



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE QUIMICA

“Análisis térmico de las curvas de enfriamiento y solidificación en la formación de rechupes localizados en aluminio puro.”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TIULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA

LUIS ANGEL MORENO ESCUTIA



CD. MX.

2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: M. EN M. EUSEBIO CANDIDO ATLATENCO TLAPANCO
VOCAL: DR. ADRIAN MANUEL AMARO VILLEDA
SECRETARIO: M. EN M. ARTURO ALEJANDRO SANCHEZ SANTIAGO
1er. SUPLENTE: IQM. HECTOR ISRAEL QUIROGA HERRERA
2° SUPLENTE: M. EN I. AGUSTIN GERARDO RUIZ TAMAYO

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

ASESOR DEL TEMA:

M. EN M. EUSEBIO CANDIDO ATLATENCO TLAPANCO _____

SUPERVISOR TÉCNICO:

M. EN I. AGUSTIN GERARDO RUIZ TAMAYO _____

SUSTENTANTE:

LUIS ANGEL MORENO ESCUTIA _____

Índice

Introducción	5
Hipótesis	6
Objetivos	6
Capítulo 1 Marco Teórico	7
1.1. Defectos por porosidades	7
1.2. Defectos por gas.....	7
1.3. Metal frio	8
1.4. Falta de metal.....	8
1.5. Rechupe.....	9
1.5.1 Contracciones que sufre el metal durante la transición de líquido a sólido ..	10
1.5.2 Mecanismo de formación de rechupes.	14
• Mecanismo de un Micro rechupe.....	14
• Mecanismo de un Rechupe disperso	15
• Mecanismo de un Rechupe localizado	15
1.5.3 Morfología de los rechupes (interna o externa):.....	17
• Rechupe interno.....	17
• Rechupe Externo	17
• Rechupe Mixto	18
1.6. Análisis para determinar la localización de los rechupes en una pieza.....	18
• Junta Fría	18
• Junta Caliente	19
1.7. Análisis Térmico.....	20
1.7.1. Curva Real de Enfriamiento.....	23
1.7.2. Uso de la 1 ^{ra} Derivada(dT/dt).....	23
• Señales representativas para cada diferente zona (uso de la 1 ^{ra} derivada). 24	
• Zona líquida.....	25
• Zona de solidificación	26
• Zona de enfriamiento del solido	28
1.8. Conductividad Térmica del aluminio.....	30
Capítulo 2 Metodología experimental	32

2.1. Sistema experimental.....	32
2.2. Material y equipo empelado.....	34
Capítulo 3 Desarrollo experimental.....	36
Capítulo 4 Resultados y Análisis de resultados	43
4.1. Fotografías de los 4 experimentos para cada temperatura (760°C, 730°C-[A], 730°C-[B] y 700°C).....	43
4.2. Gráficas de las curvas de enfriamiento y 1 ^{ra} Derivada de los 4 experimentos (760°C, 730°C ZCR-Arriba[A], 700°C y 730°C ZCR-Arriba[B]).....	48
4.2.1. Curvas de enfriamiento y 1 ^{ra} Derivada a Temperatura de vaciado de 760°C(Z.C.R (en medio y arriba) y Z.S.R(arriba y abajo)).....	49
4.2.2. Curvas de enfriamiento y 1 ^{ra} Derivada a Temperatura de vaciado de 730°C(Z.C.R (en medio y arriba-[A]) y Z.S.R (abajo y arriba).....	55
4.2.3. Curvas de enfriamiento y 1 ^{ra} Derivada a Temperatura de vaciado a 700°C (Z.C.R (en medio y arriba) y Z.S.R (arriba y abajo).....	60
4.2.4. Curvas de enfriamiento y 1 ^{ra} Derivada a Temperatura de 730°C (Z.C.R en medio y arriba - [B]) y Z.S.R (abajo y arriba).....	65
4.2.5. Curvas de enfriamiento y 1 ^{ra} Derivada para la Z.C.R (en medio y arriba-[A]) para las temperaturas de 760°C, 730°C y 700°C.	70
4.3. Tiempo y temperatura de aparición del rechupe localizado con respecto a la temperatura de vaciado (760°C, 730°C-[A]) y 700°C).....	71
Capítulo 5 Conclusiones	75
Bibliografía.....	76
Anexos	77
1. Composición química de los 3 experimentos (760°C, 730°C y 700°C)	77
2. Fotografías de los 4 experimentos (760°C, 730°C -A, 700°C y 730°C -[B])	80
3. Medidas y cálculos de sistema de colada con la pieza tipo “L”.....	81

Introducción

A lo largo de la fabricación de piezas por la vía del proceso de fundición se han estudiado los motivos por los cuales se presentan los diferentes defectos de fundición que se presentan en forma de huecos, que se llegan a tener dependiendo del medio de moldeo, el tamaño de la pieza a fabricar y el metal o aleación a utilizar, por lo cual es necesario hacer diferentes estudios al fenómeno de contracción líquido-líquido y contracción por solidificación para poder erradicar el defecto.

Por lo general se tiene estos tipos de defectos por contracción en los procesos de fundición:

- Defectos por gas (sopladuras).
- Rechupe (en el cual se enfoca este trabajo).
- Metal frío.
- Falta de metal.

Todos estos tipos de defectos, llega a afectar las piezas a fabricar (en su forma y en sus propiedades mecánicas), por lo cual es necesario un control del proceso, como también conocer las limitaciones del mismo para poder tener la menor cantidad de defectos o ninguno en la piezas a realizar.

En el presente trabajo se trata de emplear una nueva técnica para la detección de la formación de los rechupes.

Al utilizar un molde de arena en verde y una pieza tipo "L" se puede generar y controlar en donde puede aparecer el defecto de contracción (Rechupe) para poder hacer un análisis del mismo, utilizando el método de análisis térmico para poder predecir en qué momento se está generando este defecto. El método consiste en obtener una curva de enfriamiento (temperatura-tiempo) y a través del análisis de la 1^{ra} derivada obtener modificaciones de una curva normal que indican la formación de un rechupe

Cabe mencionar que este estudio es la base para analizar con mayor profundidad el defecto llamado rechupe y así poder utilizar la metodología en aleaciones comerciales para saber que señales se pueden tener, utilizando el método del análisis térmico.

Hipótesis

El uso del análisis térmico de curvas de enfriamiento y solidificación permitirá el conocimiento de la formación de un rechupe localizado 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 localizados durante la solidificación de metales puros.

Objetivos

- Determinar por medio de la curva de solidificación y enfriamiento la señal en la cual aparece un rechupe localizado en una pieza de Aluminio.
- Determinar con la obtención de la 1^{ra} derivada, la forma de la señal y su relación con la temperatura y tiempo.

Capítulo 1 Marco Teórico

1.1. Defectos por porosidades

Los diferentes tipos de defectos por porosidades que se llegara a tener utilizando el material de aluminio o sus diferentes aleaciones son las siguientes:

- Defectos por gas.
- Metal frio.
- Falta de metal.
- Rechupe (en el cual se enfoca este trabajo).

1.2. Defectos por gas

Estos defectos surgen por la presencia de gas disuelto en el metal líquido el cual forma diferentes porosidades y estos se pueden apreciar cuando el material se está solidificando. La porosidad podría adquirir la forma de una cavidad o de una burbuja la cual se puede apreciar en la Figura 1.1.

Los diferentes tipos de gases que se pueden atrapar son el hidrogeno, el aire, u orgánicos volátiles, principalmente gases solubles en el metal líquido y vapor de agua que proviene de la humedad que contiene la mezcla de arena (proceso de moldeo de arena en verde).

Este defecto puede afectar al maquinado, como también al acabado de la superficie y disminuir en las propiedades mecánicas de la pieza.



Figura 1.1 Defecto por gas atrapado (sopladura), corte transversal en una pieza de aluminio.

1.3. Metal frío[1]

Este defecto es correspondiente a la selección de la temperatura de vaciado y de trabajo para cada metal a usar, al momento de vaciar el metal en el molde, ocasiona que la pieza no llene o este incompleta y se puede apreciar dicho defecto en la Figura 1.2.

Es necesario darle un sobrecalentamiento de 100°C a 150 °C dependiendo de la forma de la pieza y la cantidad de piezas a vaciar, como también la trayectoria de vaciado, la materia de ajuste para cada aleación y la temperatura de fusión de cada material.



Figura 1.2 Parte defectuosa debido a una baja temperatura de vaciado del metal

1.4. Falta de metal

La causa de falta de metal en la pieza puede derivarse por diferentes causas, las cuales son las siguientes y se puede apreciar dicho defecto en la Figura 1.3:

- Baja temperatura del metal líquido.
- Molde roto (causando fuga de metal líquido).
- Un mal cálculo de uso de metal para el llenado de las piezas.

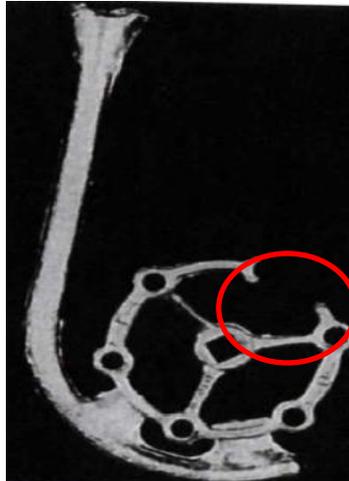


Figura 1.3 Parte defectuosa debido a una baja de temperatura del molde.

1.5. Rechupe

Ha sido común que durante el mecanizado de las piezas de fundición aparezcan los rechupes, es decir porosidades o cavidades de mayor o menor tamaño (macro o micro rechupes) las cual son cavidades ocasionadas por la contracción líquido-líquido y la contracción por solidificación.

Generalmente su forma es muy irregular y de paredes rugosas tipo dendríticas, por lo general se halla internamente, en los cambios de espesor de la pieza o en el interior de las zonas masivas y a veces, forman depresiones superficiales de tamaño variable, se puede apreciar en la Figura 1.4.

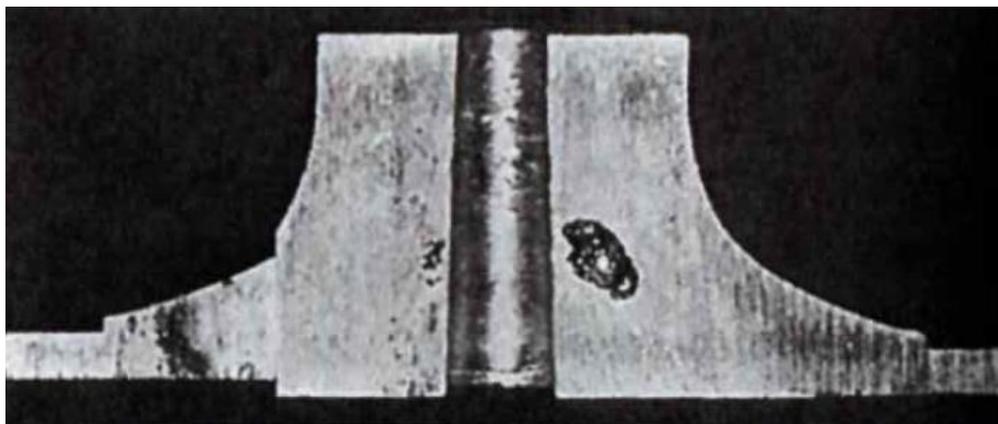


Figura 1.4 Rechupe interno en pieza de fundición^[1].

La formación de rechupes se produce en casi todas las aleaciones y metales puros, independientemente del molde y del proceso de fundición.

Los rechupes se clasifican en 5 tipos diferentes:

- Interno.
- Externo.
- Localizado.
- Disperso.
- Mixto.

Las posibles causas del rechupe se pueden encontrar dependiendo de la parte del proceso a analizar, ya sea el área de fusión y en el área de moldeo.

- Posibles causas por el área de fusión.
 - Metal Frio.
 - Aleación de rango largo.
 - Aleación de rango cortó.
- Posibles causas por el área de moldeo.
 - Fractura del molde (causando aletas de enfriamiento).
 - Alta temperatura de la mezcla de la arena.
 - Un deficiente sistema de llenado (sistema de colada) especialmente en piezas con espesores muy grandes.
 - Mal diseño de alimentadores y/o del sistema de colada (Entradas muy pequeñas) esto es más evidente en secciones muy gruesas y ataque muy pequeños.
 - Por diferentes espesores en la misma pieza.
 - Cambios de sección, con respecto a la geometría de la pieza.

1.5.1 Contracciones que sufre el metal durante la transición de líquido a sólido.

La mayoría de metales en estado líquido cuando pasan al estado sólido (temperatura ambiente) sufren 3 tipos de contracciones:

- Contracción líquido – líquido

La contracción que se efectúa se debe al cambio de densidades que va teniendo el metal líquido dependiendo de la temperatura de enfriamiento como se observa en la Figura 1.5, debido a que el metal líquido tiene una temperatura muy alta durante el vaciado (Temperatura máxima de vaciado) pero una densidad baja en ese momento. Una vez que esa temperatura de vaciado se va enfriando, la densidad cambiara (aumenta), ya que la temperatura del material y la densidad del mismo son inversamente proporcionales.

Una vez que el metal desciende su temperatura hasta la temperatura de transición líquido-sólido, comienza la segunda contracción (contracción por solidificación).

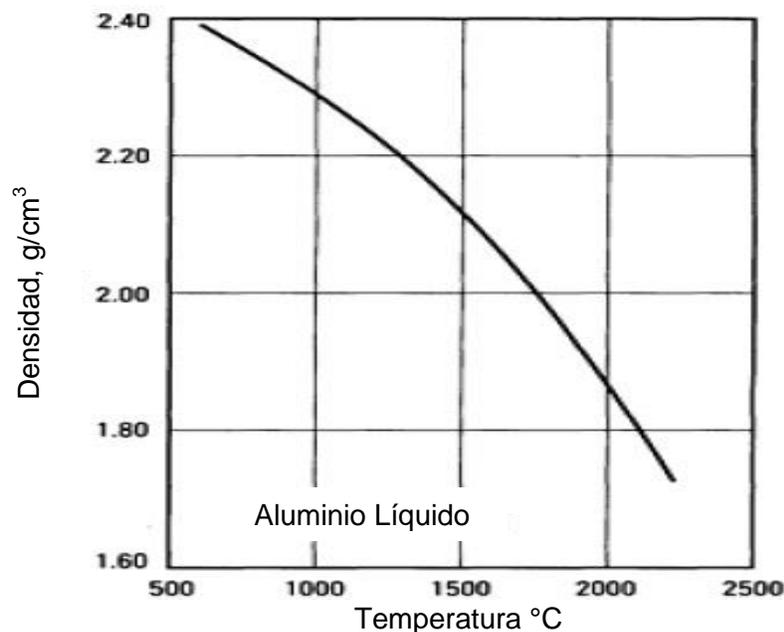


Figura 1.5 Relación de la temperatura con respecto a la densidad de un aluminio puro [2].

- Contracción por solidificación (líquido-sólido)

La contracción por solidificación se da una vez que el metal haya alcanzado su temperatura de transición líquido- sólido y en este caso se tiene líquido que no ha solidificado. Se tiene dos tipos de solidificación dependiendo de la aleación a escoger:

- * Aleaciones de rango largo de solidificación (ARLS).

Si se tiene una ARLS, dará origen a un rechufe disperso, ocasionado por la diferencia de temperaturas entre línea líquidus y la línea sólidus, originando la formación de dendritas, que crean espacios interdendríticos entre ellas, los cuales tendrán entre los espacios, líquido remanente y puntos de saturación térmica, ocasionando que se forme el defecto ya mencionado, se puede apreciar en la Figura 1.6.

- * Aleaciones de rango corto de solidificación (ARCS) y metales puros.

En las ARCS, darán origen a un rechufe localizado, ya que en este tipo de aleaciones la línea líquidus y la línea sólidus no tiene mucha diferencia entre sus temperaturas, ocasionando que el metal líquido tenga una menor densidad que el metal solidificado, provocando que el metal líquido se contraiga en una zona con una alta saturación térmica y este a su vez es el último en solidificarse, originando el defecto de un rechufe localizado, se puede apreciar en la Figura 1.8.

Cabe mencionar, que en este trabajo está enfocado a la contracción de solidificación, de modo que en la zona donde aparecerá el rechufe localizado, se va formando durante la transición de solidificación, formando una costra (sólido), Figura 1.8-[3], la cual al momento de hacer el análisis térmico da información con respecto al defecto mencionado, esto debido a la difusión térmica que está aportando esa zona y a la contracción de solidificación que se está llevando a cabo (mencionado anteriormente) debajo de la costra.

Es necesario conocer el % de contracción durante la solidificación del material, para poder generar la pieza con las medidas que se indique y darle una medición extra para el modelo, se puede apreciar en la Tabla 1.6.

Tabla 1.6 %de Contracción que sufren algunos metales durante la solidificación [8].

Contracción de algunos metales y materiales durante la solidificación.	
Material	Contracción (%)
Aluminio (Al)	7.0
Cobre (Cu)	5.1
Magnesio (Mg)	4.0
Zinc (Zn)	3.7
Hierro (Fe)	3.4
Plomo (Pb)	2.7
Galio (Ga)	+ 3.2 (de expansión)
Agua (H ₂ O)	+ 8.3 (de expansión)
Acero bajo carbono	2.5 – 3.0
Acero alto carbono	4.0
Hierro Blanco	4.0 – 5.5
Hierro Gris	+ 1.9 (de expansión)

- Contracción sólido – sólido

Esta última contracción se efectúa cuando el metal está totalmente sólido.

La contracción que se ejerce en este punto, es debido a que se tiene un sólido ya formado, el cual está todavía caliente y va cambiando su densidad, conforme va enfriándose, ocasionando la contracción del material, como se observa en la Figura1.8-[4].

Las dos primeras contracciones dan origen a rechupes en las piezas sólidas, y es necesario el diseño y cálculo de alimentadores para evitar este defecto.

La tercera contracción se debe considerar para el diseño y cálculo de modelos (de fundición) ya que la pieza disminuye en sus dimensiones al bajar, desde una temperatura elevada, hasta la temperatura ambiente en estado sólido.

1.5.2 Mecanismo de formación de rechupes.

- Mecanismo de un Micro rechupe

La formación del rechupe localizado se efectúa durante el proceso de solidificación en la transición líquido - sólido, se conoce como una contracción de solidificación (líquido-sólido).

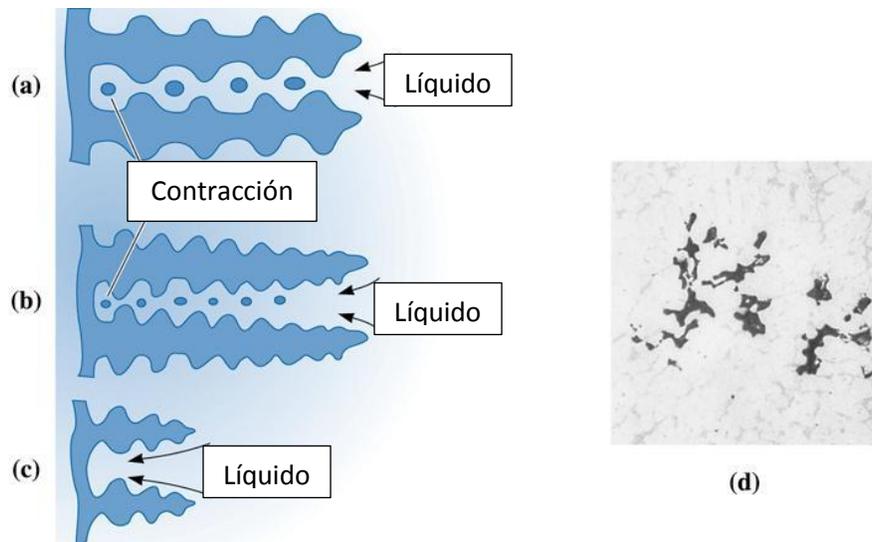


Figura 1.6 Mecanismo de formación de un rechupe disperso (Micro rechupe).

En la Figura 1.6 se muestra lo siguiente:

- a) Durante el proceso de solidificación de una aleación de rango largo, se generan dendritas sólidas y líquido remanente.
- b) El líquido remanente en su proceso de solidificación llega a contraerse, generando un hueco entre las dendritas.
- c) Una vez que ya no hay líquido remanente, el hueco que se generó se expande debido a la contracción de solidificación en esa zona, ocasionado la formación de micro rechupes.
- d) La formación de micro rechupes se puede ver realizando un ensayo metalográfico o empleando algún otro método que permita analizar la pieza.

Para este mecanismo se tiene considerado que el tipo de rechupe que se genera es el rechupe disperso

- Mecanismo de un rechupe disperso

El rechupe disperso el cual se aprecia en la Figura 1.7 se produce en zonas con paredes más gruesas, en especial, en las zonas donde se observan grandes cambios de espesor de pared; las depresiones superficiales se suelen producir en las paredes transversales y en las superficies exteriores de las piezas fundidas, con paredes relativamente gruesas. Suelen ir acompañadas de micro porosidades (micro rechupes).

Los rechupes dispersos no tienen conexión con el exterior y están situados en el interior de la pieza fundida (Rechupe interno). Su forma es irregular, las paredes son ásperas y a menudo están cubiertas por dendritas. Se aprecian a simple vista a través de una prueba no destructiva o posteriormente durante el proceso de maquinado.

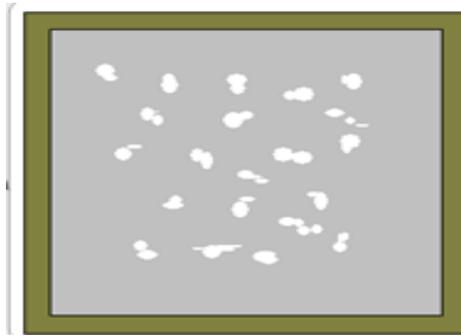


Figura 1.7 Ejemplo de Rechupe disperso en pieza de fundición

- Mecanismo de un rechupe localizado [3].

En la Figura 1.8 en la parte superior izquierda **(1)**, se observa el vaciado del metal a un molde, en el cual el metal líquido tiene un nivel inicial de altura. En la parte superior derecha **(2)** se ve el proceso de enfriamiento, el metal líquido que está en contacto con la pared, inicia su proceso de solidificación el cual es el primero que se encuentra en estado sólido. En la parte superior del molde, el metal líquido comienza su contracción (contracción liquido-liquido), por lo cual reduce su nivel en comparación al nivel inicial de altura. En la parte inferior izquierda **(3)** se tiene una segunda contracción (contracción por solidificación) ocasionando que reduzca un poco más el nivel de altura del metal y el metal líquido que se observa, es el

líquido remanente que se tiene durante el proceso de solidificación, este a su vez es el último en solidificarse y llega a contraerse dejando un hueco en esta zona.

Debido a la contracción de solidificación en esta zona, el hueco se va expandiendo y en ciertos casos, dependiendo de la temperatura de vaciado se puede llegar a caer la costra formada en la parte superior de la pieza (rechufe externo) o puede quedar debajo de la costra. En este último caso se puede ver el rechufe cortando la pieza (rechufe interno) y se puede localizar debido a que el metal forma una depresión en la pieza. En la parte inferior derecha (4) se genera un rechufe, en este caso un rechufe interno el cual a simple vista no se puede ver; se lleva a cabo la última contracción en el metal (contracción sólido – sólido) y se efectúa durante el enfriamiento del sólido.

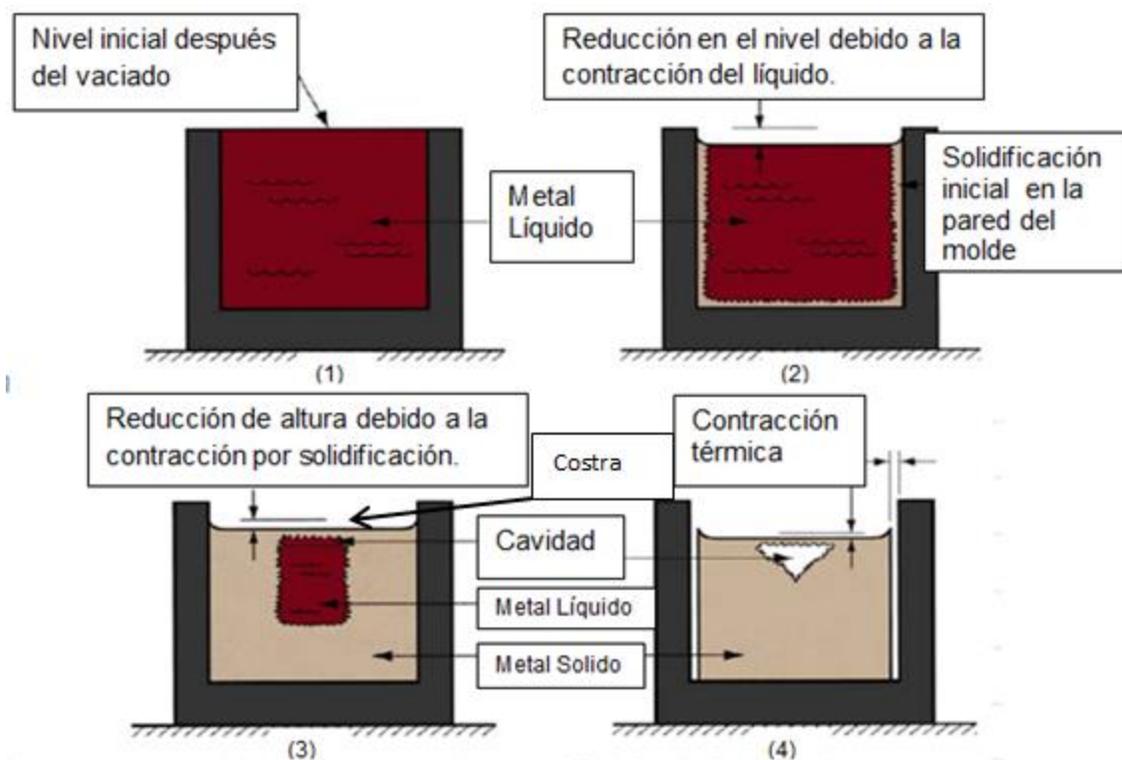


Figura 1.8 Mecanismo de formación de un rechufe localizado [8].

El rechufe localizado son cavidades simétricas y profundas que suelen tener una apertura con forma de embudo hacia el exterior y, a veces, continúan hacia el interior formando cavidades cerradas. Las paredes de las cavidades suelen ser ásperas. Los rechufes localizados son claramente apreciables a simple vista.

Los materiales metálicos con intervalos cortos de solidificación y solidificación de frente plano, como los metales puros y las aleaciones eutécticas o peritéticas, son especialmente propensos a presentar rechupes localizados. Solamente el rechupe localizado es el que se puede presentar de manera externa.

1.5.3 Morfología de los rechupes (interna o externa):

- Morfología del rechupe interno

El cual se puede observar solamente al cortar la pieza y para su análisis es necesario conocer en qué parte se encuentra el defecto, para descartar las posibles causas del mismo, este defecto se presenta en la Figura 1.9.

En este tipo de rechupes se presentan los siguientes tipos:

- Rechupe disperso
- Rechupe localizado

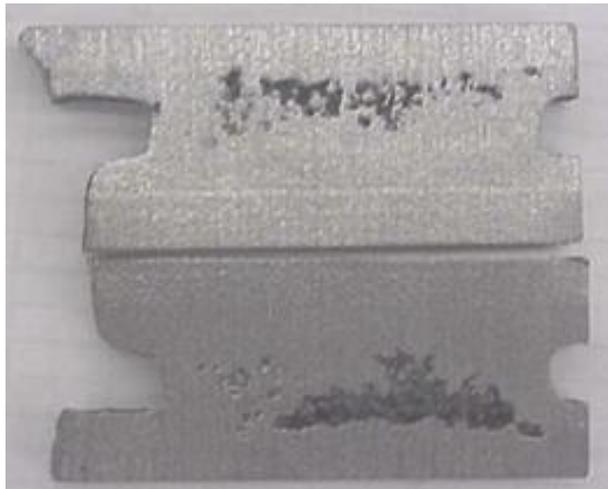


Figura 1.9 Rechupe interno en pieza de fundición

- Morfología del rechupe externo

Se puede observar a simple vista ya que se presenta como una depresión superficial, pero es necesario cortar la pieza para saber la trayectoria del rechupe y sobre todo saber la altura del rechupe.

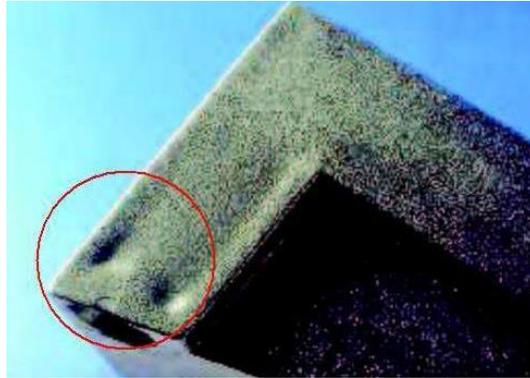


Figura 1.10 Rechupe externo en pieza de fundición [4].

En esta morfología se presenta el rechupe localizado y se puede identificar debido a la característica representativa que tiene en la pieza, ya que se presenta como una pequeña o una gran depresión en la pieza como se muestra en la Figura 1.10.

- **Morfología del rechupe mixto**

El rechupe mixto es el que aparece con combinación de los rechupes ya mencionados, pueden aparecer de manera externa o interna en la pieza como también puede aparecer en conjunto con el rechupe disperso o localizado, todo dependiendo de las variables que se lleguen a presentar en el proceso de fabricación de una pieza de fundición.

1.6. Análisis para determinar la localización de los rechupes en una pieza.

Toda pieza de fundición real tiene juntas frías y juntas calientes, que ayuda a ubicar el lugar donde se presentaría un rechupe. Estas juntas se presentan en la Figura 1.12.

- **Junta Fría**

Una junta fría es una junta externa, la cual disipa el calor de manera libre, esta disipación depende del medio de moldeo que tiene una conductividad térmica que controla la transferencia de calor, ocasionando que en la zona de la junta fría se enfríe rápidamente el metal líquido, evitando la aparición de rechupe, trasladándose a otro lugar, está junta se presenta en la pieza tipo “L” en la Figura 1.11.

- Junta Caliente

Una junta caliente es una junta interna la cual no disipa el calor de manera libre, ya que se tiene una saturación térmica debido a que se encuentran las dos trayectorias de calor, ocasionando que no se pueda disipar el calor y es donde el metal líquido (líquido remanente) es el último en solidificarse, provocando que se efectúe el rechufe en ese lugar, se puede apreciar en la figura 1.12. Esta junta se presenta en la pieza tipo "L", como se observa en la Figura 1.11.

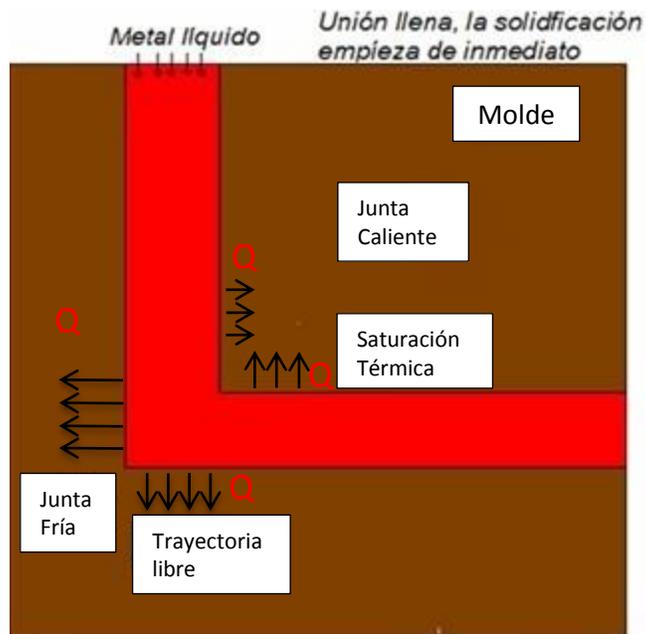


Figura 1.11 Ejemplo de junta caliente y junta fría, en unión tipo L en una pieza de fundición.

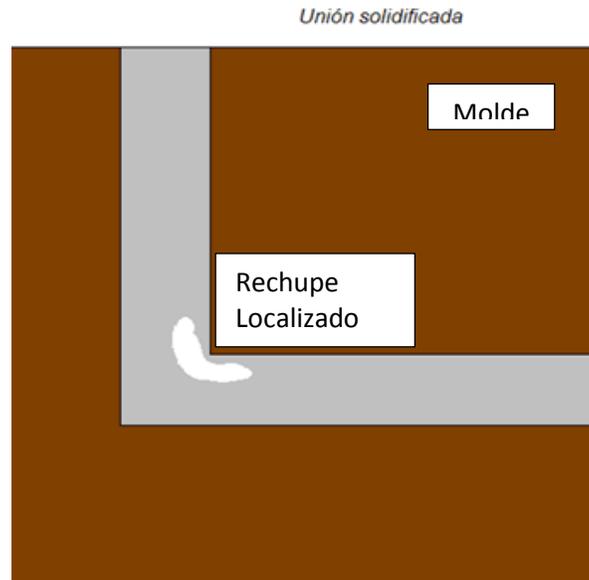


Figura 1.12 Ejemplo de rechufe localizado en una unión tipo L.

Algunos ejemplos de uniones que se presentan en las piezas de fundición, para presentar rechupes, se presentan en la Figura 1.13, donde se puede analizar la presencia de juntas frías y juntas calientes.



Figura 1.13 Ejemplo de uniones en piezas de fundición.

1.7. Análisis Térmico

El análisis térmico es una técnica para monitorear la temperatura de muestras durante su enfriamiento, como también para su calentamiento, a través de los intervalos de temperatura-tiempo donde ocurren transformaciones de fase. En el caso de la solidificación se presentan en la solidificación primaria, transformaciones eutécticas o peritéticas e incluso en el estado sólido.

El uso del análisis térmico se puede usar durante el estudio de piezas de fundición, ya que es importante tener conocimiento de las temperaturas de solidificación para poder llevar a cabo un control de calidad más eficiente y saber

que ocurre dentro del molde, desde su momento de vaciado, hasta su punto de solidificación y desmoldeo.

Las diferentes técnicas que se presentan para el uso del análisis térmico se muestran en la Tabla 1.14:

Tabla 1.14 Técnicas de Análisis Térmico más comunes [5]

Técnicas	Propiedad medida
Termo gravimetría	Masa
Análisis térmico	Temperatura
Calorimetría diferencial de barrido	Entalpia
Análisis termo mecánico	Módulo de Young
Análisis Termo mecánico Dinámico	Módulo de Young
Relajación Dieléctrica	Constante dieléctrica
Termo optometría	Propiedad Óptica
Análisis Electro térmico	Conductividad Eléctrica

La técnica que se usó para este trabajo es el análisis térmico, los datos que aporta esta prueba son de una curva de solidificación, cuya forma depende de las reacciones que se producen durante el proceso de solidificación (reacciones principales). La solidificación de un metal puro o una aleación depende de las reacciones que se presentan durante el enfriamiento desde su estado líquido hasta su estado sólido, los cambios de velocidades que llega a tener se debe al espesor de la pieza y los elementos que tenga el metal líquido.

Para lograr entender el uso del análisis térmico, se analiza una curva de enfriamiento ideal (para metales puros), la cual tiene sus respectivas zonas de transición, como se muestra en la Figura 1.15.

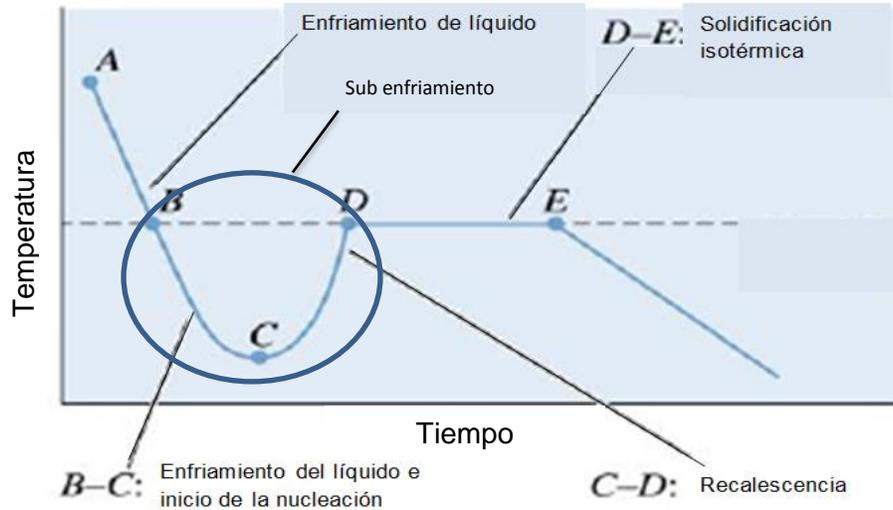


Figura 1.15 Curva ideal de enfriamiento (Temperatura vs Tiempo) para metales puros

En la Figura 1.15 se muestra una curva ideal de enfriamiento, la cual se caracteriza por no tener cambios drásticos con respecto a la velocidad de enfriamiento, es por eso que a simple vista se pueden apreciar los cambios de pendiente que tienen durante su proceso de enfriamiento.

Las reacciones principales son fácilmente identificables en la curva de enfriamiento, pero ciertas reacciones que ocurren debido al cambio de velocidad de enfriamiento ya sea antes o durante la solidificación, son difíciles de distinguir a simple vista, por lo cual se aplica el uso de la 1^{ra} derivada ($\frac{dT}{dt}$) en función de los datos adquiridos en una prueba experimental, para lograr visualizar e identificar los diferentes cambios de velocidad de enfriamiento que genera el experimento.

Los puntos de inflexión o cambio de pendiente correspondientes a la curva de enfriamiento se aprecian con mayor claridad aplicando la 1^{ra} derivada ($\frac{dT}{dt}$) en función de los datos generados (T vs t), aportando datos para poder analizar los diferentes cambios de pendiente con respecto a la velocidad de enfriamiento del líquido que sufre durante el proceso global de enfriamiento (desde el líquido, la solidificación y enfriamiento del sólido).

1.7.1. Curva Real de Enfriamiento

Para una curva real de enfriamiento del aluminio puro se tienen estas diferentes zonas.

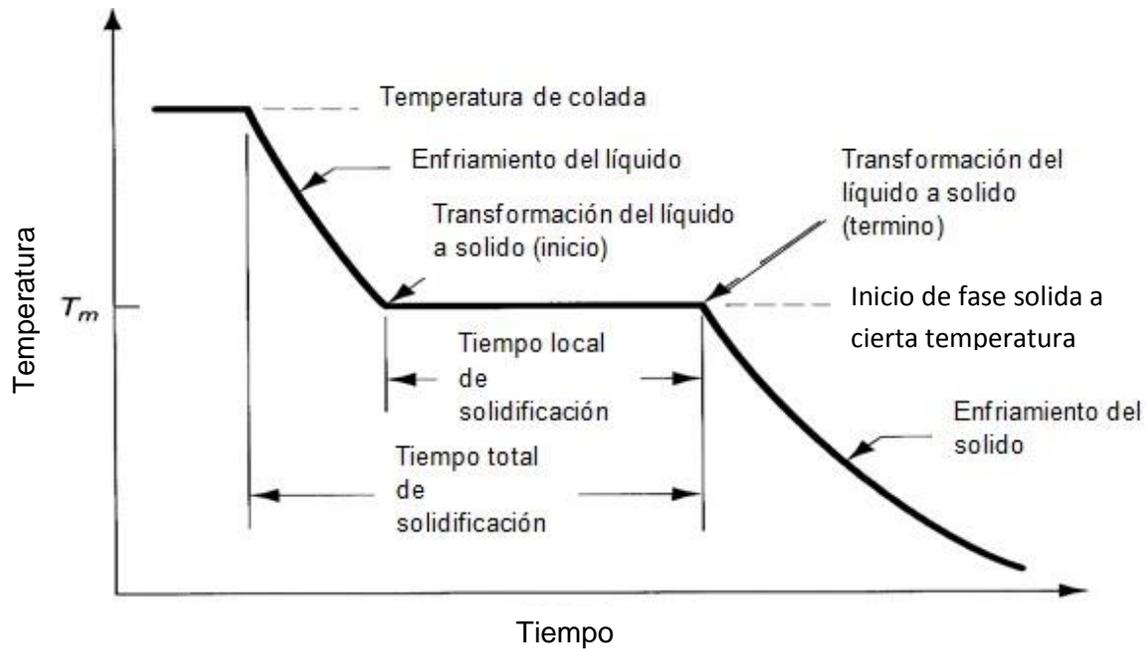


Figura 1.16 Curva Real de enfriamiento (Temperatura vs Tiempo) para el aluminio puro [1].

Con este tipo de gráficas, dependiendo de los cambios de velocidad de enfriamiento que pueden ocurrir durante su solidificación, son poco apreciables a simple vista, independientemente de los puntos de cambios de pendientes visibles en la Figura 1.16, es en esta situación que los datos generados del experimento, se le aplique el uso de la 1^{ra} derivada.

1.7.2. Uso de la 1^{ra} Derivada ($\frac{dT}{dt}$)

El uso de la 1^{ra} derivada aporta datos para analizar con detalle una curva de enfriamiento y con mayor claridad se pueden apreciar los puntos donde se tienen cambios de pendiente o puntos de inflexión, para poder localizar el inicio y termino de una reacción (ya sea de solidificación, recalcencia, enfriamiento del sólido, etc.).

Para hacer uso de la 1^{ra} derivada en la curva de enfriamiento, varios utilizan un software, el cual automáticamente les da la primera derivada, pero es necesario saber qué cantidad de datos descarta, como también conocer el suavizamiento (% de alineación de datos) del programa.

Los puntos de inflexión o cambios de pendiente adquiridos durante la experimentación, al aplicar la 1^{ra} derivada, se representaran por picos y cambios de pendiente drásticos durante el proceso de enfriamiento del sólido como se muestra en la Figura 1.17.

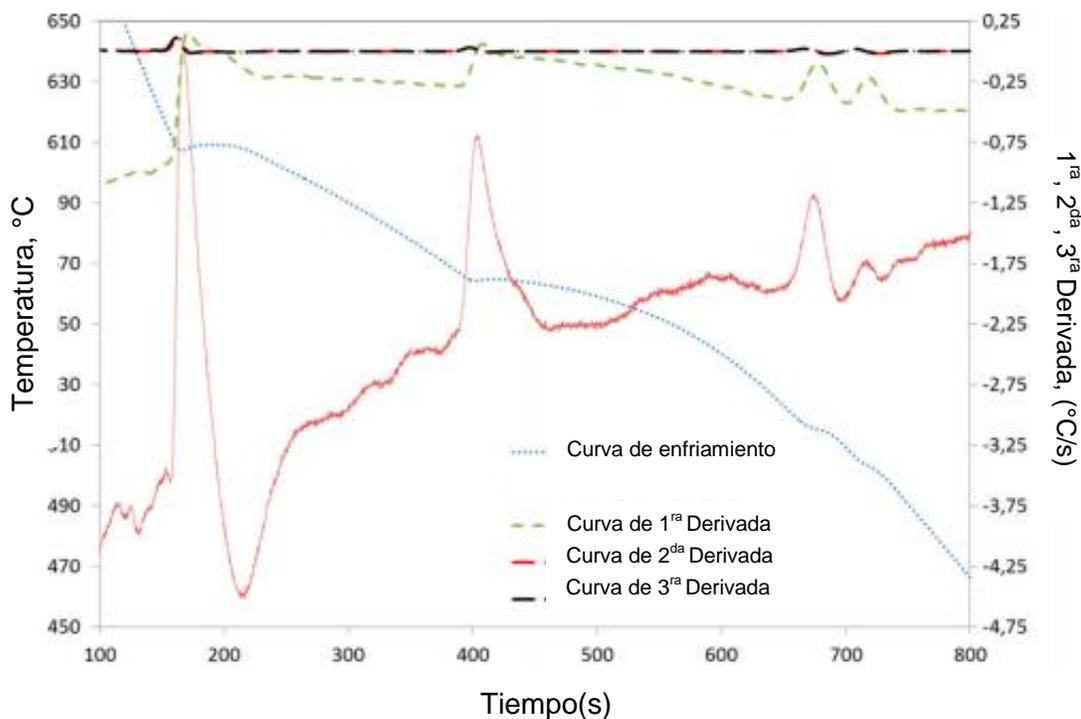


Figura 1.17 Relación de la primera derivada con respecto a la curva real de enfriamiento (Curva real de enfriamiento de $AlSi_6Cu_4$, 1^{ra} Derivada, 2^{da} Derivada y 3^{ra} Derivada)^[9].

Dependiendo de la zona en la cual se aplique el uso de la primera derivada, se tendrán puntos de inflexión y/o cambios de pendiente representativos.

- Señales representativas para cada diferente zona (uso de la 1^{ra} derivada)

Los diferentes puntos de inflexión o cambios de pendiente representados con la 1^{ra} derivada para cada zona de la curva de enfriamiento son las siguientes:

- Zona líquida

Cuando el metal llega a su temperatura máxima dentro del molde, va bajando gradualmente la temperatura hasta llegar a su temperatura de transición líquido – sólido (zona de solidificación).

Dependiendo del material que se esté utilizando se tendrán diferentes señales en la 1^{ra} Derivada.

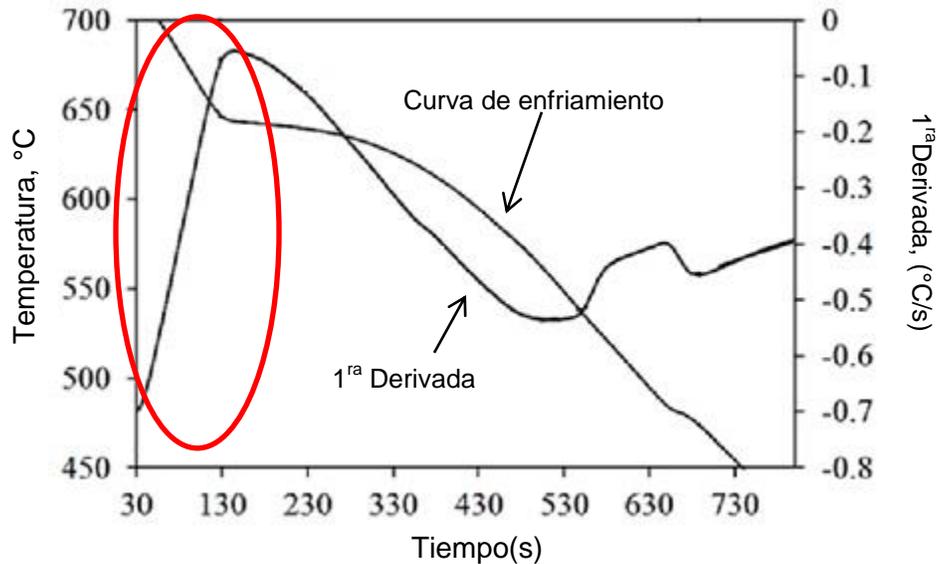


Figura 1.18 Curva de enfriamiento y 1^{ra} Derivada de una aleación de aluminio 7075 [10].

En la Figura 1.18 en el círculo rojo, se puede observar la zona líquida del material y la señal que aporta la 1^{ra} Derivada con respecto a los datos obtenidos de la curva de enfriamiento, se aprecia en la señal de la 1^{ra} derivada como va aumentando gradualmente hasta un punto máximo donde indica el término de la zona líquida y el comienzo de la zona de solidificación.

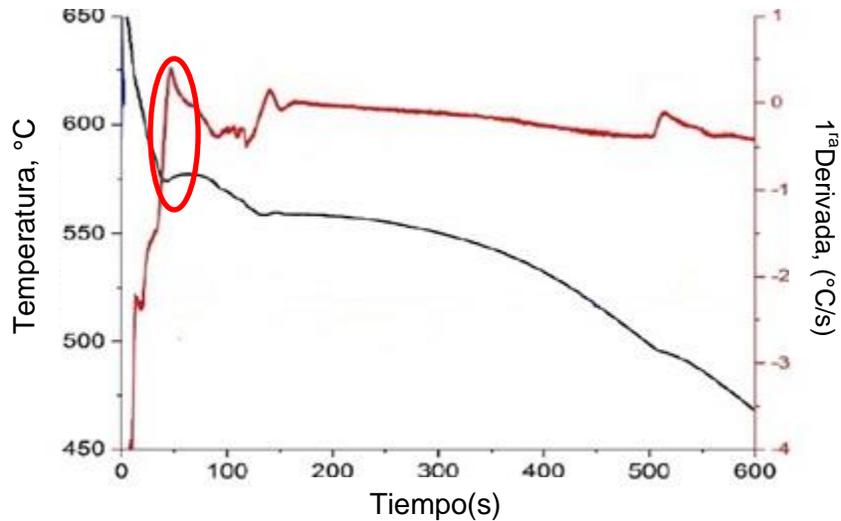


Figura 1.19 Curva de enfriamiento y 1ª Derivada de una aleación de aluminio A380[11].

En la Figura 1.19 en el círculo rojo, se presenta una curva de enfriamiento de una aleación A380 y tiene las mismas señales que en la Figura 1.18 en la zona líquida, pero en la zona transición de solidificación dentro del círculo rojo se presenta un sub enfriamiento, el cual puede aparecer en aleación de esa clasificación y en algunos casos en metales puro, por eso es necesario entender los diferentes cambios de pendiente que tiene, ya sea desde su temperatura máxima de la curva de enfriamiento hasta el término del subenfriamiento, ya que indica en que momento termino la zona liquida y comienza la zona de solidificación.

- Zona de solidificación

Una vez que el metal está en la zona de solidificación, la temperatura va decreciendo gradualmente y en cierto punto alcanza su temperatura máxima. La temperatura máxima no se puede ver a simple vista, pero aplicando la 1ª derivada, esta temperatura está representada por un pico en la gráfica, junto con un cambio de pendiente, como también las diferentes reacciones que pueden ocurrir durante la solidificación (Es necesario ver los datos tanto de la curva de enfriamiento, como los datos de la 1ª derivada de manera simultánea para poder comparar los diferentes cambios y en qué momento ocurren los cambios de pendiente o picos que se generan por el cambio de velocidad de enfriamiento).

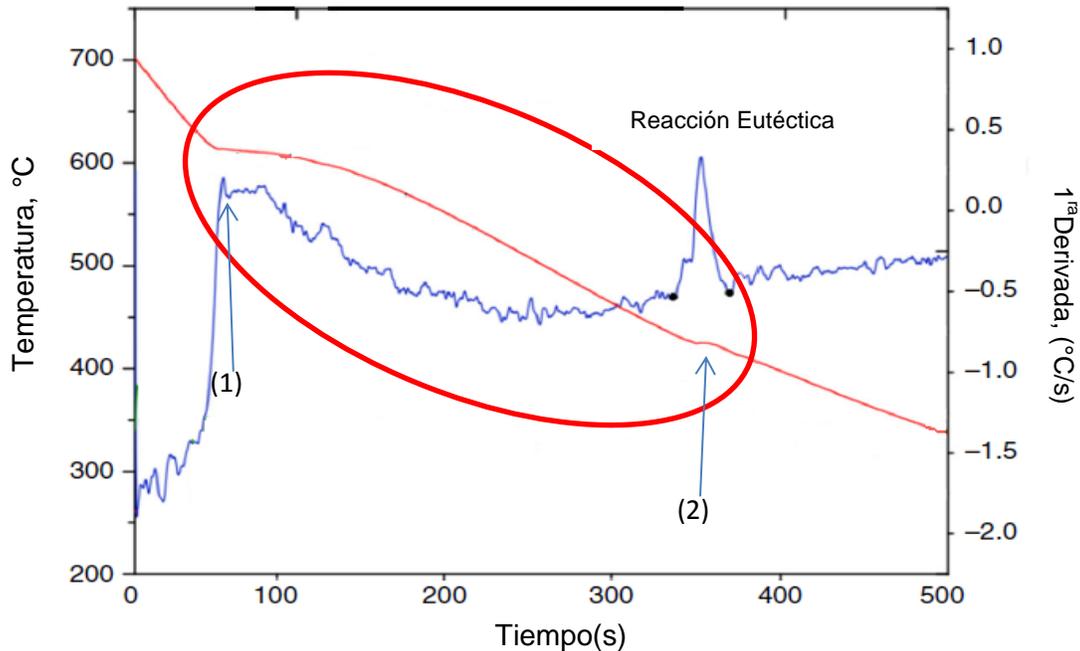


Figura 1.20 Curva de enfriamiento y 1ª Derivada de una aleación de aluminio Al-Mg-Zn [11].

En la Figura 1.20 se observa dentro del círculo rojo el cambio de pendiente para comenzar la zona de solidificación (1), la cual refleja que ha pasado de un estado líquido a un estado de solidificación (líquido-sólido), este primer cambio de pendiente está representado en un diagrama de fases como el punto de la línea liquidus y su señal en los datos de la 1ª derivada es representada por una línea semirrecta (una superficie representativa de la temperatura de la línea liquidus del diagrama empleado), la cual indica que no está sufriendo cambios de velocidad de enfriamiento durante la solidificación (si llegara a tener un cambio de pendiente después de la línea recta durante la solidificación, esta representa su temperatura máxima como aparecen posteriormente en la curva de enfriamiento (reacción eutéctica (2)) y la señal que aporta la 1ª derivada es un pico que indica un cambio de velocidad de enfriamiento) y posteriormente puede llegar a decrecer la señal de la 1ª derivada o mantenerse constante que indica la disminución de la temperatura.

Es necesario señalar que en este tipo de aleación están ocurriendo dos cambios de pendiente, por lo cual es necesario consultar los diagramas de fase (en este caso un diagrama de fases ternario Al-Mg-Zn) para comprender las dos

reacciones de solidificación que están ocurriendo en la curva de enfriamiento y comprender las dos señales que aporta la 1^{ra} derivada para la aleación de Al-Mg-Zn.

Es de gran importancia la zona de solidificación, debido a que en este trabajo, se demuestra con datos experimentales, se muestra el comportamiento con respecto a la temperatura y el tiempo de solidificación, para el defecto del rechupe localizado, con el cual se tiene un cambio de velocidad de enfriamiento, debido a la conductividad térmica y a la difusión térmica que se refleja en el termopar durante la adquisición de los datos de la curva de enfriamiento, como también en la señal de la 1^{ra} derivada al tratar los datos experimentales.

Teniendo así una señal de un pico, que marca un cambio de velocidad de enfriamiento, independientemente de la temperatura máxima de solidificación y el cambio de pendiente para la zona de enfriamiento del sólido.

- Zona de enfriamiento del sólido

En el enfriamiento del sólido ya no ocurren reacciones que generen un cambio de velocidad de enfriamiento en el metal y es posterior a la zona de solidificación, en esta zona la señal de la 1^{ra} derivada va decreciendo o se mantiene constante, dependiendo de la aleación y de la temperatura del metal sólido, hasta llegar a temperatura ambiente.

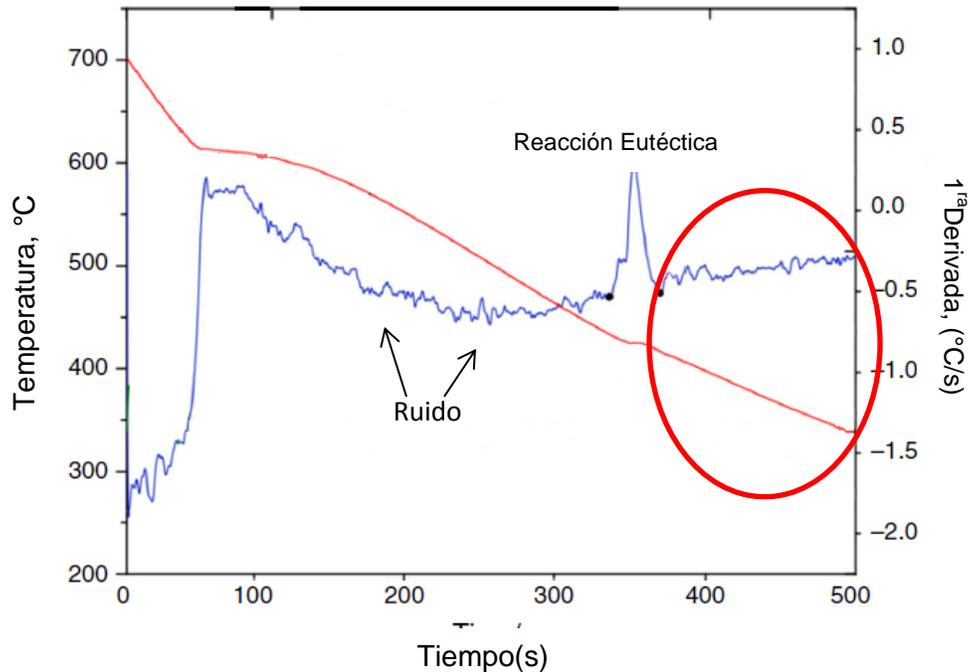


Figura 1.21 Curva de enfriamiento y 1^{ra} Derivada de una aleación de aluminio Al-Mg-Zn [11].

En la Figura 1.21 se observa dentro del círculo rojo la zona de enfriamiento del sólido y se observa en la 1^{ra} derivada que no se percibe ningún cambio de pendiente, que indique reacción alguna que sufra el metal sólido.

Es necesario señalar que a lo largo de la curva generada por la 1^{ra} derivada se encontrara diferentes picos o cambios de pendiente pequeños, los cual indica que el equipo con el que se está trabajando (Adquisidor de datos), llega a tener “**ruido**” o una mala adquisición. Pero solamente es visible cuando se aplica la 1^{ra} derivada a los datos de la curva de enfriamiento, ya que en la curva de enfriamiento no se puede percibir tal ruido.

El ruido se define como la degradación o distorsión de la señal de interés, impidiendo o limitando el estudio de la información adquirida (En este caso del análisis térmico de una curva de enfriamiento), por tal motivo se recomienda para el adquisidor de datos conectar un cable de conexión eléctrica a la fase tierra antes de empezar la adquisición de datos, para poder disminuir o casi eliminar la señal de ruido.

1.8. Conductividad Térmica del aluminio

El aluminio puro tiene una conductiva térmica de 247 W/m °K lo cual lo hace un material ideal para aplicaciones que reduzca al mínimo los tiempos de calentamiento y enfriamiento. Este coeficiente varía con las condiciones del material (humedad, temperatura y presión), por lo que se fijan condiciones para poder medirla.

La conductividad térmica describe el transporte de energía en forma de calor a través de un cuerpo y como resultado de un gradiente de temperatura. Dependiendo de la temperatura que se esté trabajando se tendrá cierta conductividad térmica como se muestra en la Tabla 1.22.

Tabla 1.22 Conductividad Térmica a diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Conductividad Térmica ($\frac{W}{m \cdot ^\circ K}$)
25	247
660.4	90

Dependiendo de la distancia y la posición en donde se encuentre el termopar, ya sea en una zona donde no se encuentre el defecto o donde se esté formando el rechupe, se tiene cierta conductividad térmica, para adquirir los datos de la experimentación y así analizar las diferentes zonas, ya sea con el defecto (rechupe localizado) o sin el mismo, Figura 1.23 y Figura 1.24.

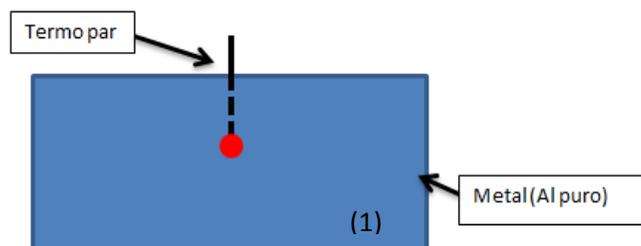


Figura 1.23 Modelo esquemático representativo para la adquisición de datos del defecto rechupe localizado (Durante la solidificación, antes de la formación del rechupe (1)).

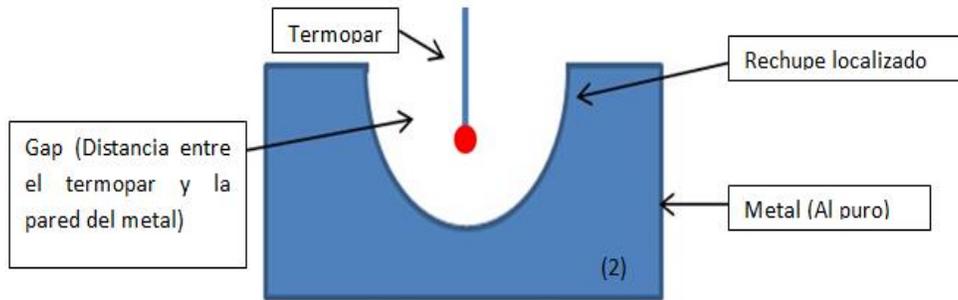


Figura 1.24 Modelo esquemático representativo para la adquisición de datos del defecto rechupe localizado (Formación final del rechupe localizado, durante la solidificación (2)).

Por esta causa es una de las propiedades que se tiene que considerar de mayor importancia en la experimentación para poder conocer el momento en el cual se forma el rechupe.

Capítulo 2 Metodología experimental

2.1. Sistema experimental

El propósito de usar aluminio puro para esta experimentación es debido a la propiedad de contracción que tiene el material, ya que su valor es alto (7% de contracción volumétrica), pero sobre todo se debe al mecanismo de formación de un rechupe localizado que se genera por ser un metal puro.

También se utilizó una pieza tipo “L”, la cual por su geometría se llega a tener una junta caliente y una junta fría para así poder direccionar en qué lugar se formara el rechupe localizado, como se muestra en la Figura 2.1 y 2.2.

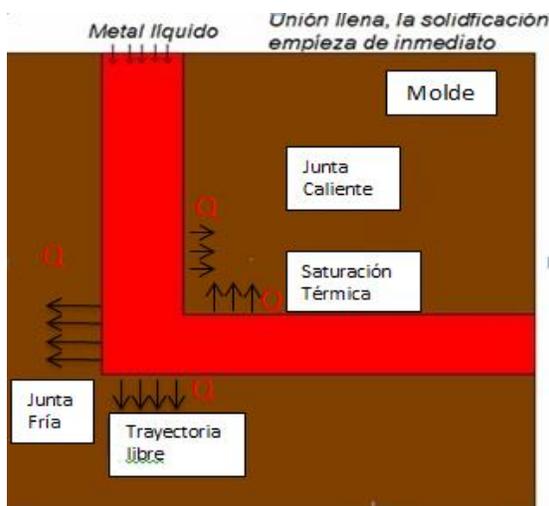


Figura 2.1 Juntas (caliente y fría) en Pieza en “L”

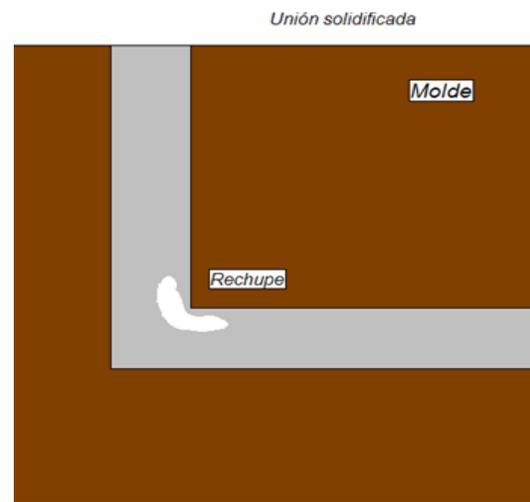


Figura 2.2 Rechupe Localizado Pieza en “L”

En la figura 2.3 (A) y en la fotografía en la figura 2.3 (B) se muestra el arreglo experimental empleado durante la experimentación.

El sistema experimental consta de un adquirente de datos National Instrument (Tarjeta de adquisición y Chasis de adquisición de datos) con 15 canales para lectura, el cual puede registrar lecturas con una precisión de 0.0001°C cada 0.1 segundos (dependiendo la cantidad de termopares a usar), en donde se registran historias térmicas (curvas de enfriamiento) con el software NI Signal Express (para la adquisición de datos) y NI MAX (para el lector de tarjeta y chasis de adquisición de datos).

Se realizaron 4 experimentos variando la temperatura de vaciado. En cada experimento se analizaron las historias térmicas y con esos datos se obtuvo la curva de solidificación y enfriamiento, posteriormente la curva de la 1^{ra} derivada. Ambas curvas se trabajaron para evaluar y determinar las condiciones (temperatura y tiempo) en que se forma el rechupe localizado.

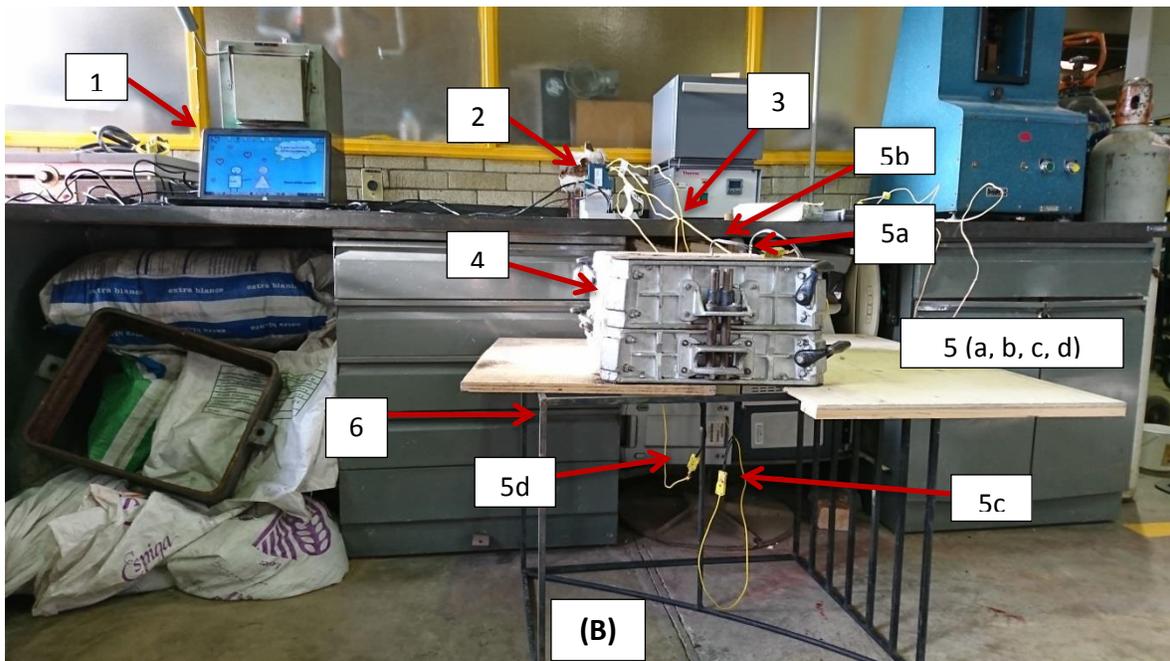
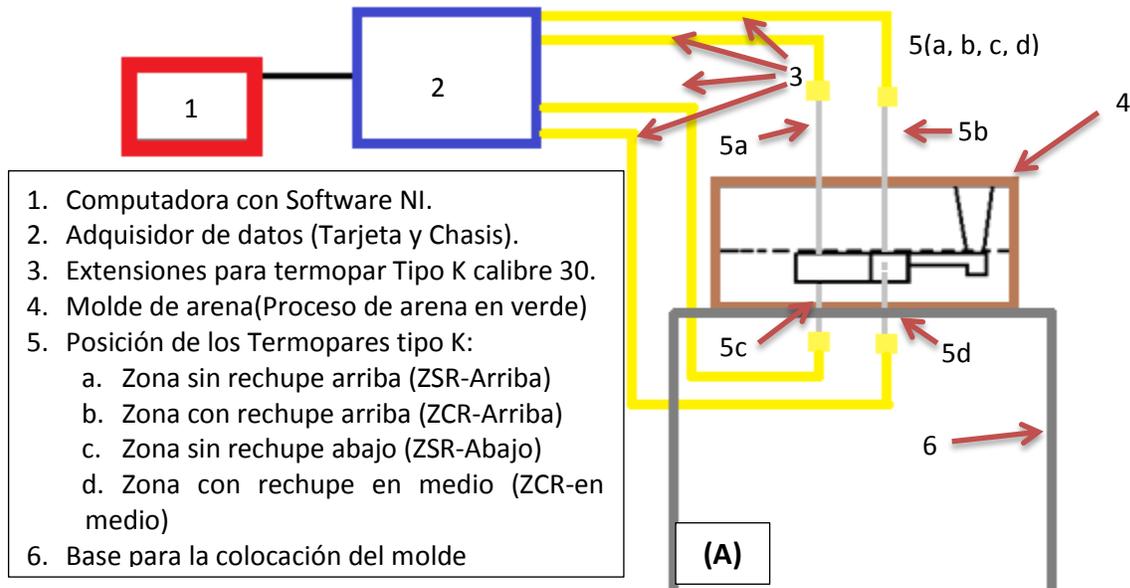


Figura 2.3: (A) Esquema del arreglo experimental construido; (B) Foto del arreglo experimental funcionando.

2.2. Material y equipo empleado.

- **Material**

- Aluminio puro comercial. La composición química se muestra en la Tabla 2.1

Tabla 2.1 Composición Química del Aluminio utilizado

%Si	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn	%Ni	%Cr	%Ti	%Sr	%Al
0.0739	0.0040	0.0062	<0.005	0.0246	0.0026	<0.0010	0.0534	0.0002	99.7
%Fe	%V	%Co	%Pb						
0.1111	0.0058	<0.0020	<0.0020						

- Mezcla de arena de molde en verde para aleaciones no ferrosos.
- Pintura de zirconio.
- Crisol de carburo de silicio tamaño A12.
- Termopares tipo K.
- Mini conectores para termopar tipo K.
- Aislador cerámico de 2 orificios, ovalado para alambre de calibre 20.
- Alambre de termopar tipo K Cromel –Alumel calibre 20.
- Aislador de termopar (Espaguete para alta temperatura).
- Extensión para termopar tipo K calibre 20.

- **Equipo**

- Equipo de adquirente de datos National Instrument (Tarjeta y Chasis de adquisición de datos).
- Equipo de seguridad de fundición (guantes de asbesto, careta, botas con casquillo de acero y bata de algodón)
- Lingoteras de acero.
- Herramientales para fundición (maneral, cucharillas, etc.)
- Horno de resistencia eléctrica con control de temperaturas marca Linderberg.
- Base para la colocación de molde.

- Pizoneta manual.
- Placa modelo con pieza Tipo “L”.
- Caja de moldeo (cope [tapa] y drag [base]).
- Molino chileno con capacidad de 20 kg.

Capítulo 3 Desarrollo experimental

- **Diseño de la placa modelo**

1. Fabricación de la placa modelo con pieza Tipo “L” la cual se muestra en la Figura 3.3, con respecto a un modelo representativo en SolidWork que se aprecia en las Figura 3.1 y 3.2.(Las medidas del sistema de colada (calculo) y de la pieza Tipo “L” se muestran en el apéndice 3)

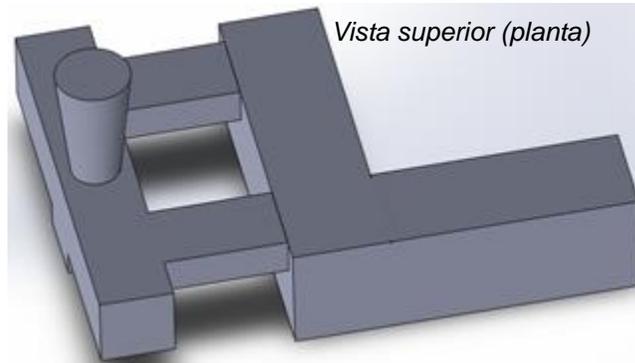


Figura 3.1. Modelo de la placa modelo con pieza de interés Tipo “L” (*Vista Superior y vista inferior*).

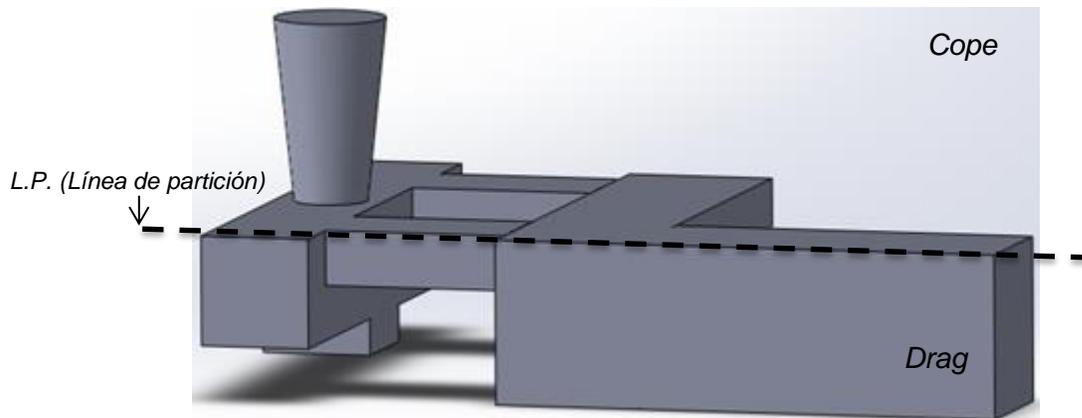


Figura 3.2. Modelo con pieza de interés “L” (*Vista Lateral.*)



Figura 3.3. Placa modelo con pieza tipo "L" (Vista inferior).

2. Pruebas de moldeo.
3. Ajustes de la placa modelo y acabados finales.
4. Fabricación de termopares tipo K (se fabricaron 12 termopares para los 3 experimentos).
 - 4.1. Fabricación de 4 termopares extras para un nuevo análisis
5. Fabricación de 3 moldes (moldeo de arena en verde) para cada una de las temperaturas a analizar.

Experimentos	Temperatura de vaciado °C	Colocación de termopares
1	760°C	Colocación de 4 termopares como se muestra en las Figuras 3.6 y 3.7.
2	730°C	Colocación de 4 termopares como se muestra en las Figuras 3.6, 3.7 y 3.8 – [A].
3	700°C	Colocación de 4 termopares como se muestra en las Figuras 3.6 y 3.7.
4	730°C	Colocación de 4 termopares como se muestra en las Figuras 3.7 y 3.8 – [B].

- 5.1. Elaboración de 1 molde extra para un nuevo análisis (experimento 4 a temperatura de vaciado de 730°C y colocación de 4 termopares como se muestra en la Figura 3.7 y 3.8 – [B].
6. Colocación de 4 termopares tipo K para cada molde, como se muestra en las Figura 3.4 y Figura 3.5.
- 6.1. Se colocaron 2 termopares por la parte inferior del drag, como se muestra en las Figura 3.4 y 3.7.
- El primer termopar se introdujo 1.5 cm dentro de la cavidad de la pieza de interés en la sección donde teóricamente se presentara el rechupe a una distancia de 2.3 cm de la esquina interna de la pieza de interés. **(Zona con rechupe en medio, Z.C.R-en Medio)**
 - El segundo termopar se introdujo hasta que solamente saliera la punta del termopar y en una sección libre de rechupe. **(Zona sin rechupe abajo, Z.S.R- Abajo)**
- 6.2. Se colocaron 2 termopares por la parte superior del cope en la misma posición que los 2 termopares colocados por la parte inferior del drag, Figura 3.5 y 3.6
- El primer termopar se introdujo hasta que solamente saliera la punta del termopar. **(Zona con rechupe arriba, Z.C.R-Arriba(Figura 3.8-[A]))**
 - Para un nuevo análisis se siguió el mismo procedimiento para solamente 3 termopares(ZCR- en medio, ZSR- abajo y arriba) pero para el termopar **ZCR-Arriba(Figura 3.8-[B])** se procede a introducir hasta cierta profundidad dejando una ligera capa de arena entre la punta del termopar y el defecto(entre 0.2 a 0.5 cm de espesor)

- El segundo termopar se introdujo hasta que solamente saliera la punta del termopar y asegurando de que es una sección libre de rechufe. **Zona sin rechufe arriba (Z.S.R.-Arriba).**

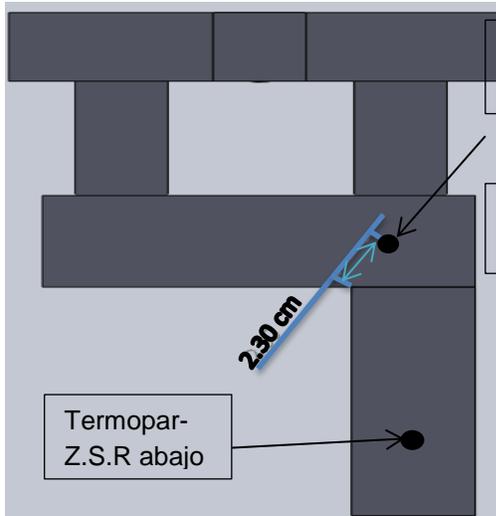


Figura 3.4. Vista inferior (Drag).

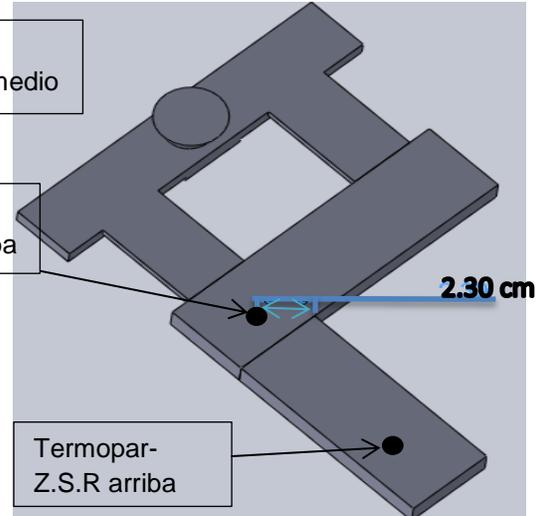


Figura 3.5 Vista superior (Cope).

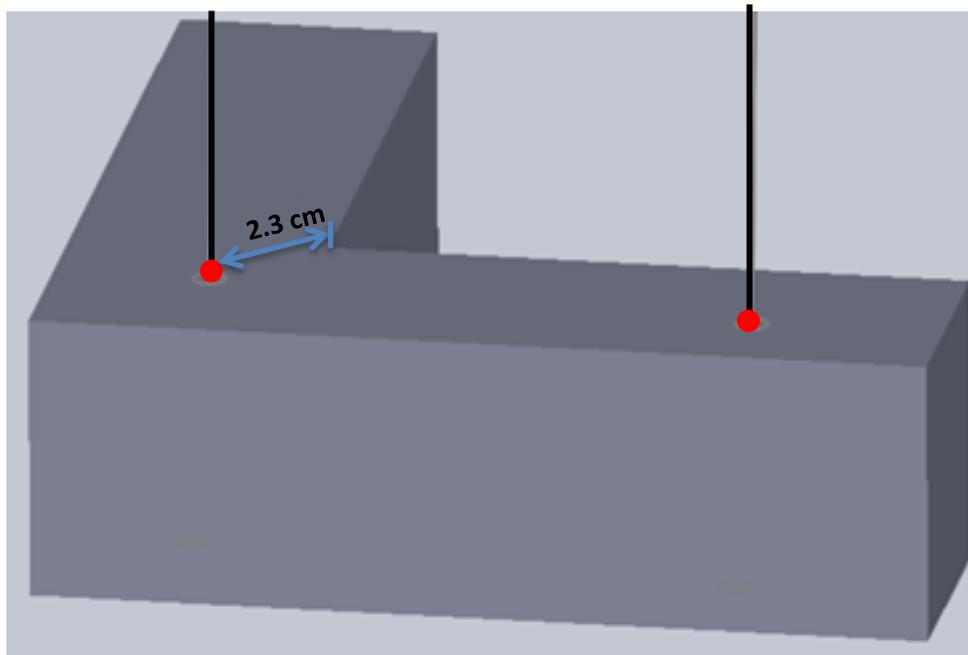


Figura 3.6. Vista superior (Z.C.R y Z.C.R. arriba).

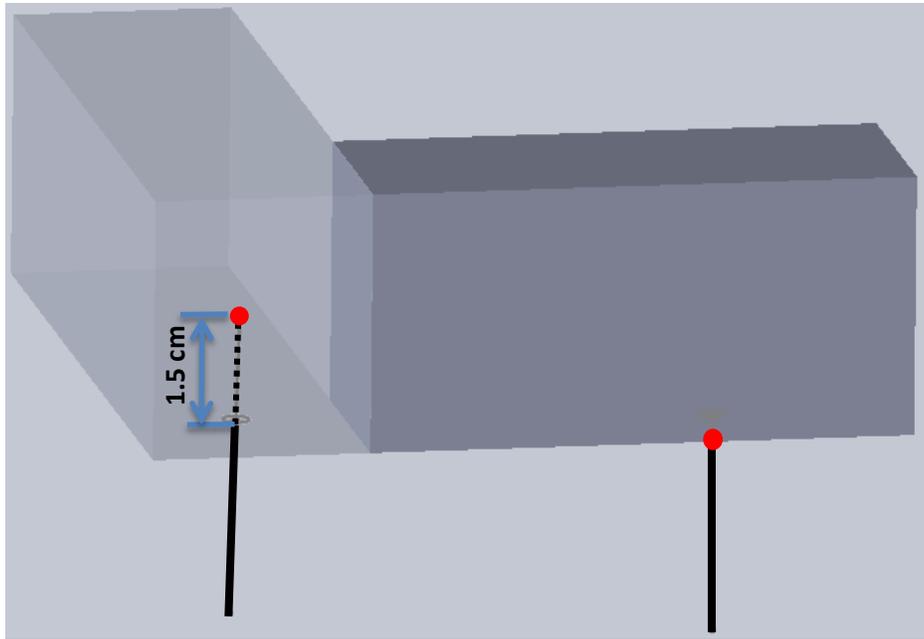


Figura 3.7 Vista lateral con transparencia en la Z.C.R. en medio y termopar Z.S.R. abajo.

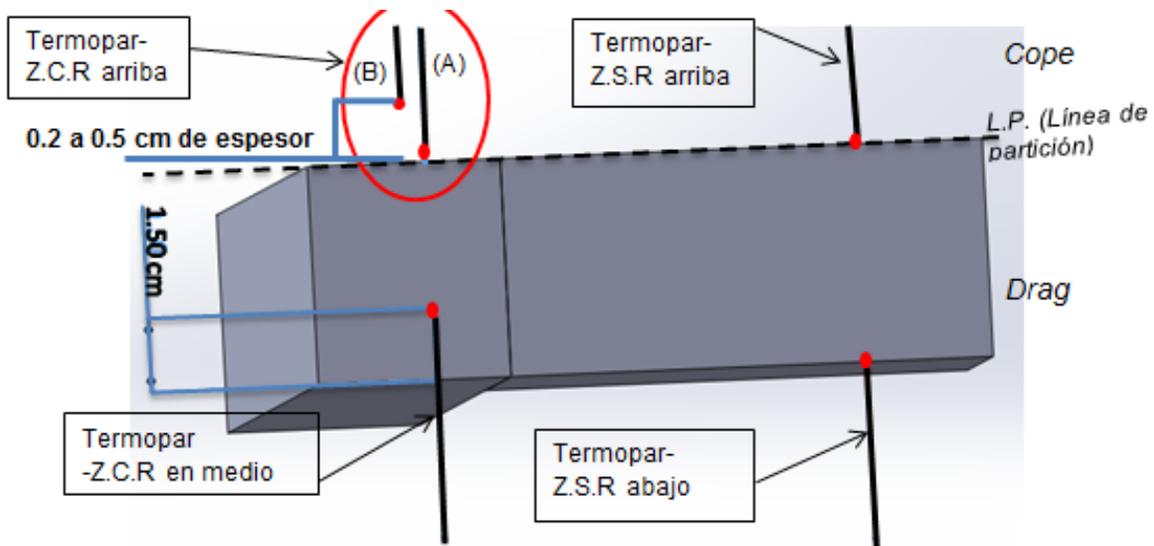


Figura 3.8 Colocación de termopares Vista lateral (Cope y drag).

7. Instrumentación del molde. Colocación del adquisidor de datos National Instrument (Tarjeta y Chasis de adquisición de datos) para la recolección de datos de los 4 Termopares.
8. Preparación de la carga (Precalentamiento de la carga en una mufla de 600°C y encendido del horno de resistencia).
9. Carga al horno de resistencia con el metal ya precalentado.

10. Monitoreo de la temperatura del metal líquido a través de un termopar conectado a un multímetro.

11. Una vez alcanzada la temperatura de trabajo, 780°C, se retira el crisol del horno de resistencia y se procede con el vaciado a molde, respetando las temperaturas de coladas propuestas (760°C, 730°C (ZCR-Arriba (A)), 730°C (ZCR-Arriba (B)) y 700°C para cada experimento, como se muestra en las Figura 3.9 y 3.10.



Figura 3.9. Monitoreo de temperatura



Figura 3.10. Vaciado a molde

12. Adquisición de los datos de cada una de las pruebas con el software NI Signal express, como se observa en la Figura 3.11.

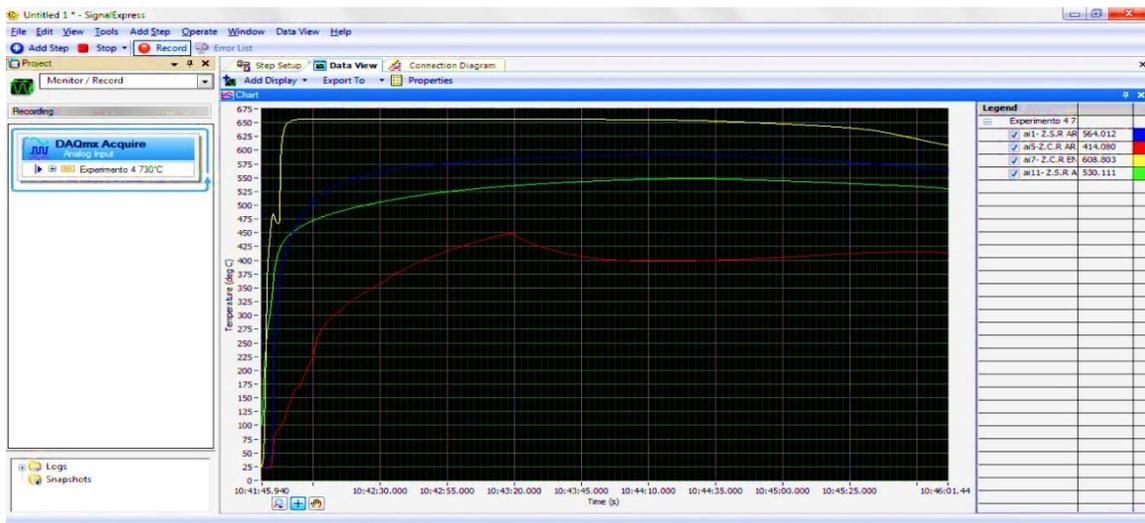


Figura 3.11. Adquisidor de datos NI Signal Express.

13. Tratamiento de los datos experimentales, realizando la gráfica temperatura contra tiempo (T vs t) y análisis de la misma. Los datos experimentales se trataron con el programa "Table Curve 2D" con una suavización de los datos del 0.5%, como se muestra en la Figura 3.12.

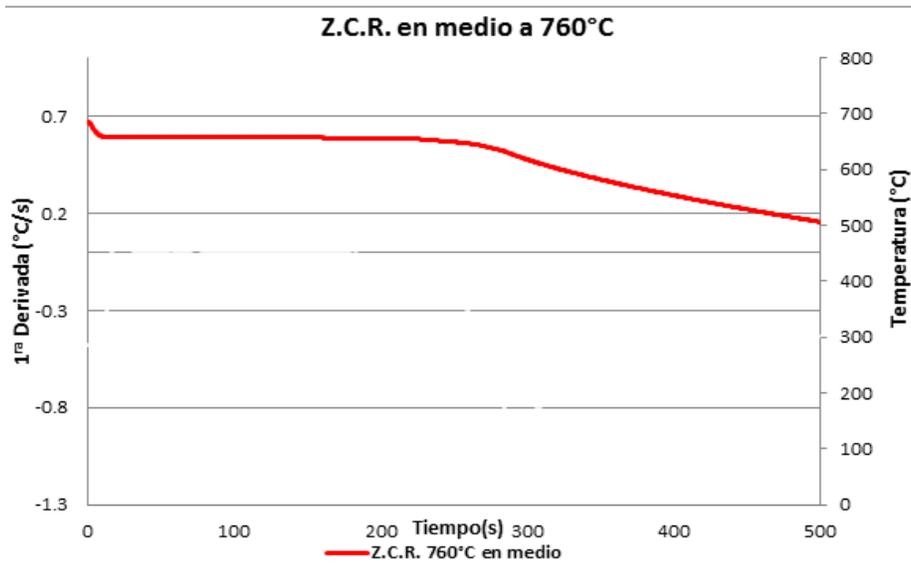


Figura 3.12. Curva de enfriamiento tratada 0.5% (Z.C.R. en medio a 760°C).

14. Graficar los datos experimentales aplicando la 1ª derivada para poder analizar la velocidad de enfriamiento ($\frac{dT}{dt}$ vs t), en conjunto con la curva de enfriamiento, como se aprecian en la Figura 3.13.

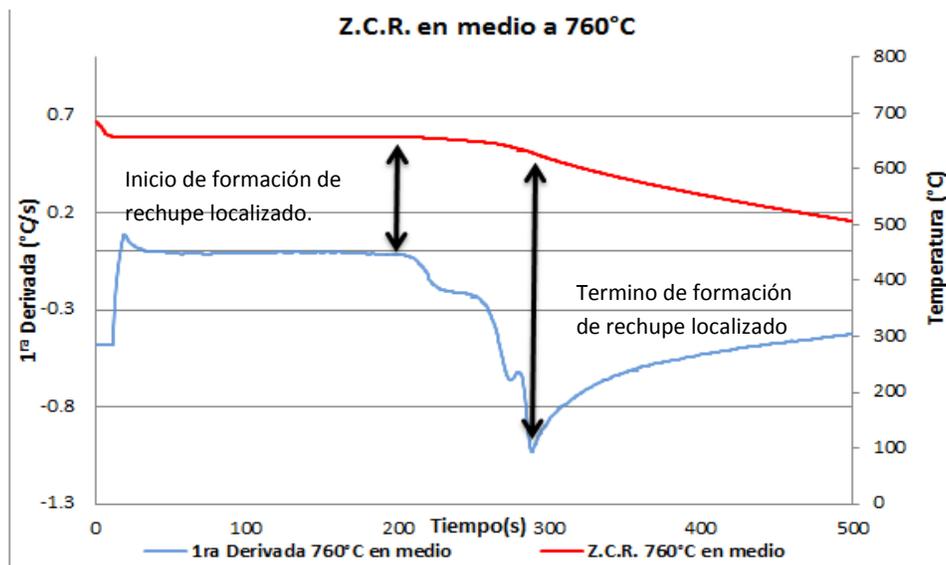


Figura 3.13. Curva de enfriamiento y 1ª Derivada (Z.C.R en medio a 70°C).

Capítulo 4 Resultados y Análisis de resultados

4.1. Fotografías de los 4 experimentos para cada temperatura (760°C, 730°C-(A), 730°C-(B) y 700°C)

En esta parte del trabajo se puede apreciar en las fotografías tomadas para cada experimento, la presencia del rechupe localizado en la zona esperada y la posición final en la cual aparecen los termopares.

❖ **Experimento 1: Pieza tipo “L” con una Temperatura de vaciado a 760°C, como se muestra en las Figuras 4.1 a 4.4.**



Figura 4.1 Pieza en “L” (Vista superior)



Figura 4.2 Rechupe pieza en “L” (Vista superior)



Figura 4.3 Pieza cortada en medio

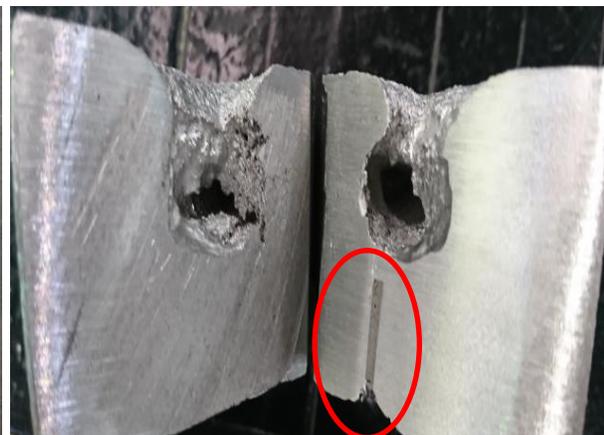


Figura 4.4 Termopar en medio y Rechupe

En el experimento 1, con una temperatura de vaciado de 760°C se puede observar en la Figura 4.1 y 4.2 la aparición de un rechupe localizado externo, en la zona donde colocaron los termopares Z.C.R en medio y arriba. Es necesario señalar

que de las 3 pruebas realizadas fue el único que presentó un rechupe localizado externo.

Para la Figura 4.4 se hizo un corte transversal en la zona donde se localiza el rechupe y el termopar con la leyenda “Zona con rechupe en medio, con el fin de verificar sobre los datos obtenidos experimentalmente sean del defecto (Rechupe).

❖ **Experimento 2: Pieza tipo “L” con una Temperatura de vaciado a 730°C (ZCR-Arriba (A)), figura 4.5 a 4.7.**



Figura 4.5 Vista superior



Figura 4.6 Vista inferior



Figura 4.7 Vista lateral del Rechupe

Para el experimento 2 se observa en la Figura 4.5 dentro del círculo rojo la presencia del rechupe localizado interno y en la Figura 3.8 se observa como quedaron los termopares con la leyenda “Zona con rechupe en medio y abajo”

En la Figura 4.7 se aprecia dentro del círculo rojo la aparición del rechupe localizado en la junta interna mencionada anteriormente (junta caliente).

❖ Experimento 3: Pieza tipo “L” con una Temperatura de vaciado a 700°C, figura 4.8 a 4.11.



Figura 4.8 Vista superior

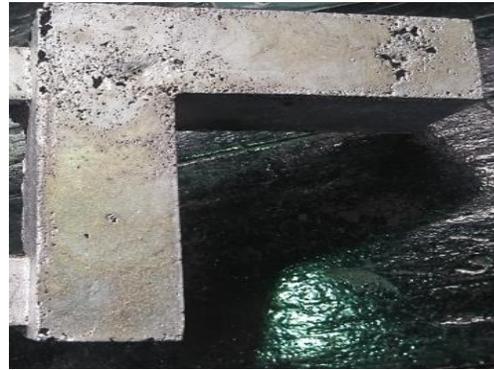


Figura 4.9 Vista inferior



Figura 4.10 Vista lateral del Rechupe



Figura 4.11 Corte transversal (Z.S.R arriba)

En los experimento 2 y 3 se puede apreciar en las Figuras 4.5 y 4.8 la presencia del rechupe, como se describe anteriormente (una depresión del metal), el defecto(rechupe) tiene la característica en este caso que es un rechupe localizado interno(vista superior) ya que se encuentra debajo de la capa de metal que se formó, pero observando con más detalle las piezas de los experimentos en las piezas tipo "L" de manera lateral, como se muestra en la Figura 4.7 y 4.10, se muestra la presencia del rechupe (para la Figura 4.7 el rechupes es externo y para la Figura 4.10 el rechupe es interno) en la junta interna de la pieza tipo "L", donde se tiene la junta caliente de la pieza.

En la Figura 4.11 se hizo un corte transversal a la zona sin rechupe (Z.S.R) para cotejar con los datos adquiridos de la curva de enfriamiento, representaran solamente el enfriamiento del aluminio. Por tal motivo se tiene datos experimentales que demuestran el enfriamiento del solido sin el defecto (Z.S.R) y datos representativos del defecto (Rechupe), por lo cual se puede comparar las curvas de enfriamiento, para poder conocer la señal y el momento en que comienza a formarse el rechupe y también cuando termina la formación del mismo.

❖ **Experimento 4: Pieza en "L" y Temperatura de vaciado a 730°C (ZCR-Arriba -B, figura 3.8), figura 4.12 a 4.16.**



Figura 4.12 Pieza en "L" (Vista superior)



Figura 4.13 Rechupe pieza en "L" (Vista superior)

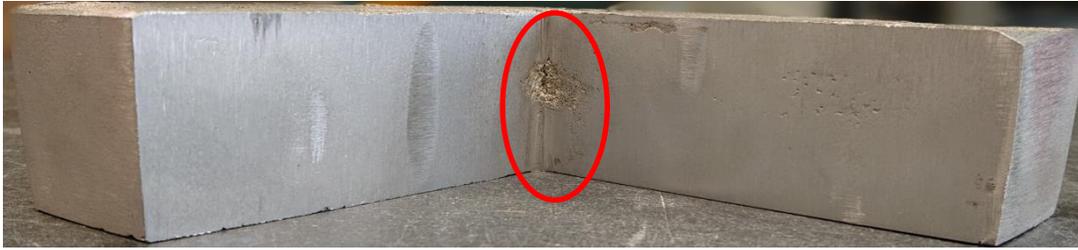


Figura 4.14 *Vista lateral del Rechupe*



Figura 4.15 *Pieza cortada en medio*

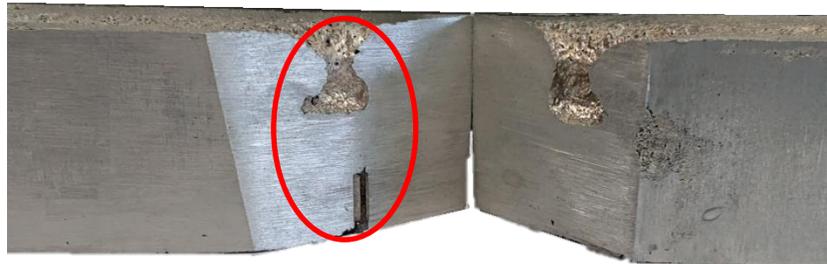


Figura 4.16 *Termopar en medio y Rechupe*

Para el experimento 4, como se mencionó anteriormente, solamente se modificó el termopar de la Z.C.R arriba (Z.C.R. arriba-B), dejando una ligera capa de arena entre la intercara metal – molde.

En la Figura 4.12 se aprecia los mismos resultados que aparecieron en las 3 experimentaciones anteriores, por tal motivo se puede observar la presencia del rechupe localizado exactamente en la misma zona (en este caso es un rechupe externo) y se puede ver con mayor claridad el rechupe localizado en la Figura 4.13.

Como también se aprecia en la junta interna de la pieza (Tipo “L”), la depresión del metal, la cual es una de las características para identificar al defecto, como se aprecia en la Figura 4.14. Por tal motivo se procedió hacer un corte transversal en la zona del rechupe localizado, como se muestra en la Figura 4.15 para poder apreciar la forma del rechupe localizado.

En la Figura 4.16 dentro del círculo rojo se observa, cómo se formó el rechupe localizado y también se aprecia el termopar de la Z.C.R. en medio, lo cual indica en los datos de la curva de enfriamiento son de la formación del rechupe localizado.

4.2. Gráficas de las curvas de enfriamiento y 1^{ra} Derivada de los 4 experimentos (760°C, 730°C ZCR-Arriba[A], 700°C y 730°C ZCR-Arriba[B])

En esta parte del trabajo se aprecia para cada zona, los datos adquiridos experimentalmente, graficados en curvas de enfriamiento, como también los datos adquiridos del uso de la 1^{ra} derivada.

El uso del análisis térmico de la curva de enfriamiento para el análisis de la formación de un rechupe localizado da una señal característica en la comparación de las distintas zonas donde se obtiene la señal (Z.C.R en medio o arriba), se puede observar para los datos de la Z.C.R en medio y arriba, la aparición de un cambio de velocidad de enfriamiento durante su solidificación (inicio de la formación del rechupe localizado) y posteriormente tiene un cambio de pendiente, indicando el término del defecto.

A simple vista, los datos experimentales y la curva de enfriamiento no se puede determinar en qué momento comienza la formación del rechupe, pero implementando el uso de la 1^{ra} derivada se aprecia los diferentes cambios de pendiente que se forman, debido al cambio de velocidad de enfriamiento que se tiene durante la experimentación, donde se muestra el inicio de la formación del rechupe representado por un cambio de pendiente y el termino del mismo representado por un pico, cuando se grafican los datos adquiridos de la 1^{ra} derivada.

Se evaluó la señal en las dos posiciones mencionadas anteriormente (Z.C.R en medio y arriba), observando el comportamiento de la señal a 3 diferentes temperaturas de vaciado (760°C, 730°C y 700°C), para analizar la curva de enfriamiento de cada uno de los experimentos y la forma característica de la señal cuando se le aplica la 1^{ra} derivada.

Es necesario mencionar la realización de una 4^{ta} experimentación para valorar la señal adquirida por el termopar de la Z.C.R arriba, con una ligera capa de arena entre el metal líquido y la punta del termopar, para poder implementar dicha práctica como un ensayo no destructivo.

Adquiriendo para futuras experimentaciones el uso de solamente 1 termopar y quitando el termopar de la Z.C.R. en medio.

4.2.1. Curvas de enfriamiento y 1^{ra} Derivada a Temperatura de vaciado de 760°C (Z.C.R (en medio y arriba) y Z.S.R (arriba y abajo))

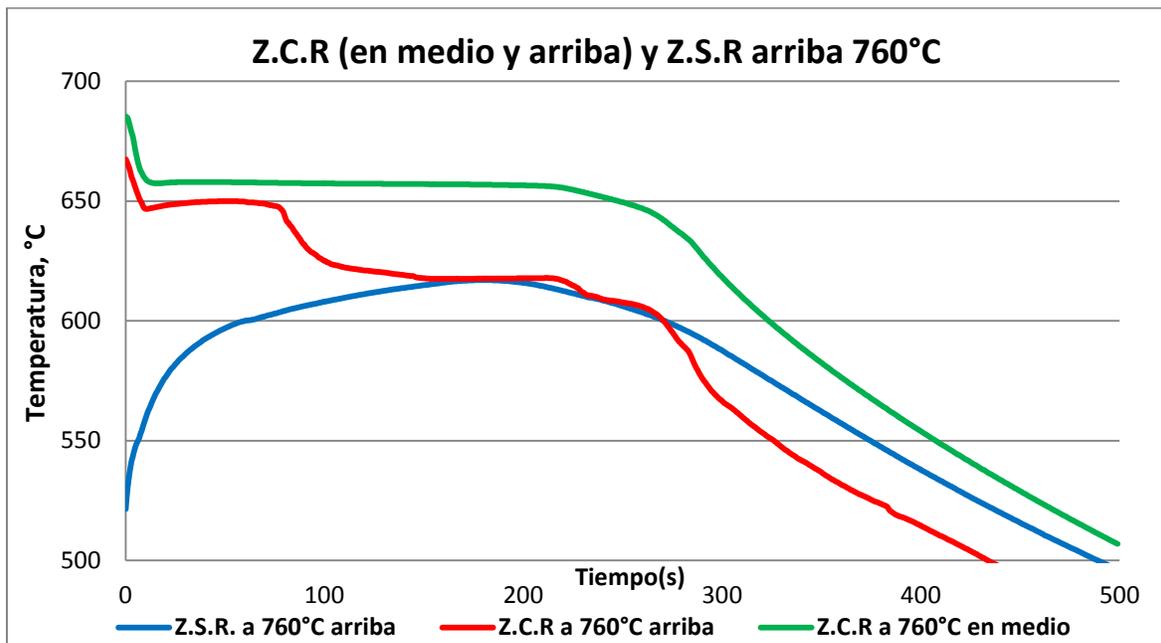


Figura 4.17 Comparación de Curvas de enfriamiento Z.C.R (en medio y arriba) y Z.S.R. arriba a 760°C

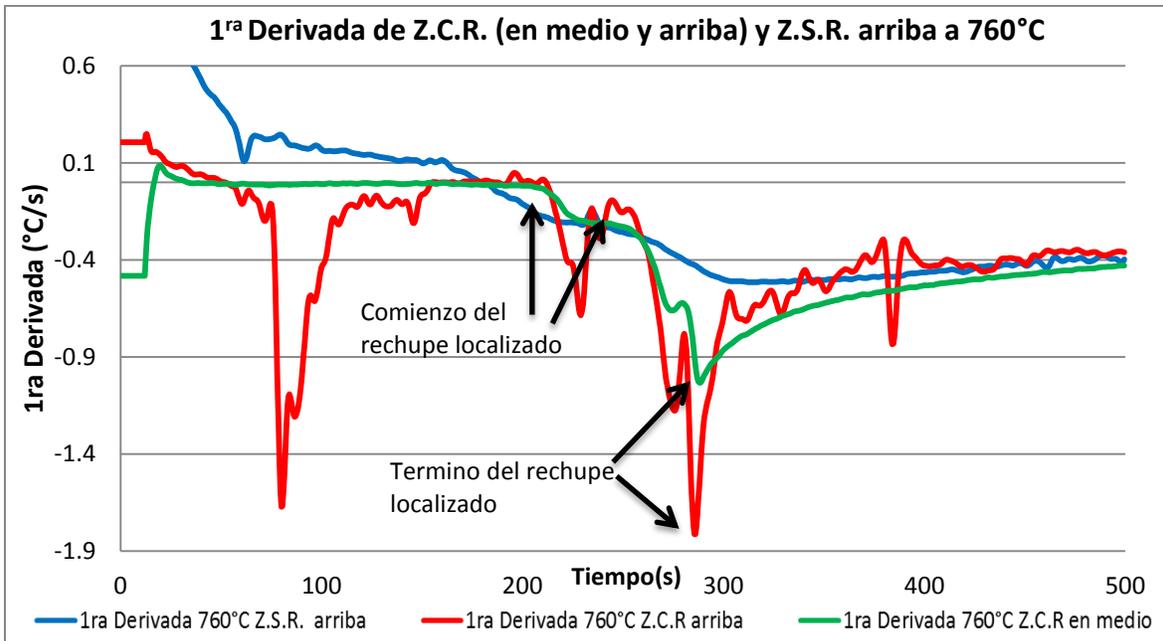


Figura 4.18 Comparación de la 1ª Derivada Z.C.R (en medio y arriba) y Z.S.R. arriba a 760°C

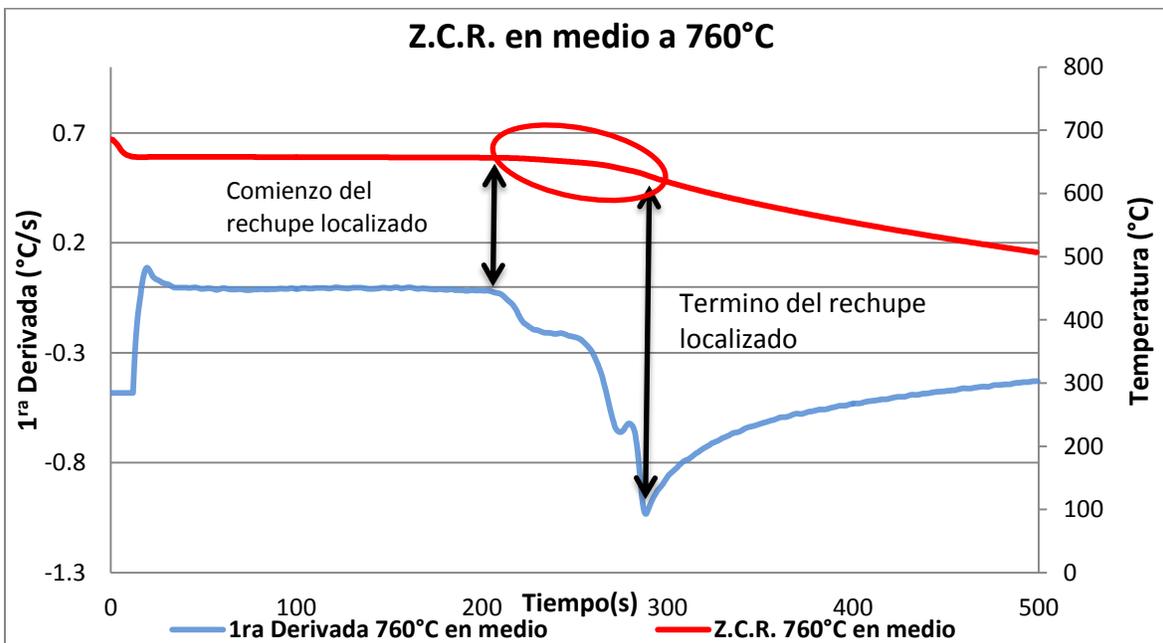


Figura 4.19 Comparación entre la Curva de enfriamiento y 1ª Derivada a 760°C (Z.C.R. en medio) con respecto al comienzo y termino del rechupe localizado.

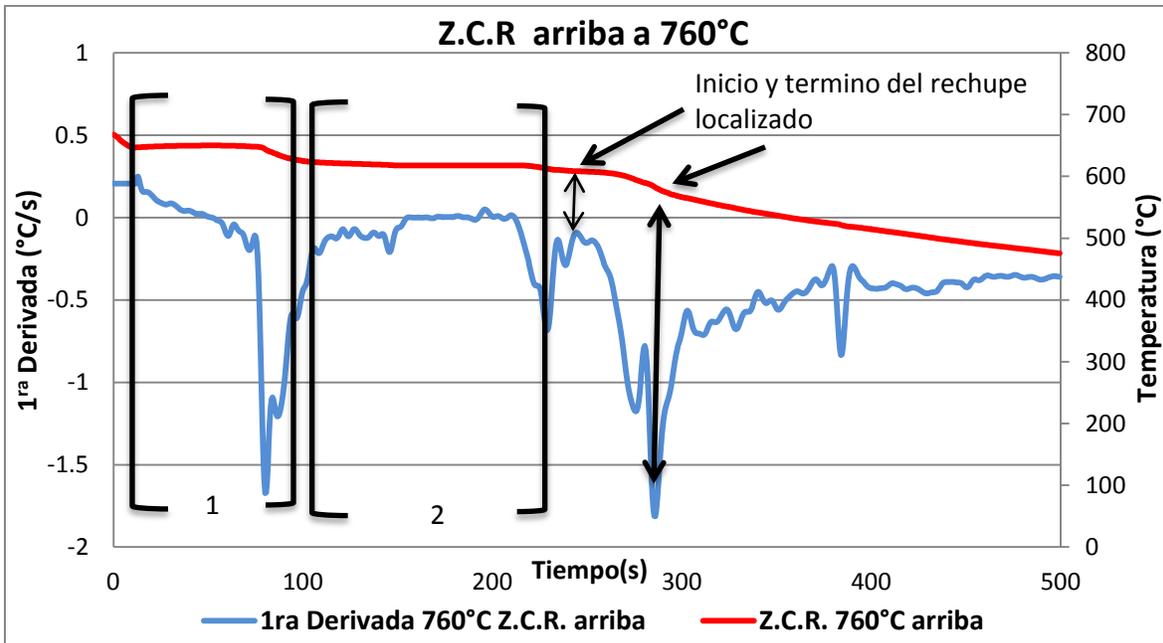


Figura 4.20 Comparación entre la Curva de enfriamiento y 1ª Derivada a 760°C (Z.C.R. arriba) con respecto al comienzo y termino del rechupe localizado.

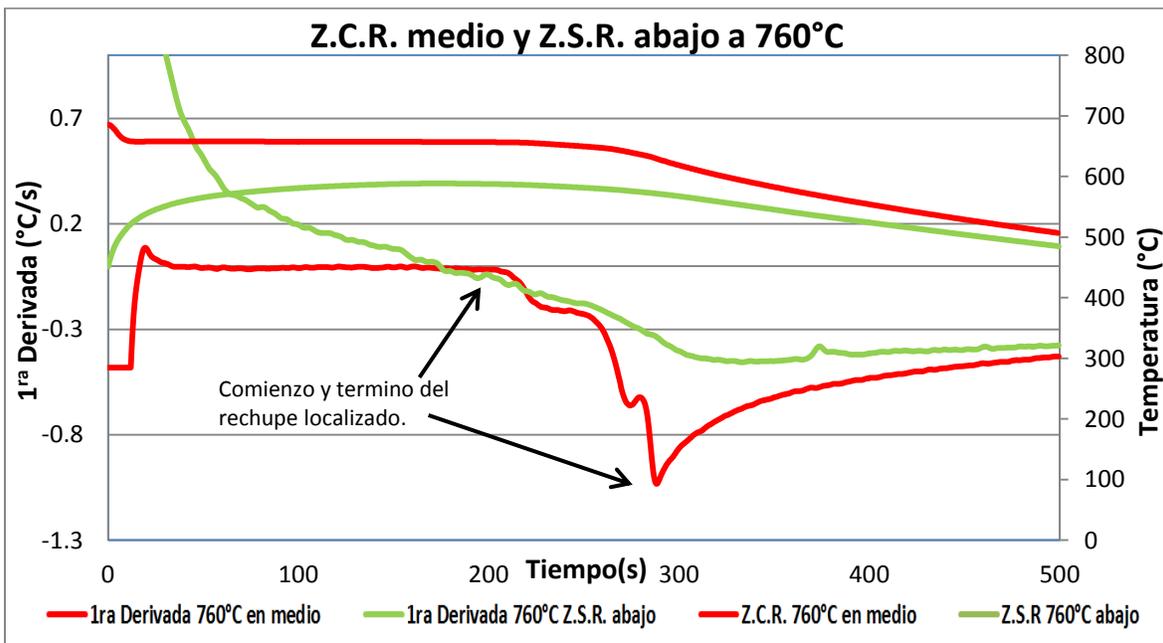


Figura 4.21 Comparación Curva de enfriamiento y 1ª Derivada a 760°C (Z.C.R. en medio y Z.S.R. abajo)

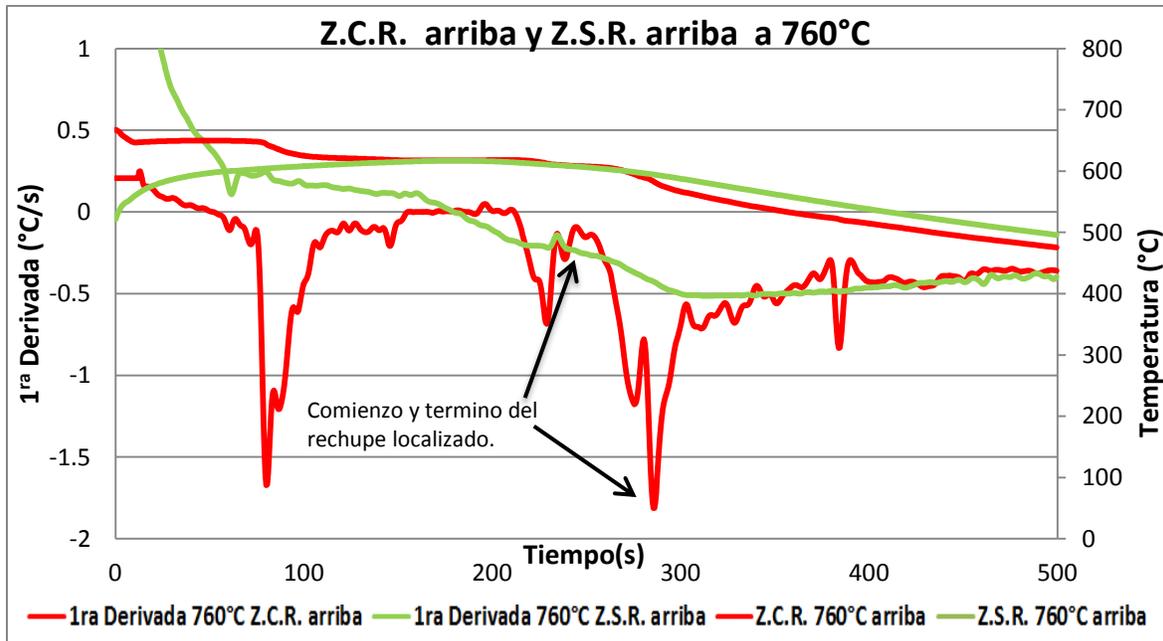


Figura 4.22 Comparación Curva de enfriamiento y 1ª Derivada a 760°C (Z.C.R. arriba y Z.S.R. arriba)

En la Figura 4.17 se observan las curvas de enfriamiento para la Z.C.R (en medio y arriba) y la Z.S.R arriba a una temperatura de vaciado de 760°C, las cuales al compararlas, se aprecian, diferencias entre las curvas de enfriamiento, debido a la zona donde se adquirieron los datos. Por tal motivo para la Z.C.R en medio y arriba se observa que tiene una curvatura diferente al término de la solidificación y al comparar dicha característica con la parte final de la solidificación de la Z.S.R arriba, se aprecia la señal característica del rechupe localizado como se muestra en el círculo rojo de la Figura 4.19.

Para la Z.C.R arriba en la curva de enfriamiento, se tiene una línea recta al termino del enfriamiento del líquido que corresponde a la solidificación del material, pero en cierto momento durante la solidificación se observa otro cambio de pendiente, el cual representa la formación de una capa del solido del material mencionado anteriormente, como también se visualiza en la curva de enfriamiento un cambio de pendiente que representa la formación del rechupe localizado, Figura 4.17.

Con respecto a la Z.C.R en medio en la curva de enfriamiento, se observa después del enfriamiento del líquido, una línea recta que corresponde a la

solidificación del material, pero en cierto momento se tiene un cambio de velocidad de enfriamiento y un cambio de pendiente, el cual representa el inicio de la formación del rechupe localizado (en este caso no se puede ver a simple vista, por tal motivo se aplica el uso de la 1^{ra} derivada para ver los diferentes cambios de velocidad de enfriamiento), Figura 4.17.

En la Figura 4.18 se aprecia la 1^{ra} derivada de los datos experimentales para la Z.C.R (en medio y arriba) y la Z.S.R arriba, donde se muestra el momento de aparición del rechupe localizado y la diferencia de señales entre una zona donde se está analizando el rechupe, con respecto a una zona donde no tiene el defecto.

Con respecto a las zonas con rechupe (en medio y arriba) se puede ver una diferencia entre ambas señales, con respecto al momento de inicio de la formación del rechupe localizado, el cual es ocasionado por la posición en la que se encuentra cada termopar, debido a que el termopar de la Z.C.R en medio es el primero en detectar el rechupe. Pero como el defecto va creciendo y llega a la zona donde se encuentra el termopar de la Z.C.R arriba, es cuando el termopar detectara la señal del defecto.

Para la Z.S.R arriba se aprecia un claro comportamiento del enfriamiento del sólido sin la presencia de ningún defecto o cambio de pendiente característico del defecto. Por esa razón se puede ver la diferencia de señales que tiene cada zona, ya sea el enfriamiento del sólido o la aparición del rechupe localizado.

En la Figura 4.19 se comparan la curva de enfriamiento con respecto a los datos graficados de la 1^{ra} derivada, para poder identificar el momento en el cual da inicio la formación del rechupe localizado y el término del mismo, para la Z.C.R en medio.

Para la Z.C.R arriba en la Figura 4.20 se observan cambios de pendiente durante la solidificación del material en la curva de enfriamiento, pero al aplicar la 1^{ra} derivada a los datos experimentales, se aprecia con mayor claridad los cambios

de pendiente y los picos de velocidad de enfriamiento, que representa el término cada proceso de solidificación (capa de metal, solidificación y rehecho localizado).

Una vez que el metal termina su estado líquido, en la curva de enfriamiento se tiene un cambio de pendiente y línea semi recta al comparar dicha sección de la curva de enfriamiento con los datos de la 1^{ra} derivada se observa con mayor claridad el cambio de velocidad de enfriamiento que se tiene en esa sección y un pico en los datos, representando el término de la solidificación del material como se muestra en la Figura 4.20- sección de la curva 1, posterior a dicha sección de la curva de enfriamiento, se observa una línea recta y un cambio de pendiente, representando por la capa formada en la intercara metal-molde del proceso de contracción de solidificación, y en los datos de la 1^{ra} derivada se tiene también una línea semi recta indicando que no hay ningún cambio de velocidad de enfriamiento como se aprecia en la Figura 4.20- sección de la curva 2, pero en cierto momento, se tiene un cambio de pendiente y en la 1^{ra} derivada se confirma ese cambio, el cual es representado por un pico como también un cambio de velocidad de enfriamiento y da comienzo a formarse el rehecho localizado en esa sección de la curva de enfriamiento y de la 1^{ra} derivada (inicio y término del rehecho localizado).

Al comparar cada zona del rehecho localizad (Z.C.R. en medio y arriba), con la zona donde no se tiene el defecto (Z.S.R arriba y abajo) se confirma, tanto para la curva de enfriamiento y los datos de la 1^{ra} derivada, que el estudio es del defecto con respecto a las Figura 4.21 y Figura 4.22.

4.2.2. Curvas de enfriamiento y 1^{ra} Derivada a Temperatura de vaciado de 730°C (Z.C.R. (en medio y arriba-(A), Figura 3.8) y Z.S.R. (abajo y arriba))

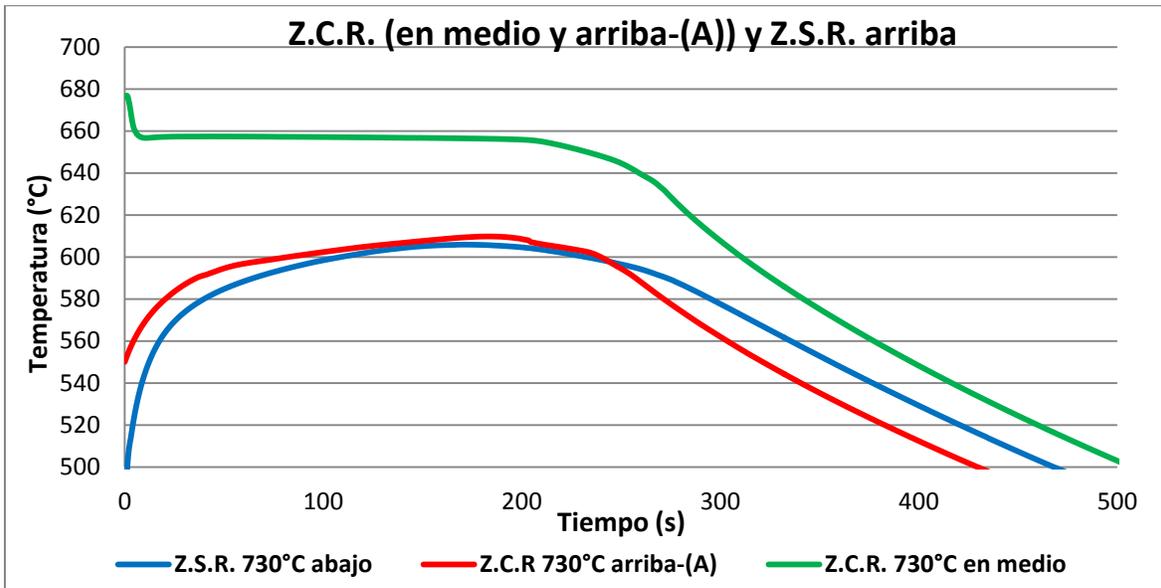


Figura 4.23 Comparación de Curvas de enfriamiento Z.C.R. (en medio y arriba-(A)) y Z.S.R. arriba a 730°C

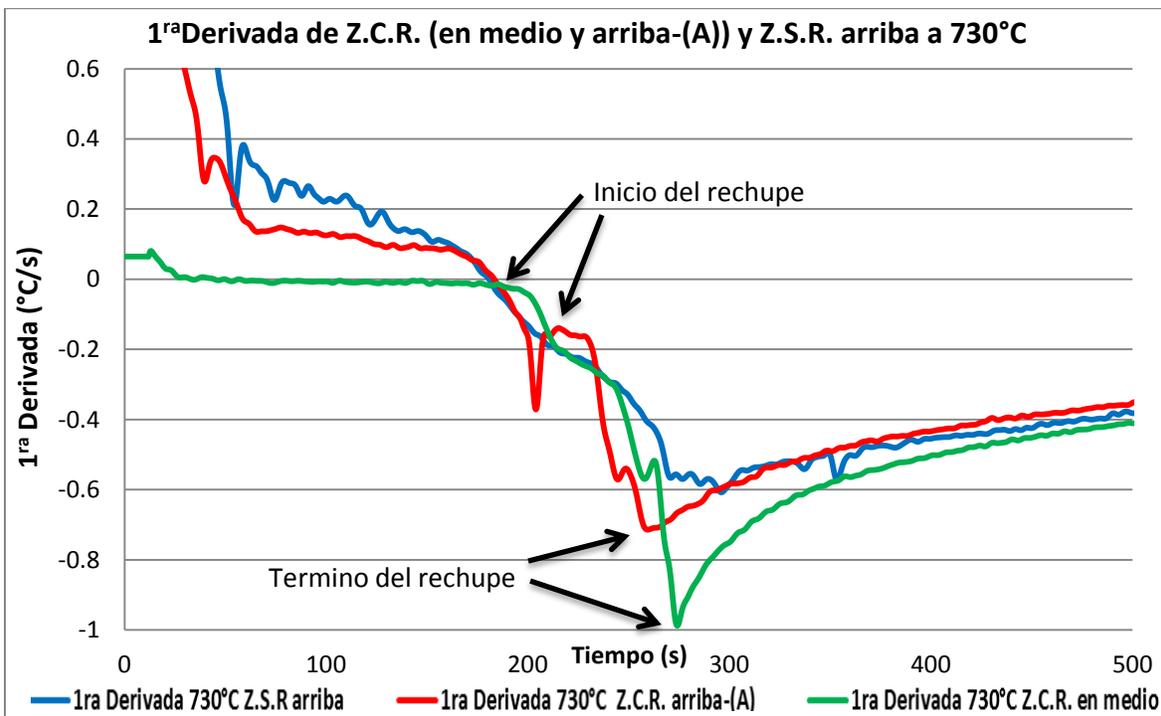


Figura 4.24 Comparación de la 1^{ra} Derivada Z.C.R. (en medio y arriba-(A)) y Z.S.R. arriba a 730°C

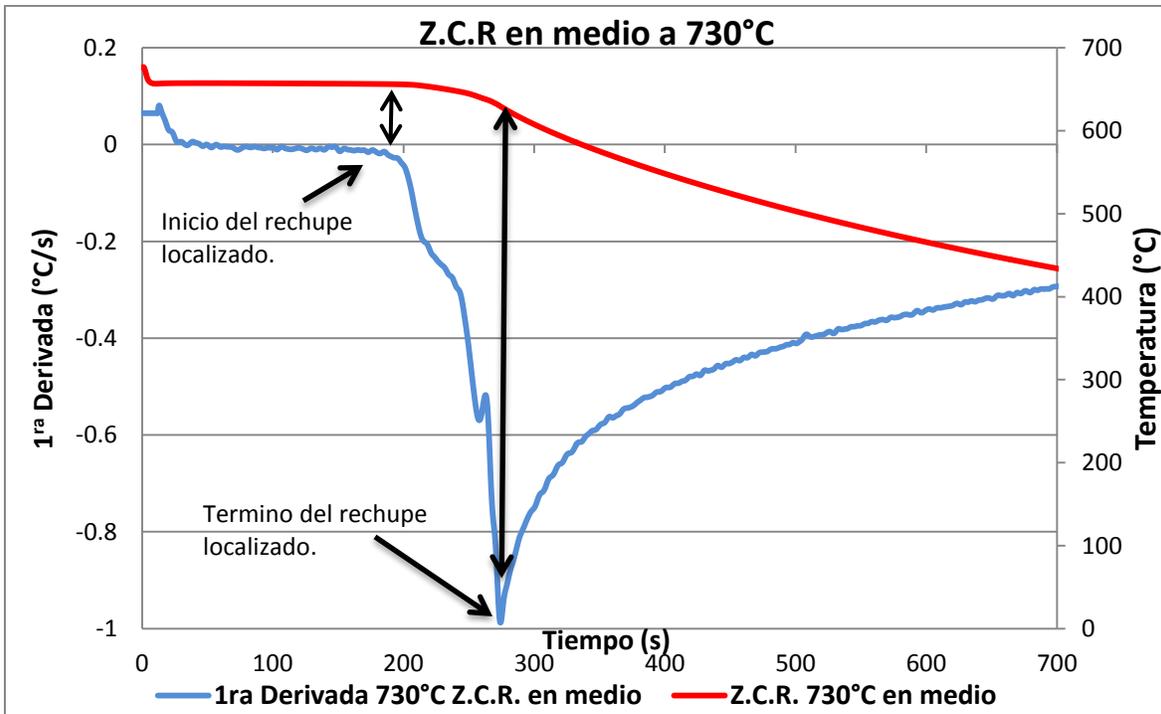


Figura 4.25 Comparación entre la Curva de enfriamiento y 1ª Derivada a 730°C (Z.C.R. en medio) con respecto al comienzo y termino del rechupe localizado.

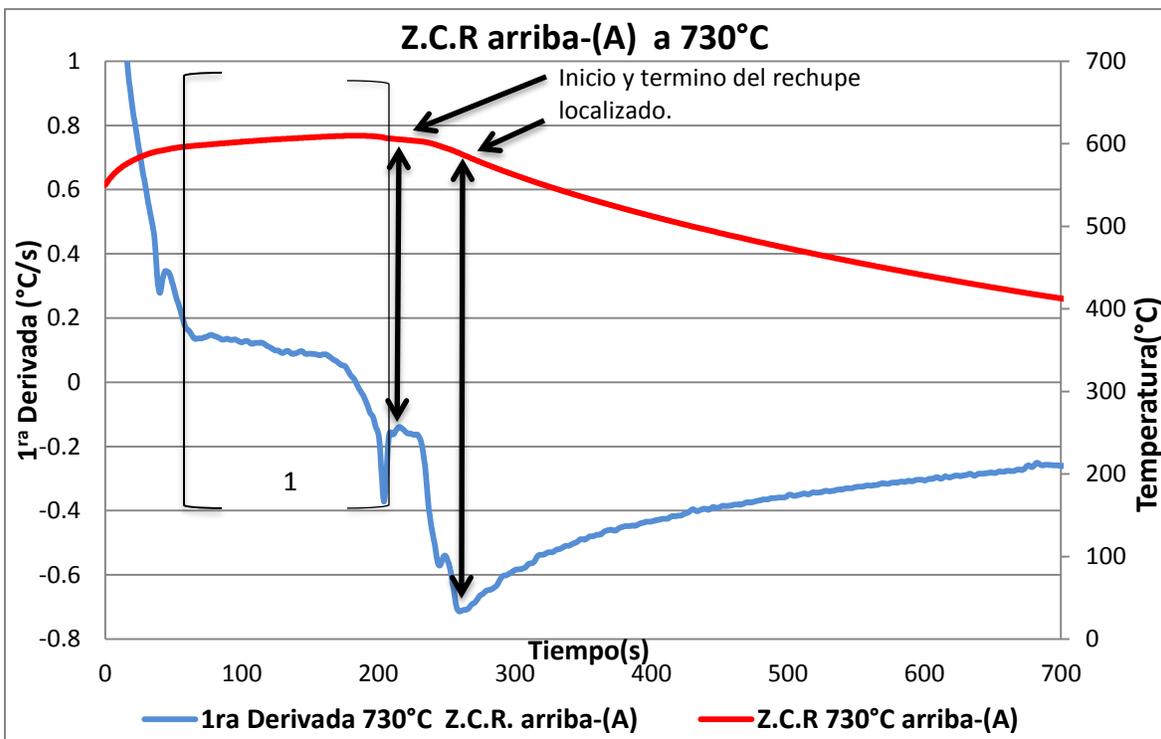


Figura 4.26 Comparación entre la Curva de enfriamiento y 1ª Derivada a 730°C (Z.C.R. arriba -(A)) con respecto al comienzo y termino del rechupe localizado.

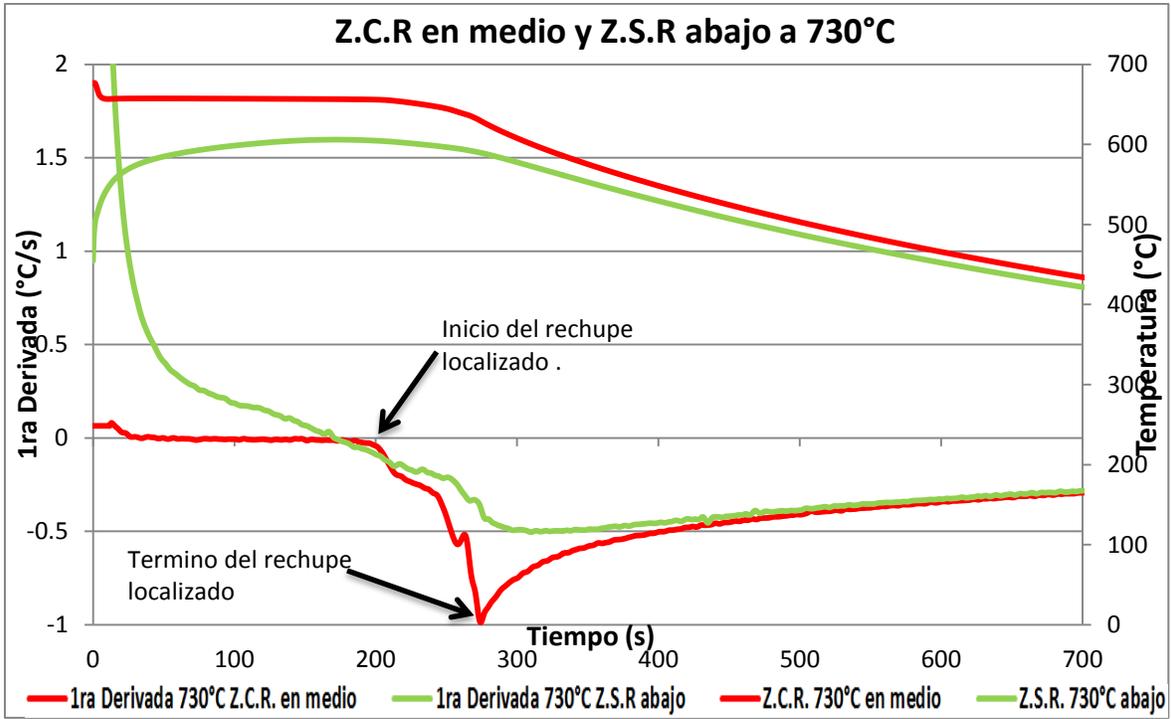


Figura 4.27 Comparación Curva de enfriamiento y 1ª Derivada a 730°C (Z.C.R. en medio y Z.S.R. abajo)

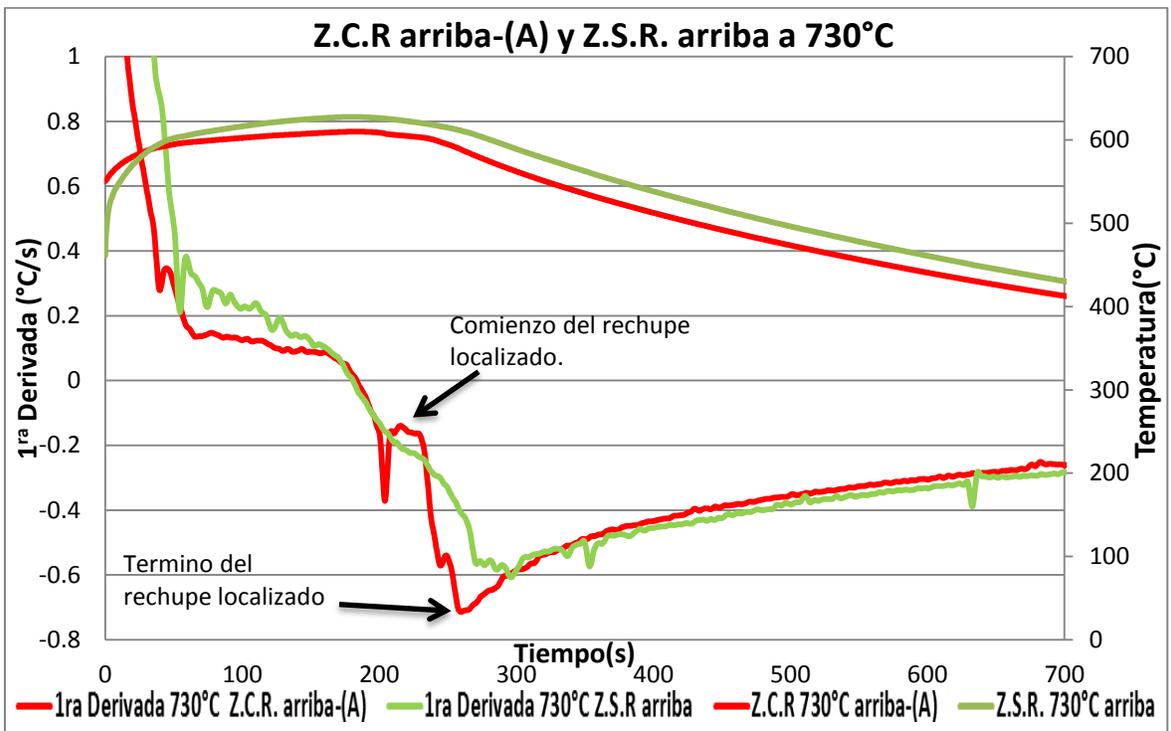


Figura 4.28 Comparación Curva de enfriamiento y 1ª Derivada a 730°C (Z.C.R. arriba-(A) y Z.S.R. arriba)

En la Figura 4.23 se observan las curvas de enfriamiento para la Z.C.R (en medio y arriba) y la Z.S.R arriba a una temperatura de vaciado de 730°C, las cuales al compararse, se aprecian, diferencias entre las curvas de enfriamiento. Por tal motivo para la Z.C.R en medio y arriba se observa que tiene la misma curvatura que aparece en la experimentación a la temperatura de vaciado de 760°C.

Para la Z.C.R arriba en la curva de enfriamiento, se observa en la Figura 4.23 el incremento de la temperatura y la estabilización de la misma pero en este caso se tiene una temperatura por debajo de la temperatura de solidificación del aluminio puro, considerando dicha situación se observa en la curva de enfriamiento un cambio de pendiente y un incremento en la temperatura de enfriamiento, llegando a un punto máximo y de nuevo bajando su temperatura, teniendo en cuenta que cuando baja la temperatura, se aprecia en la curva de enfriamiento la curvatura antes de comenzar el enfriamiento de líquido. Por tal motivo es necesario aplicar la 1^{ra} derivada a los datos experimentales para apreciar en que momento de la curva de enfriamiento comienza la formación del rechupe localizado para esa zona.

Con respecto a la Z.C.R en medio en la curva de enfriamiento, se observa después del enfriamiento del líquido, una línea recta que corresponde a la solidificación del material, pero en cierto momento se tiene un cambio de velocidad de enfriamiento el cual representa el inicio de la formación del rechupe localizado (en este caso no se puede ver a simple vista, por tal motivo se aplica el uso de la 1^{ra} derivada para ver los diferentes cambios de velocidad de enfriamiento), pero se observa antes del enfriamiento del sólido, la curvatura característica en la curva de enfriamiento, la cual represente al rechupe localizado en esa zona, Figura 4.23.

En la Figura 4.24 se aprecia el uso de la 1^{ra} derivada en los datos experimentales para la Z.C.R (en medio y arriba) y la Z.S.R arriba, donde se muestra el momento de aparición del rechupe localizado y la diferencia de señales entre una zona donde se está analizando el rechupe localizado, con respecto a una zona donde no tiene dicho defecto.

Con respecto a las zonas con rechupe (en medio y arriba) se puede ver una diferencia entre ambas, con respecto al momento de inicio de la formación del rechupe localizado, esto es ocasionado por la posición en la que se encuentra cada termopar, debido a que el termopar de la Z.C.R en medio es el primero en detectar el rechupe. Pero como el defeco va creciendo y llega a la zona donde se encuentra el termopar de la Z.C.R arriba, es cuando el termopar detectara la señal del defecto.

Para la Z.S.R arriba se aprecia un claro comportamiento del enfriamiento del sólido, por esa razón se puede ver la diferencia de señales que tiene cada zona, ya sea el enfriamiento del sólido o la aparición del rechupe localizado.

En la Figura 4.25 se compara la curva de enfriamiento, con respecto a los datos graficados de la 1^{ra} derivada, para poder identificar el momento en el cual da inicio la formación del rechupe localizado y el término del mismo, para la Z.C.R en medio.

Para la Z.C.R arriba en la Figura 4.26 se observa un cambio de pendiente, teniendo un incremento en la temperatura, hasta llegar una temperatura máxima en la curva de enfriamiento como se muestra en la Figura 4.26-sección de la curva 1, la sección mencionada corresponde a la formación de la capa de metal, ocasionada por la contracción y posterior a dicha sección se tiene otro cambio de pendiente y la curvatura que representa la formación del rechupe localizado, pero al aplicar la 1^{ra} derivada a los datos experimentales, se aprecia con mayor claridad los cambios de pendiente y los picos de velocidad de enfriamiento, que representan el término de la capa de metal formada y también la formación del rechupe localizado (inicio y termino del defecto).

Por tal motivo al comparar cada zona del rechupe localizad (Z.C.R. en medio y arriba), con la zona donde no se tiene el defecto (Z.S.R arriba y abajo) se confirma, para la curva de enfriamiento y los datos de la 1^{ra} derivada, que la señal adquirida y el análisis efectuado es del rechupe localizado como se parecía en las Figura 4.27 y Figura 4.28.

4.2.3. Curvas de enfriamiento y 1ª Derivada a Temperatura de vaciado a 700°C (Z.C.R. (en medio y arriba) y Z.S.R. (arriba y abajo)).

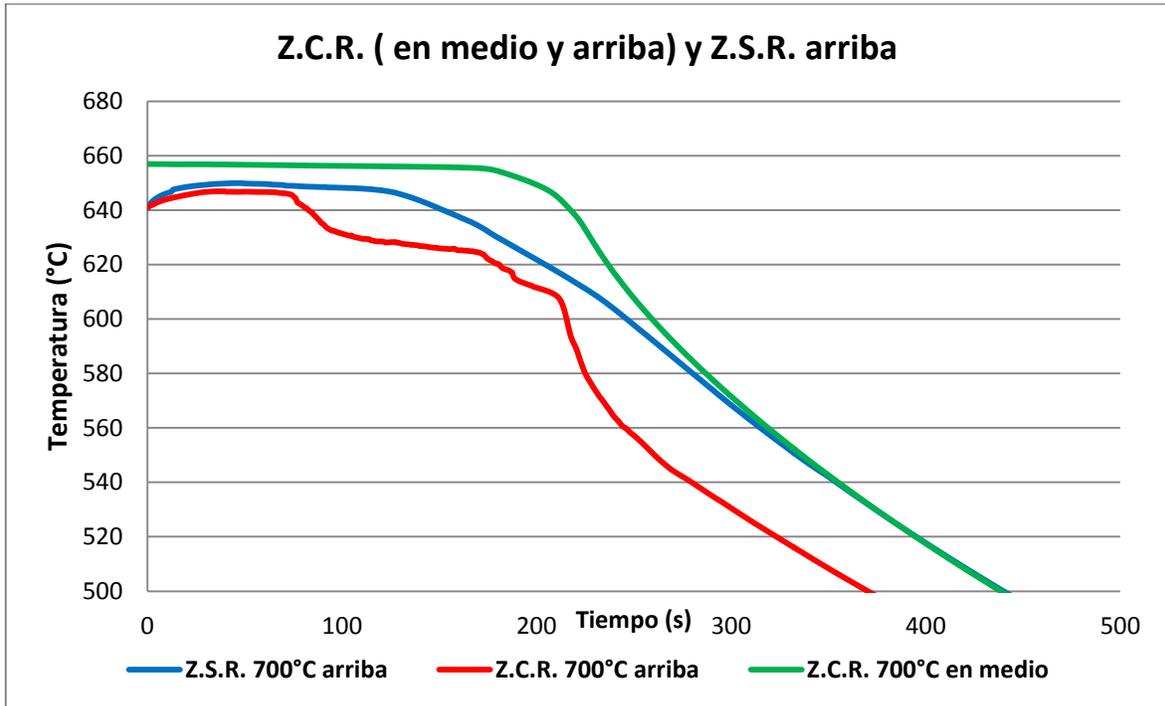


Figura 4.29 Comparación de Curvas de enfriamiento Z.C.R. (en medio y arriba) y Z.S.R. arriba a 700°C

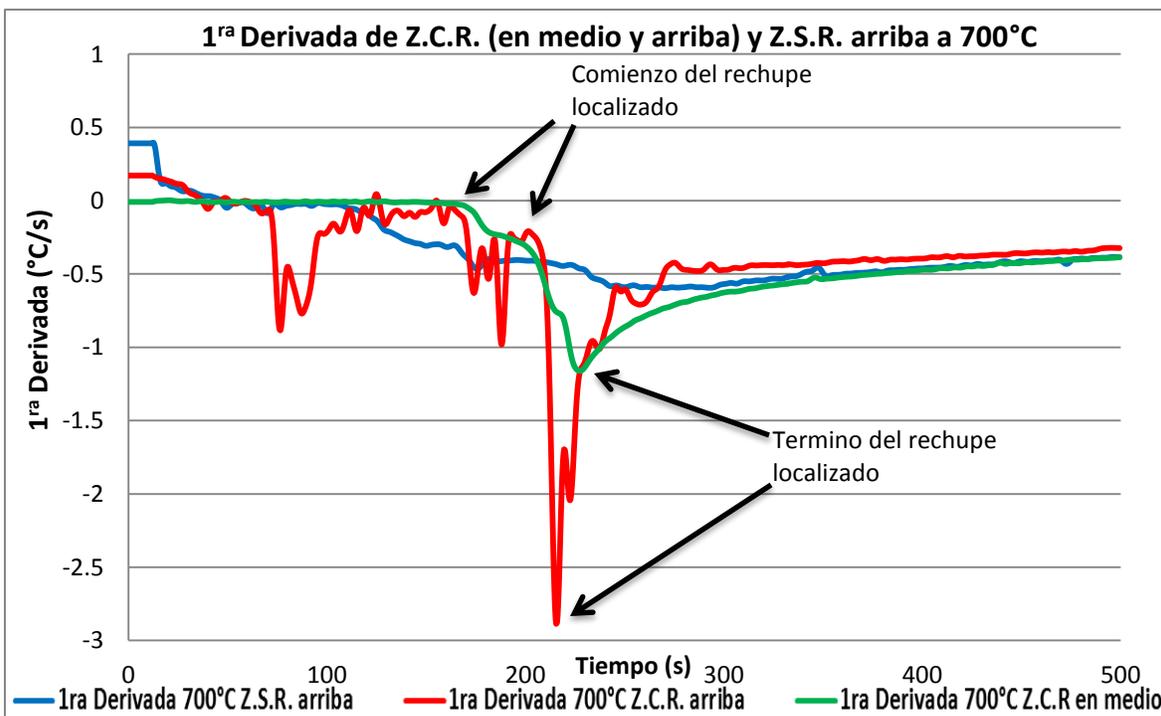


Figura 4.30 Comparación de 1ª Derivada Z.C.R. (en medio y arriba) y Z.S.R. arriba a 700°C

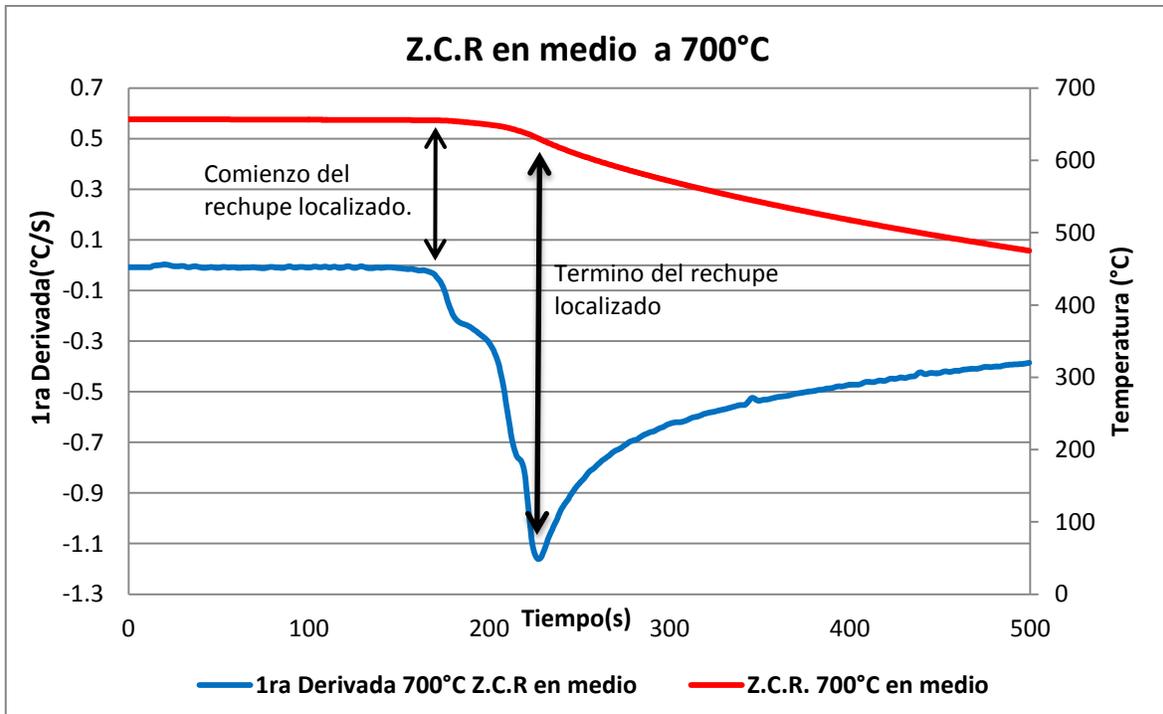


Figura 4.31 Comparación entre la Curva de enfriamiento y 1ª Derivada a 700°C (Z.C.R. en medio) con respecto al comienzo y termino del rechupe localizado.

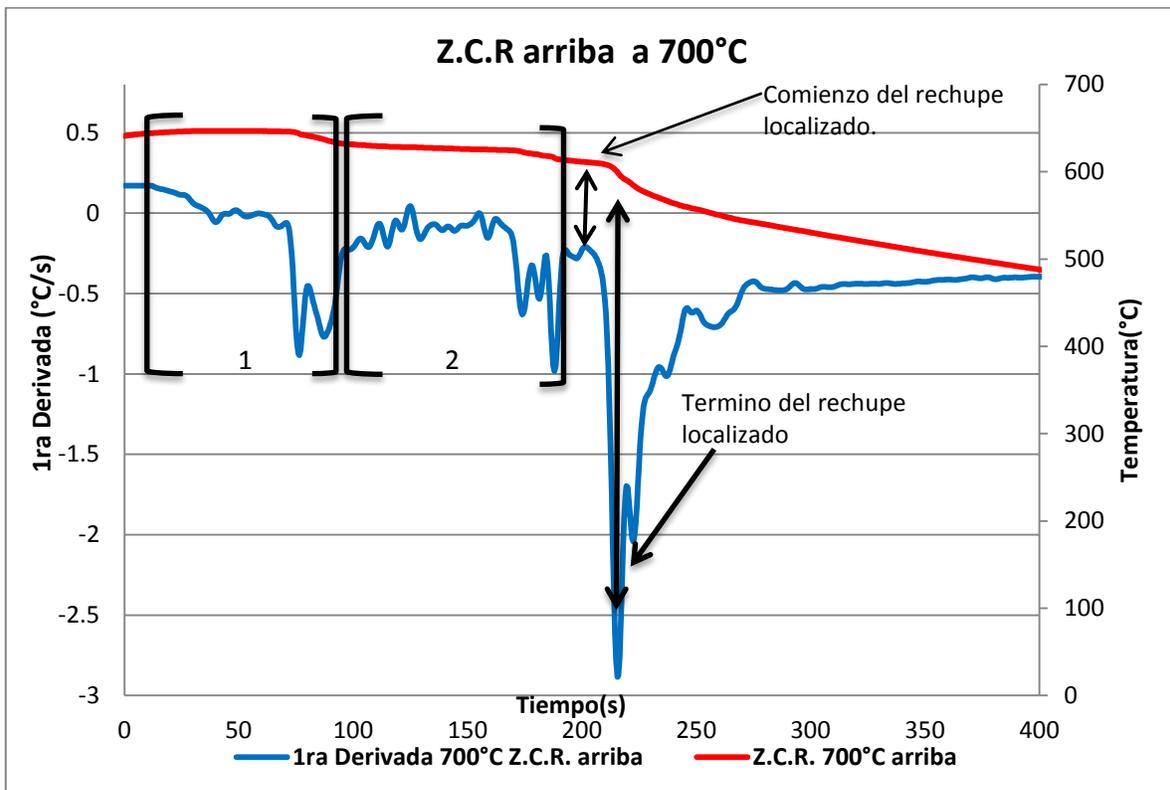


Figura 4.32 Comparación entre la Curva de enfriamiento y 1ª Derivada a 760°C (Z.C.R. arriba) con respecto al comienzo y termino del rechupe localizado.

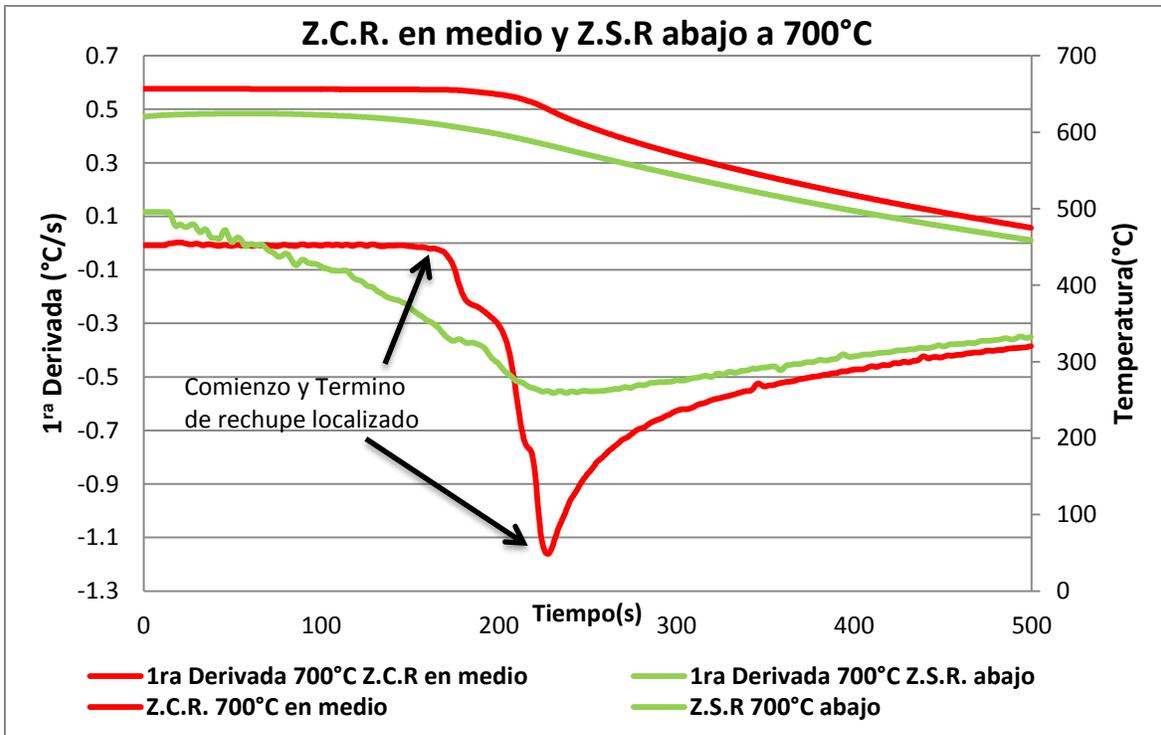


Figura 4.33 Comparación Curva de enfriamiento y 1ª Derivada a 700°C (Z.C.R. en medio y Z.S.R. abajo)

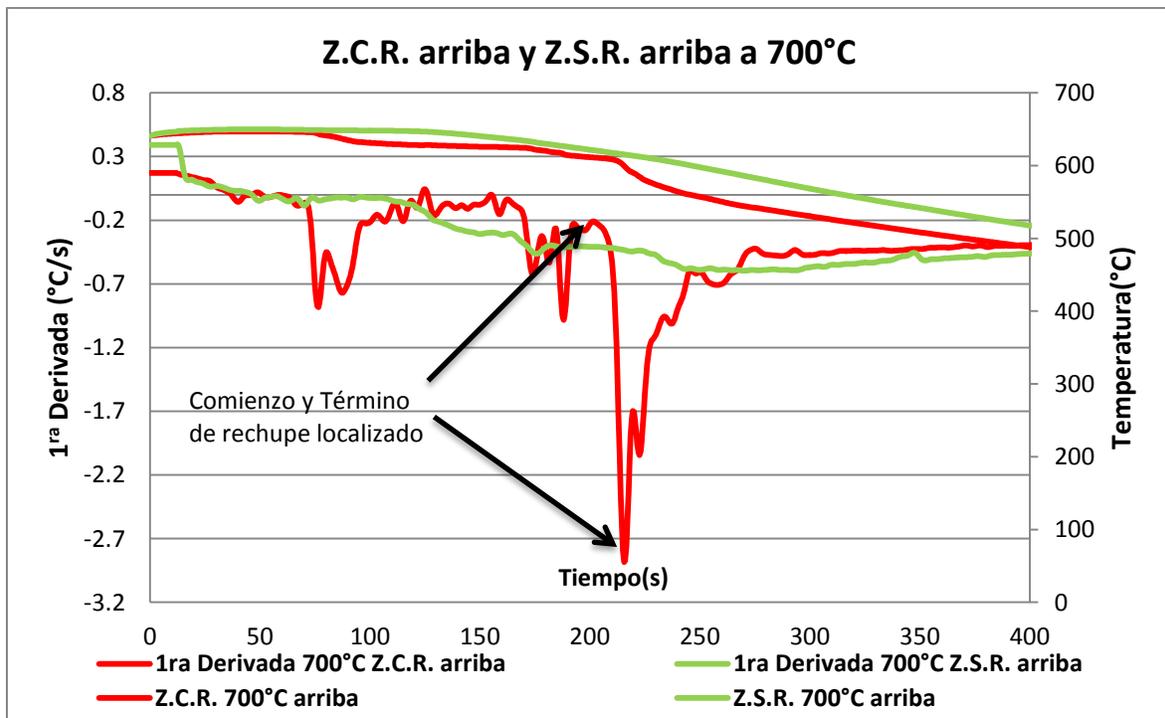


Figura 4.34 Comparación Curva de enfriamiento y 1ª Derivada a 700°C (Z.C.R. arriba y Z.S.R. arriba)

En la Figura 4.29 se observan las curvas de enfriamiento para la Z.C.R (en medio y arriba) y la Z.S.R arriba a una temperatura de vaciado de 700°C, las cuales al compararlas, se aprecian, diferencias entre las curvas de enfriamiento, debido a la zona donde se adquirieron los datos. Por tal motivo para la Z.C.R en medio y arriba se observa que tiene una curvatura diferente al término de la solidificación y al comparar dicha característica con la parte final de la solidificación de la Z.S.R arriba, se observa la señal característica del rechupe localizado.

Para la Z.C.R arriba en la curva de enfriamiento, se tiene un cambio de pendiente y una línea semi recta que corresponde a la solidificación del material y posteriormente se tiene otro cambio de pendiente en la curva de enfriamiento como también una línea semi recta, la cual representa la formación de una capa de sólido del material, después de esa sección se tiene un cambio de pendiente y la curvatura característica de la formación del rechupe localizado, Figura 4.29.

Con respecto a la Z.C.R en medio en la curva de enfriamiento, se observa después del enfriamiento del líquido, una línea recta que corresponde a la solidificación del material, pero en cierto momento se tiene un cambio de velocidad de enfriamiento, el cual representa el inicio de la formación del rechupe localizado (en este caso no se puede ver a simple vista, por tal motivo se aplica el uso de la 1^{ra} derivada para ver los diferentes cambios de velocidad de enfriamiento), Figura 4.29.

En la Figura 4.30 se aprecia el uso de la 1^{ra} derivada en los datos experimentales para la Z.C.R (en medio y arriba) y la Z.S.R arriba, donde se muestra el momento de aparición del rechupe localizado y la diferencia de señales entre una zona donde se está analizando el rechupe, con respecto a una zona donde no se tiene defecto. Para la Z.S.R arriba se aprecia un claro comportamiento del enfriamiento del sólido sin la presencia de ningún defecto o cambio de pendiente característico del defecto. Por esa razón se puede ver la diferencia de señales que tiene cada zona, ya sea el enfriamiento del sólido o la aparición del rechupe localizado.

En la Figura 4.31 se compara la curva de enfriamiento con respecto a los datos graficados de la 1^{ra} derivada, para poder identificar el momento en el cual da inicio la formación del rechupe localizado y el término del mismo, para la Z.C.R en medio a una temperatura de vaciado de 700°C.

Para la Z.C.R arriba a temperatura de vaciado de 700°C como se muestra en la Figura 4.32 se observan cambios de pendiente durante la solidificación del material en la curva de enfriamiento, pero al aplicar la 1^{ra} derivada a los datos experimentales, se aprecia con mayor claridad los cambios de pendiente y los picos de velocidad de enfriamiento, que representa el término de cada proceso de solidificación. Una vez que el metal termina su estado líquido, en la curva de enfriamiento se tiene un cambio de pendiente y una línea recta, al comparar dicha sección de la curva de enfriamiento con los datos de la 1^{ra} derivada se observa con mayor claridad el cambio de velocidad de enfriamiento que se tiene en esa sección y un pico de termino en los datos experimentales, representando dicha sección, en este caso es la solidificación del material como se muestra en la Figura 4.32- sección de la curva 1, posterior a dicha sección de la curva de enfriamiento, se observa en la misma curva de enfriamiento una línea recta y un cambio de pendiente representado por la capa formada en la intercara metal-molde del proceso de contracción de solidificación, por lo cual en los datos de la 1^{ra} derivada se tiene también una línea semi recta indicando que no hay ningún cambio de velocidad de enfriamiento como se aprecia en la figura 4.32- sección de la curva 2, pero en cierto momento se tiene un cambio de pendiente y en la 1^{ra} derivada se confirma ese cambio, el cual es representado por la formarse el rechupe localizado en esa sección de la curva de enfriamiento y de la 1^{ra} derivada (inicio y termino del rechupe localizado).

Al comparar cada zona del rechupe localizado (Z.C.R. en medio y arriba), con la zona donde no se tiene el defecto (Z.S.R arriba y abajo) se confirma, tanto para la curva de enfriamiento y los datos de la 1^{ra} derivada, que el estudio es del defecto y se muestra en las Figura 4.33 y Figura 4.34.

Debido a los experimentos realizados anteriormente y a los datos recopilados se toma la decisión de hacer una 4^{ta} experimentación pero modificando la Z.C.R arriba dejando una ligera capa de arena entre la intercara metal-molde para poder hacer de este estudio un ensayo no destructivo.

4.2.4. Curvas de enfriamiento y 1^{ra} Derivada a Temperatura de 730°C (Z.C.R (en medio y arriba – [B], Figura 3.8) y Z.S.R (abajo y arriba)).

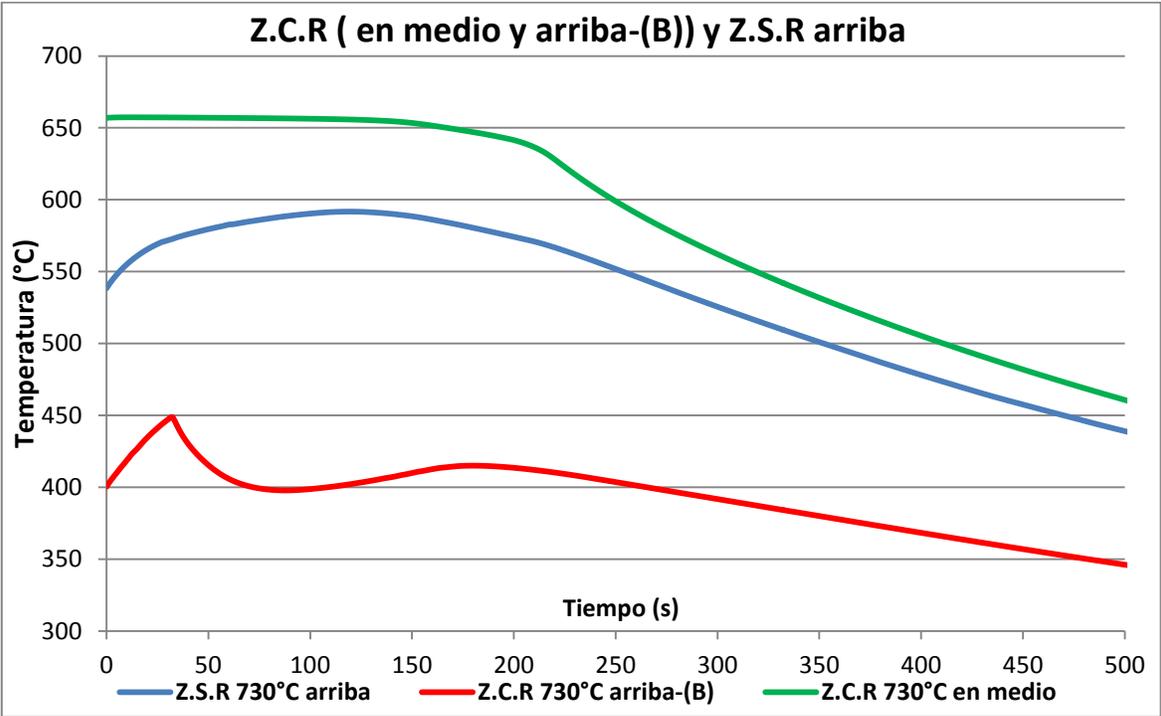


Figura 4.35 Comparación de Curvas de enfriamiento Z.C.R (en medio y arriba-[B]) y Z.S.R. arriba a 730°C

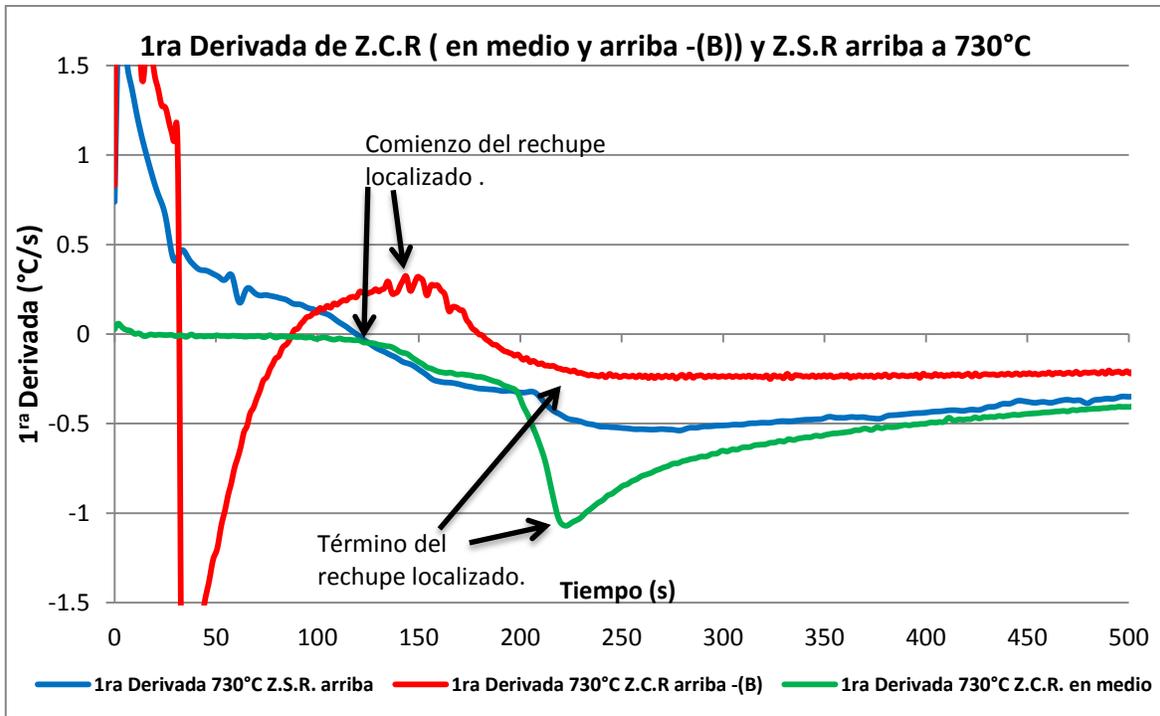


Figura 4.36 Comparación de 1ª Derivada Z.C.R (en medio y arriba-(B)) y Z.S.R. arriba a 730°C

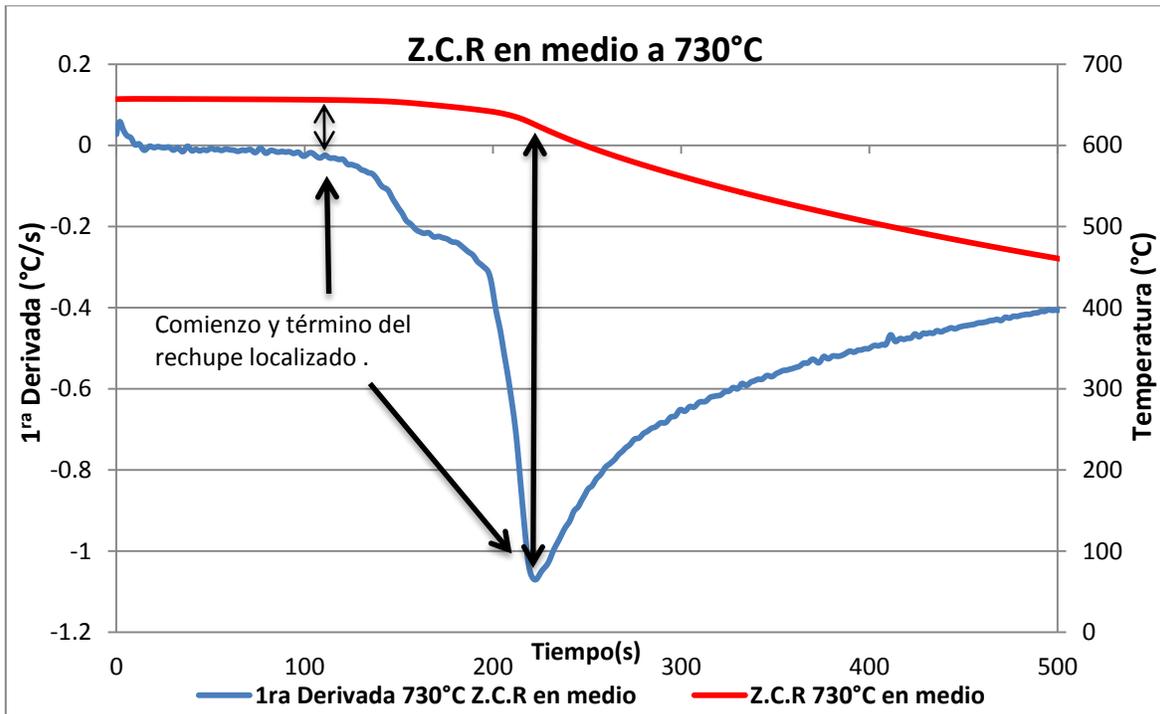


Figura 4.37 Curva de enfriamiento y 1ª Derivada a 730°C (Z.C.R. en medio)

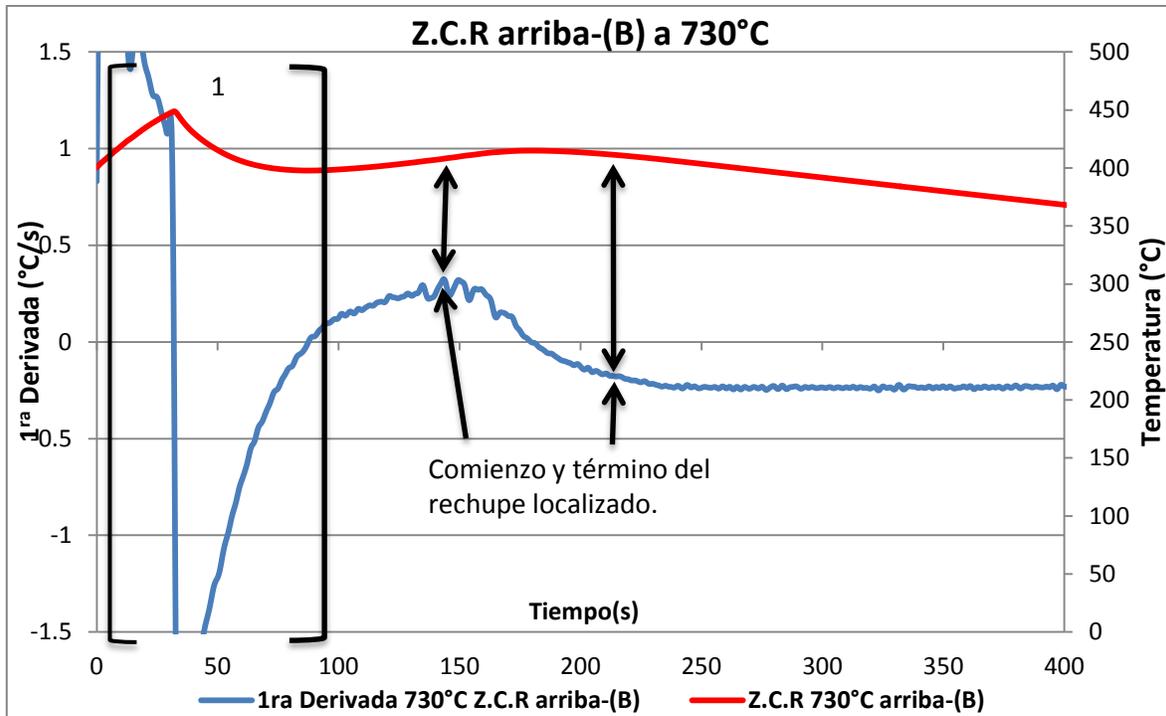


Figura 4.38 Curva de enfriamiento y 1ª Derivada a 730°C (Z.C.R. arriba – [B])

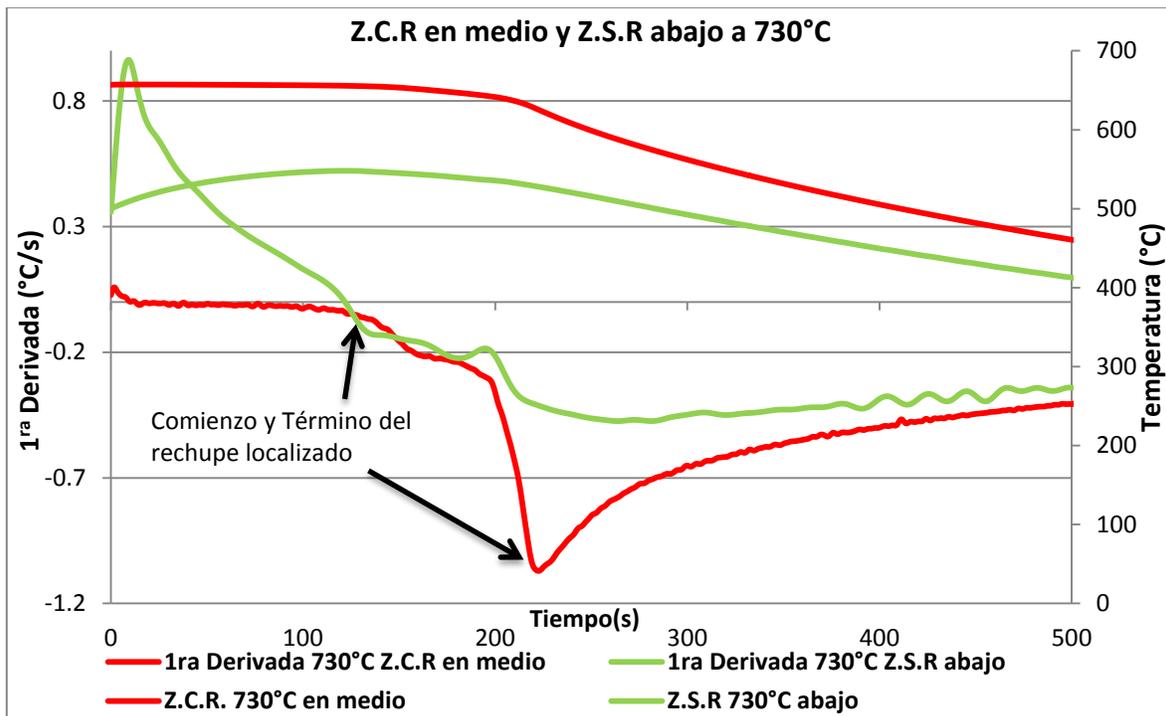


Figura 4.39 Comparación entre la Curva de enfriamiento y 1ª Derivada a 730°C (Z.C.R. en medio) con respecto al comienzo y término del rechupe localizado.

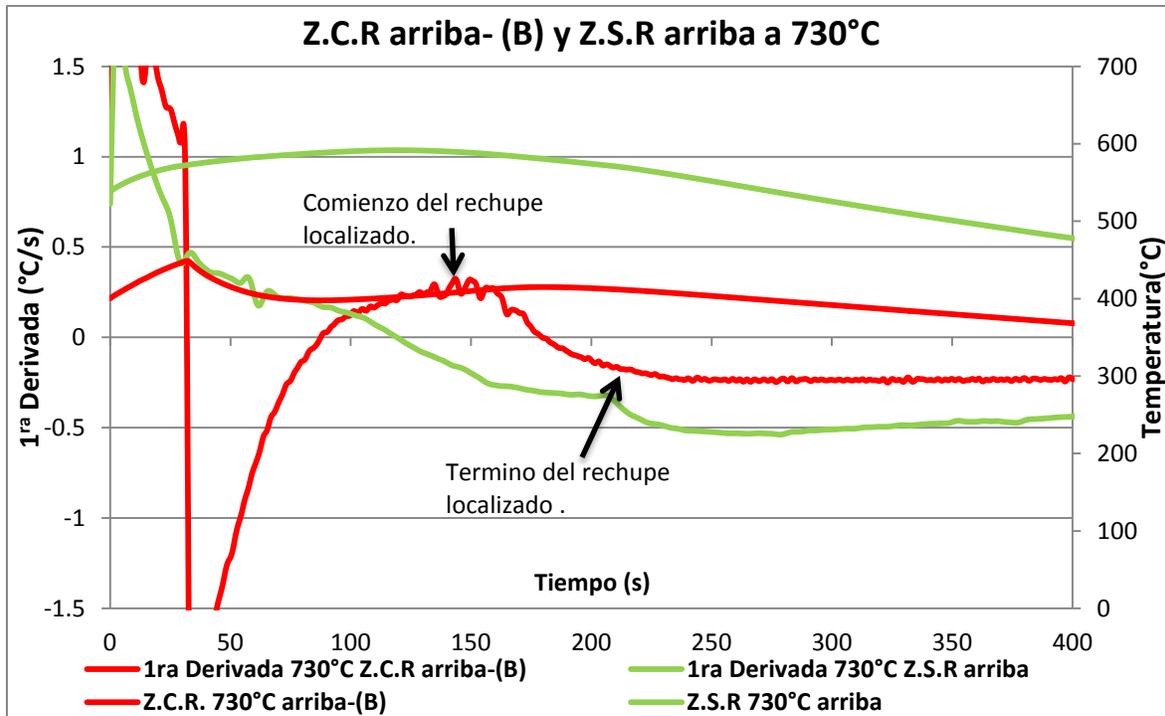


Figura 4.40 Comparación entre la Curva de enfriamiento y 1ª Derivada a 760°C (Z.C.R. arriba – [B]) con respecto al comienzo y término del rechupe localizado.

Tabla 4.41 Tiempo y temperatura de formación de un Rechupe (Z.C.R. en medio)

Z.C.R en medio				
Temperatura vaciado(°C)	Inicio del Rechupe (min)	Duración del Rechupe (min)	Temperatura de formación de rechupe(°C)	Temperatura de termino de formación rechupe(°C)
730	1.8	1.91	656.15	625.46

Tabla 4.42 Tiempo y temperatura de formación de un Rechupe (Z.C.R. en medio)

Z.C.R arriba-(B)				
Temperatura vaciado(°C)	Inicio del Rechupe (min)	Duración del Rechupe (min)	Temperatura de formación de rechupe(°C)	Temperatura de termino de formación rechupe(°C)
730	2.39	1.23	408.01	410.71

En la Figura 4.35 se muestra en la curva de enfriamiento para la Z.C.R en medio la presencia de la curvatura al término de la solidificación, la cual es la característica y el término de la formación del rechupe localizado, pero para la Z.C.R arriba se tiene esa característica ante del término de la solidificación.

Al observar la Figura 4.36 se puede ver la diferencia de señales que tiene, ya sea la Z.C.R (en medio y arriba –B), y la Z.S.R. arriba, por tal motivo se puede apreciar el momento de inicio y termino de la formación del rechupe localizado. Es

necesario mencionar que los datos de la 1^{ra} derivada de la Z.C.R arriba, en el término de la formación del rechupe localizado es un poco difícil de distinguir a simple vista pero al observar los datos experimentales y compararlos con los datos experimentales de la 1^{ra} derivada de la Z.C.R en medio, se puede saber el momento en el cual termina la formación del rechupe localizado para esa zona (Z.C.R arriba-B).

Para la Figura 4.37 se compara la curva de enfriamiento de la Z.C.R en medio con los datos de la 1^{ra} derivada de esa zona, para saber el momento y la temperatura en la cual se llega a formar el rechupe localizado (Tabla 4.41). Se puede ver en la curva de enfriamiento la zona de solidificación, pero en cierto momento ocurre un cambio de velocidad de enfriamiento durante la solidificación, ocasionando un cambio de pendiente y se puede apreciar mejor en los datos de la 1^{ra} derivada el comienzo de la formación del rechupe, como también durante la solidificación, se puede ver otro cambio de pendiente en la curvatura de la curva de enfriamiento antes del enfriamiento del sólido, que es la característica del rechupe localizado y es el término de la formación del rechupe localizado, pero se aprecia mejor en los datos de la 1^{ra} derivada.

En la Figura 4.38 se puede observar el calentamiento de la arena en la intercara metal-molde, por lo cual en esa zona, como se muestra en la Figura 4.38-sección de la curva 1, se tiene un pico en la curva de enfriamiento que indica el término de calentamiento de la arena y el comienzo de la disipación del calor, por ese motivo se puede ver en los datos de la 1^{ra} derivada un cambio de pendiente, representando este proceso, y posterior a esa zona, se aprecia el calentamiento de la arena, con un cambio de pendiente llegando a una temperatura máxima y posteriormente a un enfriamiento de la misma. En este caso se puede apreciar en los datos de la 1^{ra} derivada el comienzo de la formación del rechupe, pero no muy claramente se puede apreciar el término del mismo, por tal motivo se procedió a analizar los datos obtenidos de la 1^{ra} derivada para localizar el momento en el cual termina de formarse el rechupe localizado.

Al comparar cada zona del rechupe localizado (Z.C.R. en medio y arriba-[B]), con la zona donde no se tiene el defecto (Z.S.R arriba y abajo) se confirma, tanto para la curva de enfriamiento y los datos de la 1^{ra} derivada, que el estudio es del defecto y no afecta a los datos experimentales la presencia de una ligera capa de arena de molde en la intercara metal-molde como se muestra en las Figura 4.39 y Figura 4.40.

4.2.5. Curvas de enfriamiento y 1^{ra} Derivada para la Z.C.R (en medio y arriba-[A], Figura 3.8) para las temperaturas de 760°C, 730°C y 700°C.

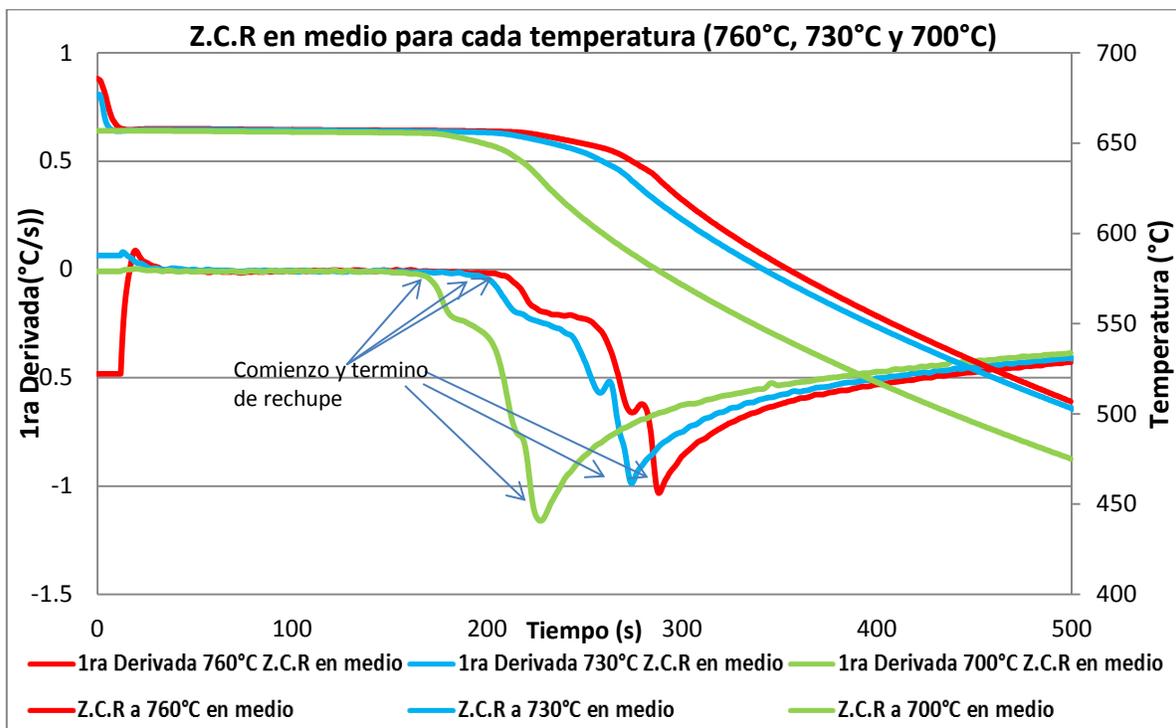


Figura 4.43 Curva de enfriamiento y 1^{ra} Derivada para cada temperatura (760°C, 730°C y 700°C) en la Z.C.R en medio

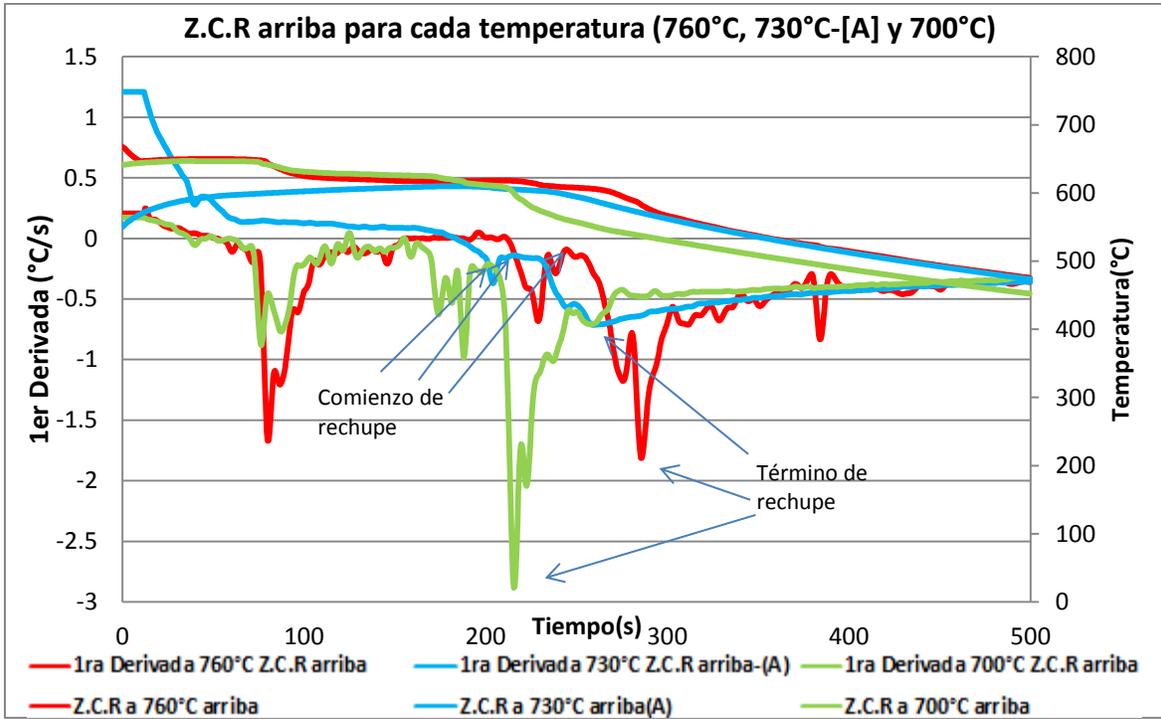


Figura 4.44 Curva de enfriamiento y 1ª Derivada para cada temperatura (760°C, 730°C y 700°C) en la Z.C.R en medio.

4.3. Tiempo y temperatura de aparición del rechupe localizado con respecto a la temperatura de vaciado (760°C, 730°C-[A], figura 3.8) y 700°C).

Tabla 4.45 Tiempo de inicio y duración del Rechupe (Z.C.R. en medio)

Z.C.R en medio				
Temperatura de vaciado(°C)	Tiempo de inicio del Rechupe (min)	Tiempo de Duración del Rechupe (min)	Temperatura de formación de rechupe(°C)	Temperatura de término de formación rechupe(°C)
760	3.41	1.39	656.55	630.05
730	3.13	1.44	655.96	629.59
700	2.74	1.05	655.52	630.08

Tabla 4.46 Tiempo de inicio y duración del Rechupe (Z.C.R arriba-(A, figura 3.8))

Z.C.R arriba				
Temperatura de vaciado(°C)	Tiempo de inicio del Rechupe (min)	Tiempo de Duración del Rechupe (min)	Temperatura de formación de rechupe(°C)	Temperatura de término de formación rechupe(°C)
760	3.54	1.25	608.46	582.76
730	2.93	1.4	605.33	587.39
700	2.7	0.89	611.19	599.72

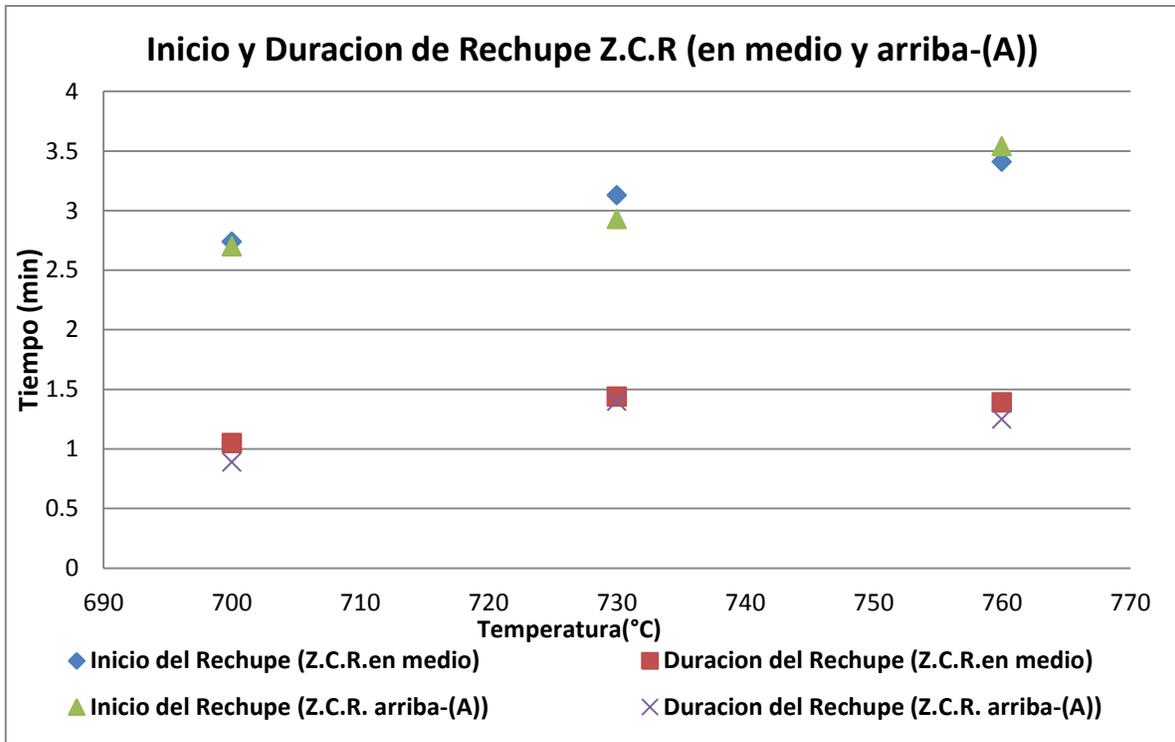


Figura 4.47 Comparación de inicio y duración de rechupe localizado (Z.C.R en medio y Z.C.R arriba).

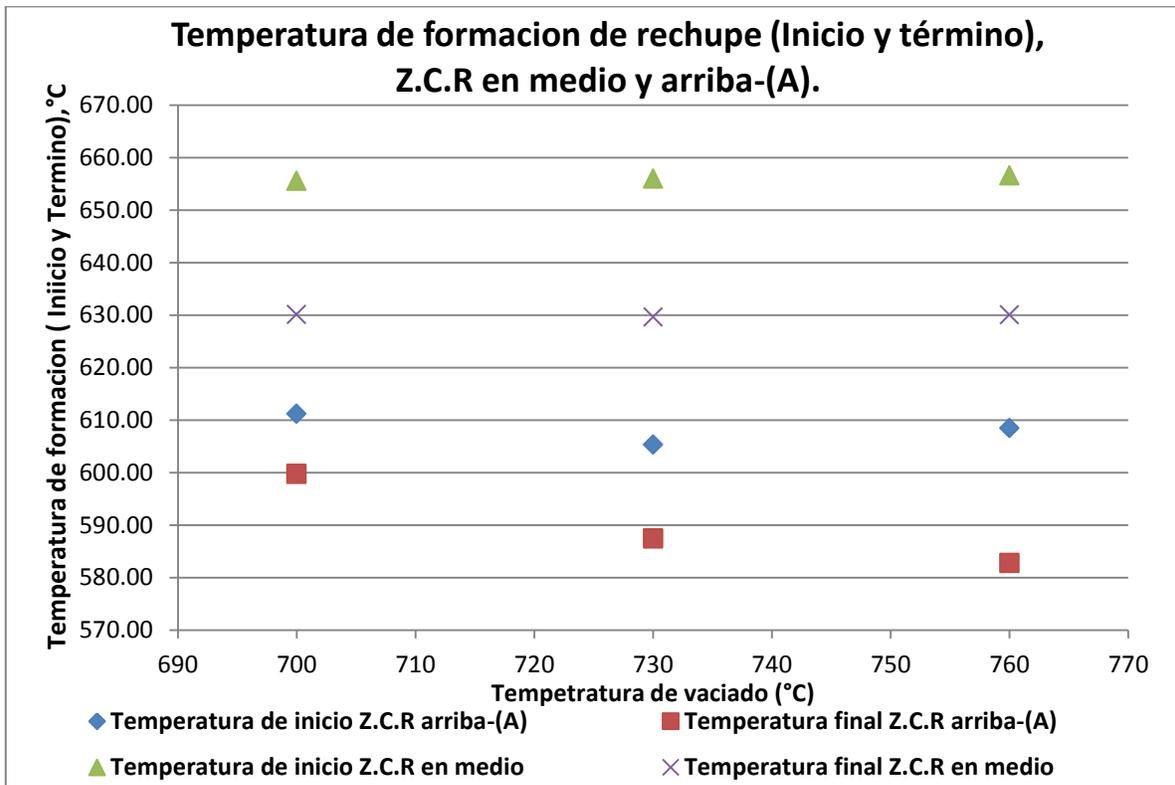


Figura 4.48 Comparación de temperaturas de formación de rechupe localizado (inicio y término), Z.C.R en medio y Z.C.R arriba-(A)

En la figura 4.43 se puede observar las curvas de enfriamiento para la Z.C.R en medio de los tres primeros experimentos (760°C, 730°C y 700°C) y se puede apreciar cómo cambia el momento en el cual comienza a formarse el rechupe dependiendo de la temperatura de vaciado y también cambia el momento en el cual termina de formarse el rechupe localizado.

Para la figura 4.44 se observa el momento de inicio de la formación del rechupe localizado y el momento en el cual termina de formarse, dependiendo también de la temperatura de vaciado de la Z.C.R arriba para los tres primeros experimentos (760°C 730°C-[A], figura 3.8, 700°C).

Los tiempos de comienzo y término de formación de rechupe localizado se pueden apreciar en la Tabla 4.45 y 4.46 para cada Z.C.R, como también las temperaturas en las cuales comienza y termina de formarse el defecto. Por tal motivo se puede ver en la Figura 4.47 para la Z.C.R en medio que al incrementar la temperatura de vaciado, también aumenta el tiempo en el cual comienza la formación de rechupe, como también incrementa ligeramente la duración de formación del rechupe y para la Z.C.R arriba-A, se puede apreciar que tiene el mismo efecto para el inicio y la duración de la formación del rechupe localizado, que al incrementar la temperatura de vaciado, incrementa el inicio y también ligeramente incrementa la duración en la cual se forma el defecto.

Para la figura 4.47 se puede observar para la Z.C.R en medio, que la temperatura de vaciado no incrementa, ni disminuye la temperatura de inicio de formación del rechupe localizado que corresponde a la temperatura de solidificación del aluminio puro con las condiciones de altura del nivel del mar para la Ciudad de México para los tres primeros experimentos y para la temperatura de termino de formación de rechupe se puede observar que disminuye su temperatura hasta llegar a la temperatura de 630°C en la cual para los tres primeros experimentos es la temperatura de termino de formación del defecto.

Para la Z.C.R arriba – [A], Figura 3.8, se puede observar en la Figura 4.49 que la temperatura de vaciado influye en la temperatura de inicio de la formación del rechupe localizado la cual está por debajo de la temperatura de solidificación, a una temperatura de 611.19°C para el 1^{er} experimento (temperatura de vaciado de 700°C) y disminuyendo la temperatura para los siguiente 2 experimentos. Lo mismo pasa para la temperatura de termino de formación de rechupe localizado para Z.C.R arriba - [A], figura 3.8) la cual para el 1^{er} experimento (temperatura de vaciado de 700°C) es de 599°C y comienza disminuir la temperatura para los siguientes experimentos.

Capítulo 5 Conclusiones

- La utilización de la curva de enfriamiento implementando el uso de la 1^{ra} derivada, identifica el momento de la formación del rechupe localizado, de modo que no se tiene que considerar si fue de la Z.C.R en medio o arriba, ya que los dos dan la señal específica del defecto, con una ligera diferencia en el tiempo de aparición de la señal para cada zona.
- A medida que disminuye la temperatura de vaciado, el tiempo de formación del rechupe va disminuyendo, como también el tiempo de duración para formarse el defecto.
- Se detectó para la Z.C.R arriba-(B), la formación del rechupe localizado. Por lo cual se puede utilizar este estudio con un solo termopar y como un ensayo no destructivo.
- La temperatura de inicio de formación del rechupe localizado corresponde a la temperatura de solidificación para la Z.C.R en medio, por tal motivo es necesario implementar el uso de la 1^{ra} para observar los cambios de velocidad de enfriamiento y conocer el momento exacto de formación del rechupe localizado.
- La implementación del análisis térmico para el análisis de defectos (rechupes) ayuda a entender el cambio de velocidad de enfriamiento que tiene, como también el momento en el cual aparece para tener una señal característica de dicho defecto.
- El control de la temperatura de vaciado ayuda a saber la temperatura y el momento en el cual aparece el rechupe localizado, sin importar si es la Z.C.R en medio o arriba.

Bibliografía

- [1] Neff, D. & Urzagaste, J.. (2015). Aluminio y aleaciones de aluminio. En Manual de defectos de fundición: Aleaciones no- Ferrosas (pp.58-60 & p.78). Estados Unidos de América: American Foundry Society.
- [2] William, H., Baker,H., Benjamin, D.& Unterweiser, P.,. (1990). Pure Metals. En ASM HANDBOOK, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials (pp.2923-2927). United States of America : American Society for Metals.
- [3] Hasse, S.. (2015). Rechupes: Patrón de formación de defectos y causas. Septiembre 29, 2019, de ASK CHEMICALS We advance your casting Sitio web: <http://www.ask-chemicals.com/es/productosdefundicion/prevencion-dedefectos-defundicion/rechupes.html>
- [4] Mariano M. (2011). Inyección de Materiales plásticos II. Septiembre 26,2007, de blogspot, Sitio web: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/inyeccion-de-materiales-plasticos-ii.html>
- [5] González Benito, Fco. (2015). Análisis Térmico . Septiembre 27, 2018, de Universidad Carlos III de Madrid, Open Course Ware Sitio web: http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/caracterizacion-de-materiales/material-de-clase-1/Analisis_termico.pdf
- [6] Torres, R. (2000). Análisis Térmico. En Análisis Térmico y Propiedades Mecánicas en una Aleación tipo A319 (pp.40-45). Universidad Autónoma de Nuevo León: Dirección General de bibliotecas.
- [7], [8] Universidad Mayor de San Simón. (2011). Solidificación y Enfriamiento. En Manual de Tecnología Mecánica II (pp. 58-60 & pp. 63-65). Facultad de Ciencias y Tecnología: Facultad de Ciencias y Tecnología.
- [9] Djurdjevic,M., Vicariob, I. & Hubera, G.. (Enero- Marzo, 2014). Review of thermal analysis applications in aluminium casting plants. Revista de Metalurgia, Volumen 50(1), pp. 4-6.
- [10] Ahmad,A.H., Naher, S. & Brabazon, D. (Enero- Junio 2014). EFFECTS OF COOLING RATES ON THERMAL PROFILES AND MICROSTRUCTURE OF ALUMINIUM 7075. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, Volumen 9, p. 5.
- [11] Fang,L., Ren, L., Geng,X., Hu,H., Xueyuan, N. &Tjong, J.. (2002). Solidification and Microstructure of Ni-Containing Al-Si-Cu Alloy. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 301, pp. 4-5
- [12] Yavari, F. & Shabestar, S.. (2017, 4 Marzo). Effect of cooling rate and Al content on solidification characteristics of AZ magnesium alloys using cooling curve thermal analysis. J Therm Anal Calorim, Vol. 662, p. 3.

Anexos

1. Composición química de los 3 experimentos (760°C, 730°C y 700°C)

Program: AL-011 04/23/2018 01:41:52 PM
 Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL
 Single spark(s) Elements: Concentration

Muestra No.: Al-760 Quality:
 Usuario: MORENO ESCUTIA LUIS ANGEL Analista: DR. ADRIAN M. AMARO VILLEDA
 Comentarios: ASIGNATURA PROYECTO

No	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Ni %	Cr %	Pb %
1	0.0741	0.1133	0.0041	0.0062	<0.0050	0.0246	0.0027	<0.0010	<0.0020
2	0.0851	0.1102	0.0041	0.0062	<0.0050	0.0242	0.0026	<0.0010	<0.0020
3	0.0624	0.1099	0.0039	0.0062	<0.0050	0.0249	0.0025	<0.0010	<0.0020

No	Ti %	V %	Co %	Sr %	Al %
1	0.0537	0.0059	<0.0020	0.0002	99.7
2	0.0533	0.0058	<0.0020	0.0002	99.7
3	0.0532	0.0057	<0.0020	0.0002	99.7

Program: AL-011 04/23/2018 01:41:52 PM
 Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL
 Average and RSD (n=3) Elements: Concentration

Muestra No.: Al-760 Quality:
 Usuario: MORENO ESCUTIA LUIS ANGEL Analista: DR. ADRIAN M. AMARO VILLEDA
 Comentarios: ASIGNATURA PROYECTO

	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Ni %	Cr %	Pb %
\bar{x}	0.0739	0.1111	0.0040	0.0062	<0.0050	0.0246	0.0026	<0.0010	<0.0020
s	0.0113	0.0019	0.0001	0.0000	0.0001	0.0004	0.0001	0.0000	0.0000
sr	15.348	1.690	2.817	0.259	1.759	1.443	5.281	0.947	2.061

	Ti %	V %	Co %	Sr %	Al %
\bar{x}	0.0534	0.0058	<0.0020	0.0002	99.7
s	0.0003	0.0001	0.0001	0.0000	0.0117
sr	0.487	2.460	2.699	5.349	0.012

Figura 6.1 Composición Química Al° puro comercia Experimento 1(Temperatura de vaciado a 760°C)

Program: AL-011
 Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL
 Single spark(s)

04/23/2018 01:39:05 PM

Elements: Concentration

Muestra No.: Al-730
 Usuario: MORENO ESCUTIA LUIS ANGEL
 Comentarios: ASIGNATURA PROYECTO

Quality:
 Analista: DR. ADRIAN M. AMARO VILLEDA

No	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Ni %	Cr %	Pb %
1	0.0709	0.1045	0.0034	0.0061	<0.0050	0.0243	0.0034	0.0011	<0.0020
2	0.0796	0.1094	0.0037	0.0060	<0.0050	0.0246	0.0034	0.0011	<0.0020
3	0.1091	0.1090	0.0038	0.0063	<0.0050	0.0253	0.0037	0.0011	<0.0020

No	Ti %	V %	Co %	Sr %	Al %
1	0.0517	0.0057	<0.0020	0.0002	99.7
2	0.0515	0.0056	<0.0020	0.0002	99.7
3	0.0507	0.0055	<0.0020	0.0002	99.7

Program: AL-011
 Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL
 Average and RSD (n=3)

04/23/2018 01:39:05 PM

Elements: Concentration

Muestra No.: Al-730
 Usuario: MORENO ESCUTIA LUIS ANGEL
 Comentarios: ASIGNATURA PROYECTO

Quality:
 Analista: DR. ADRIAN M. AMARO VILLEDA

	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Ni %	Cr %	Pb %
\bar{x}	0.0865	0.1076	0.0036	0.0061	<0.0050	0.0247	0.0035	0.0011	<0.0020
s	0.0200	0.0027	0.0002	0.0001	0.0002	0.0005	0.0001	0.0000	0.0000
sr	23.150	2.525	6.047	2.147	4.492	2.197	4.039	0.968	1.094

	Ti %	V %	Co %	Sr %	Al %
\bar{x}	0.0513	0.0056	<0.0020	0.0002	99.7
s	0.0005	0.0001	0.0001	0.0000	0.0224
sr	1.051	1.856	5.654	8.399	0.022

Figura 6.2 Composición Química Al^o puro comercia Experimento 2(Temperatura de vaciado a 730°C)

Program: AL-011
 Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL
 Single spark(s)

04/23/2018 01:36:37 PM

Elements: Concentration

Muestra No.: Al-700
 Usuario: MORENO ESCUTIA LUIS ANGEL
 Comentarios: ASIGNATURA PROYECTO

Quality:
 Analista: DR. ADRIAN M. AMARO VILLEDA

No	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0469	0.1228	0.0032	0.0063	<0.0050	0.0256	0.0029	0.0010	<0.0020
2	0.0393	0.1190	0.0033	0.0061	<0.0050	0.0250	0.0027	0.0010	<0.0020
3	0.0371	0.1094	0.0032	0.0062	<0.0050	0.0254	0.0026	0.0010	<0.0020

No	Ti	V	Co	Sr	Al
	%	%	%	%	%
1	0.0535	0.0060	<0.0020	0.0002	99.7
2	0.0526	0.0056	<0.0020	0.0002	99.7
3	0.0524	0.0058	<0.0020	0.0002	99.8

Program: AL-011
 Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL
 Average and RSD (n=3)

04/23/2018 01:36:37 PM

Elements: Concentration

Muestra No.: Al-700
 Usuario: MORENO ESCUTIA LUIS ANGEL
 Comentarios: ASIGNATURA PROYECTO

Quality:
 Analista: DR. ADRIAN M. AMARO VILLEDA

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
\bar{x}	0.0411	0.1171	0.0032	0.0062	<0.0050	0.0254	0.0027	0.0010	<0.0020
s	0.0052	0.0069	0.0000	0.0001	0.0006	0.0003	0.0001	0.0000	0.0001
sr	12.544	5.875	0.621	1.051	11.334	1.156	4.765	1.311	7.044

	Ti	V	Co	Sr	Al
	%	%	%	%	%
\bar{x}	0.0528	0.0058	<0.0020	0.0002	99.7
s	0.0006	0.0002	0.0001	0.0000	0.0128
sr	1.150	3.167	3.992	2.348	0.013

Figura 6.3 Composición Química Al^o puro comercia Experimento 3(Temperatura de vaciado a 700°C)

2. Fotografías de los 4 experimentos (760°C, 730°C -A, 700°C y 730°C -B)

Experimento 1: Temperatura de vaciado de 760°C



Figura 6.4 Vista superior

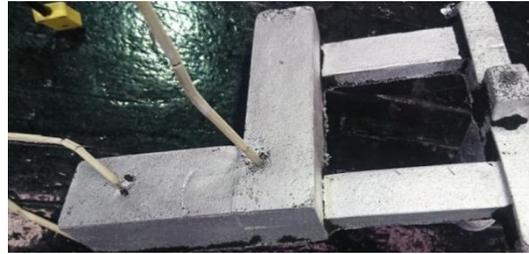


Figura 6.5 Vista inferior

Experimento 2: Temperatura de vaciado de 730 ° C – [A]



Figura 6.6 Vista superior



Figura 6.7 Vista inferior

Experimento 3: Temperatura de vaciado de 700 ° C



Figura 6.8 Vista superior

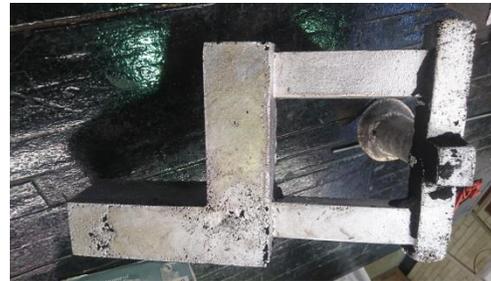


Figura 6.9 Vista inferior

Experimento 4: Temperatura de vaciado de 730 ° C – [B]



Figura 6.10 Vista superior



Figura 6.11 Vista inferior

3. Medidas y cálculos de sistema de colada con la pieza tipo "L".

- Medidas de sistema de colada y pieza tipo "L"

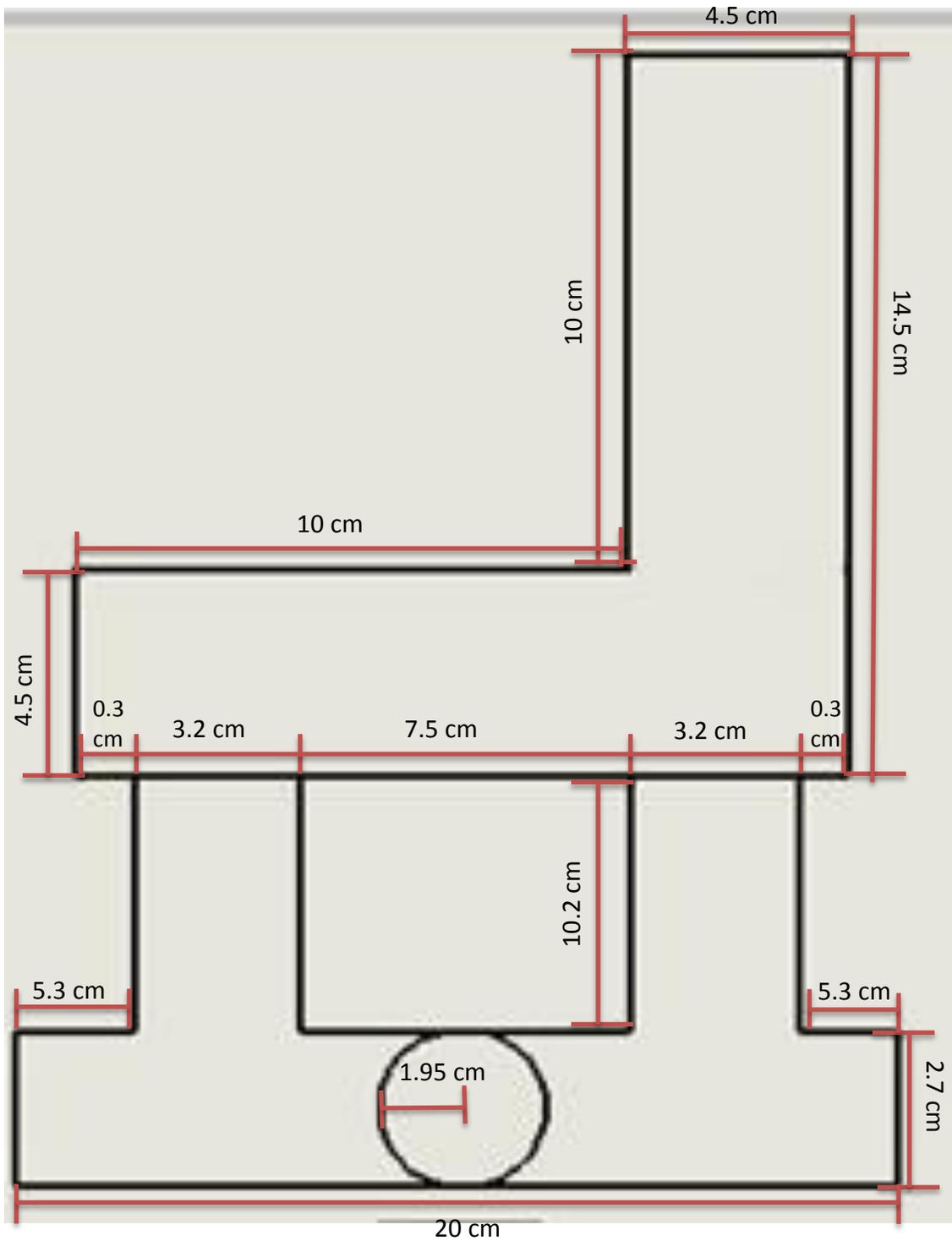


Figura 6.13 Medidas de placa modelo (Vista superior)

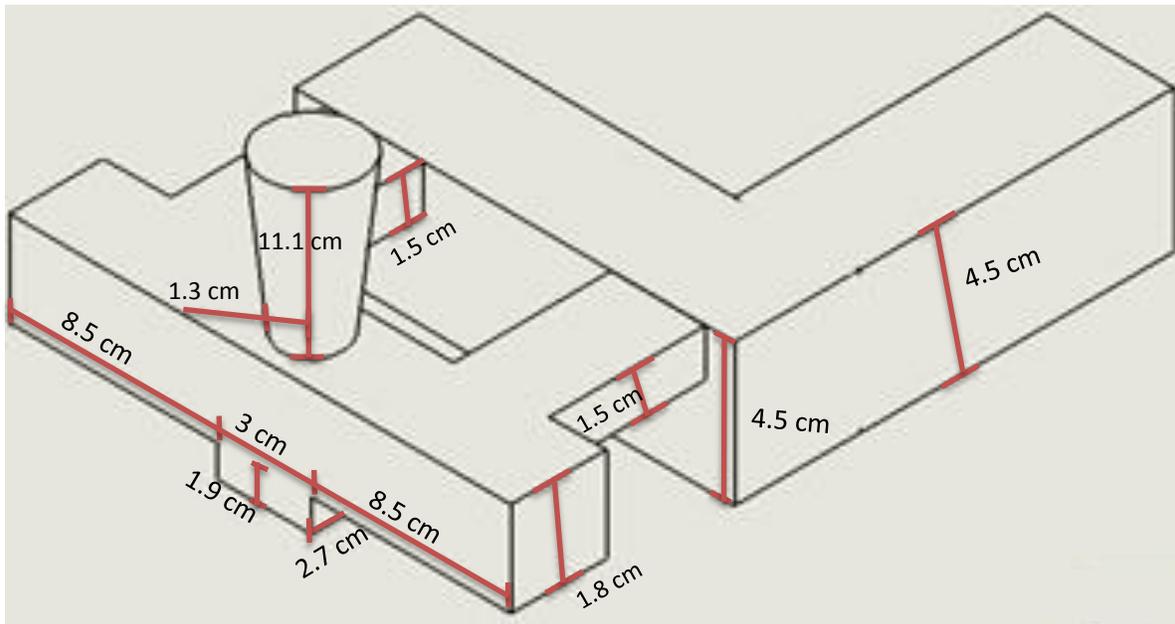


Figura 6.14 Medidas de placa modelo (Vista lateral)

- Cálculo de sistema de colada.

Para el cálculo de sistema de colada se utiliza la siguiente ecuación para conocer el área transversal inferior de la bajada.

$$A = \frac{m}{C\rho t\sqrt{2gh}} \quad \text{Ec.1}$$

Dónde:

A= Área transversal inferior de la bajada.

m= masa de la pieza, 1,333.53gr.

C= Coeficiente de descarga, 0.60.

ρ = Densidad del metal líquido a una temperatura de 780°C, $2.333 \frac{g}{cm^3}$

t= tiempo de colada (s).

g= gravedad, $980 \frac{cm}{s^2}$.

h= altura de la bajada o de la caja de moldeo (cope), 11.1 cm.

Para poder calcular el tiempo de colada se utiliza la siguiente formula:

$$t = s\sqrt{w} \quad \text{Ec.2}$$

Dónde:

s= Coeficiente en función del espesor crítico de la pieza.

w= Peso de la pieza en Kg, 1.339kg.

Para poder calcular el coeficiente en función del espesor crítico de la pieza, utilizando datos teóricos se hace una interpolación para obtener dicho resultado.

Tabla A3. Coeficiente en función del espesor critico

Espesor Critico (mm)	S
2.5 – 3.5	1.68
3.5 – 8.0	1.85
8.0 – 15	2.20
45	6.0075

Sustituimos el dato obtenido en la Tabla A3 en la Ec. 2:

$$t = 6.0075\sqrt{1.339 \text{ kg}} = \mathbf{6.952 \text{ s}} \quad \text{Ec.3}$$

El dato que se obtuvo en la Ec.3 se sustituye en la Ec.1 para conocer el área transversal inferior de la bajada.

$$A = \frac{1,333.53 \text{ gr}}{0.60 * 2.33 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} * 6.952 \text{ s} * \sqrt{2 * 980 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} * 11.1 \text{ cm}}} = \mathbf{0.934} \quad \text{Ec.4}$$

Se utiliza el dato de la Ec.4 y un sistema de colada presurizado con una relación de 1: 0.95: 0.90, para conocer las áreas de los corredores y de las entradas.

$$0.934 : 0.887 : 0.841 \quad \text{Ec.5}$$

Se compara los datos teóricos obtenidos en la Ec.5 con respecto a los datos de la placa modelo.

Tabla B3. Relación de sistema de colada

Dato	Relación de sistema de colada
Teórico	1 : 0.95 : 0.90 0.934 : 0.887 : 0.841
Placa modelo	1 : 0.917 : 0.906 5.30 : 4.86 : 4.8

- Cálculo de módulo de solidificación.

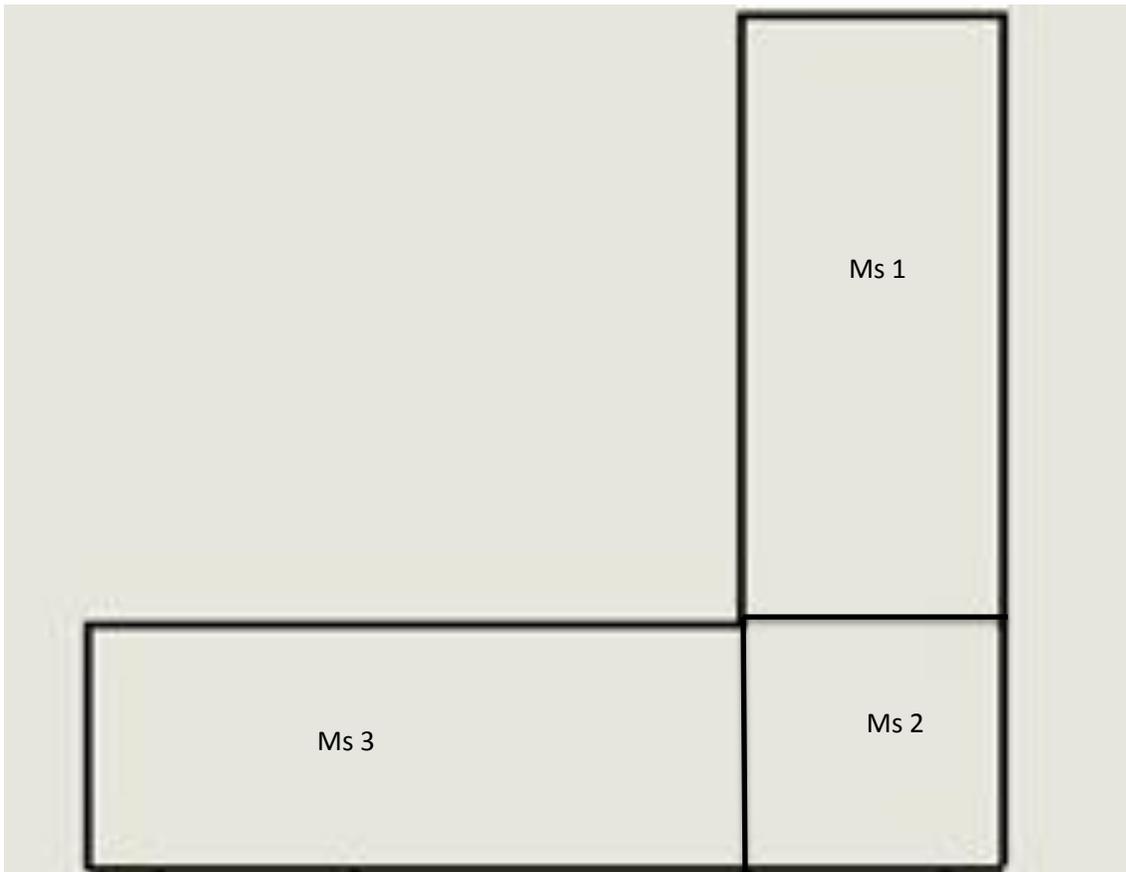


Figura 6.15 Módulo de Solidificación

Para el cálculo de módulo de solidificación (M_s) es necesario discretizar la pieza tipo "L", como se muestra en la Figura 6.15 y utilizando las medidas de las Figuras 6.13 y 6.14, se puede calcular el módulo de solidificación de la pieza tipo "L" y utilizando la siguiente ecuación.

$$M_s = \frac{V \text{ (Volumen, cm}^3\text{)}}{\text{Area transversal (cm}^2\text{)}} \quad \text{Ec.1}$$

Sustituyendo las medidas en la Ec.1 para cada módulo de solidificación de la pieza tipo "L" son las siguientes:

$$Ms\ 1 = Ms\ 2 = \frac{4.5\ cm * 4.5\ cm * 10\ cm}{4*(4.5\ cm * 10\ cm) + (4.5\ cm * 4.5\ cm)} = 1.011 \quad Ec.2$$

$$Ms\ 3 = \frac{4.5\ cm * 4.5\ cm * 4.5\ cm}{2*(4.5\ cm * 4.5\ cm) + 2*(4.5\ cm * 4.5\ cm)} = 1.125 \quad Ec.3$$

Con los resultados de la Ec.2 y Ec.3, se puede conocer que el Ms.3 es el último en solidificarse y es donde se presentara el rechupe localizado.