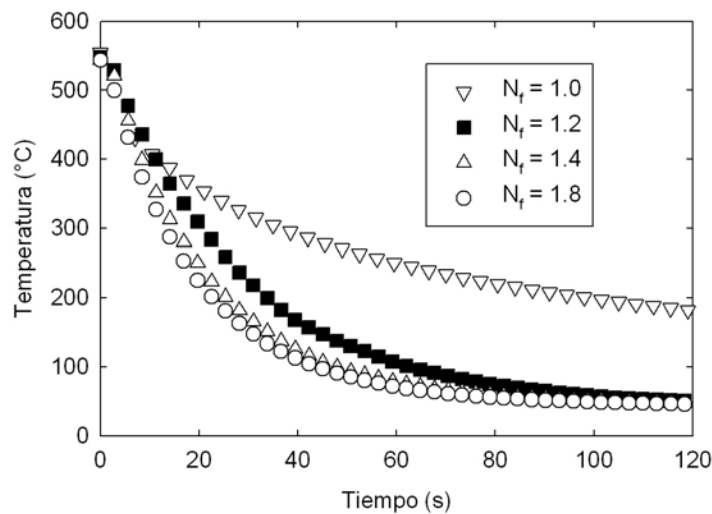


Figura 4.6. Efecto del número de fluidización sobre la historia térmica experimental durante el enfriamiento de la probeta de aluminio 6061. La temperatura inicial fue de 550°C.

Con los datos anteriores se realizó el cálculo de la rapidez de enfriamiento ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$), calculando esta derivada numéricamente. La pendiente instantánea de cada curva de enfriamiento para cada paso de tiempo de la prueba se calculó con la Ecuación 4.1, donde T representa a la temperatura en $^{\circ}\text{C}$ y t al tiempo en segundos.

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_{posterior} - T_{anterior}}{t_{posterior} - t_{anterior}} \quad (4.1)$$

Los resultados de la rapidez de enfriamiento (calculada de esta forma) como función del tiempo para la temperatura de trabajo de 450 °C se muestran en la Figura 4.7. En la figura se aprecia la diferencia entre las rapidezces de enfriamiento entre cada N_f , mostrándose que el valor máximo para $N_f=1.8$ es de alrededor de 20 °C/s y para el valor de mínima fluidización este valor es de 12 °C/s. Nótese que para tiempos superiores a 40 s la diferencia en las pendientes es prácticamente nula.

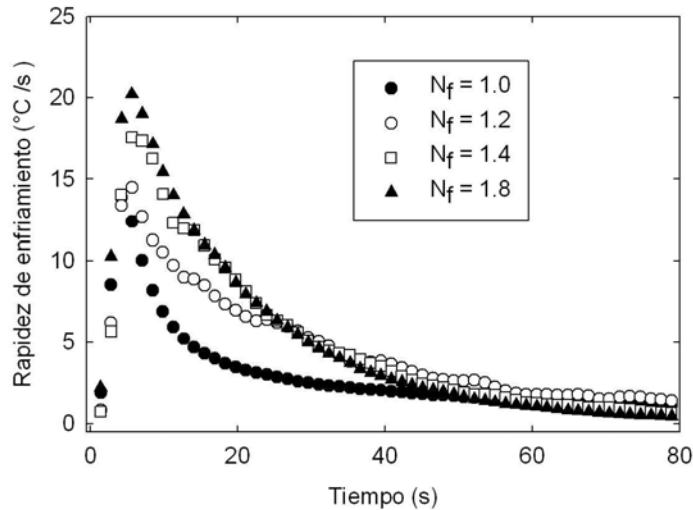


Figura 4.7. Efecto del N_f sobre la historia de rapidez de enfriamiento durante el enfriamiento de la probeta de aluminio 6061. La temperatura inicial fue de 450 °C.

La rapidez de enfriamiento como función de la temperatura de *subsuperficie* experimental de la pieza de aluminio 6061 para los distintos N_f se presenta en la Figura 4.8, se observa la diferencia entre los valores máximos obtenidos para las distintas pruebas, teniendo valores de rapidez de enfriamiento de 20 y 12 (°C/s), para las condiciones extremas, es decir, para los N_f 1.8 y 1.0, respectivamente. Se observa también que los valores máximos de cada prueba se obtienen a temperaturas muy similares (poco antes de los 400 °C).

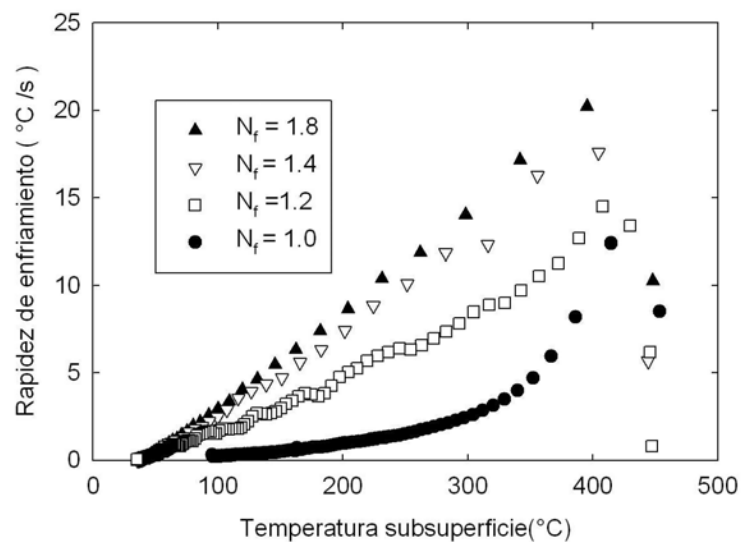


Figura 4.8. Influencia del N_f sobre la rapidez de enfriamiento (como función de la temperatura de la subsuperficie) durante el enfriamiento de la probeta de la aleación de aluminio 6061. Prueba realizada con temperatura inicial de 450 °C

En cuanto a la variación de la rapidez de enfriamiento para distintas temperaturas iniciales, en la Figura 4.9 se presentan resultados derivados de tres enfriamientos realizados a $N_f = 1.8$ para las tres temperaturas iniciales empleadas en este trabajo. Se nota que a medida que aumenta la temperatura inicial se incrementa el valor máximo obtenido de rapidez de enfriamiento, desde 20 °C/s hasta 25 °C/s para el rango de temperaturas iniciales utilizadas en la experimentación. Los valores de rapidez de enfriamiento para tiempos mayores a 30 s son casi los mismos, notándose esto en el hecho de que se enciman las gráficas.

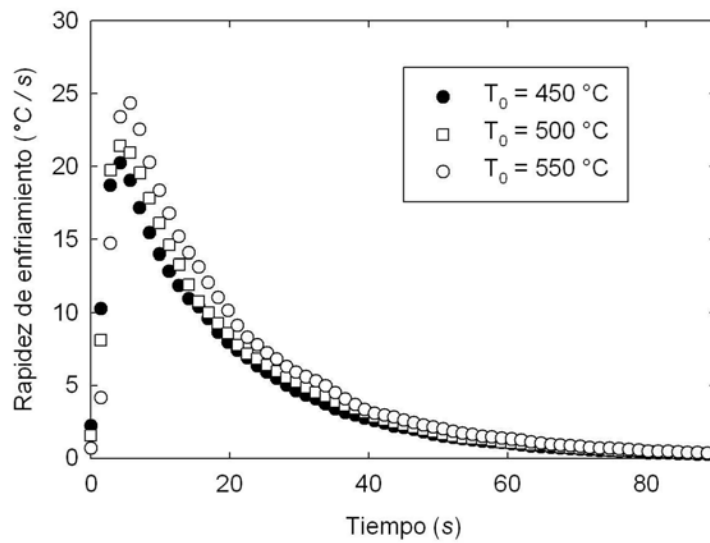


Figura.4.9. Efecto de la temperatura inicial sobre la historia de rapidez de enfriamiento. El flujo de aire utilizado para cada prueba fue el equivalente a $N_f=1.8$

De la misma manera se observa la relación que guarda la rapidez de enfriamiento de la probeta de aluminio 6061 con la temperatura de la *subsuperficie* para las tres distintas temperaturas iniciales y condiciones de enfriamiento iguales, $N_f = 1.8$, (Figura 4.10). En las curvas se nota un comportamiento similar para las distintas temperaturas iniciales, alcanzando un punto máximo después del cual se tienen valores de rapidez de enfriamiento casi idénticos. Los valores específicos de rapidez de enfriamiento se relacionan con la temperatura inicial; esto se debe al potencial térmico que existe dada la diferencia de temperaturas entre la temperatura del lecho fluidizado (temperatura ambiente) y la temperatura inicial de cada prueba, siendo así que a mayor temperatura inicial, es mayor el valor máximo alcanzado de rapidez de enfriamiento.

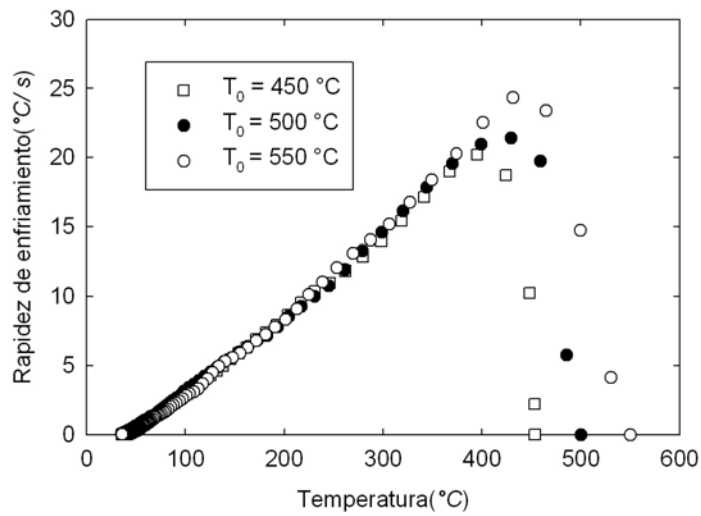


Figura 4.10. Efecto de la temperatura inicial de la pieza de aluminio 6061 en la rapidez de enfriamiento (como función de la temperatura de la subsuperficie) durante el temple. El N_f utilizado fue de 1.8 para las tres pruebas.

Es notorio que todos los gráficos hasta ahora presentados se parecen a los que se obtendrían en enfriamientos al aire, mostrando continuidad en el enfriamiento. Esto es que, por ejemplo, con relación a la rapidez de enfriamiento graficada, se observa que los datos llegan a un punto máximo para después descender homogéneamente, lo que indica que siempre se tienen los mismos mecanismos de transporte de energía actuando durante el temple en el lecho fluidizado. Entonces, en comparación con el temple en líquidos volátiles, se aprecia que en el caso de lecho fluidizado no se tienen mecanismos de transferencia de calor tales como la formación de capas de vapor o nucleación y crecimiento de burbujas.

4.2. Computacionales.

4.2.1 Historias de flux de calor e historias térmicas

Los resultados del programa *Winprobe* (flux de calor en función del tiempo) para el enfriamiento de la probeta de aluminio 6061 fueron procesados mediante una hoja de cálculo para su presentación gráfica. Los parámetros r (numero de tiempos futuros) y n (número de nodos para la discretización del sistema), necesarios para el cálculo en el programa *Winprobe* se mantuvieron constantes e igual a 4 y 5 respectivamente.

El flux de calor estimado, como función del tiempo de proceso, para los distintos N_f utilizados en el temple de la probeta de aluminio 6061 y una temperatura inicial de 450 °C se presentan en la Figura 4.11. En ella se aprecia la dependencia del valor máximo de flux de calor con el N_f ; existe una diferencia notoria entre los valores de 1.0 y 1.8 (para N_f) los cuales se alcanzan valores máximos de flux de calor de 70,000 y 120,000 (W/m^2), respectivamente; además, nótese que la curva para $N_f = 1.8$ alcanza un valor de flux de calor de prácticamente 0 mucho antes que cualquiera de las otras 3 curvas siendo menor a 100 segundos el tiempo que tarda en alcanzar este punto

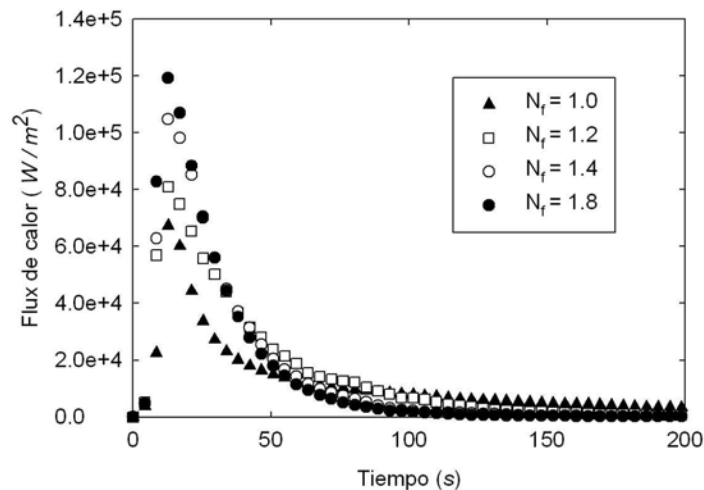


Figura 4.11. Evolución estimada del flux de calor en función del tiempo del proceso de temple de la probeta de aluminio 6061 para una $T_0 = 450$ °C y un valor del parámetro $r=4$.

En cuanto a la variación del flux de calor como función de la temperatura de la *subsuperficie* (ver figura 4.12), se observa un comportamiento similar entre las diversas pruebas, esto es que en cada curva se tiene que, inicialmente a medida que disminuye la temperatura de la *subsuperficie*, el valor de flux de calor alcanza un valor máximo para después descender, estos valores máximos son alcanzados a temperaturas distintas para cada prueba; así para la condición de $N_f = 1.8$ el máximo flux de calor se alcanza alrededor de $370\text{ }^\circ\text{C}$, en cambio para $N_f = 1.2$ este valor máximo de flux de calor es alcanzado a un temperatura de $410\text{ }^\circ\text{C}$

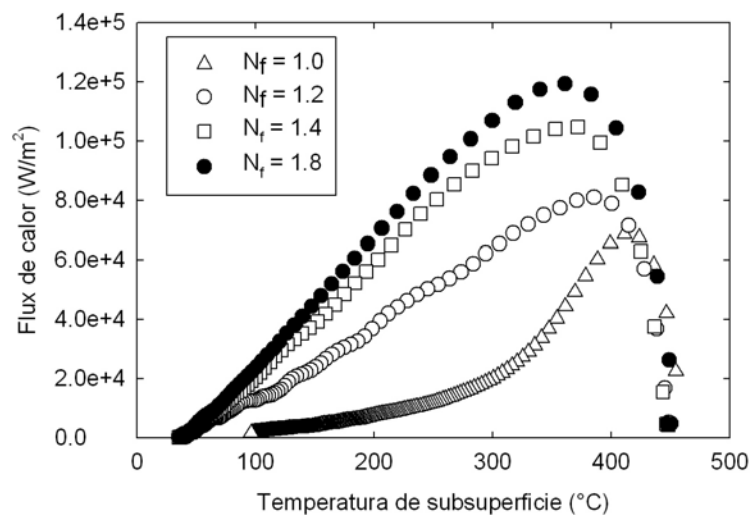


Figura 4.12. Evolución estimada del flux de calor estimado en función de la temperatura de la *subsuperficie* para el temple de una probeta aleación de aluminio 6061 con una temperatura inicial de $450\text{ }^\circ\text{C}$.

Para el enfriamiento con $N_f = 1.0$ es notorio que los resultados presentan una forma distinta reflejándose en una caída más brusca del valor de flux de calor a medida que disminuye la temperatura de la subsuperficie representando que el enfriamiento para estas condiciones de flujo de aire es mucho más lento.

De igual manera, en la figura 4.13, se presentan los resultados obtenidos mediante *Winprobe* para las pruebas realizadas con una temperatura inicial de $500\text{ }^\circ\text{C}$ en la que el valor máximo de flux de calor ($137,500\text{ W/m}^2$), ocurre para las condiciones de enfriamiento de $N_f = 1.8$; por el contrario para $N_f = 1.0$, el valor máximo obtenido es de

70,210 W/m^2 ; el tiempo en el que el flux de calor es prácticamente cero es menor para el mayor numero de fluidización.

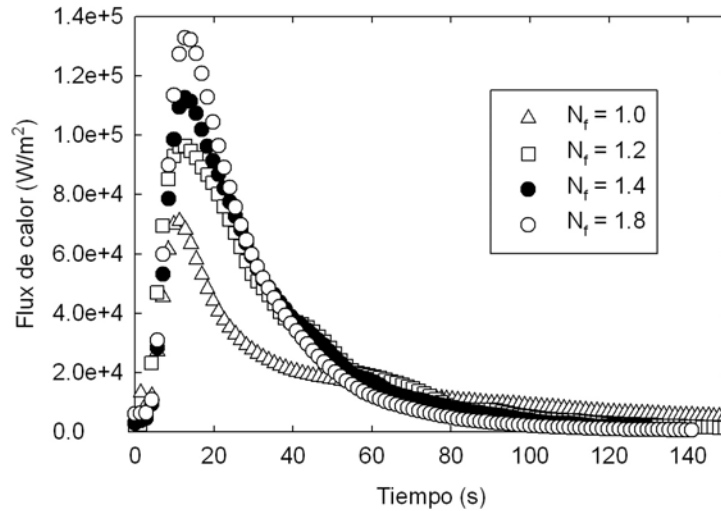


Figura 4.13. Evolución del flux de calor estimado en el tiempo para una prueba de temple de aluminio 6061 con temperatura inicial de 500 °C.

Para la temperatura inicial de 550°C se presentan los resultados obtenidos mediante *Winprobe* en la figura 4.14; en este caso el valor máximo de flux de calor para el valor de $N_f=1.8$ es de 145,000 W/m^2 , nótese que el tiempo en que tarda cada prueba en alcanzar su valor máximo de flux de calor es prácticamente el mismo e igual a 16 segundos, aproximadamente. Un aspecto a notar es la diferencia en el enfriamiento para las condiciones de $N_f= 1.0$ ya que es un enfriamiento mas lento y los valores de flux de calor son muy distintos a los otros números de fluidización ya que las otras curvas prácticamente se empalman después de alcanzado su valor máximo. Los valores de flux de calor para $N_f=1.0$ tardan mas en alcanzar el cero en eje del flux de calor.

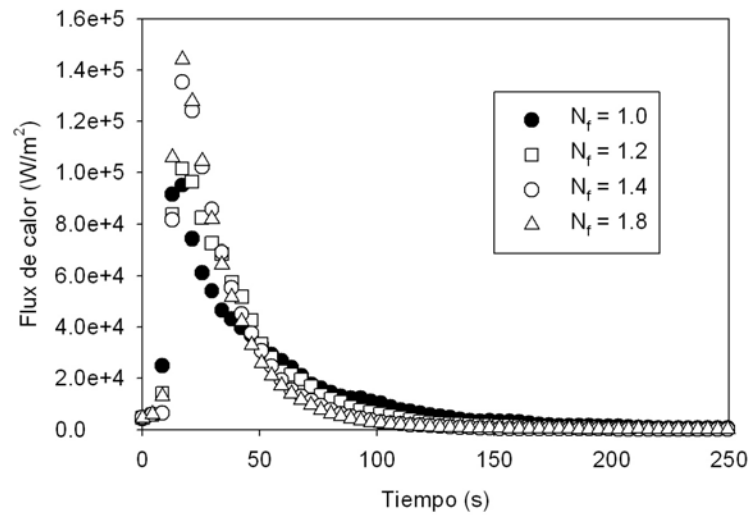


Figura.4.14 Evolución del flux de calor en el tiempo para una prueba de temple de aluminio 6061 con temperatura inicial de 550 °C.

A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante el empleo del programa *Quench*; se muestran gráficos de las curvas de enfriamiento calculadas mediante el programa mencionado.

En la figura 4.15 se muestra la estimación de una serie de pruebas de temple, para la probeta de la aleación de aluminio 6061, en las que la temperatura inicial fue de 450 °C, y distintas condiciones de enfriamiento (N_f). Al igual que en los resultados experimentales, se tiene diferencia en la evolución del enfriamiento para distintos N_f , siendo más lento el enfriamiento para $N_f=1.0$. La escala de tiempo fue acotada hasta 120 segundos, con lo que no se nota que la prueba de 1.0 alcance la temperatura ambiente pero se decidió usar esa escala para notar de mejor manera la diferencia en las curvas de los demás N_f .

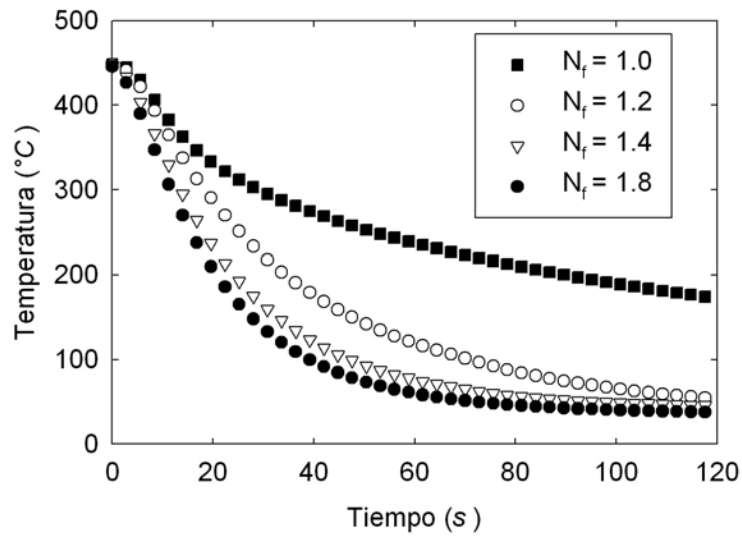


Figura. 4.15. Historias térmicas calculadas para el proceso de temple de una probeta de la aleación de aluminio 6061 para distintas condiciones de enfriamiento (N_f) y temperatura inicial de 450°C .

La comparación entre los resultados calculados mediante *Quench* y los experimentales, se presenta en las Figuras 4.16 y 4.17, en las cuales se muestran únicamente los valores extremos de condiciones de enfriamiento ($N_f = 1.0$ y 1.8) y para dos temperaturas iniciales 450 y 500 °C. Los resultados computacionales son muy similares a los experimentales, excepto a tiempos cortos, observándose que las graficas correspondientes a las mismas condiciones de enfriamiento prácticamente se empalman. Como *Quench* ya ha sido validado independientemente [5], puede concluirse que las estimaciones de las historias térmicas son correctas.

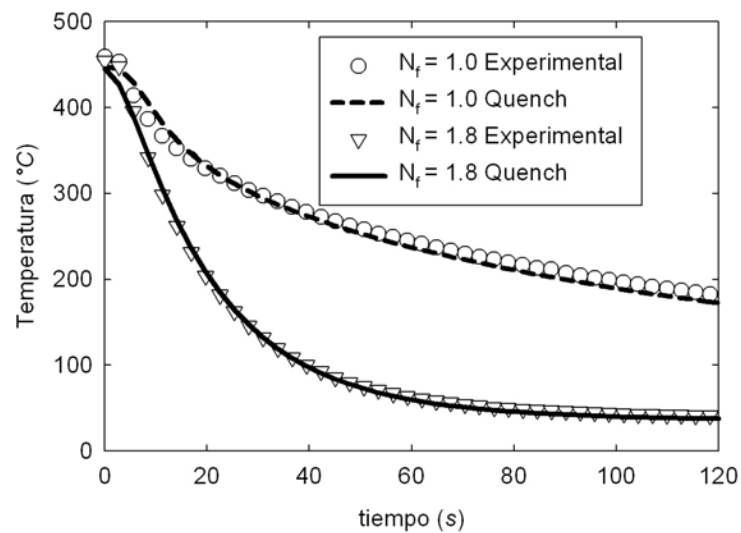


Figura. 4.16. Historias térmicas experimentales (símbolos) y calculadas mediante *Quench* (líneas) que representan el enfriamiento de una probeta de aleación de aluminio 6061, a una $T_0 = 450$ °C, para dos distintos N_f (1.0 y 1.8).

En el caso de la temperatura inicial de 500 °C se observa una ligera variación entre los resultados, teniendo un desplazamiento de las curvas de los resultados computacionales, que pasan por arriba de los datos experimentales, es decir el enfriamiento es subestimado; aún así los valores estimados mediante el programa son aceptables.

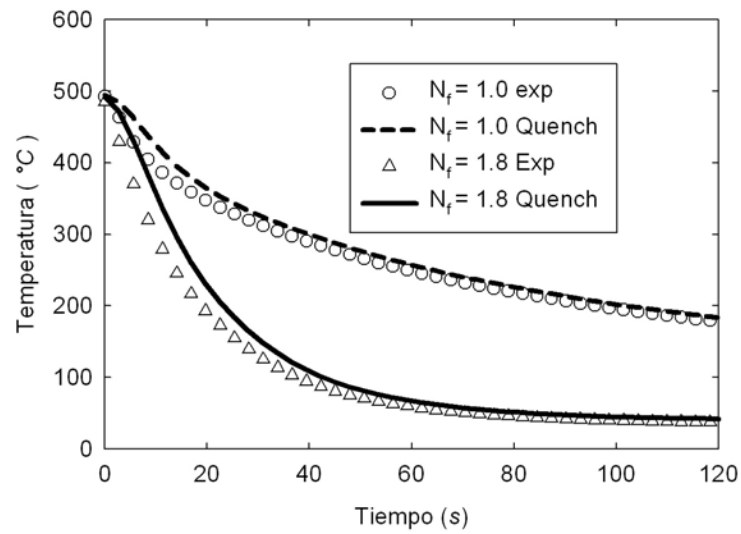


Figura 4.17. Historias térmicas experimentales (símbolos) y calculadas mediante Quench (líneas) que representan el enfriamiento de una probeta de aluminio 6061, a una $T_0 = 500$ °C, para dos distintos N_f (1.0 y 1.8).

La Figura 4.18 muestra la influencia de las variables estudiadas en este trabajo sobre la extracción de calor de las probetas de la aleación de aluminio 6061. En particular, en el eje z se grafica el valor del flux de calor máximo estimado para cada combinación de temperatura inicial y número de fluidización. Se observa que el valor máximo de flux de calor aumenta al aumentar tanto T_0 como N_f . Esto se explica porque al aumentar el flujo de aire (lo que aumenta el número de fluidización) aumenta la capacidad del medio para extraer calor; por su parte, al aumentar la temperatura inicial aumenta la diferencia inicial de temperatura con respecto a la del medio de enfriamiento, propiciando que exista un potencial térmico (fuerza motriz) alto.

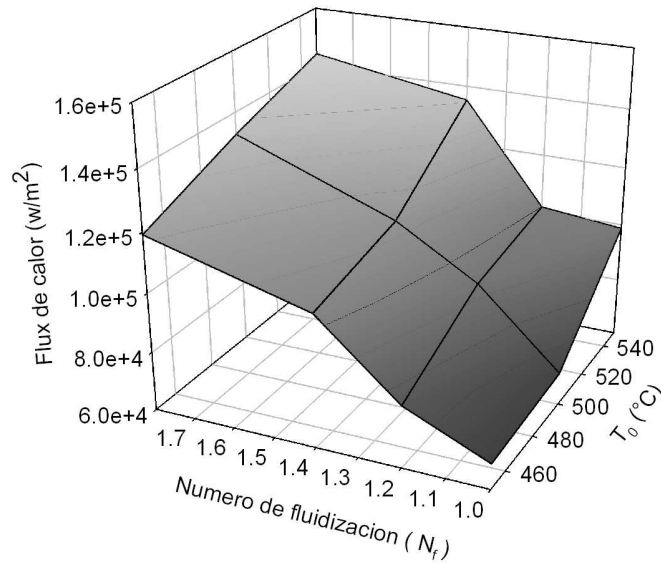


Figura 4.18. Variación del flux de calor máximo estimado como función de la temperatura inicial (T_0) y del número de fluidización (N_f) durante el temple de probetas de la aleación de aluminio 6061.

4.2.2 Predicción de historias térmicas

El siguiente paso, en la elaboración de este trabajo fue el obtener datos (curvas de enfriamiento), para condiciones que no se realizaron experimentalmente. Esto requirió de la construcción de familias de curvas para representar a las historias de flux de calor.

Partiendo de los resultados de *Winprobe* se aplicó una regresión caracterizada por la ecuación de Weibull de 4 parámetros (Ecuación 4.2) [11], mediante la cual se obtuvieron valores de éstos para cada condición de enfriamiento.

$$y = a \left(\frac{c-1}{c} \right)^{\frac{1-C}{C}} * \left[\frac{X-X_0}{b} + \left(\frac{c-1}{c} \right)^{\frac{1}{C}} \right]^{C-1} * \exp - \left[\frac{X-X_0}{b} + \frac{c-1}{c} \right]^C + \frac{C-1}{C} \quad (4.2)$$

Los parámetros de la ecuación de Weibull representan [11]:

- X : el tiempo instantáneo a lo largo del proceso.
- a : el valor máximo del flux de calor.
- b : El valor mas bajo de flux de calor.
- c : Es el parámetro que aporta la asimetría ala distribución.
- X_0 : El tiempo al cual se registra el valor máximo de flux de calor.

En la Figura 4.19 se muestra el resultado grafico de la aplicación de la regresión no lineal con la ecuación de Weibull para los datos de flux de calor en función del tiempo, obtenidos con *Winprobe* para tempes desde 450 °C y dos valores de número de fluidización. Los datos alimentados al programa *sigmaplot* para la regresión debieron ser adimensionalizados, esto se realizo dividiendo los valores instantáneos de flux de calor entre el valor máximo obtenido (119190 W/m²), así mismo el tiempo adimensional se obtuvo del cociente del tiempo entre 180s. Como puede apreciarse los resultados de la regresión describen muy bien a los datos de flux de calor para las condiciones de enfriamiento de la experimentación.

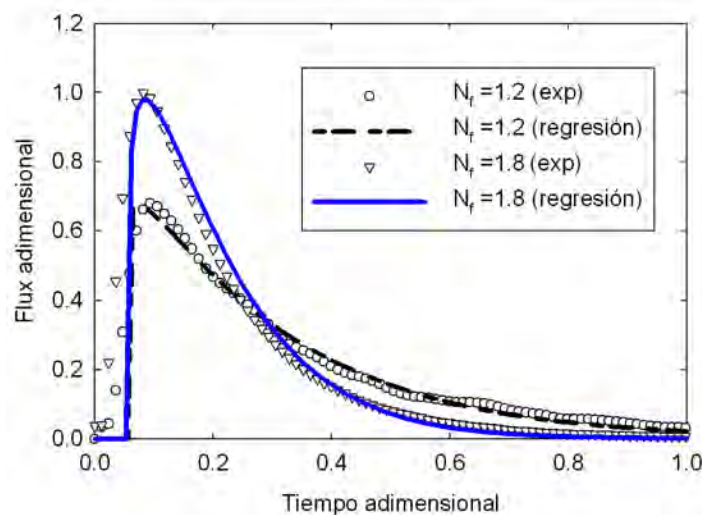


Figura.4.19. Regresión aplicada a datos obtenidos con *Winprobe* para experimentos realizados desde $T_0 = 450$ °C y dos N_f distintos (1.8 y 1.0).

Los valores para cada parámetro de la ecuación de Weibull asociados a cada una de las condiciones de enfriamiento (N_f) para el caso de $T_0 = 450\text{ °C}$ se muestran en la Tabla 4.2.

Debe tomarse en cuenta que los datos se trabajaron en forma adimensional tanto el flux de calor como el tiempo fueron divididos entre sus valores máximos, esto es para dividimos el flux de calor para cada instante entre 119190 W/m^2 ya que este valor es el estimado para las condiciones de $N_f=1.8$ y el tiempo fue dividido entre 180 s que es el tiempo necesario para que el flux de calor tome un valor aproximado de cero en cada prueba. En la Figura 4.20 se observan los valores de flux de calor con sus dimensiones asociadas por lo que se realizó el proceso inverso a la adimensionalización, es decir, los datos obtenidos de la regresión de Weibull fueron multiplicados por 119190 W/m^2 y 180 s para obtener así valores dimensionalmente correctos y con ello poder alimentar estos (posteriormente) al programa *Quench*.

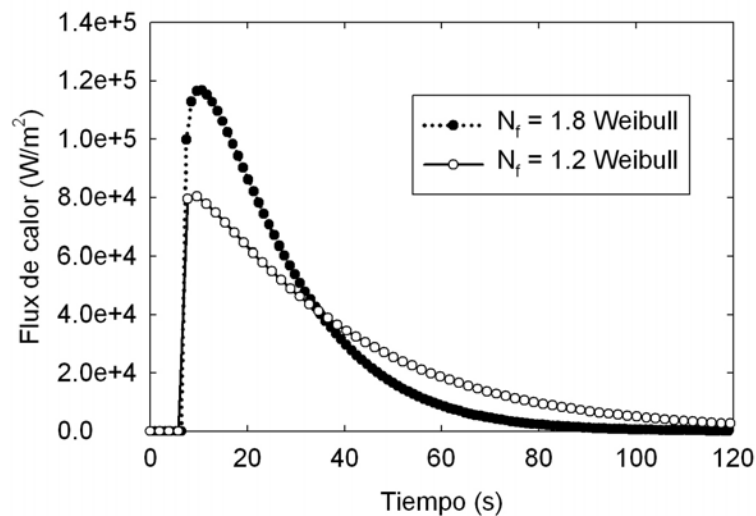


Figura 4.20. Valores de Flux de calor y tiempo obtenidos a partir de la aplicación de la regresión con la ecuación de Weibull.

Estos resultados de flux de calor estimado obtenidos mediante la regresión de Weibull debieron modificarse antes de su introducción al programa *Quench*. Para esto, fueron eliminados los valores a tiempos iniciales equivalentes a cero y se trazó una línea recta desde cero hasta el primer valor distinto de cero. El resultado de este procedimiento se ejemplifica en la Figura 4.21.

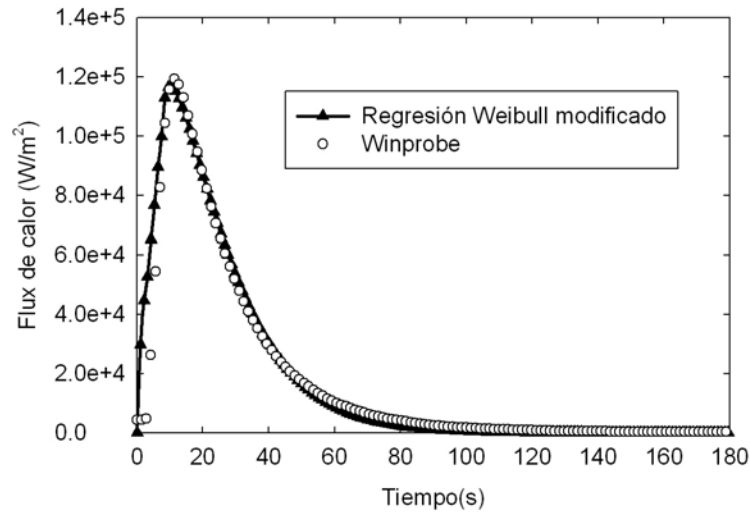


Figura 4.212 Comparación entre las historias de flux de calor, obtenidos directamente de datos experimentales (puntos) y su regresión mediante la ecuación de Weibull (línea) para los valores de $N_f = 1.8$ y $T_0 = 450^\circ\text{C}$.

Tabla 4.2 Coeficientes de la ecuación de Weibull para los distintos N_f experimentales para $T_0 = 450^\circ\text{C}$.

N_f	A	b	c	X0
1	0.3864	0.4011	0.6118	0.0849
1.2	0.676888	0.269216	1.046116	0.072272
1.4	0.872632	0.185644	1.279984	0.068028
1.8	0.979888	0.163436	1.146376	0.084692

Los parámetros anteriores fueron relacionados con el número de fluidización mediante ecuaciones de tipo polinomial cuadrática (Ecuación 4.3).

$$y = \alpha N_f^2 + \beta N_f + \theta \tag{4.3}$$

Donde y representa el valor del coeficiente de interés (a, b, c, X_0), N_f es el número de fluidización requerido, α, β y θ representan valores relacionados a la función. En la Figura 4.22 se muestra las líneas de tendencia asociadas a los valores de los parámetros (a y b) de la ecuación de Weibull graficados, con estas líneas se determinó la

ecuación asociada a cada una obteniéndose para el parámetro las ecuaciones 4.4 y 4.5 para el calculo de los valores de a y b.

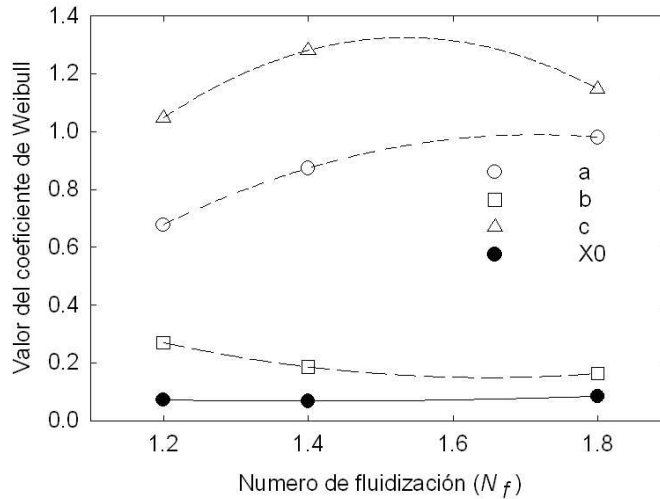


Figura 4.22. Tendencia de los valores de los coeficientes de la ecuación de Weibull (a,b)

$$a = -1.1843x^2 + 4.0579x - 2.4872 ; \quad R^2 = 1 \quad (4.4)$$

$$b = 0.6039x^2 - 1.988x + 1.78522 ; \quad R^2 = 1 \quad (4.5)$$

Mediante estas ecuaciones es posible estimar los parámetros de la ecuación de Weibull correspondientes a números de fluidización para los cuales no se cuenta con antecedentes experimentales. Los resultados obtenidos de esta forma para dos números de fluidización de interés se dan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Coeficientes de la ecuación de Weibull para dos valores de N_f sin antecedente experimental, estimados a partir de regresiones de la forma de la Ecuación. 4.6.

N_f	a	b	c	X0
1.3	0.786603	0.221391	1.188106	0.069102
1.5	0.934975	0.161975	1.32175	0.06905

Con estos valores se realizó el cálculo de de las curvas de flux de calor en función del tiempo para estas condiciones teniendo cuenta que son valores adimensionales, por lo que se debieron de convertir a valores dimensionales multiplicando el tiempo por 180s y en el caso del flux de calor por 119190 W/m^2 obteniendo así los valores en unidades de (W/m^2) para el flux de calor y (s) para el tiempo.

Posteriormente mediante el empleo nuevamente del programa *Quench*, se realizó la simulación de las historias térmicas para estos valores de N_f . Los resultados se presentan en la Figura 4.23. En esa figura también se muestran algunos de los valores experimentales de los que se disponía, para su comparación con los resultados calculados.

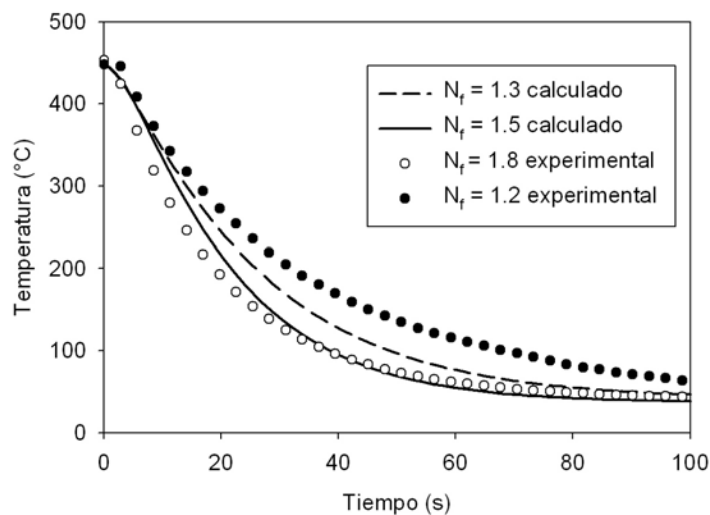


Figura 4.23. Historias térmicas calculadas y experimentales para el temple de una probeta de la aleación de aluminio 6061 desde una temperatura inicial de $450 \text{ }^\circ\text{C}$.

Obsérvese que los valores de las curvas de enfriamiento muestran la tendencia esperada en relación con los valores experimentales y que además se encuentran acotadas por resultados experimentales que abarcan al rango de números de fluidización de interés: A partir de estos resultados se considera que la metodología de cálculo es suficientemente confiable para la predicción de historias térmicas.

Capítulo 5. Aplicaciones

5.1 Curvas de enfriamiento y ensayo Jominy

Recientemente se ha propuesto el uso de ensayos tipo Jominy para estudiar el proceso de endurecimiento por precipitación de aleaciones de aluminio [9]. Siguiendo la metodología utilizada para el diseño de tratamientos térmicos de aceros, convendría comparar las curvas de enfriamiento obtenidas en el lecho fluidizado con respecto a las obtenidas en un ensayo Jominy estándar. Así, en la figura 4.22 se presentan las curvas de enfriamiento obtenidas en este trabajo junto con las curvas de enfriamiento obtenidas experimentalmente en un ensayo Jominy realizado en una investigación previa [9]. Puede apreciarse que las curvas asociadas al enfriamiento en el lecho fluidizado presentan un tendencia similar a la que se observa en las curvas para el ensayo Jominy (principalmente entre 300 y 200 °C, que es la zona en la que interesa observar la rapidez de enfriamiento ya que en este intervalo de temperaturas es donde se presenta la precipitación de los compuestos intermetálicos). Por lo que con la caracterización completa de una probeta Jominy (templada y envejecida) se podría diseñar un proceso de temple en lecho fluidizado, ya que con la información del perfil de durezas provenientes de la probeta Jominy se determinarían las condiciones de enfriamiento requeridas en el diseño del proceso.

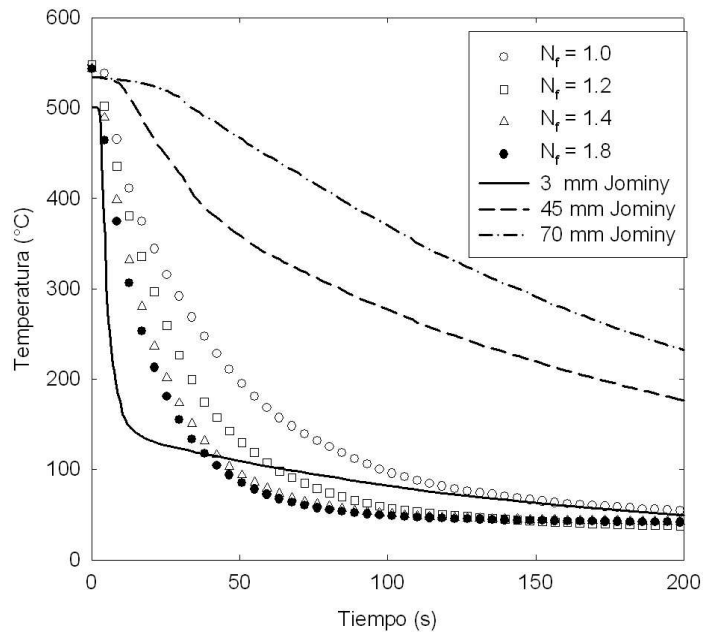


Figura 5.1. Curvas de enfriamiento en el lecho fluidizado (símbolos) para la aleación de aluminio 6061 y en una prueba Jominy [9] (líneas) realizada al mismo material.

5.2 Curvas de enfriamiento y diagramas TTT

Otra forma en la que se utilizan las curvas de enfriamiento para diseñar tratamientos térmicos es sobreponiéndolas en diagramas TTT o diagramas CCT. Para ilustrar el uso de la información generada en esta investigación en este marco de referencia, los resultados de las pruebas de temple en el lecho fluidizado se graficaron en las Figura 5.2 y 5.3 sobre los diagramas TTT para dos aleaciones comerciales de aluminio (aleación 319 y aleación 356, respectivamente). Aún cuando se trata de aleaciones de distinta composición química a la de la aleación 6061, se espera que las historias térmicas sean similares debido a que las propiedades termo físicas no deberían variar mucho entre las aleaciones 6061, 319 y 356.

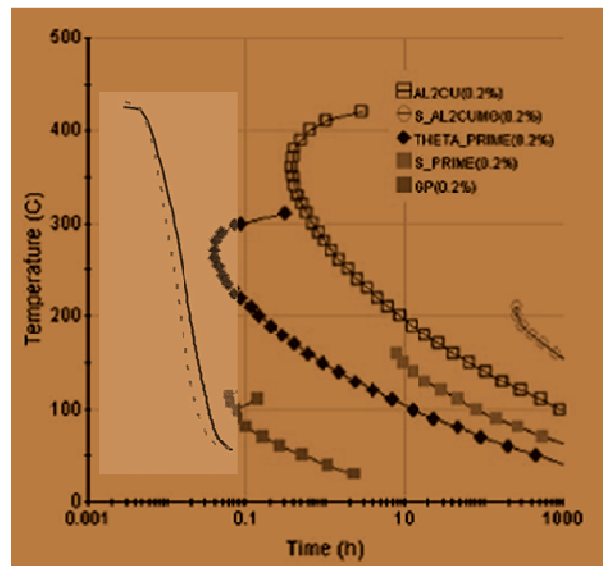


Figura 5.2 Diagrama TTT para una aleación de aluminio 319 [12], al que se le sobrepusieron las curvas experimentales para N_f de 1.2 (línea sólida) y 1.8 (línea punteada).

Para la aleación de aluminio 319 (Figura 5.2), la temperatura de solubilización o T_0 es de 440 °C, por lo que se sobrepusieron los resultados obtenidos en este trabajo para la aleación de aluminio 6061 y $T_0 = 450$ °C. En particular, se grafican las curvas de enfriamiento para N_f de 1.2 y 1.8. Se observa que el enfriamiento en el lecho fluidizado es lo suficientemente rápido como para evitar las narices de las curvas de transformación por lo que se puede decir que las condiciones de enfriamiento experimentadas en este trabajo son lo suficientemente severas como para lograr una saturación de soluto en la matriz de una aleación de aluminio 319.

De igual manera, en la Figura 5.3 se muestra el diagrama TTT de una aleación de aluminio 356 [12] sobre el cual se le han transpuesto las curvas experimentales para una temperatura inicial de 550 °C (dado que esta temperatura es igual a la temperatura de solubilización de la aleación de aluminio 356 para el diagrama TTT). Esta última figura indica que las condiciones de enfriamiento en el lecho fluidizado no permiten obtener una

completa saturación de soluto, ya que se observa que se tendría la precipitación de las tres primeras fases y librando únicamente la transformación y precipitación del Mg_2Si .

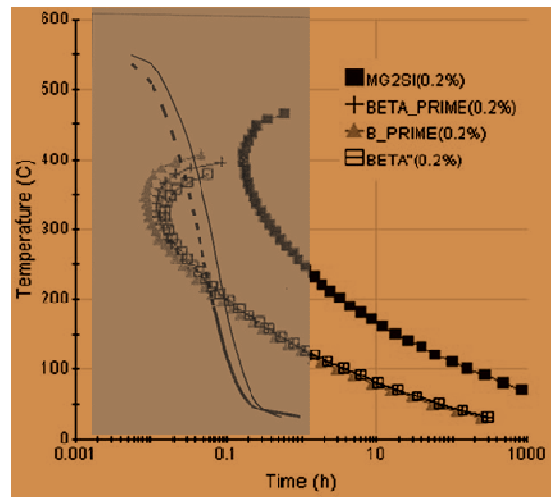


Figura 5.3 Diagrama TTT para una aleación de aluminio 356 [12], al que se le superpusieron las curvas de enfriamiento experimentales para N_f de 1.2 (línea sólida) y 1.8 (línea punteada) y una T_0 de 550 °C.

Conclusiones

En este trabajo se analizó la respuesta térmica de probetas de la aleación de aluminio 6061 durante un proceso de temple en lecho fluidizado para su posterior procesamiento computacional. A partir de los resultados experimentales y computacionales se concluye que:

- Las variables N_f y T_0 tienen un impacto notorio en la rapidez de enfriamiento durante el temple de probetas de la aleación de aluminio 6061 en lechos fluidizados alúmina (malla 54) y aire a temperatura ambiente.
- La historia de flux de calor en la superficie de las probetas puede estimarse correctamente utilizando el programa *Winprobe*.
- Las historias de flux de calor para las condiciones experimentales estudiadas pueden representarse aproximadamente mediante una ecuación tipo Weibull de 4 parámetros.
- Mediante antecedentes experimentales es posible estimar, usando los parámetros de la ecuación de Weibull, el enfriamiento de probetas de la aleación de aluminio 6061 templadas en un lecho fluidizado de alúmina (malla 54) y aire a temperatura ambiente, para cualquier valor de número de fluidización en el rango de 1.2 a 1.8.
- Los resultados obtenidos experimental y computacionalmente pueden utilizarse para diseñar la etapa de temple (en un lecho fluidizado alúmina (malla 54) y aire a temperatura ambiente) dentro de un tratamiento térmico de aleaciones de aluminio comerciales.

Referencias.

- [1] *Light Alloys from traditional to nanocrystals. Fourth edition.* I.J.Polmear. Editorial Elsevier. Pg 29-203.
- [2] *Metals Handbook Volume 2 10th. Properties and selection: Nonferrous alloys and special-porpose materials.* ASM International 2002.
- [3] *Residual stres reduction in 7175-T73, 6061-T6 and 2017-T4 aluminium alloys using quench factor analysis.* G.P. Dolan , J.S. Robinson. Journal if Materials Processing Tech (pg 346-351) 2004.
- [4] *Heat treatment in fluidized beds.* R.W. Reynoldson. ASM International 2001.
- [5] *Análisis de la evaluación microestructural de los aceros grado maquinaria (AISI 4140 y AISI 9840) durante el temple en un lecho fluidizado.* A.M. Dueñas. Tesis de maestría IPN2007.
- [6] *Mathematical Model of the Microstructural Response of a Medium-Carbon, Low-Alloy Steel Quenched in a Fluidized Bed.* J.B. Hernández-Morales, A.M. Dueñas-Pérez, M. Díaz-Cruz. Proceedings of the 24th ASM Heat Treating Society Conference, ASM International 2007.
- [7] *Computer-aided cooling curve analysis using WinProbe.* L. Meekisho, B. Hernández-Morales and J.S. Téllez-Martínez, X. Chen. Int. J. Materials and Product Technology, Vol. 24, Nos. 1–4, 2005.
- [8] *Inverse Heat Conduction* ,J. V. Beck & Blackwell, Willey Interscience, 1985.
- [9] *Determinación de curvas TTT para aleaciones de aluminio comerciales.* L. L. Valencia. Tesis de licenciatura UNAM 2007.
- [10] www.sigmaplot.com. Consultada 27 marzo 2008.
- [11] *Fit of first order thermoluminescence glow peaks using the Weibull distribution function.* V.Pagonis, S.M. Mian and G. Kitis. Radiation protection dosimetry Vol 93 No,1 ,pp 11,17. Nuclear technology. 2001.
- [12] *Fluidized Bed Quenching Performance and Its Application for Heat Treating Aluminum Alloys.* J. Keist , S. Chaudhury y D. Apelian. Proceedings of the 24th ASM Heat Treating Society Conference, September 17-19, 2007 COBO Center, Detroit, Michigan, USA.ASM International,2007.

- [13] *Optimización de los tratamientos térmicos T5 y T6 para una aleación A356 conformada por SLC*. David Fresno Abad. Universidad politécnica de Cataluña 2007.
- [14] *Análisis estadístico de la microdureza Vickers de precipitados de una aleación Cu-10% Ni-3% Al mediante la función de Weibull*. G. Diaz, E. Donoso, A. Vaschausky. Universidad de Chile 2004.
- [15] *Efficient Solution of the Nonlinear Inverse Heat Conduction Problem*, J. V. Beck, B. Litkouhi y C.R. St. Clair Jr. Numerical Heat Transfer, 5, 1982, pp. 275-286.
- [16] *Faster Methods of Studying Aluminum Through Jominy End Quench*, J.W. Newkirk, K. Ganapati and D.S. MaxKenzie. Proc. of the 18th Heat Treating Conference. R.A. Wallis and H.W. Walton, Eds. ASM International, 1998, pp. 134 -- 150.
- [17] *Quench Factor Analisis of Aluminium Alloys using the Jominy End Quench Technique*, G.P. Dolan, R.J. Flynn, D.A. Tanner and J.S. Robinson. Materials Science and Technology, 2005, vol. 21, no. 6, pp. 687-692.

Apéndice

Guía de uso *Winprobe*

Este programa requiere de tener valores de temperatura en función del tiempo, con los cuales se debe generar un archivo de texto en el cual se tengan estas dos columnas. Al entrar en el programa se debe seleccionar la opción de abrir archivo, con la cual se llamara el registro térmico antes guardado como archivo de texto, al reconocer el archivo de la historia térmica se activan otras opciones en las cuales se encuentra la de presos en la cual se tienen opciones para el cálculo del flux de calor por el método inverso (heat flux IHCP), la cual debe seleccionarse, aparecerá entonces una ventana de aplicación en la cual se pide seleccionar el tipo de material con el que se está trabajando, así como el valor del parámetro r , al ejecutar, el programa generara columnas de resultados en las cuales se representara el tiempo, la temperatura estimada y el flux de calor estimado para el proceso. Se tienen opciones, ya después de obtenidos los resultados, de almacenar el archivo en formato de texto para su posterior manipulación en una hoja de calculo y con ello realizar la presentación grafica.

Guía de uso *Quench*.

Archivos requeridos

Para el empleo de este programa se requiere de datos de la variación del flux de calor en función del tiempo, con los cuales se debe generar un archivo de texto en formato MS-DOS, adicional a este archivo, se deben generar dos archivos de texto en formato .txt en los cuales se tengan valores de las propiedades termofisicas del material con el cual se esta trabajando en uno la conductividad térmica del material en función de la temperatura, el otro el producto ρC_p (densidad del material por capacidad calorífica del material a presión constante) en función de la temperatura. Por ultimo se genera un archivo en formato .dat en el cual en el cual se contiene como datos el numero de nodos que se utilizara para la discretización, el tiempo inicial y final, el delta de tiempo a utilizar en el calculo , la temperatura inicial y final de la prueba, los nombres de los archivos de las propiedades termofisicas, el nombre del archivo que contiene el historial

del flux de calor y el nombre del archivo destino en el cual deseamos guardar los resultados generados del proceso de calculo.

Instrucciones para la corrida.

Ya generados los archivos necesarios, desde el ambiente de MS-DOS(abrir comand-prompt) teclear **classpath** seguido de enter, **cd quench** enter nuevamente, **java quench.Quench file nombre del archivo** y enter nuevamente. Con esto se generara un archivo de texto en el que se presentara dos columnas una de tiempo y otra de temperatura teniendo así la estimación de la historia térmica, pudiendo se manipulable mediante una hoja de calco para su presentación grafica.