



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE QUIMICA

“Análisis térmico de las curvas de enfriamiento y
solidificación en el estudio de la formación de rechupes
dispersos en una aleación aluminio-6%Si.”

T E S I S

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

PRESENTA

JOSÉ EDUARDO HUERTA HERNÁNDEZ

ASESOR

M. EN M. EUSEBIO CÁNDIDO ATLATENCO TLAPANCO



Ciudad Universitaria, CD. MX.

2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: M. EN M. EUSEBIO CÁNDIDO ATLATENCO TLAPANCO

VOCAL: M. EN M. ARTURO ALEJANDRO SÁNCHEZ SANTIAGO

SECRETARIO: IQM. BALBINA OJEDA RAMÍREZ

1er. SUPLENTE: IQM. CLAUDIA FLORES VARGAS

2° SUPLENTE: M. EN I. AGUSTIN GERARDO RUIZ TAMAYO

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA, EDIFICIO D, FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM

ASESOR DEL TEMA:

M. EN M. EUSEBIO CÁNDIDO ATLATENCO TLAPANCO

SUSTENTANTE (S):

JOSÉ EDUARDO HUERTA HERNÁNDEZ

Índice	
Índice de figuras	5
Índice de tablas	9
Introducción	10
Hipótesis	11
Objetivos	11
Capítulo 1. Marco Teórico	12
1.1. Defectos de porosidades por contracción.	12
1.2. Solidificación de aleaciones.	13
1.2.1. Aleaciones de rango corto de solidificación.....	14
1.2.2. Aleaciones de rango largo de solidificación.....	16
1.3. Análisis térmico por curvas de enfriamiento.	18
1.3.1. Primera derivada de la curva de enfriamiento.	19
1.4. Aleaciones Al–Si.	22
Capítulo 2. Procedimiento experimental	25
2.1. Material y equipo empleado.	25
2.2. Fabricación de la aleación de aluminio 6% Si.	26
2.3. Preparación de los moldes.	27
2.4. Montaje del sistema experimental.	31
2.5. Fusión, Vaciado y Toma de datos.	33
Capítulo 3. Resultados y Análisis de Resultados	36
3.1. Microestructura y Composición química.....	36
3.2. Curvas de enfriamiento y su primera derivada.	38
3.2.1. Primer experimento con una temperatura de vaciado de 680°C.	39
3.2.2. Segundo experimento con una temperatura de vaciado de 720°C.	43

3.2.3. Tercer experimento con una temperatura de vaciado de 760°C.	47
3.3. Fotografías de la superficie interna de una probeta con rechupes y una probeta sin rechupes, para cada experimento.	51
3.3.1. Fotografías de las probetas del experimento a 680°C.	51
3.3.2. Fotografías de las probetas del experimento a 720°C.	53
3.3.3. Fotografías de las probetas del experimento a 760°C.	54
3.4. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas, entre las probetas con rechupes dispersos y las probetas sin rechupes dispersos.	55
3.4.1. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas del primer experimento con temperatura de vaciado de 680°C.	55
3.4.2. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas del segundo experimento con temperatura de vaciado de 720°C.	60
3.4.3. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas del tercer experimento con temperatura de vaciado de 760°C.	64
3.5. Tablas de resultados.	71
3.5.1. Tabla del primer experimento con temperatura de vaciado de 680°C.	71
3.5.2. Tabla del segundo experimento con temperatura de vaciado de 720°C.	72
3.5.3. Tabla del tercer experimento con temperatura de vaciado de 760°C.	74
Capítulo 4. Conclusiones	76
Referencias	77

Índice de figuras

Figura 1. Esquema del modo de solidificación en metales puros. La cristalización empieza en la pared del molde y avanza al interior de la fundición en un frente plano de solidificación (ASM, 2009, pág. 63).	14
Figura 2. Diagrama del modo en que solidifican las aleación de rango corto de solidificación (ASM, 2009, pág. 63).	15
Figura 3. Forma de los rechupes principales en aleaciones de rango corto de solidificación, que forman una sólida capa de borde (ASM, 2009, pág. 64).	15
Figura 4. Diagrama del modo en que solidifican las aleaciones de rango largo de solidificación (ASM, 2009, pág. 63).	17
Figura 5. Forma de los rechupes dispersos en las fundiciones de moldeo en arena, de las aleaciones de rango largo de solidificación o de forma claramente pastosas (ASM, 2009, pág. 64).	17
Figura 6. Curva de enfriamiento y diagrama de fase de una aleación hipoeutéctica (Cooling curves, s.f.).	19
Figura 7. Curva de enfriamiento y su primera derivada de la solidificación de una aleación A356 (Sharifi & Arab, 2015, pág. 120).	21
Figura 8. Diagrama de fases del sistema aluminio – silicio (Warmuzek, 2004, pág. 2).	23
Figura 9. Imagen de las 4 latas usadas para los moldes, los moldes para detectar la señal con rechupes se hicieron con latas con una altura de 8.23cm y diámetro de 8.46cm y los moldes para detectar la señal sin rechupes se hicieron con latas con una altura de 11.4cm y un diámetro de 8.58cm.	27
Figura 10. Imagen de las latas usadas para los moldes con sus respectivas medidas y dimensiones, se observa la perforación en donde se colocó el termopar en ambas latas.	28
Figura 11. Imagen del fondo de las latas, en donde se observa cómo se colocan las cuerdas de probetas de tensión de cobre y la fibra aisladora, para su respectivo molde.	29

Figura 12. Corte transversal del molde para detectar la señal sin rechupes, en el cual se observa el hueco de la pieza, la entrada del termopar y los enfriadores en el fondo del molde.	30
Figura 13. Corte transversal del molde para detectar la señal con rechupes, en el cual se observa el hueco de la pieza, la entrada del termopar, la fibra aislante térmica en el fondo del molde y alrededor de las paredes de la lata.....	31
Figura 14. Imagen de los termopares tipo K fabricados, están hechos de una mini clavija para termopar tipo K, espagueti para alta temperatura, aisladores de cerámica de dos orificios calibre 20 y alambre alumel y cromel calibre 20.	32
Figura 15. Representación gráfica del sistema que se ocupó en todos los experimentos, para la adquisición de datos de Temperatura y tiempo.	33
Figura 16. Imagen de los moldes y las piezas, al día siguiente de un experimento, antes de desmoldearlas.	35
Figura 17. Diagrama de fases Al-Si, en donde se señala la temperatura de liquidus en equilibrio para una aleación aluminio 6%Si.	37
Figura 18. Microestructura de la aleación aluminio 6%Si sin modificar, a 200X, en donde se observan agujas de Si en una matriz de Al α y en la parte superior se puede observar un rechupe.....	38
Figura 19. Curva de enfriamiento y primera derivada, de la probeta No. 1 del experimento con una temperatura de vaciado de 680°C.	39
Figura 20. Curva de enfriamiento y primera derivada de la probeta No. 2 del experimento con una temperatura de vaciado de 680°C.	40
Figura 21. Curva de enfriamiento y primera derivada de la probeta No. 3 del experimento con una temperatura de vaciado de 680°C.	41
Figura 22. Curva de enfriamiento y su primera derivada de la probeta No. 4 del experimento con una temperatura de vaciado de 680°C.	42
Figura 23. Curva de enfriamiento y su primera derivada de la probeta No. 1 del experimento con una temperatura de vaciado de 720°C.	43
Figura 24. Curva de enfriamiento y su primera derivada de la probeta No. 2 del experimento con una temperatura de vaciado de 720°C.	44

Figura 25. Curva de enfriamiento y su primera derivada de la probeta No. 3 del experimento con una temperatura de vaciado de 720°C.	45
Figura 26. Curva de enfriamiento y su primera derivada de la probeta No. 4 del experimento con una temperatura de vaciado de 720°C.	46
Figura 27. Curva de enfriamiento y su primera derivada de la probeta No. 1 del experimento con una temperatura de vaciado de 760°C.	47
Figura 28. Curva de enfriamiento y su primera derivada de la probeta No. 2 del experimento con una temperatura de vaciado de 760°C.	48
Figura 29. Curva de enfriamiento y su primera derivada de la probeta No. 3 del experimento con una temperatura de vaciado de 760°C.	49
Figura 30. Curva de enfriamiento y su primera derivada de la probeta No. 4 del experimento con una temperatura de vaciado de 760°C.	50
Figura 31. Corte transversal de la probeta No. 3 del experimento con una temperatura de vaciado de 680°C, preparada metalográficamente a lija 1200, en donde se observa una pequeña cantidad de rechupes cerca de la punta del termopar.	52
Figura 32. Corte transversal de la probeta No. 2 del experimento con una temperatura de vaciado de 680°C, preparada metalográficamente a lija 1200 y en donde no se observan rechupes alrededor de la punta del termopar.	52
Figura 33. Corte transversal de la probeta No. 3 del experimento con una temperatura de vaciado de 720°C, preparada metalográficamente a lija 1200 y pulida, en donde se observan una gran cantidad de rechupes cerca de la punta del termopar.	53
Figura 34. Corte transversal de la probeta No. 2 del experimento con una temperatura de vaciado de 720°C, preparada metalográficamente a lija 1200 y pulida, en donde se observa que en la zona alrededor de la punta del termopar no hay rechupes.	54
Figura 35. Corte transversal de la probeta No. 4 del experimento con una temperatura de vaciado de 760°C, preparada metalográficamente a lija 1200, en donde se observa una pequeña cantidad de rechupes cerca de la punta del termopar.	54

Figura 36. Corte transversal de la probeta No. 2 del experimento con una temperatura de vaciado de 760°C, preparada metalográficamente a lija 1200, en donde no se observan rechupes cerca de la punta del termopar.....	55
Figura 37. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas entre la probeta No. 2 y la No. 3 del experimento con una temperatura de vaciado de 680°C.	56
Figura 38. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas entre la probeta No. 2 y la No. 4 del experimento con una temperatura de vaciado de 680°C.	57
Figura 39. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas entre la probeta No. 1 y la No. 2 del experimento con una temperatura de vaciado de 680°C.	59
Figura 40. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas entre la probeta No. 2 y la No. 3 del experimento con una temperatura de vaciado de 720°C.	60
Figura 41. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas entre la probeta No. 2 y la No. 4 del experimento con una temperatura de vaciado de 720°C.	62
Figura 42. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas entre la probeta No. 2 y la No. 1 del experimento con una temperatura de vaciado de 720°C.	63
Figura 43. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas entre la probeta No. 2 y la No. 3, del experimento con una temperatura de vaciado de 760°C.	65
Figura 44. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas entre la probeta No. 2 y la No. 4 del experimento con una temperatura de vaciado de 760°C.	66
Figura 45. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas entre la probeta No. 2 y la No. 1 del experimento con una temperatura de vaciado de 760°C.	68

Índice de tablas

Tabla 1. Temperatura de vaciado para los experimentos realizados.	34
Tabla 2. Composición química de la aleación aluminio 6%Si, obtenida por espectrometría de emisión atómica, en el Edificio D de la Facultad de Química. .	36
Tabla 3. Datos obtenidos del tratamiento de las curvas de enfriamiento y su primera derivada para las probetas del experimento a 680°C.	71
Tabla 4. Datos obtenidos del tratamiento de las curvas de enfriamiento y su primera derivada para las probetas del experimento a 720°C.	72
Tabla 5. Datos obtenidos del tratamiento de las curvas de enfriamiento y su primera derivada para las probetas a 760 °C.....	74

Introducción.

En los procesos de fundición hay una gran cantidad de variables a controlar, por lo que en la práctica, es imposible que todos los productos estén libres de defectos. Una cantidad grande de piezas defectuosas representa una pérdida sustancial de dinero, material y tiempo, por lo que se debe hacer un esfuerzo en controlar la aparición de defectos.

Detectar e identificar los defectos presentes en las piezas y posteriormente analizar sus causas, es el procedimiento que se debe realizar a fin de implementar las medidas adecuadas para prevenir y controlar los defectos perjudiciales.

El siguiente estudio presenta un método de detención de rechupes dispersos, defecto que se presenta como pequeñas cavidades en forma de porosidad en el interior de las piezas, provocando que sus propiedades mecánicas disminuyan y creando zonas de iniciación y propagación de grietas. La causa de este defecto es la contracción líquida y la contracción de solidificación que la aleación colada sufre durante su enfriamiento, desde el momento en que es vaciado al molde.

Se usa el análisis térmico durante la etapa de enfriamiento del líquido y la etapa de solidificación, de una aleación de rango largo de solidificación, que es vertido en dos diferentes moldes de arena en verde, uno en el que se inhibe la aparición de rechupes, aumentando la velocidad de enfriamiento mediante el uso de enfriadores, y otro para propiciar la aparición de rechupes, disminuyendo la velocidad de enfriamiento usando fibra aisladora térmica. Se construyen las dos curvas de enfriamiento (Temperatura en función del tiempo), y posteriormente se obtiene la primera derivada (dT/dt) correspondiente a cada curva, a fin de compararlas y buscar la inflexión de la curva, indicativa de la formación de los rechupes, así como determinar el momento y la forma en la que se desarrolla.

Con la información obtenida se busca detectar la formación de rechupes dispersos en las zonas de mayor módulo de solidificación de una pieza, con el propósito de aplicar las medidas preventivas necesarias y así evitar su formación, mejorando la calidad final del producto.

Hipótesis.

El uso del análisis térmico de curvas de enfriamiento y solidificación permitirá el conocimiento de la formación de un rechupe disperso en función de la velocidad de enfriamiento local y del tiempo en el cual cambia la misma, los cuales son indicativos de la aparición de rechupes dispersos durante la solidificación de aleaciones de rango largo de solidificación.

Objetivos.

- Determinar la forma de la modificación de la curva de solidificación, Temperatura vs. tiempo, cuando se presenta el rechupe disperso apoyado por la curva de la 1ª derivada (dT/dt) vs. tiempo.
- Determinar el tiempo de formación de los rechupes dispersos.

Capítulo 1. Marco Teórico.

1.1. Defectos de porosidades por contracción.

La transformación del estado líquido al sólido, en la mayoría de los metales viene acompañada de una disminución en el volumen o contracción.

El desarrollo de la contracción es una consideración importante en la fundición de metales. Hay tres fuentes principales de contracción durante la fundición: (1) contracción volumétrica del metal líquido sobrecalentado a medida que se enfría hasta la temperatura de liquidus, (2) la contracción de solidificación durante la transformación de líquido a sólido, y (3) la contracción del metal sólido a medida que se enfría a temperatura ambiente, resultante de la dependencia de la temperatura de la densidad del sólido. (Asthana, Kumar, & Dahotre, 2006, pág. 58)

La contracción líquida y la de solidificación al aunar sus efectos, da lugar a un cierto número de defectos, que, por razón de su origen idéntico, se reúnen todos en el defecto base denominado rechupe. Su presencia da como resultado en propiedades mecánicas deficientes que incluyen resistencia y ductilidad limitadas, iniciación y propagación de grietas irregulares (Kaufman, 2004, pág. 49).

Cuando el rechupe no forma más que una sola cavidad (interna o externa) se llama localizado, este es un defecto a macro escala por lo que también puede denominarse macrorechupe, por el contrario, cuando da lugar a un gran número de cavidades internas, el rechupe se llama disperso, y en este último caso, cuando las cavidades son apreciables a simple vista y de dimensiones relativamente grandes, se le designa con el nombre de macrorechupe, tomando el nombre de microrechupe cuando no se observan más que con la ayuda de una lupa de gran aumento o del microscopio óptico (Kaufman, 2004, pág. 50).

(López, 2019, pág. 69): “Puede muy bien suceder que, en una misma pieza, se observen al mismo tiempo rechupes localizados y rechupes dispersos, puesto que, aun teniendo la misma causa, estos rechupes no tienen exactamente el mismo mecanismo de formación”.

1.2. Solidificación de aleaciones.

(Kaufman, 2004, pág. 50): “La tendencia a la formación de rechupes está relacionada tanto con la fracción de volumen líquido / sólido en el momento final de la solidificación, como con el rango de temperatura de solidificación de la aleación”.

Las aleaciones no presentan un punto de fusión bien definido, la solidificación comienza cuando la temperatura desciende por debajo de T_L (liquidus) y finaliza cuando alcanza a T_S (solidus). Entre ambas temperaturas, el metal se encuentra en estado pastoso, formando dendritas columnares. Entre los brazos de las dendritas se encuentra metal líquido. Los fenómenos que suceden durante la zona pastosa son importantes en la solidificación. Esta zona se define como la diferencia entre T_L y T_S , y se denomina rango de solidificación (López, 2019, pág. 70).

Los metales puros tienen un rango de solidificación próximo a cero, dado que tienen un punto de solidificación definido, el frente de solidificación (interfaz sólido líquido) se mueve a través del metal fundido, solidificándose a partir de las paredes del molde hacia el centro, como un frente plano (Figura 1), sin formar la zona pastosa (Kalpakjian & Schmid, 2002, pág. 244).

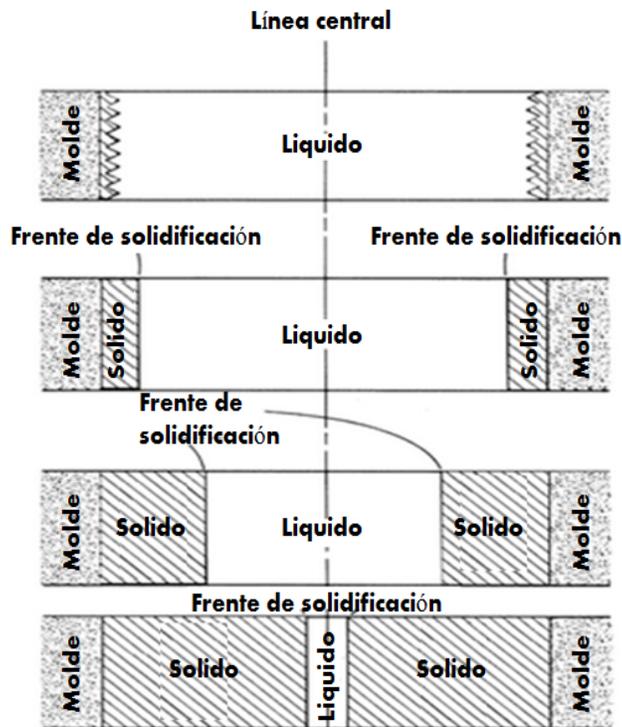


Figura 1. Esquema del modo de solidificación en metales puros. La cristalización empieza en la pared del molde y avanza al interior de la fundición en un frente plano de solidificación (ASM, 2009, pág. 63).

En las aleaciones, se considera un rango de solidificación corto cuando la diferencia entre T_L y T_S es inferior a 50°C y un rango de solidificación largo cuando la diferencia es superior a 110°C . Las fundiciones ferrosas suelen tener zonas pastosas estrechas, las aleaciones de aluminio y de magnesio tienen zonas amplias (López, 2019, pág. 70).

1.2.1. Aleaciones de rango corto de solidificación.

En composiciones de rango corto de solidificación, hay una oportunidad mejorada para establecer la solidificación direccional (Figura 2). Los defectos pueden tomar la forma de rechupes localizados a causa de su sólida capa del borde (Figura 3). Estas aleaciones pueden caracterizarse por una mayor proporción de alimentación en masa en relación con la alimentación interdendrítica. Tal crecimiento cristalino corto y relativo ayuda a mantener el metal líquido de alimentación en contacto con todas las superficies solidificadas (ASM, 2009, pág. 63; Kaufman, 2004, pág. 50).

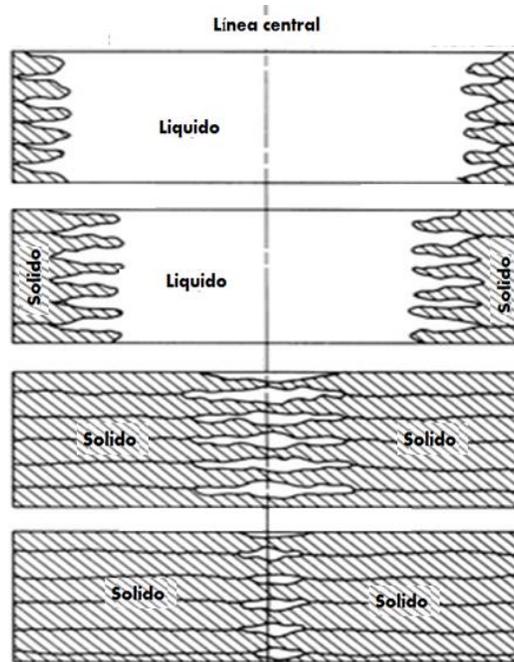


Figura 2. Diagrama del modo en que solidifican las aleación de rango corto de solidificación (ASM, 2009, pág. 63).

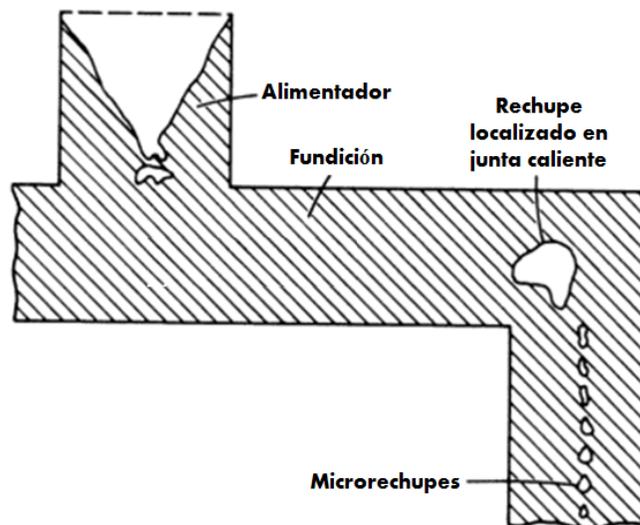


Figura 3. Forma de los rechupes principales en aleaciones de rango corto de solidificación, que forman una sólida capa de borde (ASM, 2009, pág. 64).

1.2.2. Aleaciones de rango largo de solidificación.

En aleaciones de rango largo de solidificación en forma claramente pastosa, el desarrollo de la solidificación direccional es difícil. Aunque inicialmente se puede formar una capa delgada en las paredes del molde, la solidificación no avanza progresivamente hacia adentro. Por el contrario, se desarrolla a lo largo de la solidificación de la fundición en lugares dispersos, formando islas equiaxiales (Figura 4). Este modo de solidificación blanda o pastosa da como resultado el desarrollo de numerosos canales pequeños de metal líquido en la fase de solidificación. La alimentación a través de estos canales está restringida, y se producen rechupes dispersos en toda la fundición (Figura 5) (ASM, 2009, pág. 64).

La severidad de la contracción se incrementa por la complejidad geométrica, el espesor variable de la sección, la tasa de solidificación, las características de alimentación de la aleación, y por limitaciones en la práctica efectiva de alimentadores que no proporcionan los gradientes necesarios para la solidificación direccional (Kaufman, 2004, pág. 50).

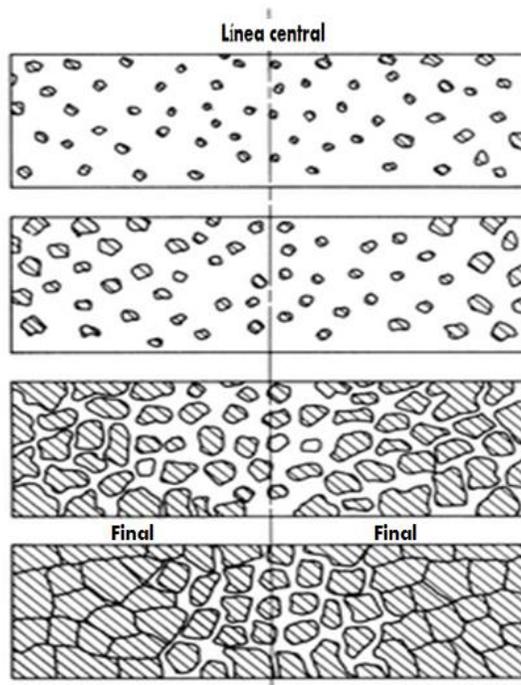


Figura 4. Diagrama del modo en que solidifican las aleaciones de rango largo de solidificación (ASM, 2009, pág. 63).

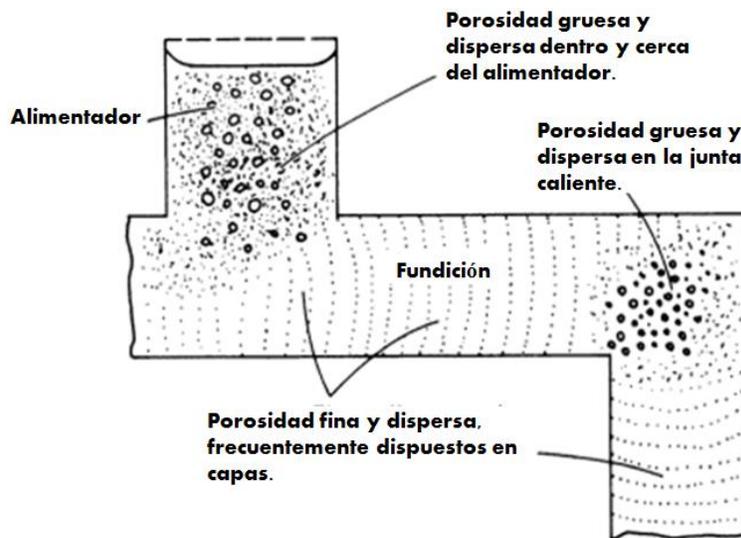


Figura 5. Forma de los rechupes dispersos en las fundiciones de moldeo en arena, de las aleaciones de rango largo de solidificación o de forma claramente pastosas (ASM, 2009, pág. 64).

1.3. Análisis térmico por curvas de enfriamiento.

El análisis térmico consiste en registrar e interpretar la variación de la temperatura en el tiempo de un material que se enfría o calienta. En su forma más sencilla, aplicada a la fundición de metales, se registra y analiza la curva de enfriamiento de un metal que se solidifica en un molde. Su interpretación se basa en la comprensión de que todos los acontecimientos que se producen durante la solidificación dejan su huella en la forma de la curva de enfriamiento (Stefanescu, 2015, pág. 105).

El análisis térmico que usa el método de las curvas de enfriamiento es útil para aplicaciones comerciales por varias razones, es simple, no es caro y provee resultados constantes. Esta técnica es una buena elección para generar relaciones fundamentales entre las características de una curva de enfriamiento, la composición de la aleación y su tratamiento en la solidificación. Además de las temperaturas de solidificación características, el análisis térmico a menudo se usa para calcular la distribución de fracciones sólidas entre las temperaturas de liquidus y solidus (Sparkman & Kearney, 1994, pág. 455; Fras, Kapturkiewicz, Burbielko, & Lopez, 1993, pág. 505).

Una curva de enfriamiento es una presentación gráfica de la temperatura de transición de fase con el tiempo para metales puros o aleaciones en un rango completo de temperatura a través del cual se enfría (Toyserkani, y otros, 2020, pág. 304).

Las transformaciones de fases ocurren generalmente con absorción o desprendimiento de energía. Si durante el enfriamiento de un metal este pasa por una temperatura a la cual ocurre un cambio microestructural, su curva de enfriamiento presentará una inflexión. La curva de enfriamiento de un metal puro presenta una meseta que corresponde a su temperatura de solidificación, debido a la estabilización térmica generada por el calor latente, este mantiene al líquido remanente a la temperatura de solidificación hasta que todo el líquido se ha solidificado y no puede generarse más calor. Una vez completada la solidificación,

la curva de enfriamiento continúa su descenso (Boljanovic, 2009, pág. 11; Rufe, 2002, pág. 102).

En el caso de las aleaciones, el proceso de solidificación no se produce a una temperatura constante, las aleaciones solidifican en un rango de temperaturas basado en la composición de la aleación (Figura 6). A medida que se enfría una aleación, la mezcla comenzará a solidificarse a la temperatura de liquidus y completará la solidificación a la temperatura de solidus. Así, en la curva de enfriamiento se aprecia un intervalo con una cierta pendiente ($\Delta T/\Delta t$), que puede variar según la composición relativa de los elementos en la aleación (Rufe, 2002, pág. 102).

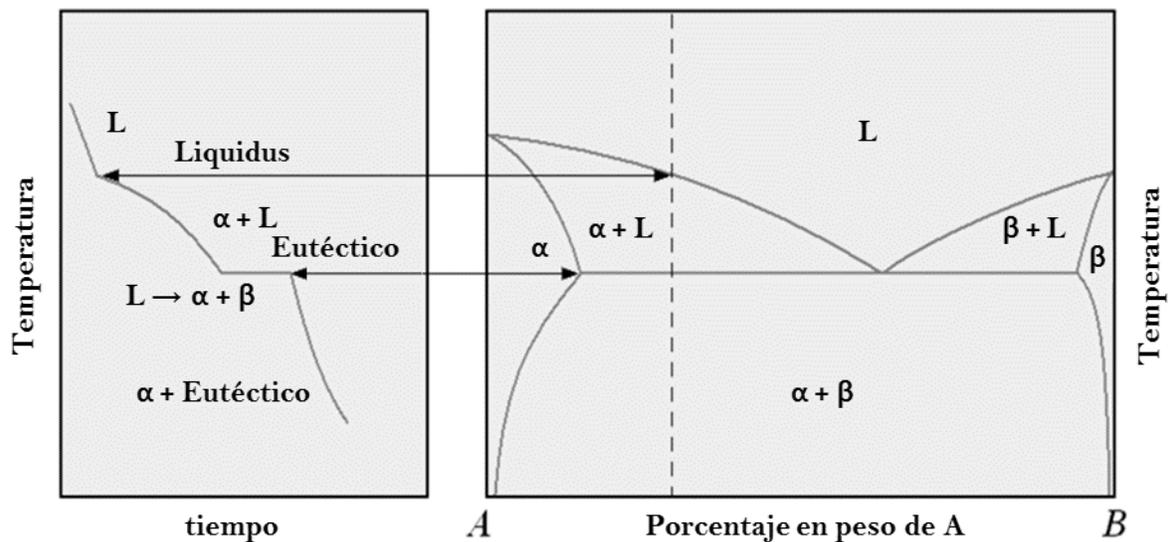


Figura 6. Curva de enfriamiento y diagrama de fase de una aleación hipoeutéctica (Cooling curves, s.f.).

1.3.1. Primera derivada de la curva de enfriamiento.

La curva de enfriamiento normal proporciona información básica sobre la solidificación. Se puede obtener información adicional de la primera derivada de la curva (dT/dt). La derivada en cada punto de la curva de enfriamiento es numéricamente igual a la pendiente de la curva de enfriamiento, por lo tanto, representa la velocidad de enfriamiento del metal en la solidificación.

Un aumento en la derivada indica que algo ha sucedido para disminuir la velocidad de enfriamiento, como el inicio de la solidificación de cualquier fase. Tomando como ejemplo el caso de una aleación A356 (Figura 7), la derivada aumenta y disminuye en el final de la transformación de fase. La temperatura liquidus es el punto donde las dendritas primarias ($Al \alpha$ para las aleaciones de Al-Si) comienzan a solidificarse a partir del líquido, hay un aumento de Si y Mg en el líquido remanente. El cambio en la pendiente de la curva de enfriamiento en este punto resulta del calor de solidificación de la fase α . Por lo tanto, la región 1, donde la derivada aumenta rápidamente, muestra la nucleación de $Al \alpha$ y las regiones 2 y 3 muestran crecimiento y engrosamiento de las dendritas de $Al \alpha$. Debajo de la temperatura de liquidus los cristales dendríticos se separan de la pared del molde y se mueven libremente en la fundición (Sharifi & Arab, 2015, pág. 120).

En la región 4 es el punto donde la mezcla eutéctica de Si y $Al \alpha$ se forma, este crecimiento de Si continúa en la región 5 de la curva, en el líquido remanente hay un aumento localizado de Mg. El crecimiento de los granos de $Al \alpha$ y Si es rápido al principio y disminuye a medida que avanza la solidificación. La Región 6 exhibe nucleación y crecimiento de la fase Mg_2Si . La región 7 corresponde a una inflexión en la curva de enfriamiento que significa el final de la solidificación (Sharifi & Arab, 2015, pág. 120).

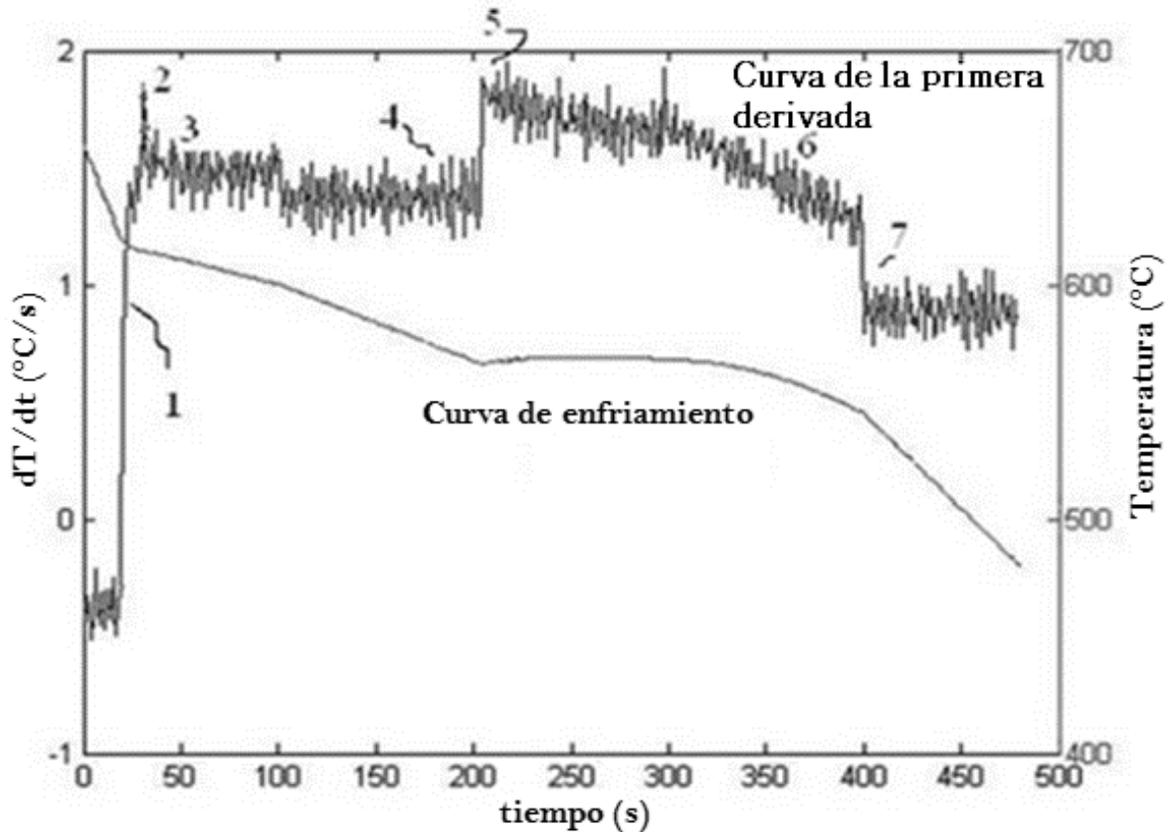


Figura 7. Curva de enfriamiento y su primera derivada de la solidificación de una aleación A356 (Sharifi & Arab, 2015, pág. 120).

En el ejemplo anterior se determinó la primera derivada de la curva de enfriamiento para realizar los cambios de pendiente que están relacionados con las reacciones de solidificación. La derivada de la curva de enfriamiento mejora la sensibilidad de las mediciones y permite una mayor precisión en la determinación de los puntos exactos de los eventos de solidificación primaria y eutéctica (Shabestari & M.Malekan, 2005).

Estas curvas térmicas y sus derivadas pueden utilizarse para identificar puntos característicos metalúrgicos clave y facilita la determinación del tiempo de nucleación, la temperatura, la fracción sólida y la velocidad de enfriamiento de las

fases. Estos puntos también pueden utilizarse para identificar la composición de la aleación con la ayuda de diagramas de fase (O. Sedighi, 2018).

Una plataforma de análisis térmico de última generación es capaz de cuantificar las características metalúrgicas, entre las que se incluyen: el tamaño de grano, el espaciado de los brazos dendríticos, la temperatura de liquidus, la temperatura de solidus, la temperatura de nucleación y solidificación de las eutécticas secundarias y terciarias (Hernández & Sokolowski, 2005).

1.4. Aleaciones Al–Si.

Debido a su excelente colabilidad y a sus buenas propiedades mecánicas, las aleaciones de Al–Si (aluminio–silicio) son las aleaciones de Al para fundición más importantes y utilizadas, constituyen entre el 80 y el 90% del total de fundiciones de Al producidas en todo el mundo y tienen amplias aplicaciones, especialmente en las industrias aeroespacial y automotriz.

El sistema Al–Si es puramente eutéctico (Figura 8), con este a 12.6% en peso de Si y a la temperatura de 577°C, en la solución sólida α se disuelve a esta temperatura, el 1.65% en peso de Si (Hufnagel, 1992, pág. 387).

El grupo dominante de aleaciones de fundición Al–Si contiene entre el 5 y el 25% en peso de Si, con adiciones de Mg, Ni y Cu. A grandes rasgos estas se dividen en tres categorías basadas en la cantidad de Si presente, en relación con el punto eutéctico, aproximadamente 12.6% en peso de Si. Estas categorías son: hipoeutéctica, eutéctica e hipereutéctica (Warmuzek, 2004).

Las aleaciones Al–Si se han desarrollado a causa de sus buenas propiedades, como una excelente fluidez y una fácil capacidad de alimentación, propiedades mecánicas específicas adecuadas y una alta resistencia a la corrosión (Kaufman, 2004).

En estas aleaciones el Si cristaliza con una forma acicular gruesa que reduce la capacidad de mecanización y las propiedades mecánicas de la aleación. Los modificadores químicos, como el Sr, el Na y el Sb, pueden cambiar las partículas

de Si en forma de agujas o láminas por fases finas, fibrosas y bien distribuidas en la microestructura. Estos elementos modificadores influyen en los procesos de nucleación y crecimiento de los cristales de silicio eutéctico. (Kaufman, 2004)

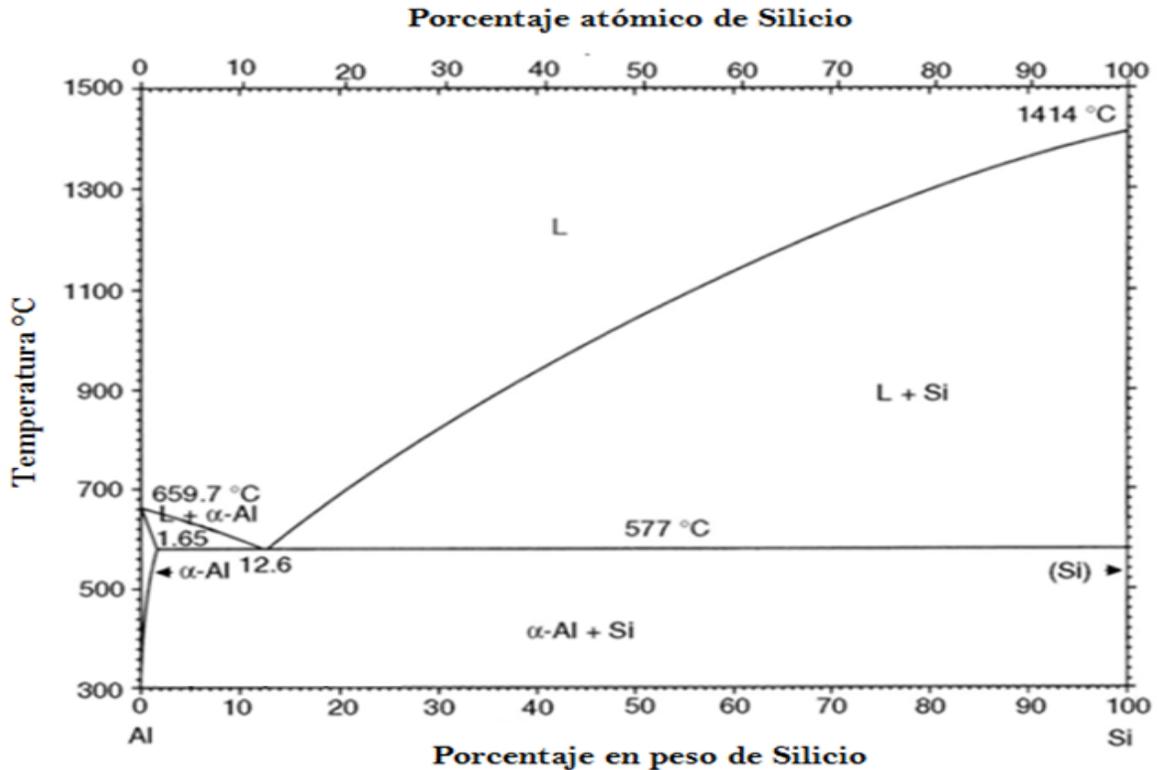


Figura 8. Diagrama de fases del sistema Al-Si (Warmuzek, 2004, pág. 2).

Las aleaciones hipoeutécticas contienen menos del 12.6% en peso de Si, a temperatura ambiente consisten en la fase de Al α blando y dúctil, y la fase de Si frágil y muy dura asociada con la reacción eutéctica. Es esta fase de Si la que contribuye a la muy buena resistencia al desgaste de estas aleaciones (Warmuzek, 2004).

Las aleaciones hipereutécticas contienen más del 12.6% en peso de Si, consisten en partículas gruesas, angulares, primarias de Si, así como Si eutéctico. Estas partículas de Si primario imparten excelente resistencia al desgaste a estas aleaciones. Suelen caracterizarse por tener una excelente resistencia al desgaste, conductividad térmica y reducción de peso en comparación con las aleaciones

hipoeutécticas. Los niveles más altos de Si también minimizan la expansión térmica y aumentan la conductividad térmica (Hernández & Sokolowski, 2005).

Las aleaciones de Al–Si pueden tener ciertas impurezas dependiendo de la pureza del Al puro comercial utilizado, tales como el Fe, Mn, Cu y Zn, aunque algunos son agregados a propósito para aumentar la resistencia y dureza del material, su presencia conlleva a constituyentes más complejos (incluyendo compuestos intermetálicos), que precipitan en la solidificación (Hufnagel, 1992, pág. 389).

Para las aleaciones hipoeutécticas se presenta la siguiente secuencia durante la solidificación:

- 1- Formación de las dendritas de Al α (Temperatura liquidus).
- 2- Reacción eutéctica Al–Si (Temperatura solidus).
- 3- Reacciones eutécticas secundarias, de acuerdo con los solutos de la aleación (Mg_2Si , Cu_2Si , etc.).

Dentro de las reacciones eutécticas secundarias también está presente el Fe y Mn, los cuales forman compuestos intermetálicos en el líquido remanente durante la solidificación, estos tienen bajos puntos de fusión formándose en la región de 500 a 480°C (Hufnagel, 1992, pág. 389).

Capítulo 2. Procedimiento experimental.

Para realizar los experimentos se eligió usar aluminio 6%Si, una aleación de rango largo de solidificación, debido a que el mecanismo de solidificación de este tipo de aleaciones propicia la formación de rechupes dispersos. Sin realizar ningún tratamiento al metal líquido (refinación y modificación), para no afectar la solidificación de la aleación.

Se fabricaron dos moldes, cada uno con una velocidad de enfriamiento diferente. Un molde para inhibir la aparición de rechupes con una velocidad de enfriamiento alta, en el cual se colocaron enfriadores en la base del molde, provocando que la solidificación avance progresivamente desde la base, evitando la formación de rechupes dispersos en la zona inferior de la pieza. Y un molde para detectar la formación de los rechupes con una velocidad de enfriamiento baja, en el cual se cubrieron de fibra aisladora térmica todos los alrededores del molde, evitando que el calor se disipe rápidamente y propiciando una solidificación pastosa, que facilite la formación de rechupes dispersos en el interior de la pieza.

Se realizaron 3 experimentos por duplicado, con diferente temperatura de vaciado, el primer experimento con una temperatura de vaciado de 680°C, el segundo experimento con una temperatura de vaciado de 720°C y el tercer experimento con una temperatura de vaciado de 760°C.

2.1. Material y equipo empleado.

Material:

- Arena de moldeo en verde para aleaciones no ferrosas.
- 2 latas de acero con una altura de 8.23cm y un diámetro de 8.46cm.
- 2 latas de acero con una altura de 11.4cm y un diámetro de 8.58cm.
- Tubo de una pulgada de diámetro.
- Alambre de acero de medio centímetro de diámetro.
- Fibra aisladora térmica.
- Cuerdas de probetas de tensión de cobre.
- 5 termopares tipo K para cada experimento.

- 5 extensiones para termopares tipo K.
- Pintura de circonio.
- Pastillas Degasal A hechas a base de hexacloroetano.

Equipo:

- Horno de resistencia eléctrica.
- Crisol de Carburo de silicio tamaño A12.
- Maneral y pinzas.
- Multímetro.
- Laptop con software Personal Daqview.
- Campana de gases.
- Equipo de seguridad (Bata de algodón, Botas con casquillo de acero, careta y guantes de asbesto).
- Adquisidor de datos Personal Daq/56.

2.2. Fabricación de la aleación de aluminio 6%Si.

Para fabricar la aleación se utilizó aluminio puro comercial y silicio metálico, se realizó el balance de carga tomando como base de cálculo 1.9 Kilogramos de aleación (En base a la cantidad de aluminio disponible).

A partir de las cantidades de materias primas calculadas en el balance, se procedió a realizar la fusión, el crisol se recubrió de pintura de circonio en el interior y después se colocó dentro del horno de resistencia eléctrica, se encendió el horno y se ajustó a la temperatura de 800°C. Como técnica de fusión el silicio y el aluminio (cortado en piezas más pequeñas), se precalentaron en la mufla a 500°C. Una vez que el horno llegó a la temperatura establecida se procedió a colocar la carga dentro del crisol, se empezó con añadir la mitad del aluminio, primero la pieza más grande de aluminio se introdujo dentro del crisol, una vez dentro, se colocó la tapa del horno y se esperó hasta que la pieza se fundió, después se agregaron las piezas más pequeñas de aluminio dentro del crisol, una vez fundidas se agregó la mitad del silicio para que se disuelva en el aluminio, de forma similar a la primera mitad del aluminio se agregó la mitad restante dentro del

crisol y al final se agregó la segunda mitad del silicio para que se disuelva por completo.

Durante la fusión de la aleación, se realizó el molde de una placa modelo con pieza tipo "L", se utilizó arena verde para aleaciones no ferrosas con 3% de humedad. Una vez que la aleación estuvo completamente en estado líquido, se estableció una temperatura de vaciado a 700°C, con el equipo de seguridad puesto, se procedió a retirar el crisol del horno usando las pinzas para levantar el crisol y colocarlo dentro del maneral, después se retiró la escoria con la cucharilla, una vez que la aleación llegó a la temperatura establecida se realizó el vaciado en el molde. Se dejó enfriar y al día siguiente se desmoldeó la pieza en "L".

Se cortó una pequeña muestra de la pieza, para realizar una metalografía y observar la microestructura resultante. También se hizo un análisis químico por espectrometría de emisión atómica a la aleación, a fin de conocer su composición química.

2.3. Preparación de los moldes.

El molde para detectar la señal sin rechupes y el molde para detectar la señal con rechupes, se hicieron con latas de acero que se observan en las Figuras 9 y 10.



Figura 9. Imagen de las 4 latas usadas para los moldes, los moldes para detectar la señal con rechupes se hicieron con latas con una altura de 8.23cm y diámetro de 8.46cm y los moldes para detectar la señal sin rechupes se hicieron con latas con una altura de 11.4cm y un diámetro de 8.58cm.

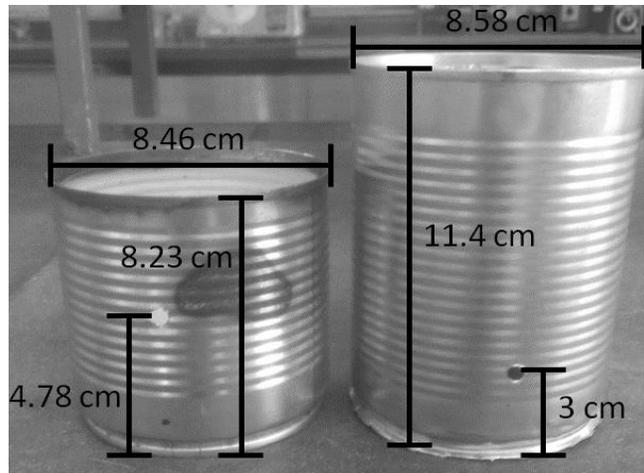


Figura 10. Imagen de las latas usadas para los moldes con sus respectivas medidas y dimensiones, se observa la perforación en donde se colocó el termopar en ambas latas.

El molde para detectar la señal sin rechupes se hizo con una lata de acero grande, el diámetro de la lata es de 8.58cm y la altura de 11.4cm (Figura 10). Se removió la tapa y la base de la lata, en el fondo se colocaron cuerdas de probetas para ensayo de tensión de cobre (Figura 11), para que sirvan de enfriadores. Se hizo una perforación de medio centímetro de diámetro en el cuerpo de la lata para la entrada del termopar, de tal manera que el termopar quede a medio centímetro arriba de la base de la pieza, teniendo en cuenta que se colocó una capa de arena verde de medio centímetro de espesor entre los enfriadores y la pieza.

Para el molde para detectar la señal con rechupes se utilizó una lata pequeña de acero, el diámetro de la lata es de 8.46cm y la altura de 8.23cm (Figura 10), se le removió la tapa y se hizo una perforación de medio centímetro de diámetro en el cuerpo de la lata para la entrada del termopar, de modo que el termopar quede a la mitad de la pieza, considerando que se colocó una capa de fibra aisladora térmica de un centímetro de espesor en el fondo de la lata (Figura 11), después una capa de medio centímetro de arena verde y luego la pieza.



Figura 11. Imagen del fondo de las latas, en donde se observa cómo se colocan las cuerdas de probetas de tensión de cobre y la fibra aisladora, para su respectivo molde.

Para el moldeo se utilizó arena verde para aleaciones no ferrosas, con una humedad al 3%, para cada experimento se prepararon 4Kg de arena. Una vez que se prepararon las 4 latas, colocando los enfriadores o la fibra aisladora térmica respectivamente, se procedió a llenar las latas hasta el tope con arena apisonando perfectamente para que tenga la resistencia adecuada, cuando todas las latas se llenaron completamente de arena, se hizo el hueco de la pieza con ayuda de un tubo de una pulgada de diámetro, al cual se le saco filo en la orilla del tubo para poder penetrar con facilidad la arena. El tubo se colocó de forma vertical y centrado en la lata, se fue introduciendo dentro de la arena aplicando presión, a fin de hacer el orificio cilíndrico a la altura correspondiente, después se retiró el tubo cuidadosamente y se removió la arena que se quedó atrapada en el interior del tubo, dejando solo la capa de medio centímetro de arena que separa a la pieza de la fibra aisladora o los enfriadores. Se apisonó la superficie del hueco formado, con cuidado para dejarla lo más lisa posible y que no se desprenda la arena a la hora de vaciar el metal líquido (Figura 12 y Figura 13).

Después se procedió a hacer la perforación en donde se colocaron los termopares con ayuda de un alambre de medio centímetro de diámetro, al cual se le saco punta en un extremo, se realizó el conducto a partir de la perforación hecha a las

latas hasta el hueco de la pieza, con cuidado para evitar que se desprendiera una gran cantidad de arena y procurando que sea lo más recto posible.

A los moldes para detectar la señal con los rechupes se les rodeó de fibra aisladora térmica, dejando solo libre la entrada del termopar.

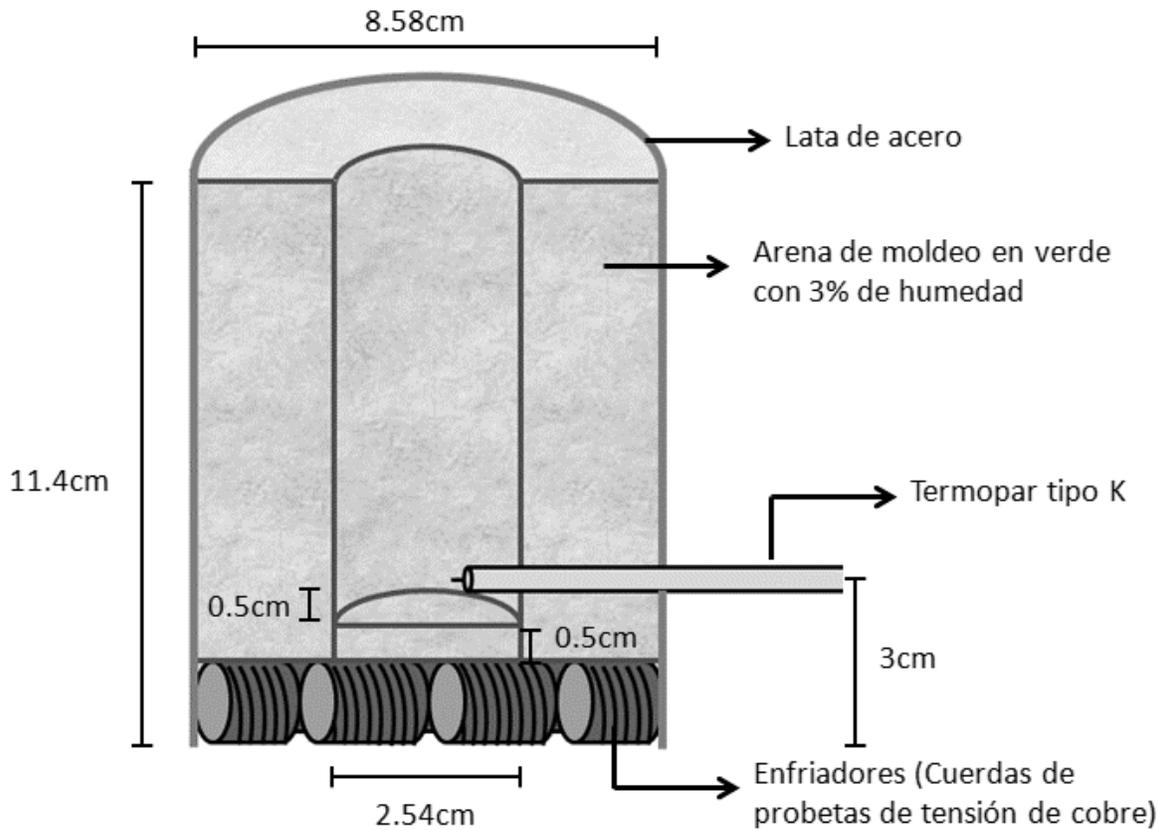


Figura 12. Corte transversal del molde para detectar la señal sin rechupes, en el cual se observa el hueco de la pieza, la entrada del termopar y los enfriadores en el fondo del molde.

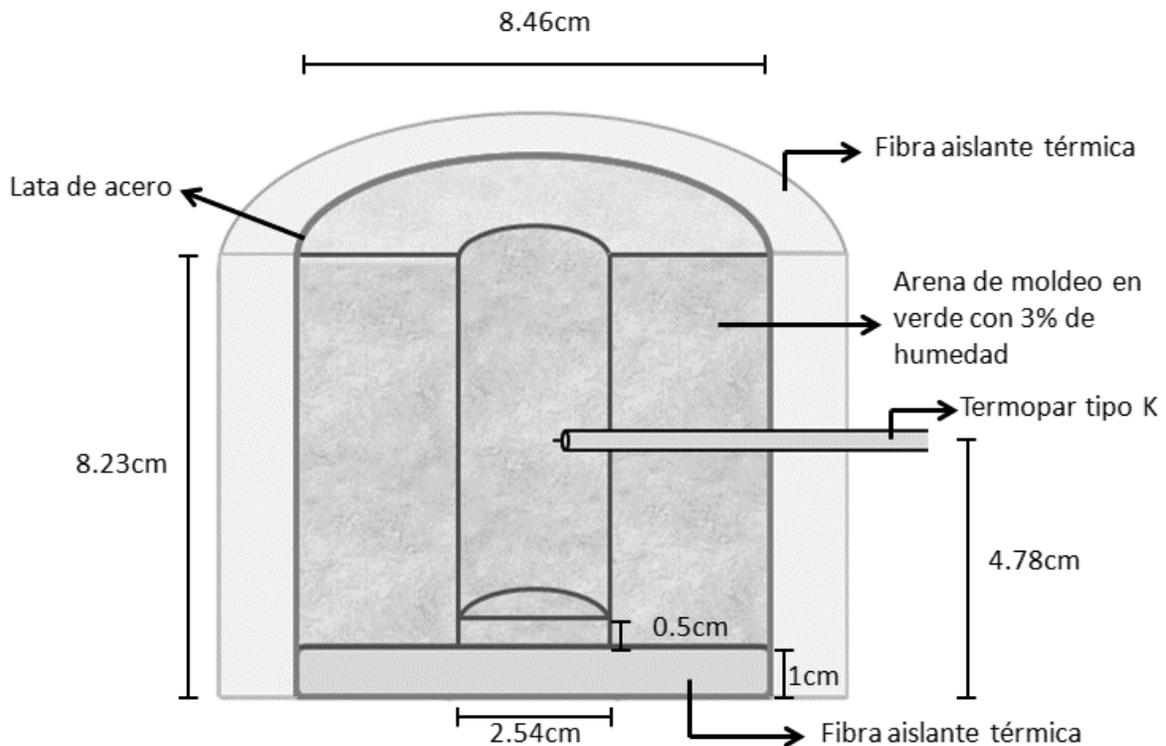


Figura 13. Corte transversal del molde para detectar la señal con rechupes, en el cual se observa el hueco de la pieza, la entrada del termopar, la fibra aislante térmica en el fondo del molde y alrededor de las paredes de la lata.

2.4. Montaje del sistema experimental.

Se usaron 5 termopares tipo K (Figura 14) en cada experimento, a todos se les colocó pintura de zirconio en la zona inferior de la punta para evitar la interferencia de las señales, se insertaron los termopares en los 4 moldes a través del conducto para termopar hecho en cada lata, dejando un centímetro de termopar dentro del hueco de la pieza y se ajustaron con cinta adhesiva para evitar que se muevan, el quinto termopar se usó para medir la temperatura del metal líquido con ayuda de un multímetro.

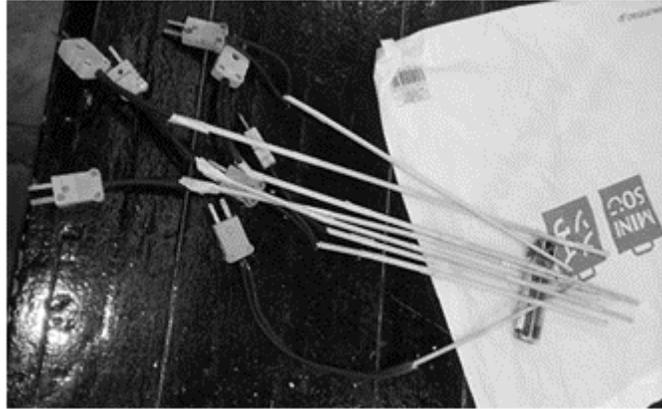


Figura 14. Imagen de los termopares tipo K fabricados, están hechos de una mini clavija para termopar tipo K, espagueti para alta temperatura, aisladores de cerámica de dos orificios calibre 20 y alambre alumel y cromel calibre 20.

Los termopares se conectaron por medio de extensiones para termopar tipo K, al adquisidor de datos Personal Daq/56 y este se conectó a una laptop por medio de una conexión Usb. La laptop cuenta con el software Personal Daqview el cual es configurado para registrar dos señales por segundo (una señal cada 0.5 segundos).

Los moldes se ordenaron de tal modo que los primeros en vaciarse sean los moldes para detectar la señal sin rechupe y después los moldes para detectar la señal con rechupe (Figura 15).

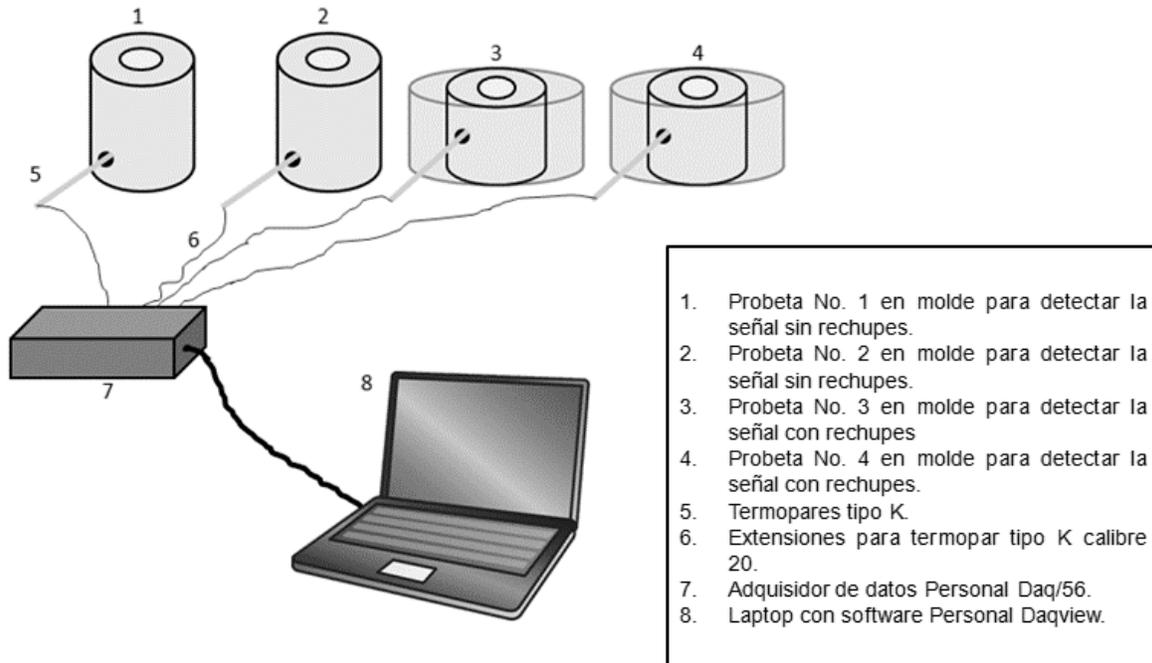


Figura 15. Representación gráfica del sistema que se ocupó en todos los experimentos, para la adquisición de datos de Temperatura y tiempo.

2.5. Fusión, Vaciado y Toma de datos.

Para cada experimento, se pesó un kilogramo de la aleación, se cortaron en piezas más pequeñas y se precalentaron en la mufla a 500°C. El interior del crisol se limpió y se recubrió de pintura de zirconio, el crisol se colocó dentro del horno de resistencia eléctrica y se encendió ajustando la temperatura a 800°C, una vez que el horno llegó a esa temperatura se procedió a agregar la carga, colocando la pieza más grande en el crisol, una vez fundida se procede a agregar otra pieza y así consecutivamente hasta que todas las piezas estén fundidas.

Para evitar la formación de sopladuras (porosidad por gas) que puedan confundirse con rechupes, se desgasificó utilizando las pastillas Degasal A, hechas a base de hexafluoruro de azufre. Se pesaron 3 gramos y se envolvieron en un trozo pequeño de papel aluminio, utilizando una campana cubierta con una delgada capa de pintura de zirconio, se introdujo el desgasificante hasta el fondo del crisol, dando un lento movimiento circular hasta que dejaron de emitirse los

gases producto de la reacción, inmediatamente se retiró la campana y se dejaron pasar 4 minutos.

Pasados los 4 minutos se sacó el crisol del horno para retirar la escoria, cuando el metal líquido llegó a 10 grados arriba de la temperatura de vaciado se hizo andar el software para empezar a tomar los datos de temperatura y tiempo, en el momento que se alcanzó la temperatura establecida (Tabla 1), se hizo el vaciado en los 4 moldes. Una vez vaciados los moldes para detectar la señal con rechupes, se taparon inmediatamente con fibra aisladora térmica en la parte superior.

Tabla 1. Temperatura de vaciado para los experimentos realizados.

Experimento	Temperatura de Vaciado (°C)
1	680
2	720
3	760

Cuando la temperatura en los moldes llegó aproximadamente a los 100°C, se detuvo el programa y se guardaron los datos para su posterior análisis. Las piezas se desmoldearon al día siguiente (Figura 16) y se cortaron a la mitad (perpendicularmente a la base), mostrando el termopar incrustado en la pieza. Se desbastaron a lija 1200 y se pulieron para ver la superficie interna de las piezas, corroborando la existencia de rechupes o por el contrario la ausencia de rechupes en la zona alrededor de la punta del termopar.

Las curvas de enfriamiento se hicieron en Excel, graficando la temperatura en función del tiempo de cada molde, se hizo la primera derivada (dT/dt) de las curvas, suavizando los datos un 2% para eliminar el ruido generado.



Figura 16. Imagen de los moldes y las piezas, al día siguiente de un experimento, antes de desmoldearlas.

Capítulo 3. Resultados y Análisis de Resultados.

3.1. Microestructura y Composición química.

En la Tabla 2 se puede observar la composición química de la aleación, obtenida por espectrometría de emisión atómica. Se obtuvo una aleación de aluminio 6%Si, de acuerdo al diagrama de fases Al–Si (Figura 17) es una aleación hipoeutéctica y de rango largo de solidificación, con una temperatura liquidus de 625°C y una temperatura solidus (eutéctico) de 577°C.

Tabla 2. Composición química de la aleación aluminio 6%Si, obtenida por espectrometría de emisión atómica, en el Edificio D de la Facultad de Química.

%Al	%Si	%Fe	%Cu	%Mn
93.8	5.93	0.1293	0.0037	0.0082
%Mg	%Zn	%Ni	%Cr	%Pb
<0.0050	0.0247	0.006	0.0031	<0.0020
%Ti	%V	%Co	%Sr	
0.0496	0.0048	<0.0020	0.0002	

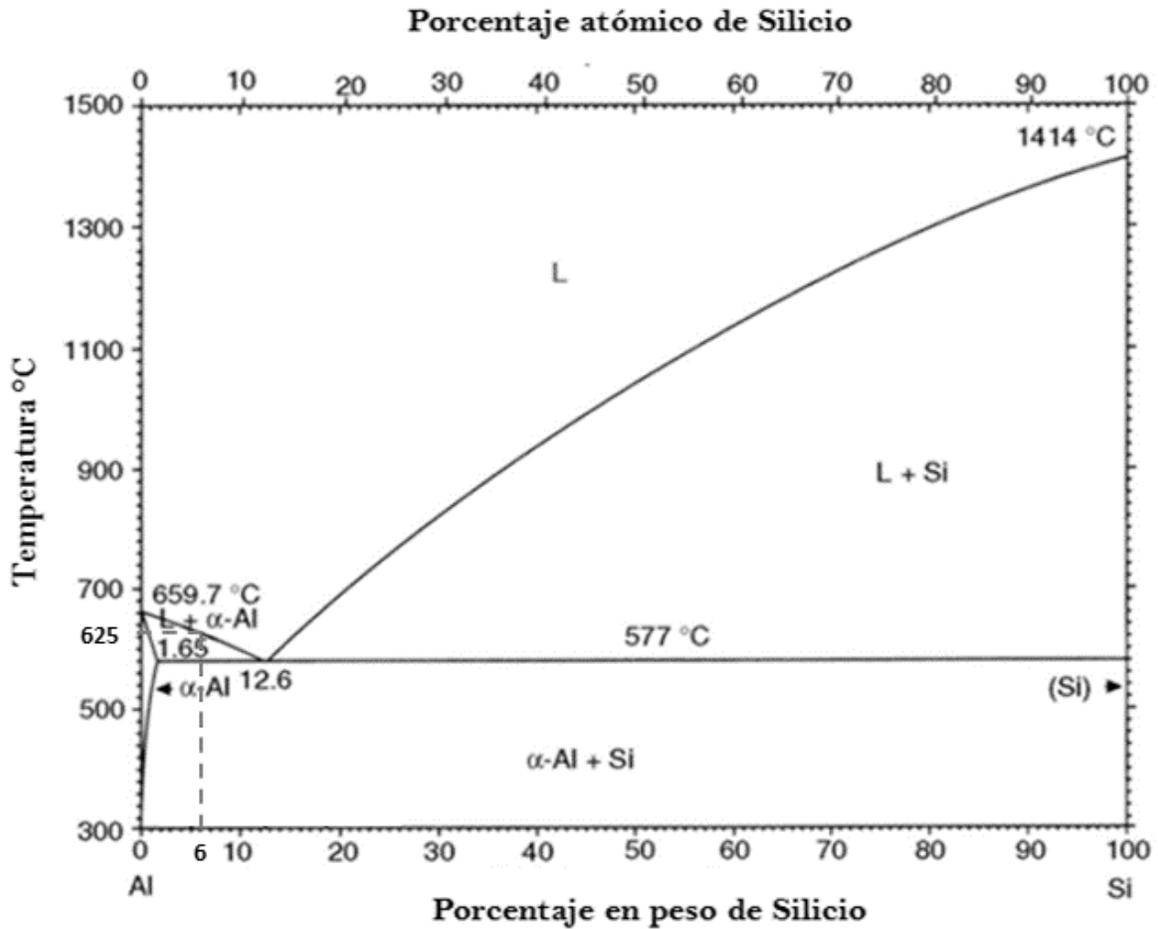


Figura 17. Diagrama de fases Al-Si, en donde se señala la temperatura de liquidus en equilibrio para una aleación aluminio 6%Si.

En la Figura 18 se muestra la microestructura de la aleación aluminio 6%Si sin modificar, se observan agujas de Si en una matriz de Al α y en la parte superior un rechupe. No se realizó una modificación de la microestructura del silicio o refinación de grano debido a que estos tratamientos pueden modificar las curvas de enfriamiento haciéndolas más complejas y considerando que parte de su efecto es reducir la aparición de rechupes en las piezas de aleaciones Al-Si.

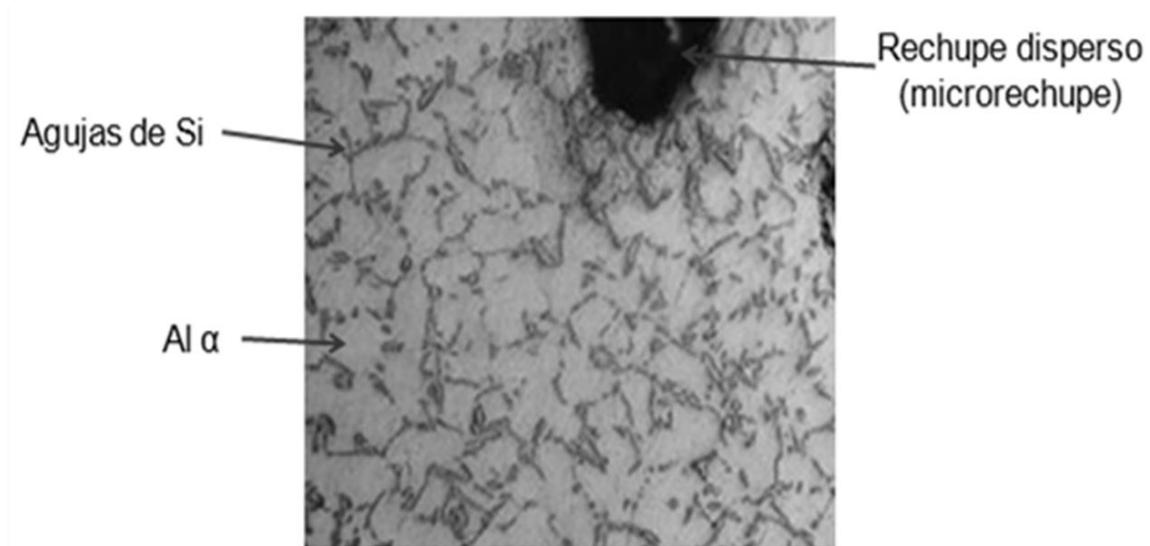


Figura 18. Microestructura de la aleación aluminio 6%Si sin modificar, a 200X, en donde se observan agujas de Si en una matriz de Al α y en la parte superior se puede observar un rechupe.

3.2. Curvas de enfriamiento y su primera derivada.

Con los datos obtenidos en los experimentos, se realizaron las curvas de enfriamiento, graficando la temperatura en función del tiempo, considerando solo el enfriamiento, es decir, se tomaron los datos a partir de la temperatura máxima registrada por el adquirente de datos.

Utilizando Excel se obtuvo la primera derivada de las curvas de enfriamiento (dT/dt), con un suavizado del 2%, las curvas de enfriamiento se graficaron junto a su primera derivada, a fin de analizarlas.

Mediante el análisis térmico se identificaron los cambios de pendiente en las curvas de enfriamiento, que corresponden a las transformaciones de fase conocidas que ocurren durante la solidificación de la aleación aluminio 6%Si, la zona 1 señalada con los brazos de una llave horizontal representa la región de liquidus y la zona 2 señalada con los brazos de una llave horizontal es la región de solidificación (reacción eutéctica).

3.2.1. Primer experimento con una temperatura de vaciado de 680°C.

A continuación se muestran las curvas de enfriamiento y su primera derivada del primer experimento, con una temperatura de vaciado de 680°C. Se puede observar que en los 4 moldes, las temperaturas máximas registradas por el adquisidor de datos están por debajo de la temperatura de liquidus, por lo que solo se observa la inflexión de la curva de enfriamiento correspondiente a la reacción eutéctica (solidus).

La Figura 19 muestra la curva de enfriamiento y primera derivada, de la probeta No. 1 del experimento, la cual se realizó con un molde para detectar la señal sin rechupes, se registró una temperatura máxima de 600°C y una temperatura eutéctica de 571°C.

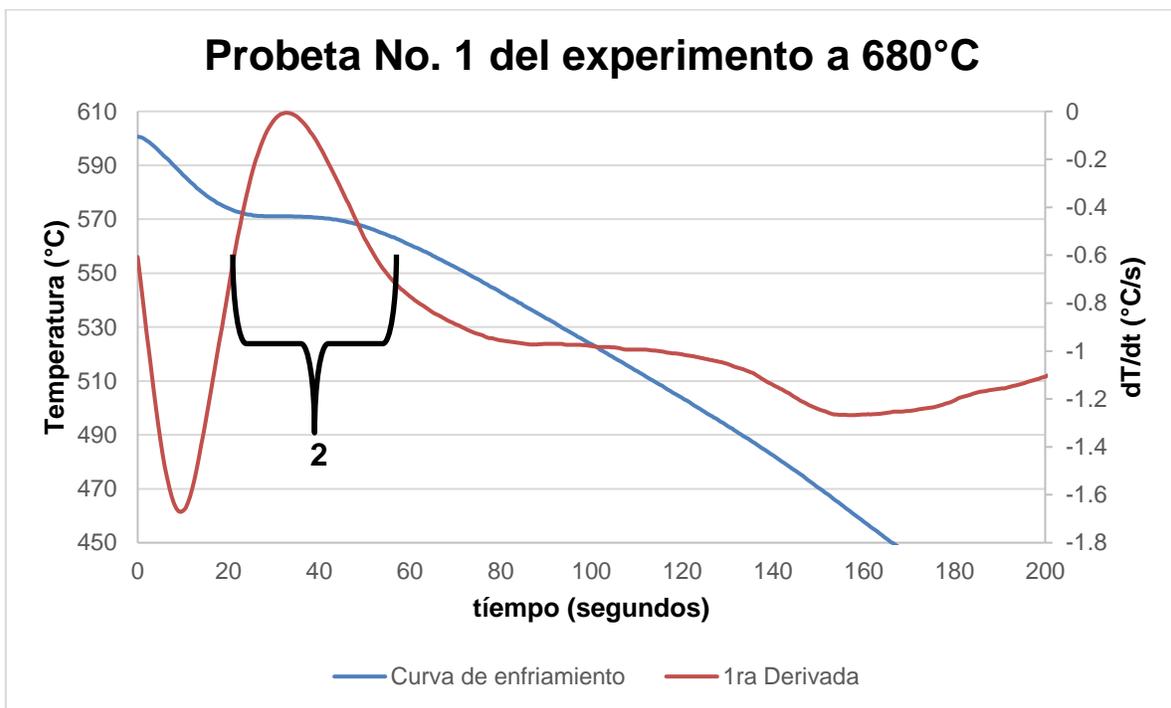


Figura 19. Curva de enfriamiento y primera derivada, de la probeta No. 1 del experimento con una temperatura de vaciado de 680°C.

La Figura 20 muestra la curva de enfriamiento y primera derivada de la probeta No. 2 del experimento, la cual se realizó con un molde para detectar la señal sin rechupes, se registró una temperatura máxima de 602°C y una temperatura eutéctica de 571°C.

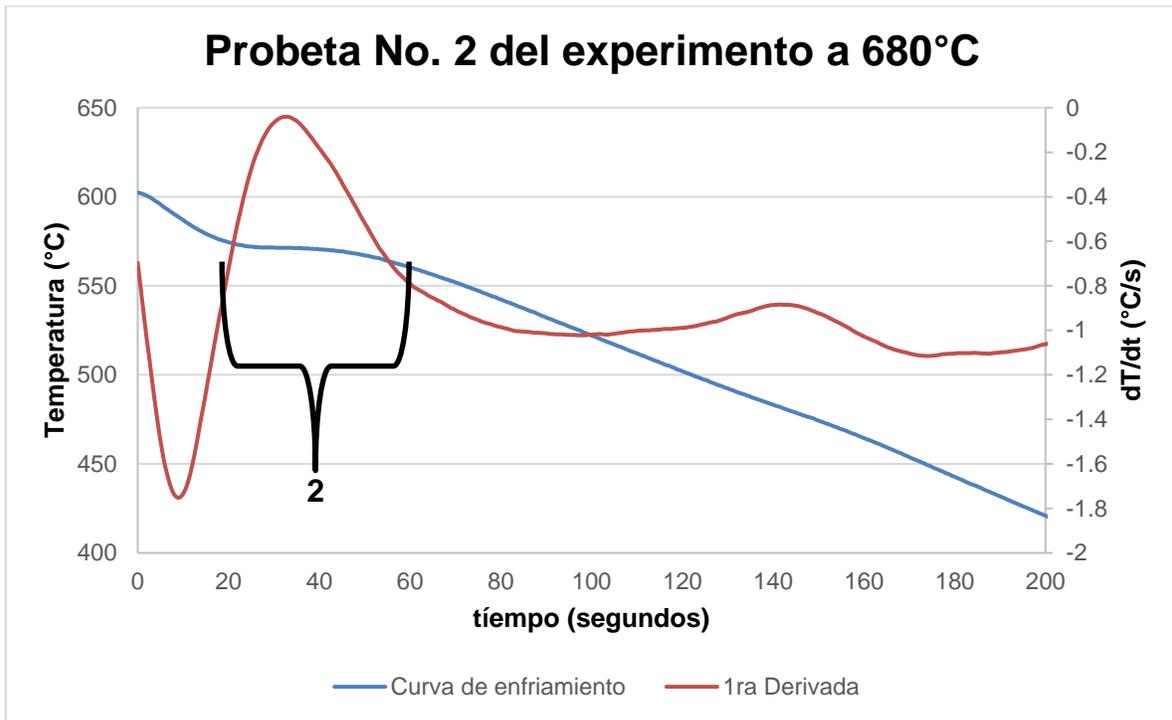


Figura 20. Curva de enfriamiento y primera derivada de la probeta No. 2 del experimento con una temperatura de vaciado de 680°C.

La Figura 21 muestra la curva de enfriamiento y primera derivada de la probeta No. 3 del experimento, la cual se realizó con un molde para detectar la señal con rechupes, se registró una temperatura máxima de 600°C y una temperatura eutéctica de 569°C.

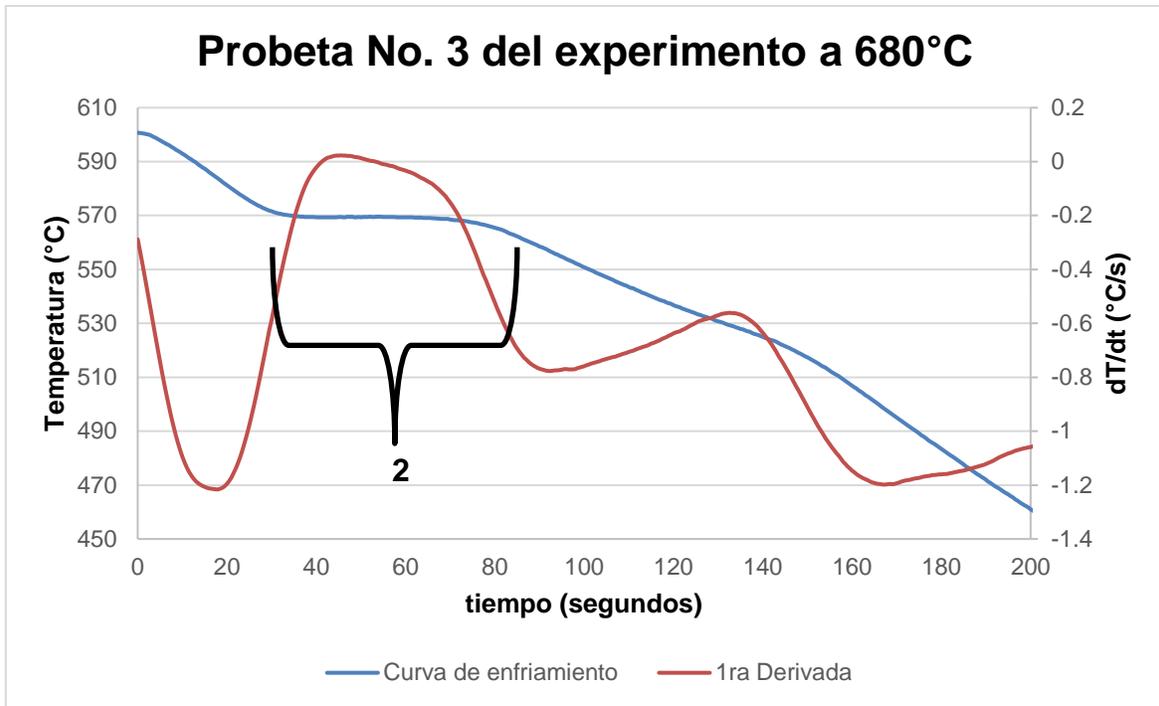


Figura 21. Curva de enfriamiento y primera derivada de la probeta No. 3 del experimento con una temperatura de vaciado de 680°C.

La Figura 22 muestra la curva de enfriamiento y primera derivada de la probeta no. 4 del experimento, la cual se realizó con un molde para detectar la señal con rechupes, se registró una temperatura máxima de 599°C y una temperatura eutéctica de 570°C.

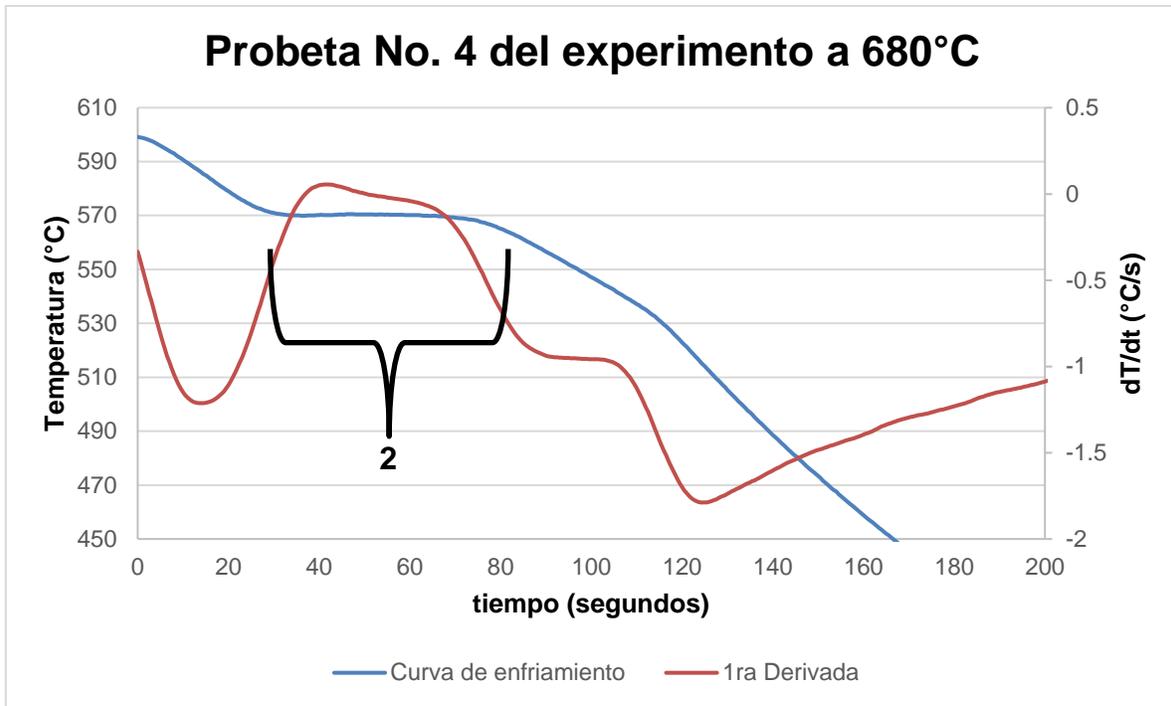


Figura 22. Curva de enfriamiento y su primera derivada de la probeta No. 4 del experimento con una temperatura de vaciado de 680°C.

En el primer experimento con una temperatura de vaciado de 680°C, las temperaturas máximas que se llegaron a registrar están entre los 599°C y 602°C, por debajo de la temperatura liquidus de acuerdo al diagrama de fases Al-Si. La aleación se encontraba en estado pastoso cuando se registró la temperatura más alta en los cuatro moldes, ya se habían formado las dendritas de Al α y en ese punto las dendritas se encontraban distribuidas en el líquido engrosando. Este proceso se observa como una pendiente negativa en la curva de la primera derivada, es decir un incremento en la velocidad de enfriamiento, hasta que hay un cambio de inflexión a una pendiente positiva indicando la reducción de la velocidad de enfriamiento producida por la estabilidad térmica del calor latente que genera la reacción del eutéctico, se genera una meseta durante el periodo en que ocurre la reacción eutéctica y termina cuando hay un cambio de inflexión a una pendiente negativa en la curva de la primera derivada.

3.2.2. Segundo experimento con una temperatura de vaciado de 720°C.

Las siguientes figuras muestran las curvas de enfriamiento y sus primeras derivadas, del segundo experimento a una temperatura de vaciado de 720°C, solo en la probeta No. 1 no se alcanzó a registrar la temperatura de liquidus.

La Figura 23 muestra la curva de enfriamiento y primera derivada de la probeta No. 1 del experimento, la cual se hizo con un molde para detectar la señal sin rechupes, se registró una temperatura máxima de 603°C y una temperatura eutéctica de 571°C.

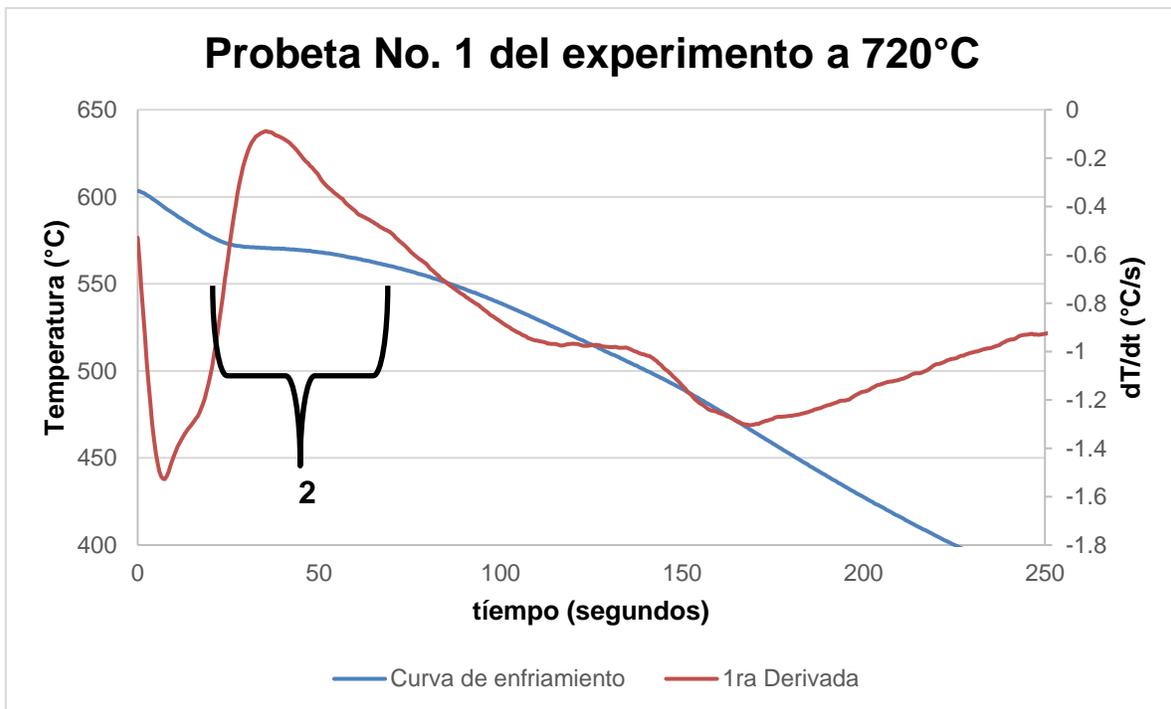


Figura 23. Curva de enfriamiento y su primera derivada de la probeta No. 1 del experimento con una temperatura de vaciado de 720°C.

La Figura 24 muestra la curva de enfriamiento y primera derivada de la probeta No. 2 del experimento, la cual se hizo con un molde para detectar la señal sin rechupes, se registró una temperatura máxima de 624°C, una temperatura liquidus de 607°C y una temperatura eutéctica de 569°C.

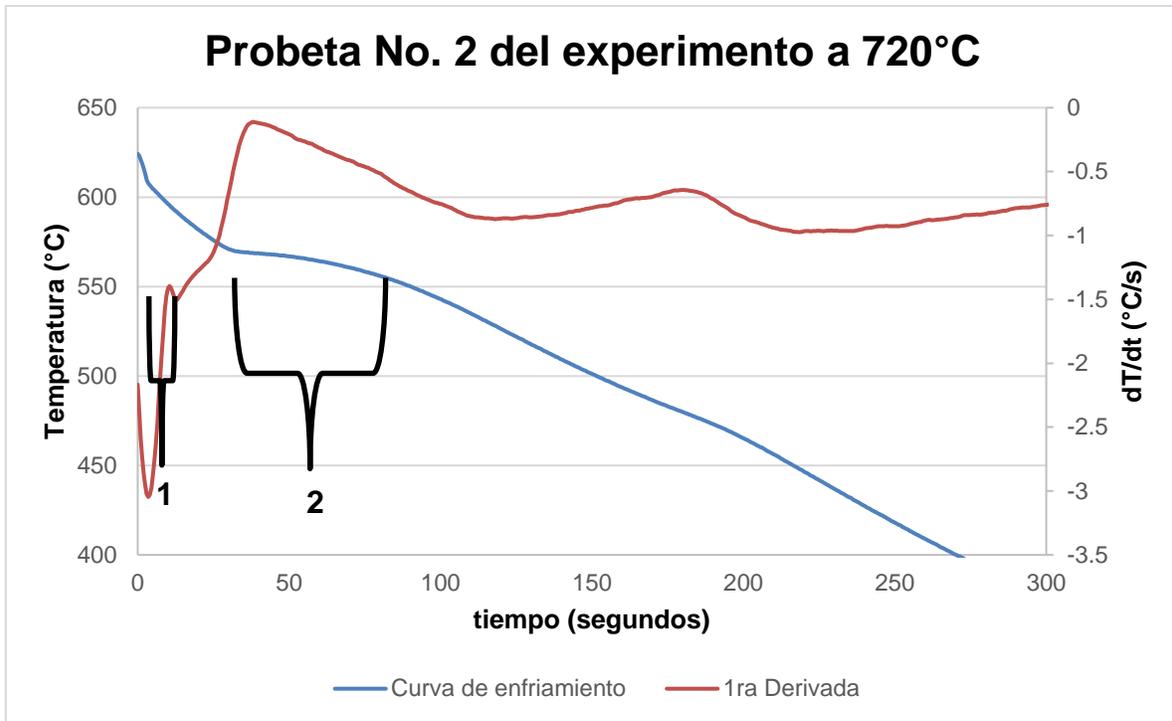


Figura 24. Curva de enfriamiento y su primera derivada de la probeta No. 2 del experimento con una temperatura de vaciado de 720°C.

La Figura 25 muestra la curva de enfriamiento y primera derivada de la probeta No. 3 del experimento, la cual se hizo con un molde para detectar la señal con rechupes, se registró una temperatura máxima de 613°C, una temperatura liquidus de 605°C y una temperatura eutéctica de 570°C.

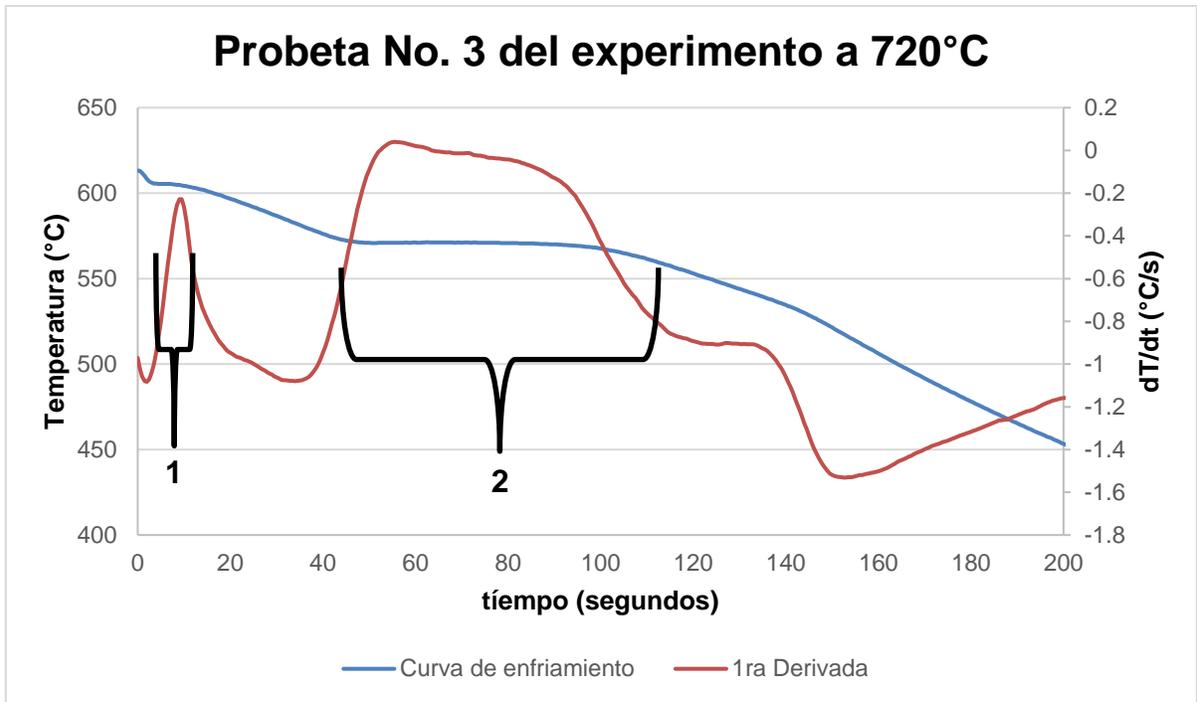


Figura 25. Curva de enfriamiento y su primera derivada de la probeta No. 3 del experimento con una temperatura de vaciado de 720°C.

La Figura 26 muestra la curva de enfriamiento y primera derivada de la probeta No. 4 del experimento, la cual se hizo con un molde para detectar la señal con rechupes, se registró una temperatura máxima de 621°C, una temperatura liquidus de 609°C y una temperatura eutéctica de 573°C.

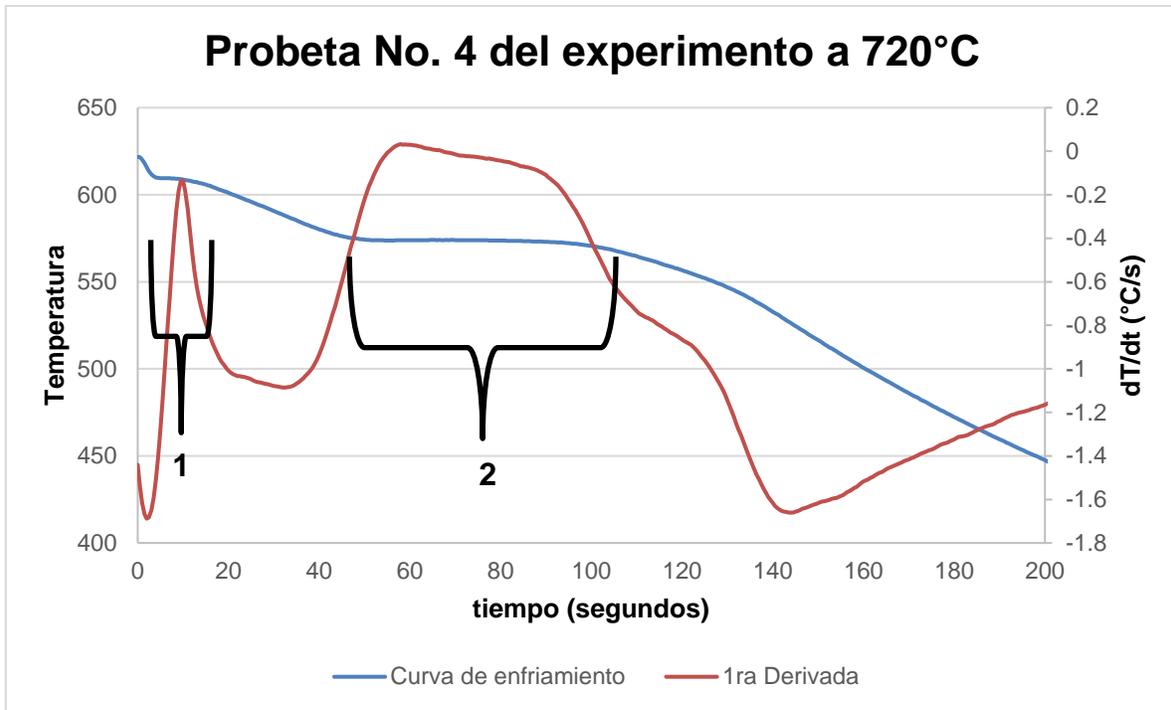


Figura 26. Curva de enfriamiento y su primera derivada de la probeta No. 4 del experimento con una temperatura de vaciado de 720°C.

En el experimento con una temperatura de vaciado de 720°C se puede ver que en las probetas No. 2, No. 3, No. 4, se registran temperaturas mayores a la temperatura liquidus, el metal aún estaba en estado líquido cuando se registraron sus temperaturas máximas, excepto en la probeta No. 1 en donde la aleación ya estaba en estado pastoso.

Cuando el metal aún está en estado líquido se observa una pendiente negativa en la curva de la primera derivada, es decir un aumento en la velocidad de enfriamiento, hasta que se observa un cambio de inflexión hacia una pendiente positiva debido al inicio de la solidificación, hay una disminución en la velocidad de enfriamiento por el calor generado en la formación de las primeras dendritas de Al α , se forma una meseta en la curva de la primera derivada, que indica el inicio y final de la fase primaria de solidificación, después hay un cambio de inflexión a una pendiente negativa, un aumento en la velocidad de enfriamiento indicando la

distribución de las dendritas en el metal líquido hasta el inicio de la reacción eutéctica.

3.2.3. Tercer experimento con una temperatura de vaciado de 760°C.

Las siguientes Figuras muestran las curvas de enfriamiento y sus primeras derivadas, del tercer experimento a una temperatura de vaciado de 760°C, se puede observar que en todos los moldes se registró la temperatura de liquidus y solidus.

La Figura 27 muestra la curva de enfriamiento y primera derivada de la probeta No. 1 del experimento, la cual se hizo con un molde para detectar la señal sin rechupes, se registró una temperatura máxima de 633°C, una temperatura liquidus de 605°C y una temperatura eutéctica de 569°C.

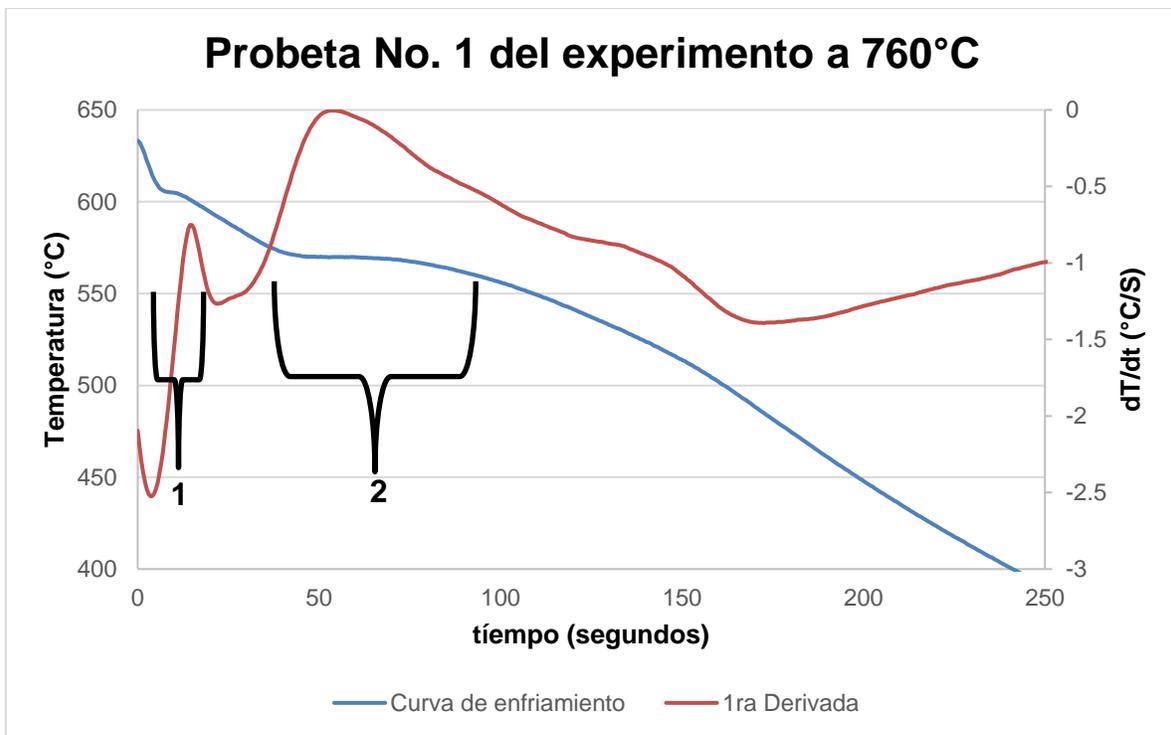


Figura 27. Curva de enfriamiento y su primera derivada de la probeta No. 1 del experimento con una temperatura de vaciado de 760°C.

La Figura 28 muestra la curva de enfriamiento y primera derivada de la probeta No. 2 del experimento, la cual se hizo con un molde para detectar la señal sin

rechupes, se registró una temperatura máxima de 646°C, una temperatura liquidus de 609°C y una temperatura eutéctica de 572°C.

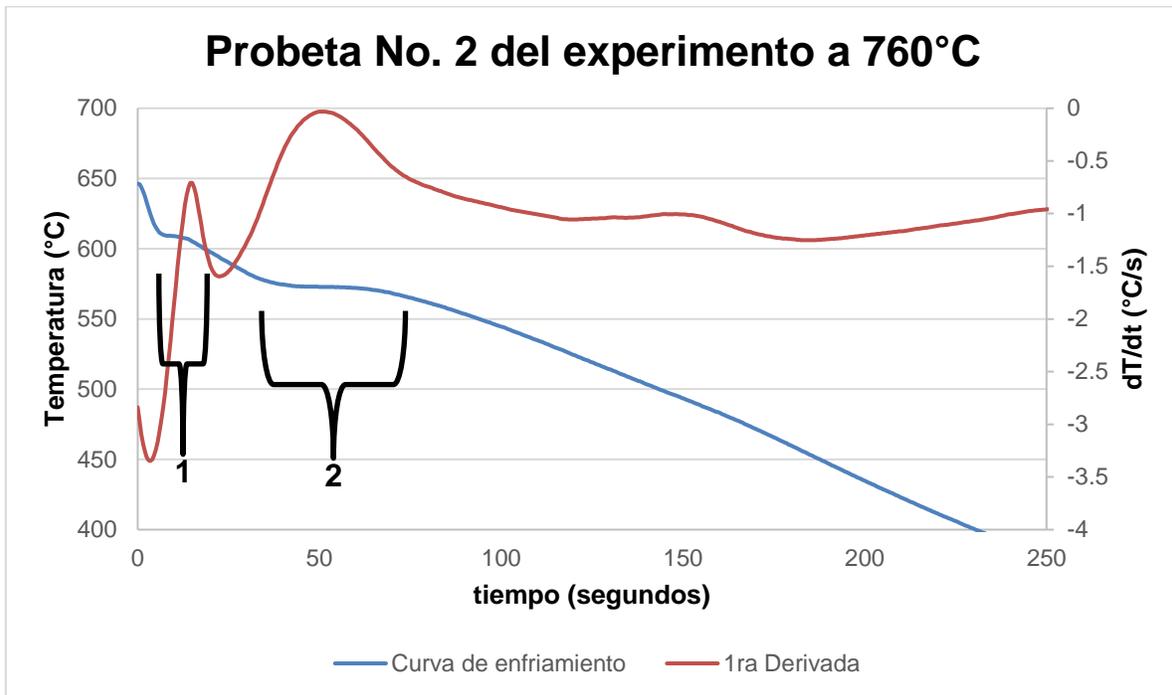


Figura 28. Curva de enfriamiento y su primera derivada de la probeta No. 2 del experimento con una temperatura de vaciado de 760°C.

La Figura 29 muestra la curva de enfriamiento y primera derivada de la probeta No. 3 del experimento, la cual se hizo con un molde para detectar la señal con rechupes, se registró una temperatura máxima de 633°C, una temperatura liquidus de 607°C y una temperatura eutéctica de 572°C.

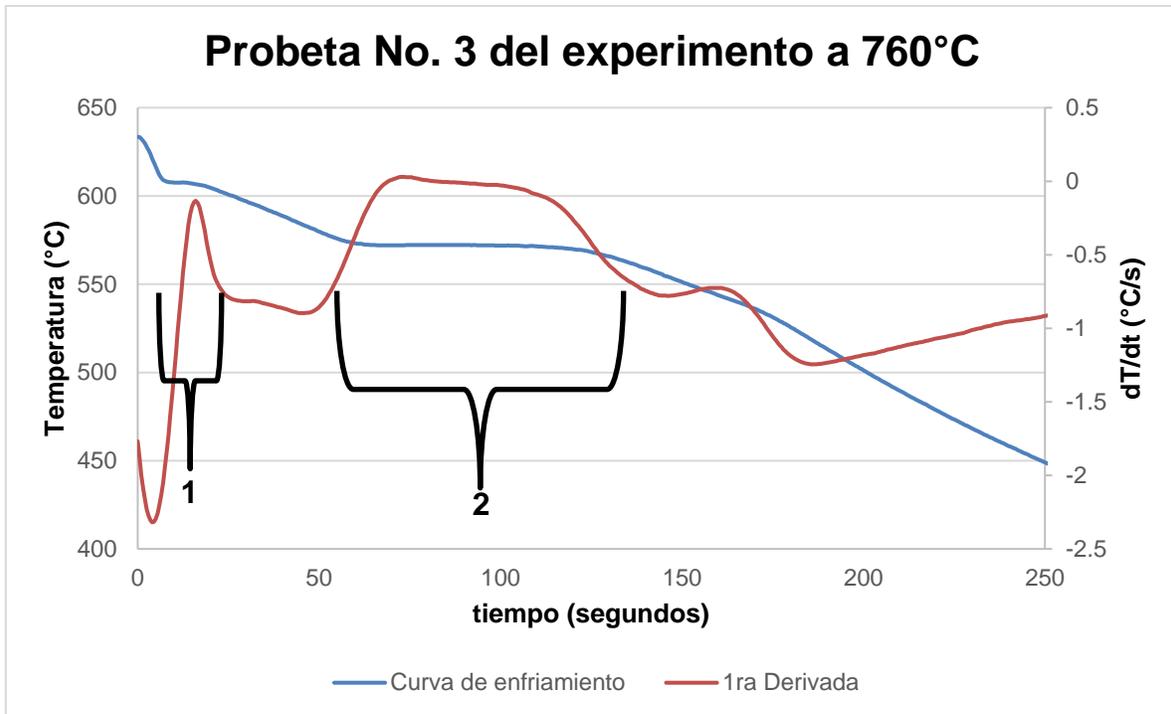


Figura 29. Curva de enfriamiento y su primera derivada de la probeta No. 3 del experimento con una temperatura de vaciado de 760°C.

La Figura 30 muestra la curva de enfriamiento y primera derivada de la probeta No. 4 del experimento, la cual se hizo con un molde para detectar la señal con rechupes, se registró una temperatura máxima de 654°C, una temperatura liquidus de 607°C y una temperatura eutéctica de 570°C.

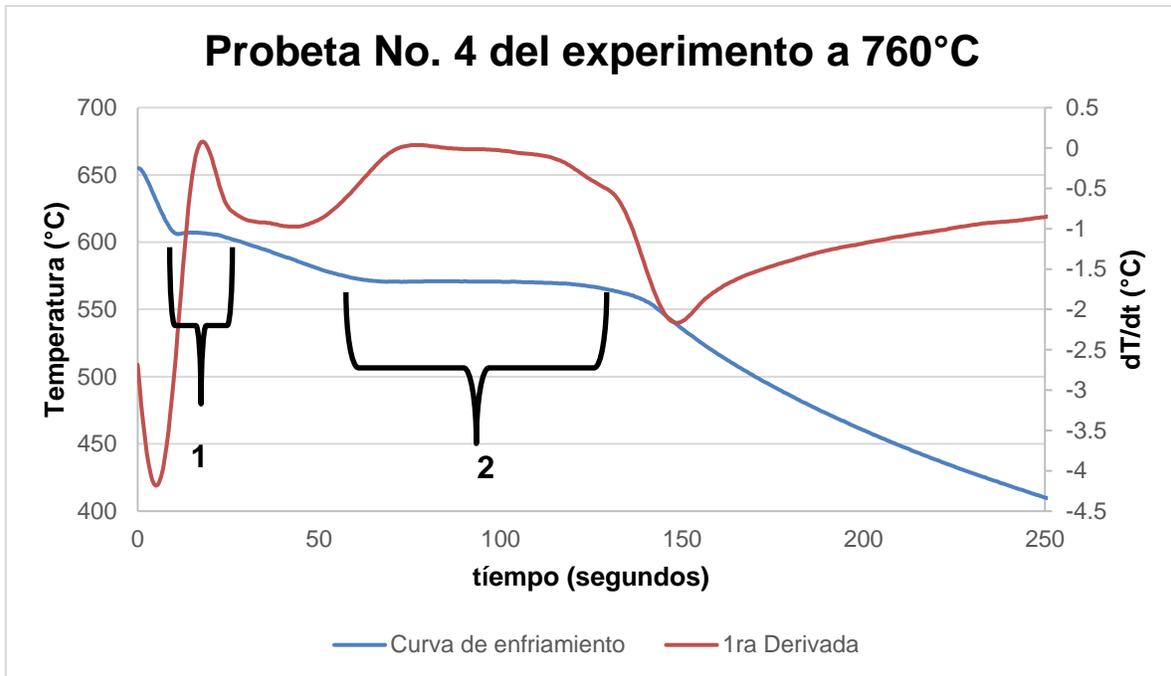


Figura 30. Curva de enfriamiento y su primera derivada de la probeta No. 4 del experimento con una temperatura de vaciado de 760°C.

En las cuatro probetas se puede observar de forma clara el desarrollo del enfriamiento y solidificación de la aleación, debido a que la temperatura de vaciado de 760°C es más alta en comparación con la temperatura de liquidus de la aleación de acuerdo al diagrama de fases en equilibrio de Al-Si, el adquisidor de datos pudo registrar la formación de las primeras dendritas de Al α (liquidus), la reacción eutéctica y el enfriamiento de la probeta sólida.

3.3. Fotografías de la superficie interna de una probeta con rechupes y una probeta sin rechupes, para cada experimento.

En esta sección se muestran las fotografías de la superficie interna de dos probetas de cada uno de los 3 experimentos, una probeta con rechupes dispersos y otra probeta sin rechupes dispersos.

Los experimentos se hicieron por duplicado, es decir, se usaron dos moldes para detectar la señal de la formación de rechupes y dos moldes para detectar la señal sin rechupes, sin embargo en cada uno de los experimentos, solo un molde para detectar la señal sin rechupes alcanzó el objetivo de inhibir la aparición de rechupes en la zona donde se colocó la punta del termopar. Por lo que en esta sección solo se muestra por cada experimento la probeta del molde para detectar la señal sin rechupes en donde no se formaron los rechupes alrededor de la punta del termopar y una probeta de los moldes en donde sí se formaron rechupes.

3.3.1. Fotografías de las probetas del experimento a 680°C.

La Figura 31 muestra el corte transversal de la probeta No. 3 del experimento con una temperatura de vaciado de 680°C, la cual se hizo con un molde para detectar la señal con rechupes, se observa que el termopar fue removido durante el corte de la pieza, pero se puede observar el hueco y la zona donde se encontraba la punta del termopar. En esta zona se observa una pequeña cantidad de rechupes.

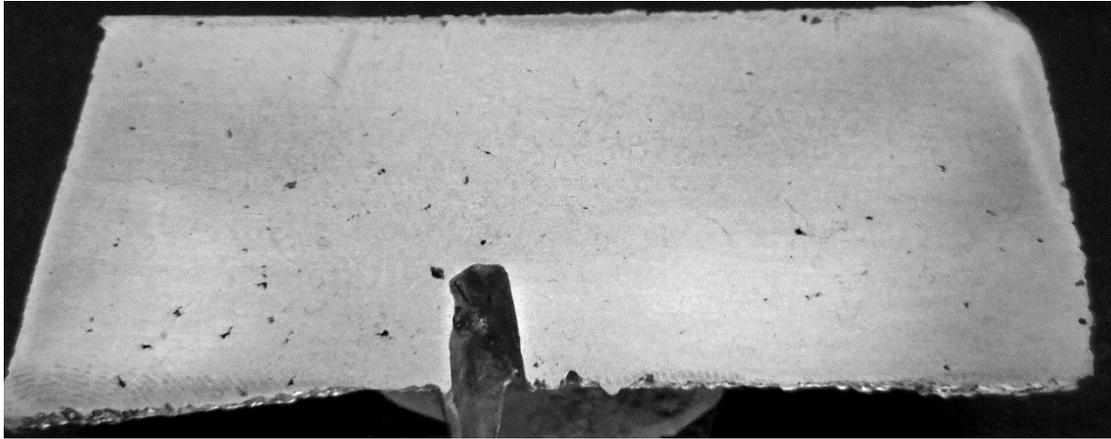


Figura 31. Corte transversal de la probeta No. 3 del experimento con una temperatura de vaciado de 680°C , preparada metalográficamente a lija 1200, en donde se observa una pequeña cantidad de rechupes cerca de la punta del termopar.

La Figura 32 muestra el corte transversal de la probeta No. 2 del experimento con una temperatura de vaciado de 680°C , la cual se hizo con un molde para detectar la señal sin rechupes, en la zona que rodea la punta del termopar no se observan rechupes dispersos.

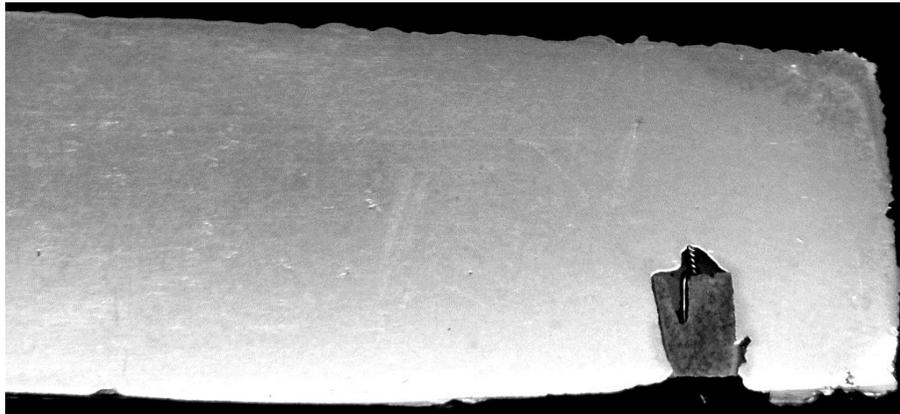


Figura 32. Corte transversal de la probeta No. 2 del experimento con una temperatura de vaciado de 680°C , preparada metalográficamente a lija 1200 y en donde no se observan rechupes alrededor de la punta del termopar.

3.3.2. Fotografías de las probetas del experimento a 720°C.

La Figura 33 muestra el corte transversal de la probeta No. 3, del experimento con una temperatura de vaciado de 720°C, la cual se hizo con un molde para detectar la señal con rechupes, en donde se observa el termopar, y la zona que rodea la punta del termopar. En esta zona se observa una gran cantidad de rechupes dispersos.

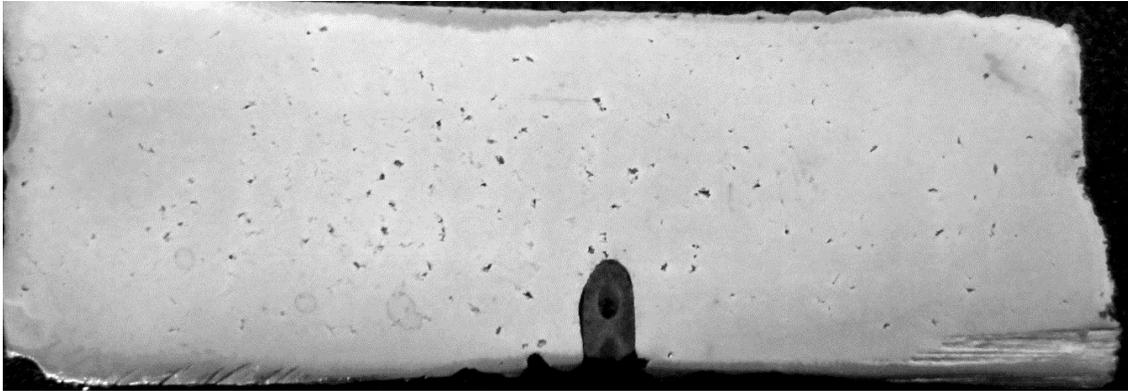


Figura 33. Corte transversal de la probeta No. 3 del experimento con una temperatura de vaciado de 720°C, preparada metalográficamente a lija 1200 y pulida, en donde se observan una gran cantidad de rechupes cerca de la punta del termopar.

La Figura 34 muestra el corte transversal de la probeta No. 2 del experimento con una temperatura de vaciado de 720°C, la cual se hizo en un molde para detectar la señal sin rechupes y en la zona que rodea la punta del termopar no se observan rechupes dispersos.

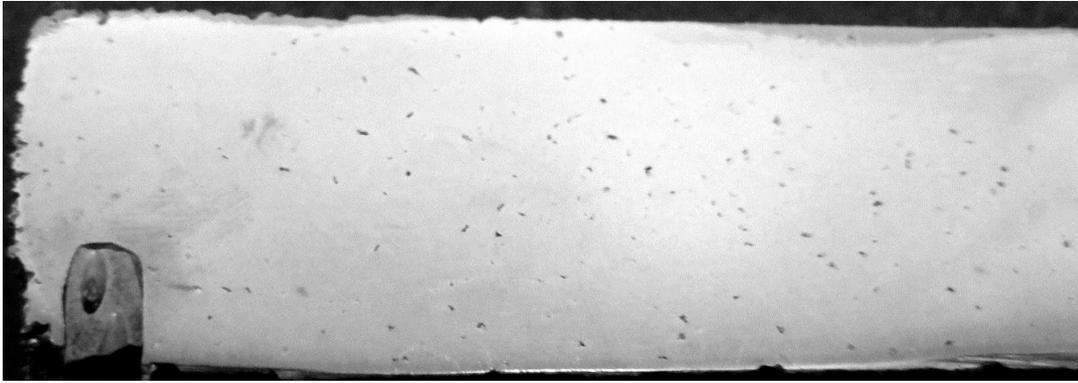


Figura 34. Corte transversal de la probeta No. 2 del experimento con una temperatura de vaciado de 720°C, preparada metalográficamente a lija 1200 y pulida, en donde se observa que en la zona alrededor de la punta del termopar no hay rechupes.

3.3.3. Fotografías de las probetas del experimento a 760°C.

La Figura 35 muestra el corte transversal de la probeta No. 4 del experimento con una temperatura de vaciado de 760°C, la cual se hizo con un molde para detectar la señal con rechupes. En donde se observa una pequeña cantidad de rechupes dispersos en la zona que rodea la punta del termopar.

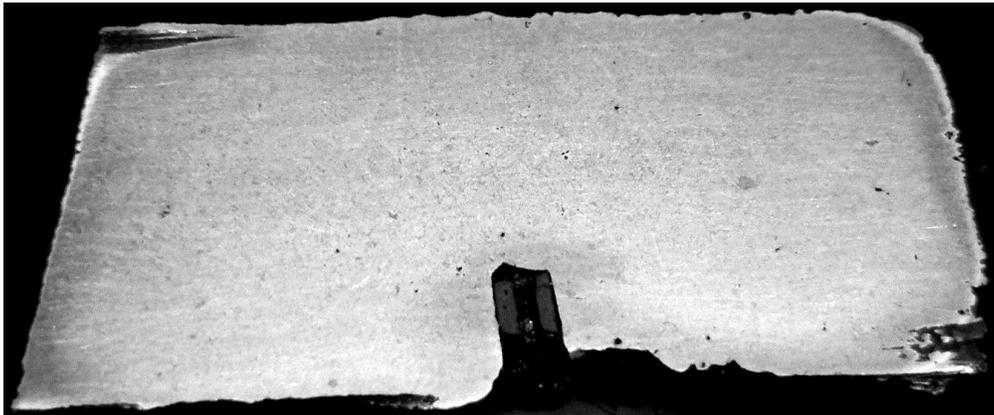


Figura 35. Corte transversal de la probeta No. 4 del experimento con una temperatura de vaciado de 760°C, preparada metalográficamente a lija 1200, en donde se observa una pequeña cantidad de rechupes cerca de la punta del termopar.

La Figura 36 muestra el corte transversal de la probeta No. 2 del experimento con una temperatura de vaciado de 760°C, la cual se hizo con una probeta para detectar la señal sin rechupes, en donde no se observan rechupes en la zona que rodea la punta del termopar.

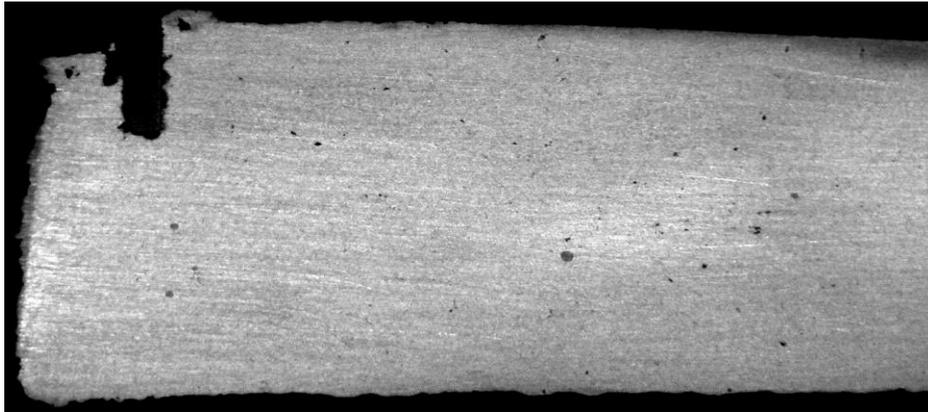


Figura 36. Corte transversal de la probeta No. 2 del experimento con una temperatura de vaciado de 760°C, preparada metalográficamente a lija 1200, en donde no se observan rechupes cerca de la punta del termopar.

3.4. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas, entre las probetas con rechupes dispersos y las probetas sin rechupes dispersos.

En esta sección se realizará la comparación de las curvas de enfriamiento y las primeras derivadas de las probetas con y sin rechupes, para determinar las inflexiones de la curva correspondientes al inicio y final de la formación de los rechupes dispersos.

3.4.1. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas del primer experimento con temperatura de vaciado de 680°C.

En la Figura 37 se observa, la comparación de las curvas de enfriamiento y sus primeras derivadas, entre la probeta No. 2 y la No. 3, para el experimento con temperatura de vaciado de 680°C. Se puede ver que las curvas de enfriamiento y primera derivada de la probeta No. 2, están más estrechas, que las curvas de la probeta No. 3, debido a que la 2 se hizo en un molde para detectar la señal sin rechupes en donde la velocidad de enfriamiento es alta.

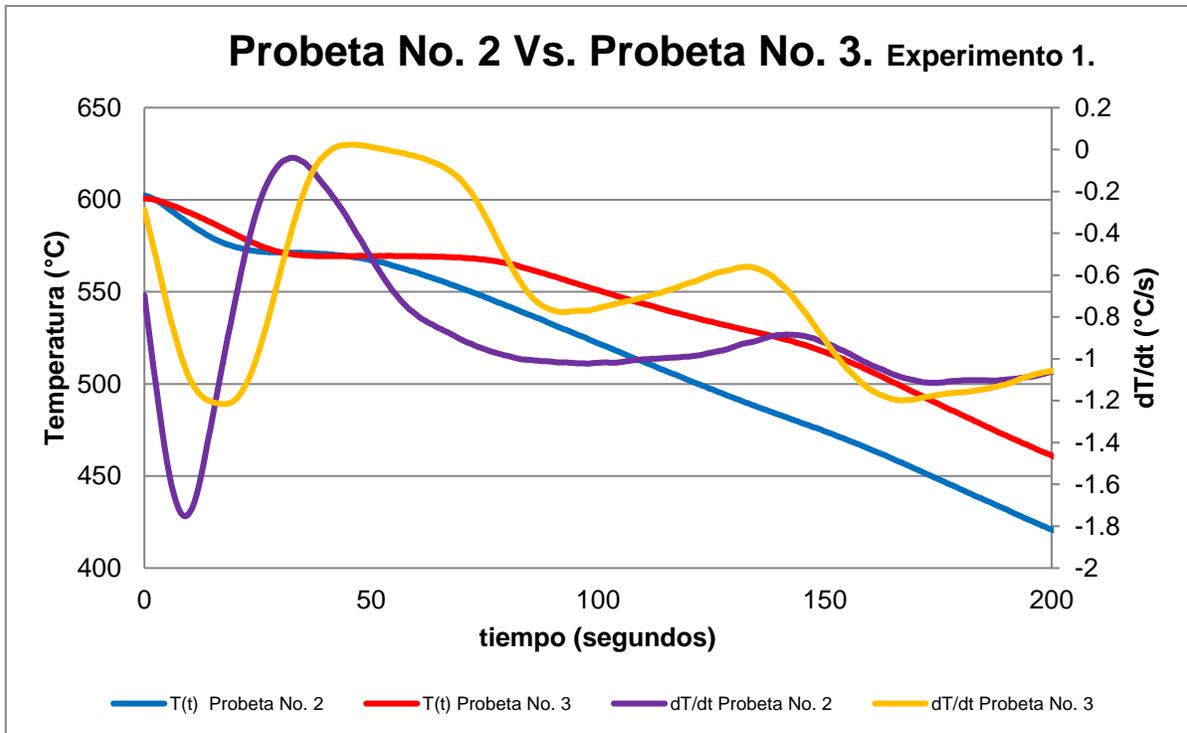


Figura 37. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas entre la probeta No. 2 y la No. 3 del experimento con una temperatura de vaciado de 680°C.

En las probetas No. 2 y No. 3, se observa una disminución en los valores de la primera derivada una vez que termina la reacción eutéctica, es decir un aumento en la velocidad de enfriamiento, hasta que hay un cambio de inflexión en las curvas de la primera derivada, hay un aumento en los valores de la primera derivada, la velocidad de enfriamiento disminuye en ambas probetas.

En el caso de la probeta No. 3 hay un aumento rápido en los valores de la primera derivada hasta un valor máximo, antes de que los valores de la primera derivada disminuyan y se presente un cambio de inflexión, en donde la velocidad de enfriamiento aumenta mucho durante un breve lapso, hasta el último cambio de inflexión en la curva de la primera derivada en donde los valores de la primera derivada aumentan lentamente hasta el final del experimento.

En el caso de la probeta No. 2 hay un aumento lento en los valores de la primera derivada, el cual se prolonga hasta que se llega a un valor máximo y se presenta un cambio de inflexión en la curva en donde los valores de la primera derivada disminuyen ligeramente, hasta la última inflexión en la curva de la primera derivada en donde los valores aumentan progresivamente hasta el final del experimento.

En la Figura 38 se observa la comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas, entre la probeta No. 2 y la No. 4 del experimento con temperatura de vaciado de 680°C. La curva de enfriamiento y primera derivada de la probeta No. 2 están más estrechas, que las curvas de la probeta No. 4 las cuales se ven más alargadas, debido a que esta se hizo en un molde para detectar la señal con rechupes.

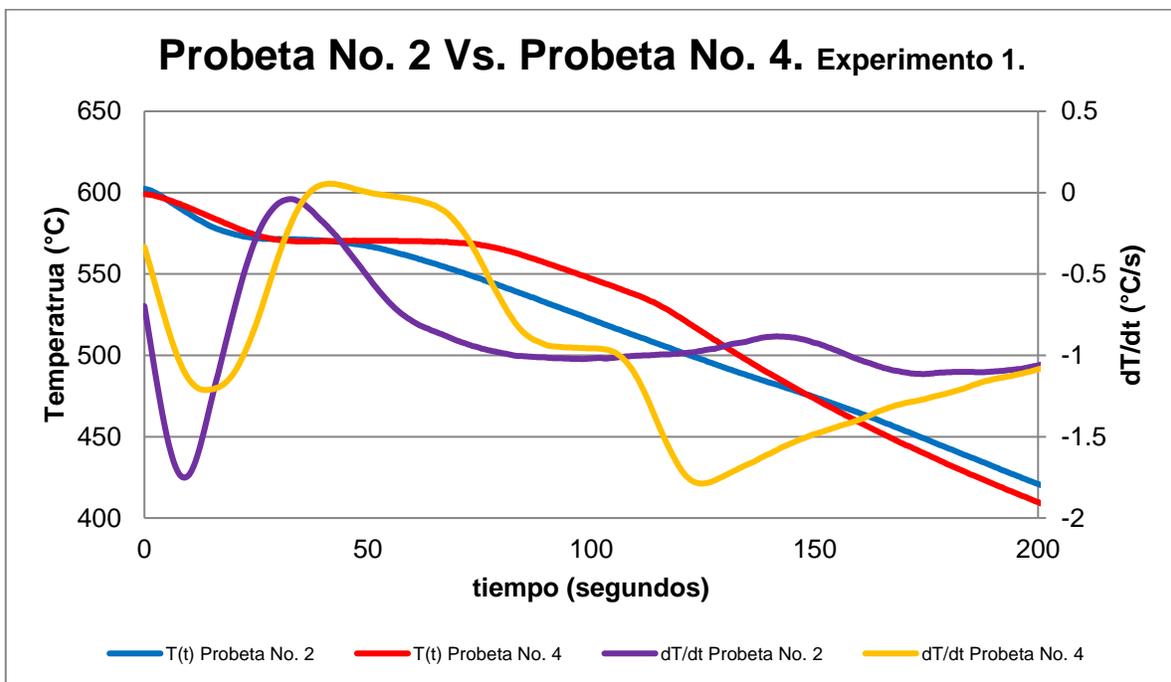


Figura 38. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas entre la probeta No. 2 y la No. 4 del experimento con una temperatura de vaciado de 680°C.

Las curvas de la primera derivada de ambas probetas siguen la misma tendencia hasta el final de la reacción del eutéctico, en ambos casos hay una disminución en

los valores de la primera derivada, hasta que se presenta un cambio de inflexión en las curvas y se presentan dos comportamientos diferentes en ambas probetas.

En el caso de la probeta No. 4 hay un cambio de inflexión a una pendiente horizontal, en donde los valores de la primera derivada se mantienen constantes durante un breve lapso de tiempo, es decir la velocidad de enfriamiento se mantiene constante, hasta que hay otro cambio de inflexión a una pendiente negativa, un aumento en la velocidad de enfriamiento durante un pequeño lapso de tiempo, después hay un último cambio de inflexión a una pendiente positiva que aumenta progresivamente hasta el final del experimento.

En el caso de la probeta No. 2 hay un aumento en los valores de la primera derivada y se aprecia la formación de una pequeña meseta, hasta que estos disminuyen una vez más durante un breve lapso, hasta el último cambio de inflexión en donde los valores aumentan progresivamente hasta el final del experimento.

En la Figura 39 se observa la comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas, entre la probeta No. 1 y la No. 2 del experimento con temperatura de vaciado de 680°C. Aunque la probeta No. 1 se hizo en un molde para detectar la señal sin rechupes, no se logró el objetivo de inhibir la aparición de rechupes en la zona alrededor de la punta del termopar, por lo que se hizo la comparación con la probeta No. 2 en la cual no se formaron rechupes en la zona alrededor de la punta del termopar (Figura 32).

Se puede ver que las curvas de enfriamiento y primeras derivadas de ambas probetas son parecidas excepto en la etapa final.

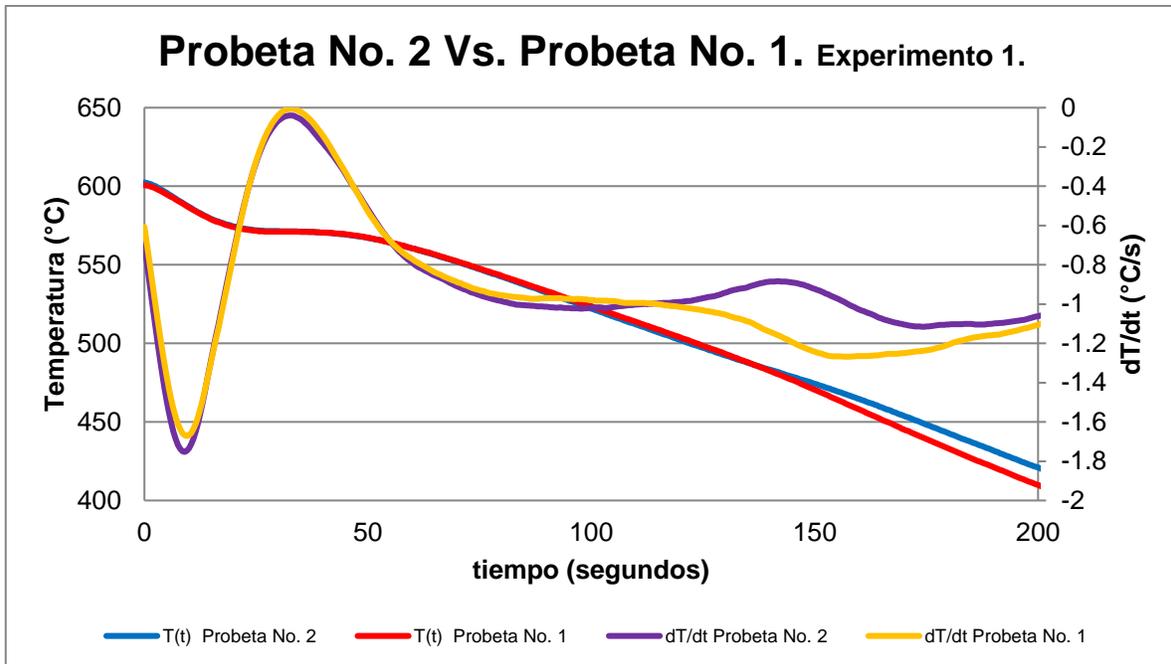


Figura 39. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas entre la probeta No. 1 y la No. 2 del experimento con una temperatura de vaciado de 680°C.

Al final de la reacción del eutéctico, se puede ver una disminución en los valores de la primera derivada de ambas probetas, es decir un aumento de la velocidad de enfriamiento, después hay dos comportamientos en las curvas de la primera derivada que diferencian a la probeta No. 2 y la No. 1.

En el caso de la probeta No. 1 los valores de la primera derivada se mantienen constantes durante un lapso, después hay un cambio de inflexión en la curva a una pendiente negativa, la velocidad de enfriamiento aumentó durante un breve lapso de tiempo, hasta el último cambio de inflexión a una pendiente positiva que aumenta lentamente hasta el final del experimento.

En el caso de la probeta No. 2 hay un aumento en los valores de la primera derivada, que da paso a la formación de una pequeña meseta en la curva de la primera derivada hasta que estos empiezan a disminuir hasta el último cambio de inflexión a una pendiente negativa que aumenta lentamente hasta el final del experimento.

3.4.2. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas del segundo experimento con temperatura de vaciado de 720°C.

En la Figura 40 se observa la comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas, entre la probeta No. 2 y la No. 3 del experimento con temperatura de vaciado de 720°C. Las curvas de enfriamiento y primera derivada de la probeta No. 3 están más alargadas que las curvas de la probeta No. 2, debido a la diferencia de velocidades de enfriamiento del molde para detectar la señal sin rechupes y del molde para detectar la señal con rechupes.

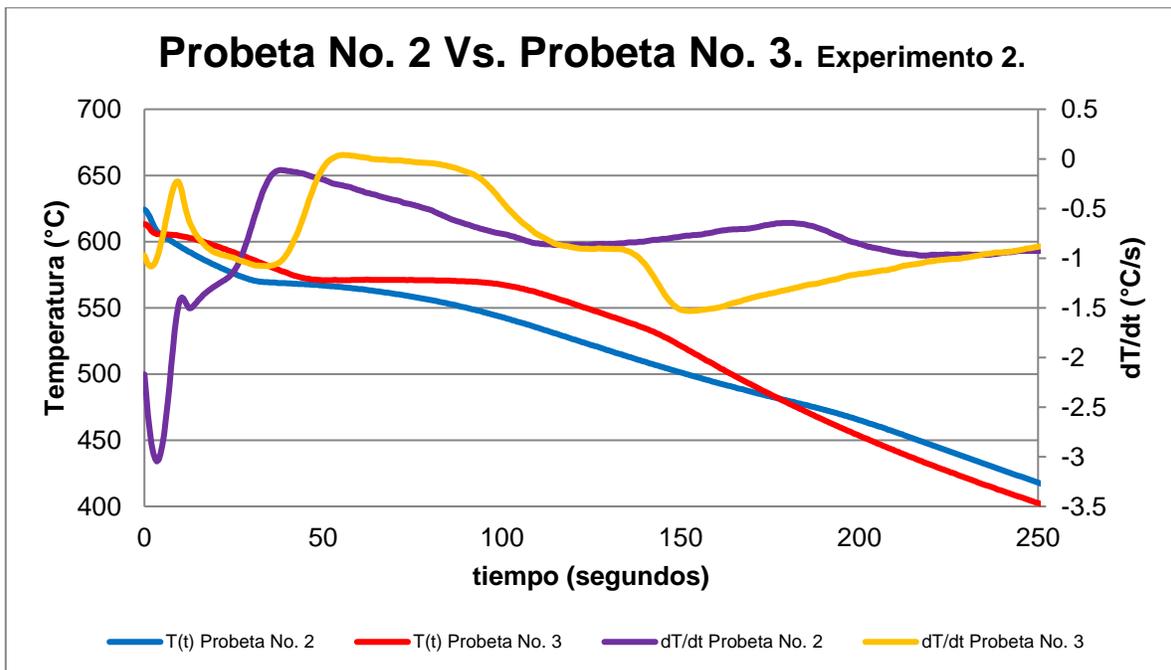


Figura 40. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas entre la probeta No. 2 y la No. 3 del experimento con una temperatura de vaciado de 720°C.

La curva de la primera derivada correspondiente a la probeta No. 2 se ve aplanada con respecto a la curva de la probeta No. 3, sin embargo se pueden apreciar las inflexiones de la curva correspondientes a la solidificación de la probeta.

En ambas curvas se observa la mesetas correspondientes a la formación de las primeras dendritas de Al α (liquidus) y a la reacción eutéctica, al finalizar dicha reacción, hay una disminución en los valores de la primera derivada en ambas

curvas por lo que la velocidad de enfriamiento aumenta en ese periodo, a partir de aquí hay dos comportamientos diferentes en las curvas de la primera derivada.

En el caso de la probeta No. 3 hay un cambio de inflexión a una pendiente horizontal, los valores de la primera derivada se mantienen constantes durante este periodo, después la velocidad de enfriamiento aumenta mucho durante un pequeño lapso, hasta que hay un último cambio de inflexión a una pendiente positiva que aumenta progresivamente hasta el final del experimento.

En el caso de la probeta No. 2, hay un aumento en los valores de la primera derivada, se forma una pequeña meseta durante un pequeño lapso de tiempo, después estos empiezan a disminuir hasta el último cambio de inflexión de la curva en donde aumentan progresivamente y sin cambios hasta el final del experimento.

En la Figura 41 se observa la comparación de las curvas de enfriamiento y primera derivada entre la probeta No. 2 y la No. 4, para el experimento con temperatura de vaciado de 720°C.

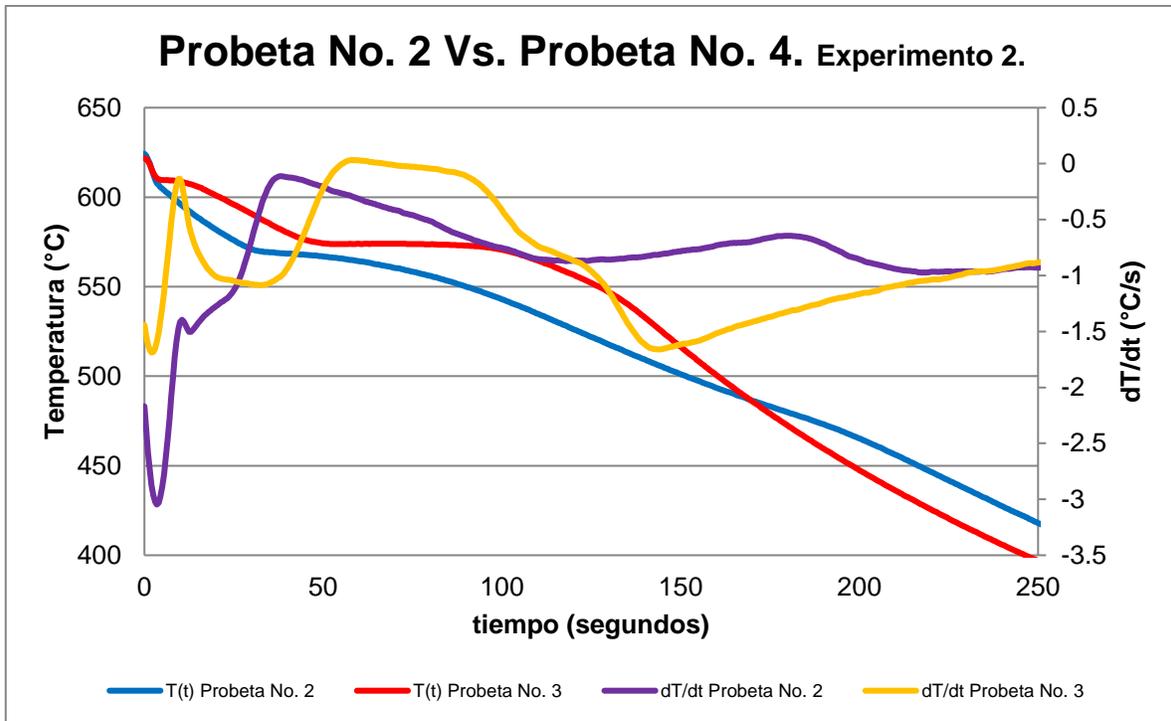


Figura 41. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas entre la probeta No. 2 y la No. 4 del experimento con una temperatura de vaciado de 720°C.

Ambas curvas de la primera derivada presentan las mesetas correspondientes a la temperatura liquidus y la reacción eutéctica, al final de dicha reacción hay una disminución en los valores de la primera derivada, después se distinguen dos comportamientos diferentes en las curvas de la primera derivada.

En el caso de la probeta No. 4 hay un cambio de inflexión a una pendiente negativa menos pronunciada, los valores de la primera derivada disminuyen lentamente, después hay otro cambio de inflexión en la curva en donde estos disminuyen rápidamente durante un breve lapso, hasta que se presenta el último cambio de inflexión en la curva de la primera derivada en donde aumentan progresivamente durante el resto del experimento.

En el caso de la probeta No. 2 hay un aumento en los valores de la primera derivada, se forma una meseta en la curva, después hay una disminución lenta de

estos, hasta el último cambio de inflexión en la curva en donde aumentan progresivamente hasta el final del experimento.

En la Figura 42 se observa, la comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas entre la probeta No. 2 y la No. 1, para el experimento con temperatura de vaciado de 720°C. Se puede ver que las curvas de enfriamiento y primeras derivadas son casi idénticas debido a que se usó el molde para detectar la señal sin rechupes para ambas probetas.

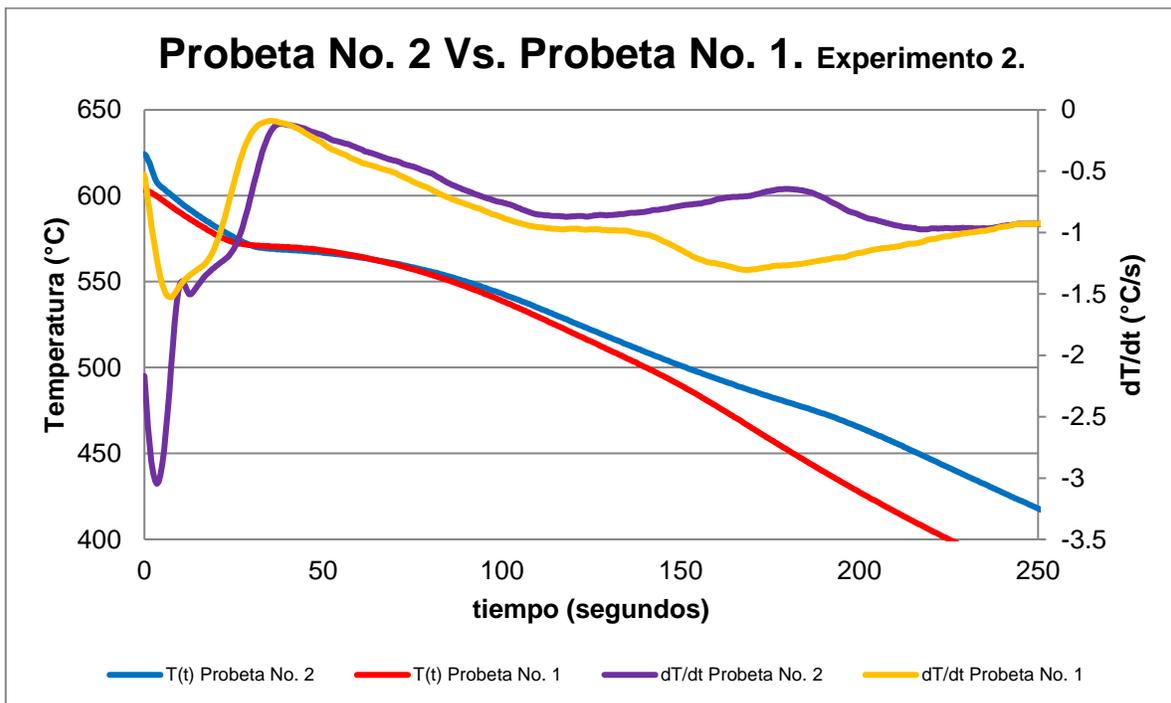


Figura 42. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas entre la probeta No. 2 y la No. 1 del experimento con una temperatura de vaciado de 720°C.

No se registró la temperatura de liquidus de la probeta No. 1, pero si se aprecia la meseta correspondiente a la reacción eutéctica, la cual es idéntica a la curva de la primera derivada de la probeta No. 2. Al final de la reacción del eutéctico hay una disminución en los valores de la primera derivada en ambas curvas, después hay dos comportamientos que diferencian a ambas probetas.

En el caso de la probeta No. 1 los valores de la primera derivada se vuelven constantes durante un pequeño lapso, después estos disminuyen, es decir un aumento en la velocidad de enfriamiento durante un breve lapso de tiempo, hasta que se presenta el último cambio de inflexión a una pendiente positiva que aumenta de forma progresiva hasta el final del experimento.

En el caso de la probeta No. 2 hay un aumento en los valores de la primera derivada, se forma una meseta en la curva de la primera derivada, después estos disminuyen hasta que la velocidad de enfriamiento se vuelve constante por un breve lapso de tiempo, y por último los valores aumentan progresivamente hasta el final del experimento.

3.4.3. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas del tercer experimento con temperatura de vaciado de 760°C.

En la Figura 43 se observa la comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas entre la probeta No. 2 y la No. 3, para el experimento con temperatura de vaciado de 760°C.

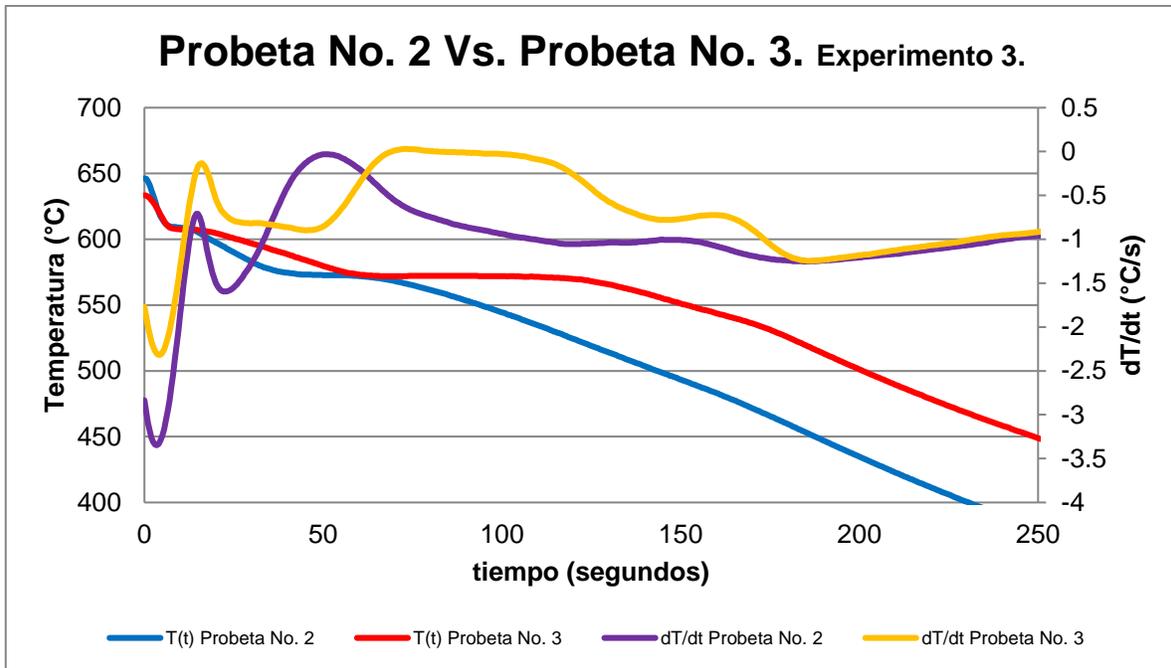


Figura 43. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas entre la probeta No. 2 y la No. 3, del experimento con una temperatura de vaciado de 760°C.

Analizando las curvas de la primera derivada, se puede observar que inicialmente siguen la misma tendencia, ambas presentan las mesetas correspondientes a la formación de las primeras dendritas de Al α (liquidus), y a la reacción eutéctica (solidus), después de la reacción del eutéctico, hay una disminución en los valores de la primera derivada de ambas curvas hasta un nuevo cambio de inflexión.

En el caso de la probeta No. 3 los valores de la primera derivada se vuelven constantes un breve momento, después hay un aumento ligero de estos, seguido de un descenso rápido en un pequeño lapso, al final hay un nuevo cambio de inflexión a una pendiente positiva que aumenta progresivamente hasta el final del experimento.

En el caso de la probeta No. 2 hay un ligero aumento en los valores de la primera derivada, después la velocidad de enfriamiento se vuelve constante durante un breve lapso, seguido de una disminución de estos, hasta que al final los valores vuelven a aumentar progresivamente hasta el final del experimento.

En la Figura 44 se observa la comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas, entre la probeta No. 2 y la No. 4 para el experimento con temperatura de vaciado de 760°C. Se puede ver que las curvas de enfriamiento y primera derivada de la probeta No. 4 están más alargadas que las curvas de la probeta No. 2, debido a la diferencia de velocidad de enfriamiento de los dos tipos de moldes utilizados.

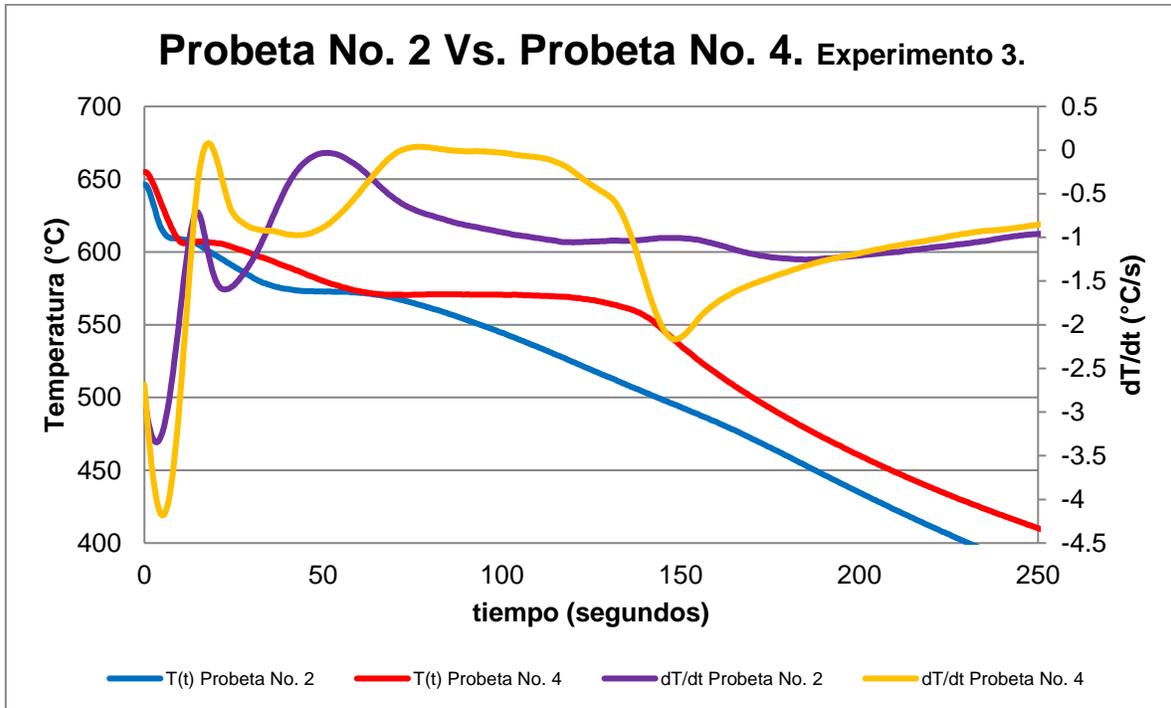


Figura 44. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas entre la probeta No. 2 y la No. 4 del experimento con una temperatura de vaciado de 760°C.

Las curvas de la primera derivada de ambas curvas siguen la misma tendencia al principio del enfriamiento, se observan las mesetas que corresponden a la formación de las primeras dendritas de Al α (liquidus) y a la formación del eutéctico (solidus). Después de la reacción del eutéctico, hay una disminución en los valores de la primera derivada de ambas probetas, es decir un aumento en la velocidad de enfriamiento hasta que se presenta un nuevo cambio de inflexión en

las curvas de la primera derivada, en donde se pueden ver dos comportamientos diferentes.

En el caso de la probeta No. 4 se puede observar una disminución en los valores de la primera derivada, es decir que hay un aumento en la velocidad de enfriamiento en un lapso corto, hasta que hay un nuevo cambio de inflexión en la curva a una pendiente positiva que aumenta progresivamente hasta el final del experimento.

En el caso de la probeta No. 2 hay un ligero aumento en los valores de la primera derivada, se forma una pequeña meseta durante unos segundos, hasta que estos empiezan a disminuir lentamente, por último se presenta otro cambio de inflexión en la curva, en donde los valores aumentan progresivamente hasta el final del experimento.

En la Figura 45 se observa, la comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas entre la probeta No. 2 y la No. 1, para el experimento con temperatura de vaciado de 760°C. Ambas probetas tienen la misma velocidad de enfriamiento debido a que las dos se hicieron en un molde para detectar la señal sin rechupes.

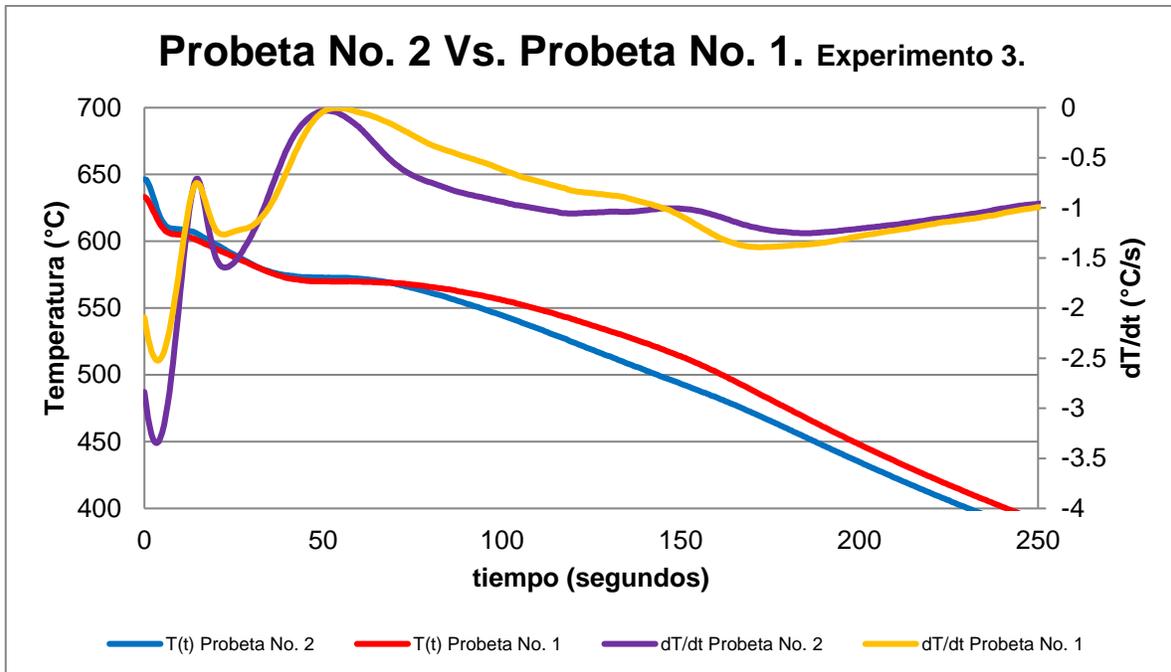


Figura 45. Comparación de las curvas de enfriamiento y primeras derivadas entre la probeta No. 2 y la No. 1 del experimento con una temperatura de vaciado de 760°C.

El comportamiento de las curvas de la primera derivada para ambas probetas es muy parecido en la fase inicial del enfriamiento, en las dos se puede observar las mesetas correspondientes a la formación de las primeras dendritas de Al α (liquidus), y a la formación del eutéctico (solidus). Después de la reacción del eutéctico, se presenta una disminución en los valores de la primera derivada en ambas probetas, después hay dos diferentes comportamientos en las curvas de la primera derivada.

En el caso de la probeta No. 1 hay una disminución en los valores de la primera derivada, hay un cambio de inflexión a una pendiente negativa, es decir la velocidad de enfriamiento aumenta, hasta que nuevamente hay un cambio de inflexión, en donde los valores aumentan progresivamente hasta el final del experimento.

En el caso de la probeta No. 2 hay un aumento en los valores de la primera derivada, se forma una meseta durante unos segundos, hasta que estos

disminuyen, por último hay un cambio de inflexión a una pendiente positiva que aumenta progresivamente hasta el final del experimento.

Comparando las curvas de la primera derivada (dT/dt), entre las probetas en donde no se formaron rechupes dispersos y las probetas en donde se formaron rechupes alrededor de la punta del termopar. Se observa que los cambios de pendiente asociados a las reacciones de solidificación son similares en todas las probetas, es después de la reacción del eutéctico donde se aprecia la diferencia entre ambas probetas.

Al terminar la reacción del eutéctico hay un aumento en la velocidad de enfriamiento, los valores de la primera derivada disminuyen debido al enfriamiento de la aleación hasta que se presenta un cambio de inflexión en las curvas de la primera derivada.

En las curvas de la primera derivada de las probetas en donde no se formaron los rechupes, se observa la formación de una meseta, primero hay un ligero aumento en los valores de la primera derivada llegando a un valor máximo antes de que estos disminuyan lentamente hasta el último cambio de inflexión en la curva.

En las curvas de la primera derivada de las probetas en donde se formaron los rechupes, se observa un cambio de inflexión a una pendiente horizontal o negativa, la velocidad de enfriamiento se ve atenuada durante un breve lapso hasta que la velocidad de enfriamiento empieza a aumentar de nuevo hasta el último cambio de inflexión en la curva en donde los valores de la primera derivada aumentan lentamente hasta el final del experimento. Solo en dos ocasiones este comportamiento es diferente, en la probeta No. 3 del experimento con temperatura de vaciado de 680°C y la probeta No. 3 del experimento con temperatura de vaciado de 760°C , en los cuales se ve un aumento en los valores de la velocidad de enfriamiento, si se observa la superficie interna de las probetas, se puede ver que los rechupes que se formaron están a cierta distancia de la punta del termopar.

El aumento de los valores de la primera derivada y la formación de una meseta en la curva de las probetas en donde no se formaron rechupes dispersos, es muy parecido a los cambios de pendiente que señalan la precipitación de otro compuesto, el aumento en los valores es provocada por la liberación de calor latente, es este caso puede deberse a una reacción eutéctica secundaria de acuerdo con los solutos de la aleación.

Esta liberación de calor latente sólo es percibida en dos de las probetas en donde se formaron los rechupes dispersos, en las demás no hay un aumento en los valores de la primera derivada, pero se observa un cambio drástico en la velocidad de enfriamiento por el cambio de inflexión en las curvas de la primera derivada hacia una pendiente horizontal o una pendiente negativa menos pronunciada, lo que señala que la conductividad térmica se vio afectada por la formación de los rechupes dispersos cerca de la punta del termopar, la transferencia de calor se ve interrumpida por la porosidad entre la zona en donde se encuentra la punta del termopar y la zona en donde se encuentra el mayor volumen de la aleación, dependiendo de la cantidad de rechupes y que tan alejados se encuentran de la punta del termopar.

3.5. Tablas de resultados.

En las tablas 3, 4 y 5 se muestra información tomada de las curvas de enfriamiento y sus primeras derivadas, para los experimentos a 680°C, 720°C y 760°C respectivamente. Los datos son: temperatura máxima que se registró, temperatura liquidus y solidus (eutéctico), temperatura de inicio y final de la señal de rechupes dispersos en las probetas y el tiempo de duración de la señal de los rechupes.

3.5.1. Tabla del primer experimento con temperatura de vaciado de 680°C.

En la Tabla 3 se muestran los datos concernientes a las curvas de enfriamiento y primera derivada, del primer experimento con temperatura de vaciado de 680°C.

Tabla 3. Datos obtenidos del tratamiento de las curvas de enfriamiento y su primera derivada para las probetas del experimento a 680°C.

Probeta No.:	Temperatura (°C)				Tiempo (s)
	Máxima	Solidus (Eutéctico)	Inicio de la señal del rechupe	Fin de la señal del rechupe	Duración de la señal de los rechupes
1	600.6	571	506	468	37
2	602.3	571			
3	600.6	569	529	499	32
4	599.1	570	542	516	20

Se puede ver que en las 4 probetas se obtuvieron temperaturas eutécticas similares, de 569°C a 571°C. En las temperaturas de inicio y final de la señal de los rechupes se puede ver una diferencia entre las 4 probetas, en la probeta No. 3 la temperatura en la que se inició la señal de los rechupes es de 529°C y terminó en la temperatura de 499°C, con una diferencia de 30°C y un tiempo de 32 segundos. Si observamos la superficie interna de probeta No. 3 (Figura 31), hay una mayor concentración de rechupes en la parte superior e inferior de la probeta

y en la zona alrededor de la punta del termopar hay una pequeña cantidad de rechupes.

En la probeta No. 4 la señal de los rechupes inició a los 542°C y terminó a los 516°C, con una diferencia de 26°C y un tiempo de 20 segundos. Al observar la superficie interna de la probeta, se ve una gran concentración de rechupes en la parte central de la probeta y en la zona alrededor de la punta del termopar.

En la probeta No. 1 la señal de los rechupes inició a los 506°C y finalizó a los 468°C, con una diferencia de 38°C y un tiempo de 37 segundos. Al observar la superficie interna de la probeta, se puede ver una gran concentración de rechupes en la zona alrededor de la punta del termopar.

En la probeta No. 2 no se formaron rechupes de acuerdo al análisis térmico, si observamos la superficie interna de la probeta (Figura 32), no hay rechupes en la zona alrededor de la punta del termopar, pero si hay en la parte superior de la probeta.

3.5.2. Tabla del segundo experimento con temperatura de vaciado de 720°C.

En la Tabla 4 se pueden observar los datos concernientes a las curvas de enfriamiento y primera derivada, del segundo experimento con temperatura de vaciado de 720°C.

Tabla 4. Datos obtenidos del tratamiento de las curvas de enfriamiento y su primera derivada para las probetas del experimento a 720°C.

Probeta No.:	Temperatura (°C)				Tiempo (s)	
	Máxima	Liquidus	Solidus (Eutéctico)	Inicio de la señal del rechupe	Fin de la señal del rechupe	Duración de la señal de los rechupes
1	603.3		571.1	500	467	28
2	624.2	607.7	569.6			
3	613.2	605.3	570.9	540	519	18
4	621.7	609.5	573.9	553	528	19

Se puede ver que solo en la probeta No. 1 no se alcanzó a registrar la temperatura de liquidus, en las otras 3 probetas la temperatura de liquidus varía ligeramente desde los 605.3°C a 609.5°C. En la temperatura eutéctica también hay una ligera variación en las 4 probetas, desde los 569.6°C a 573.9°C.

En la probeta No. 3 la temperatura del inicio de la señal de los rechupes es de 540°C y finaliza a los 519°C, con una diferencia de 21°C y un tiempo de 18 segundos. En la superficie interna de la probeta (Figura 33), se puede ver que hay una gran concentración de rechupes en el centro de la probeta y en la zona alrededor de la punta del termopar.

En la probeta No. 4 el inicio de la señal de los rechupes fue a la temperatura de 553°C y finalizó a los 528°C, con una diferencia de 25°C y un tiempo de 19 segundos. En la superficie interna de la probeta se observan muchos rechupes en el centro de la probeta y en la zona alrededor de la punta del termopar.

En la probeta No. 1 el inicio de la señal de los rechupes fue a la temperatura de 500°C y finalizó a la temperatura de 467°C, con una diferencia de 33°C y un tiempo de 28 segundos. En la superficie interna de la probeta se observa una gran cantidad de rechupes en la zona alrededor de la punta del termopar.

En la probeta No. 2 no hay formación de rechupes, de acuerdo a las curvas de enfriamiento y primera derivada. En la superficie interna de la probeta (Figura 34), no se observan rechupes en la zona alrededor de la punta del termopar, pero si hay una pequeña cantidad de rechupes en la parte superior de la probeta.

3.5.3. Tabla del tercer experimento con temperatura de vaciado de 760°C.

En la Tabla 5 se pueden observar los datos concernientes a las curvas de enfriamiento y primera derivada, del tercer experimento con temperatura de vaciado de 760°C.

Tabla 5. Datos obtenidos del tratamiento de las curvas de enfriamiento y su primera derivada para las probetas a 760 °C.

Probeta No.:	Temperatura (°C)					Tiempo (s)
	Máxima	Liquidus	Solidus (Eutéctico)	Inicio de la señal del rechupe	Fin de la señal del rechupe	Duración de la señal de los rechupes
1	633.2	605.2	569.8	518	487	25
2	646.3	609.5	572.7			
3	633.4	607.5	572.1	543	520	24
4	654.9	607.1	570.5	564	539	17

Se puede ver que las temperaturas de liquidus en las 4 probetas varían ligeramente de 605.2°C a 609.5°C, un rango de temperaturas igual al del segundo experimento a 720°C. Las temperaturas del eutéctico son similares y van en un rango de 569.8°C a 572.7°C, variando solo de 1 a 3 grados.

En la probeta No. 3 el inicio de la señal de los rechupes fue a la temperatura de 543°C y finalizó a la temperatura de 520°C, con una diferencia de 23°C y un tiempo de 24 segundos. En la superficie interna de la probeta se observan varios rechupes en la zona alrededor de la punta del termopar.

En la probeta No. 4 la señal de los rechupes inició a la temperatura de 564°C y finalizó a la temperatura de 539°C, con una diferencia de 25°C y un tiempo de 17 segundos. En la superficie interna de la probeta (Figura 35), se observa una pequeña cantidad de rechupes en la zona alrededor de la punta del termopar.

En la probeta No. 1 la señal de los rechupes inició a la temperatura de 518°C y terminó a la temperatura de 487°C, con una diferencia de 31°C y un tiempo de 25 segundos. En la superficie interna de la probeta se observa una cantidad pequeña de rechupes en la zona alrededor de la punta del termopar.

En la probeta No. 2 no hay formación de rechupes de acuerdo al análisis térmico y si se observa la superficie interna de la probeta (Figura 36) no se observan rechupes en la zona alrededor de la probeta, pero si hay varios en la parte superior de la probeta.

Capítulo 4. Conclusiones.

- La presencia de los rechupes dispersos es detectada por el análisis térmico y se observa como un cambio de inflexión en la curva de la primera derivada a una pendiente horizontal o negativa al finalizar la reacción eutéctica, señalando una disminución en la velocidad de enfriamiento durante un breve lapso antes de que el enfriamiento de la pieza solidificada continúe.
- En las probetas en donde no hay rechupes dispersos en la zona alrededor de la punta del termopar, hay un aumento en los valores de la primera derivada al final de la solidificación, este aumento se le atribuye a una reacción eutéctica secundaria de acuerdo a los solutos de la pieza.
- La conductividad térmica de la pieza se ve afectada por la formación de los rechupes dispersos, ocasionando una interrupción en la transferencia de energía de la pieza al termopar, durante el enfriamiento de la pieza solidificada, lo cual es detectado por la primera derivada de la curva de enfriamiento.
- A través del análisis térmico utilizando la curva de enfriamiento y su primera derivada, se pueden analizar las zonas más críticas de las piezas hechas de aleaciones con rango largo de solidificación a fin de localizar la aparición de rechupes dispersos y posteriormente prevenir su formación, utilizando alimentadores, enfriadores o mejorando el diseño.

Referencias

- ASM, I. (2009). *Casting Design and Performance*. Ohio: ASM International.
- Asthana, R., Kumar, A., & Dahotre, N. (2006). *Materials science in manufacturing*. United States of America: ELSEVIER.
- Boljanovic, V. (2009). *Metal Shaping Processes: Casting and Molding; Particulate Processing; Deformation Processes; and Metal Removal*. Indiana United States of America: Industrial Press, Inc.
- C. C. (s.f. de s.f. de s.f.). *ENGINEERING ARCHIVES*. Obtenido de http://www.engineeringarchives.com/les_matsci_coolingcurves.html
- Frás, E., Kapturkiewicz, W., Burbielko, A., & Lopez, H. (1993). A new concept in thermal analysis of casting . *AFS Transactions*. Vol. 101, 505-511.
- Hernández, F. R., & Sokolowski, J. (1 de Junio de 2005). Thermal analysis and microscopical characterization of Al-Si hypereutectic alloys. Essex, Windsor, Canada: Light Metals Casting Technology.
- Hufnagel. (1992). *Manual del Aluminio*. Alemania: Reverte.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. New Jersey: Prentice Hall.
- Kaufman, J. G. (2004). *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes And Applications*. United States of America: ASM International.
- López, A. M. (2019). *Tecnología de la Fabricación*. España: Edeal.
- O. Sedighi, F. Y. (2018). Investigation on the Effect of Sn on Solidification and Microstructure of AZ91 Magnesium Alloy Using Cooling Curve Thermal Analysis. Narmak, Tehran, Iran: Iran University of Science and Technology.
- Rufe, P. D. (2002). *Fundamentals of Manufacturing*. United States of America: Society of Manufacturing Engineers.
- Shabestari, S., & M.Malekan. (2005). Thermal analysis study of the effect of the cooling rate on the microstructure and solidification parameters of 319 aluminum alloy. Narmak, Tehran, Iran: Faculty of Materials and Metallurgical Engineering.

- Sharifi, A., & Arab, N. (2015). Control of Grain Refinement of A356 Aluminum Alloy by Computer Aided Cooling Curve Analysis. *TMS Middle East - Mediterranean Materials Congress on Energy and Infrastructure Systems*, 119-127.
- Sparkman, D., & Kearney, A. (1994). Breakthrough in aluminium alloy thermal analysis technology for process control. *AFS Transactions*. Vol. 102, 455-460.
- Stefanescu, D. M. (2015). *Science and Engineering of Casting Solidification*. United States of America: Springer.
- Toyserkani, E., Sarker, D., Ibadode, O. O., Liravi, F., Russo, P., & Taherkhani, K. (2020). *Metal Additive Manufacturing*. United States of America: Wiley.
- Warmuzek, M. (2004). *Aluminum-Silicon Casting Alloys Atlas of Microfractographs*. United States of America: ASM International.