UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

"HEAT TRANSFER COEFFICIENTS BY HVOF THERMAL SPRAYING ON PERMANENT MOULDS FOR ALUMINUM INDUSTRY – COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR MEDIANTE ROCIADO TÉRMICO HVOF EN MOLDES PERMANENTES PARA LA INDUSTRIA DEL ALUMINIO"

Por:
ING. JUAN CESAR RODRIGUEZ MOLINA.

EN OPCIÓN AL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES.

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, 4 DE JUNIO DE 2021.

UNIVERSIDAD AUTONÓMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

"HEAT TRANSFER COEFFICIENTS BY HVOF THERMAL SPRAYING ON PERMANENT MOULDS FOR ALUMINUM INDUSTRY – COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR MEDIANTE ROCIADO TÉRMICO HVOF EN MOLDES PERMANENTES PARA LA INDUSTRIA DEL ALUMINIO"

Por:
ING. JUAN CESAR RODRIGUEZ MOLINA.

EN OPCIÓN AL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES.

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, 4 DE JUNIO DE 2021.

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis "COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR MEDIANTE ROCIADO TÉRMICO HVOF EN MOLDES PERMANENTES PARA LA INDUSTRIA DEL ALUMINIO ", realizada por el alumno JUAN CESAR RODRIGUEZ MOLINA , con número de matrícula 1398470, sea aceptada para su defensa como requisito para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis

Dr. Arturo Juárez Hernández
Director

Edgar O. García Sánchez
Revisor

Marco A.L. Hernández Rodríguez
Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

167

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, 4 de junio de 2021

Ciudad Universitaria Pedro de Alba s/n, C.P. 66455. A.P. 076 Suc. "F"
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. Tels: (81) 8332 0903 /
Conm.: 8329 4020 / Fax: (81) 8332 0904

Agradecimientos

Se extiende un especial agradecimiento a la Universidad Autónoma de Nuevo León y la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por darme la oportunidad de integrarme al programa de maestría, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el soporte financiero al proyecto lo cual permitió desarrollar el presente trabajo.

Al Centro Nacional de Proyección Térmica (CENAPROT), por abrirnos las puertas de sus laboratorios para el rociado de nuestros materiales utilizados en este estudio.

También, deseo agradecer la guía de mi asesor, el Dr. Arturo Juárez Hernández permitirme realizar esta tesis bajo su dirección, por brindarme su tiempo y apoyo.

Un agradecimiento muy especial para el Dr. Carlos Poblano de Centro de Investigación y de Estudios Avanzados de Querétaro, (CINVESTAV) por su colaboración en el proyecto en general.

Al personal que me estuvo apoyando en las pruebas experimentales y a la gente que estuvo alrededor durante estos años que hicieron esto posible, en especial a las siguientes personas: Salomón Nieves, Fermín Medina, Juan Gómez, Denis Ávila y Marcial Chapas.

Juan Cesar Rodriguez Molina

Candidato al Grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales con el tema de Tesis:

“heat transfer coefficients by thermal spraying on permanent moulds in aluminum industry.”

Nacido el 18 de enero de 1990 en Monterrey, Nuevo León México, hijo de la Sra. Irma Aracely Molina González y Cesar Rodriguez Vargas.

El Ing. Juan Cesar Rodriguez Molina cursó sus estudios de licenciatura en la facultad de Ciencias Químicas de la UANL durante el periodo 2008-2013, obteniendo el grado de Ingeniero Químico con méritos académicos.

En 2015 se integró al programa de maestría en Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Dedicatoria.

A dios por permitirme llegar hasta donde estoy y todo lo que he logrado.

A mis padres, Irma Aracely Molina González y Cesar Rodriguez Vargas, una mamá y un papá ejemplares, siempre me han dado el apoyo necesario, consejos y fortaleza para seguir luchando y seguir adelante, sin ustedes esto no hubiese sido posible, así como a mis hermanos que me apoyaron en todo momento.

Además, a todos los que la hicieron posible esto, tanto amigos y apoyos recibidos.

Índice

Resumen 11

Abstract..... 13

Introducción 15

Objetivos del trabajo. 18

Objetivo general. 18

Hipótesis planteada. 19

Justificación. 20

Impacto social y tecnológico. 22

Antecedentes. 23

Capítulo 1. Marco teórico. 30

1.1 Aluminio y sus propiedades físicas y químicas. 30

1.1.1 Historia del aluminio y su producción. 31

1.1.2 Tipos de aleantes y tipos de designaciones de las aleaciones de aluminio. 34

1.1.3 Tratamiento térmico y especificaciones en aleaciones de aluminio. 37

1.1.4 Química de la aleación 356 y efectos de los elementos químicos. 38

1.1.5 Principales fases en la aleación 356. 43

1.2 Fundición 45

1.2.1 Tipos de fundición. 46

1.2.2 Procesos de fundición más comunes. 47
1.2.3 Tipos de moldes. 51
1.2.4 Características en el diseño de moldes. 52
1.2.5 Principales defectos de fundición. 59
1.3 Transferencia de calor 62
1.3.1 Conducción 63
1.3.2 Convección. 65
1.3.3 Radiación 66
1.3.4 Transferencia de calor en moldes permanentes. 67
1.4 Solidificación. 68
1.4.1 Nucleación en la solidificación. 69
1.4.2 Solidificación en *die casting*. 71
1.4.3 Refinación de grano 76
1.5 Barreras térmicas. 78
1.5.1 Conformación de una barrera térmica. 79
1.5.2 Selección de materiales de una barrera térmica. 82
1.5.3 Técnicas de deposición de barreras térmicas. 86
1.6 Rociado térmico. 89
1.6.1 Factores que contribuyen a la formación de un splat. 91
1.6.2 Ventajas del rociado térmico. 94
1.6.3 Tipos de Rociado térmico 95

1.6.4 Microestructura de una barrera térmica con rociado térmico. 104
1.7 Simulación númerica del proceso de fundición-solidificación..... 106
1.8 Método inverso. 114
Capítulo 2 Modelación. 117
2.1 Modelo..... 117
2.2 Descripción del modelo. 119
2.3 Instrumentación del modelo. 120
2.4 Aleación 356..... 123
2.5 Tipo de pintura. 124
2.6 Tipo de barrera térmica. 125
Capítulo 3 Procedimiento Experimental. 128
3.1 Planeación experimental. 128
3.2 Proceso experimental..... 129
3.3 Factores críticos en la experimentación. 131
3.4 Diseño experimental..... 132
3.5 Aplicación de espesores de la película de pintura..... 132
3.6 Aplicación de espesores de barrera térmica. 135
3.7 Acabados de pintura y barrera térmica mediante microscopio óptico. .. 138
3.8 Desarrollo de programa para monitorear temperaturas. 138
3.9 Preparación de carga. 139
3.10. Preparación de la Instrumentación. 140

3.11. Preparación de la carga en horno. 141
3.12. Preparación del molde..... 143
3.13. Vaciado del metal líquido 143
3.14 Captura de datos de historial térmico durante experimentación..... 144
3.15 Preparación de las muestras para caracterización..... 145
3.16 Modelación numérica. 147
3.17. Geometría y mallado. 150
3.18. Condiciones iniciales y frontera..... 151
3.19. Simulación de llenado. 153
Capítulo 4 Análisis de resultados y discusión. 155
4.1 Acabados de pintura. 155
4.2 Acabados de barrera térmica. 156
4.3 Microestructuras obtenidas con pintura..... 158
4.4 Microestructuras obtenidas por barrera térmica. 167
4.5 Comportamiento térmico con pintura de MICA..... 175
4.6 Comportamiento térmico con pintura base silicio/alúmina..... 177
4.6.1 Comportamiento térmico H-13. 177
4.6.2 Comportamiento térmico hierro gris grado 60..... 179
4.7 Comportamiento térmico barrera térmica 8% YSZ. 181
4.8 Comportamiento térmico de barrera térmica de óxido de magnesio. 184
4.9 Comparación térmica entre pinturas y barreras térmicas. 187

4.9.1 Comparación térmica H-13. 187

4.9.2. Comparación térmica hierro gris grado 60. 189

4.10 Resultados de modelo inverso. 191

Capítulo 5 Conclusiones preliminares. 198

Capítulo 6 Trabajo futuro y recomendaciones. 200

ANEXO1. 202

ANEXO 2. 202

Bibliografía 203

Índice de figuras. 211

Índice de tablas. 219

Resumen

El principal objetivo de este trabajo es calcular el coeficiente de transferencia de calor y conductividad térmica de dos tipos de recubrimientos en moldes permanentes para la industria del aluminio, para permitir direccionar el perfil de solidificación de las piezas vaciadas, mejorando las propiedades físicas así como del acabado superficial del producto final, además, de mejorar las propiedades superficiales del molde y aumentar su vida útil, evitando los retrabajos o *scrap* de piezas en la industria del aluminio. Se utilizaron como recubrimientos pintura refractaria base silicio alúmina *´´Wallacoat´´* y otra de mica de base vermiculita, brindadas por una empresa de México y recubrimientos cerámicos comerciales a base de zirconia parcialmente estabilizado con itrio y de óxido de magnesio utilizando la técnica de HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*), los cuales se aplicaron diferentes espesores, bajo condiciones óptimas de aplicación recolectadas de literatura, con el fin de comparar dichos tipos de recubrimiento, buscando optimizar el proceso de fundición. Para llevar a cabo esta investigación se diseñó y maquinó un molde permanente de geometría sencilla, con el fin de simplificar su análisis. La simulación respectiva del sistema, se efectuó con un software comercial (ProCAST). Para esto se contó con el molde metálico diseñado de dos diferentes materiales H-13 y hierro gris grado 60, instrumentados mediante termopares tipo k con bayoneta en sentido radial en la mitad del largo del molde, con diferentes profundidades hacia la pieza vaciada; las historias térmicas fueron guardadas mediante una tarjeta de adquisición de datos y fueron utilizadas en el módulo inverso de ProCAST, lo cual permitió calcular los valores de los coeficientes de transferencia de calor, bajo diferentes espesores de dos tipos de recubrimientos y en dos diferentes tipos de materiales.

Los resultados mostraron una disminución del coeficiente de transferencia de calor con el incremento del espesor de la pintura, pero aún más en el cerámico aplicado, con el cual se pudo obtener mejores propiedades de la pieza vaciada, debido a que direcciona el perfil de solidificación del mismo.

En cuanto el diferente tipo de material utilizado como molde, se mostró una disminución del coeficiente de transferencia de calor, debido a las propiedades de los mismos, ya que uno, tiene una conductividad térmica mayor que otro al mantener el espesor constante del recubrimiento, así como el área.

Teniendo como conclusión que el uso de las barreras térmicas en el proceso de fundición es ampliamente recomendable, ya que tiende a disminuir el coeficiente de transferencia de calor, evita el desgaste del molde, se pueden aplicar espesores más robustos en el área de la pieza vaciada, todo esto ayudando al perfil de solidificación de mismo.

Palabras clave: coeficiente de transferencia de calor, solidificación, ProCAST, Conductividad térmica, recubrimientos de barrera térmica, YSZ (Itria estabilizada en zirconia)

Abstract

The main objective of this work is to calculate the heat transfer coefficient and thermal conductivity of two types of coatings in permanent molds for the aluminum casting industry, to promote a directional solidification profile on the castings, improving the physical properties as well as of the surface finishing of the final products, and increasing its useful life, avoiding rework or scrap of castings in the aluminum industry. Refractory paint based on silicon and aluminum wallacoat, and another like mica based on vermiculite, were used as coatings, provided by a company in Mexico and commercial ceramic coatings based on zirconia partially stabilized with yttrium and magnesium oxide using the High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) technique, different thicknesses were applied, under optimal application conditions obtained from literature, in order to compare these types of coating, seeking to optimize the casting process. To carry out this research, a permanent mold with simple geometry was designed and machined, in order to simplify its analysis. The respective simulation of the system was carried out with commercial software (ProCAST). For these two molds were designed of different materials H-13 and gray iron grade 60, instrumented by type k thermocouples with bayonet in a radial direction in the middle of the mold length, with different depths towards the cast part. With the thermal histories were saved by means of a data acquisition card and were used in the inverse module of ProCAST, which allowed calculating the values of the heat transfer coefficients, under different thicknesses of two types of coatings and in two different types of materials. The results showed a decrease in the heat transfer coefficients with the increase in the thickness of the paint, but even more in the applied ceramic, so it was possible to obtain better properties of the casting piece, due to the fact that it directs the solidification

profile. Regarding the different type of material used as a mold, a decrease in the heat transfer coefficient was shown, due to their properties, since H13 has a higher thermal conductivity than gray iron grade 60 by maintaining the constant thickness of the coating, thus as the area. Taking as a conclusion that the use of thermal barriers in the casting process is highly recommended, since it tends to decrease the heat transfer coefficient, prevents mold wear, more robust thicknesses can be applied in the area of the cast part, all this helping the solidification profile of it.

Key words: heat transfer coefficient, solidification, ProCAST, thermal conductivity, TBC´s (Thermal Barrier Coatings), YSZ.

Introducción

La necesidad de incrementar el desarrollo tecnológico del sector de la fundición en México, para dar un mayor valor a los productos elaborados en el país, surge debido a la gran importación de la industria mexicana, con el fin de evitar dichas importaciones.

Actualmente la industria automotriz, como algunas otras, requieren una alta demanda de piezas manufacturadas a partir de fundición de aluminio, tales como monoblocks, abanicos, cajas automotrices, rines, bloques de cilindros refrigerados por agua, partes de aeronaves, por mencionar, siendo la industria del transporte la de mayor aplicación, así como la de construcción. Todo esto ha dado como resultado, el requerimiento de altas normas de calidad y mayores propiedades mecánicas, de los productos a partir de esta, debido a la competencia por las importaciones que el sector de la fundición lleva a cabo para satisfacer las demandas de requerimientos establecidos [1]

En la fundición, la fabricación de piezas se aplica primordial importancia por ser la raíz de los problemas más frecuentes debido a ciertas causas o malas ejecuciones, tales como la presencia de poros, puntos calientes y no poder tener una reproducibilidad en las piezas elaboradas. Las causas más comunes de los defectos presentes son por la presencia de hidrógeno, el perfil de solidificación no controlado, por un proceso de desgasificación inadecuado, atrapamiento de gases y gases de combustión ocasionados, ya sea por los aleantes que se agregan para lograr la química requerida o por los gases desprendidos en moldes de arena o tipo PET debido a las resinas utilizadas.

Para mejorar los acabados superficiales y propiedades de un material en la fundición es muy importante contar con un conocimiento fenomenológico

cualitativo y cuantitativo, siendo necesario conocer los mecanismos controlantes, así como las variables dentro del proceso, tales como: la temperatura del metal vaciado, la temperatura del molde, la rapidez del vaciado, la composición de la aleación, entre otras; las cuales describen la formación de porosidad, microestructura y propiedades de la pieza. Un factor de suma importancia para incrementar la calidad de las piezas fundidas es el coeficiente de transferencia de calor, porque nos indica la tasa a la cual la pieza perderá calor durante el proceso de solidificación. En este proceso, es cuando llegan a generarse porosidades en la pieza, rechupes o grietas, ya sean de pequeño o de gran tamaño, lo cual se puede prevenir al controlar la tasa de enfriamiento, mediante el coeficiente de transferencia de calor, a través de una barrera térmica aplicada al molde, obteniendo mejores propiedades metalúrgicas.

En la fundición de metales mediante moldes de arena, prácticamente toda la resistencia al flujo de calor se presenta en el molde, no siendo así cuando se lleva a cabo en moldes metálicos, donde las propiedades termo-físicas (conductividad térmica) del metal y el metal líquido forman una parte importante de la resistencia al flujo calor. Esto lleva a que existan gradientes importantes de temperatura en la fundición, donde la disminución de la temperatura superficial del metal, a valores menores a la temperatura de fusión, ocasiona que se remueva mayor calor durante la solidificación, por lo que se hace importante el control de la tasa de enfriamiento de la pieza vaciada mediante técnicas tecnológicas como la aplicación de TBC´s*(Thermal Barrier Coatings)*, para evitar la pérdida de calor de una manera brusca teniendo control en el perfil de solidificación del mismo.

En la fundición en moldes metálicos, la pieza vaciada pierde calor de una forma más rápida, y las temperaturas tanto del molde como de la pieza vaciada sufren

un cambio. El análisis matemático de ambos casos descritos suele tener una gran diferencia; lo anterior debido a que los moldes metálicos conducen el calor mucho mejor que los moldes de arena, teniendo un cambio repentino de temperatura en la interface.

La simulación matemática y el análisis de procesos de fundición permiten resolver algunos de estos problemas, resultando en mejoras a la calidad y productividad de las piezas de fundición. Para que estos resultados sean confiables y garanticen una alta eficiencia, se requiere conocer las propiedades termo-físicas del sistema, como son: el calor específico (cp), conductividad térmica (λ), coeficientes de transferencia de calor (h), etc.

Debido a la necesidad de conocer las propiedades de los elementos presentes en la fundición, es de importancia la estimación del coeficiente de transferencia de calor, así como de la conductividad térmica de los recubrimientos que se utilizan en la industria.

Objetivos del trabajo.

Objetivo general.

El objetivo principal de este trabajo es estudiar y aplicar las técnicas del método de rociado térmico en especial mediante el proceso de High Velocity Oxygen Fuel (HVOF), para determinar el coeficiente de transferencia de calor, mediante el uso de un código de simulación comercial (ProCAST), en moldes permanentes para la industria del aluminio en diferentes espesores, para permitir direccionar el perfil de solidificación de la pieza en proceso, mejorando las propiedades físicas, así como, del acabado superficial del producto obtenido y pieza final, además de mejorar las propiedades superficiales del molde y aumentar su vida útil.

Para alcanzar el objetivo se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Seleccionar condiciones óptimas de rociado térmico a partir de literatura, para la aplicación eficiente de las barreras térmicas.
- Caracterización microestructural correspondiente de las barreras térmicas aplicadas a través de SEM y EDXS.
- Diseño de un molde permanente de geometría sencilla.
- Evaluar el comportamiento térmico de un molde permanente de fundición de aluminio, con los recubrimientos, tanto en simulación como experimentalmente.
- Evaluar el comportamiento de los diferentes tipos de material del molde permanente diseñado.

Hipótesis planteada.

Hipótesis

La hipótesis planteada en este trabajo, es la determinación de los coeficientes de transferencia de calor de la interfase del recubrimiento cerámico o una barrera cerámica aplicada mediante proyección térmica a diferentes espesores, con el uso de ecuaciones canónicas de transferencia de calor y modelos de solución analíticos de un software computacional (ProCAST) “método inverso”., en el caso a estudio, teniendo en consideración que estas propiedades varían con la temperatura, espesor, porosidad presente y propiedades del recubrimiento aplicado. Con el conocimiento del perfil de temperaturas en la interfase y varias distancias del molde se podrá calcular la resistencia al flujo de calor o la tasa de enfriamiento durante la solidificación de la pieza vaciada y así poder determinar el coeficiente de transferencia de calor experimentalmente y los resultados obtenidos del software deberán de presentar una buena aproximación con las curvas experimentales. Debido a que el enfriamiento de un elemento está relacionado principalmente, por el flujo de energía en forma de calor de una zona de mayor energía a otra zona de menor energía, lo cual está restringido por las barreras o recubrimientos presentes entre el metal fundido y molde, así como el medio exterior, donde la propiedad intrínseca del material de la barrera, tal como la conductividad térmica será de primordial importancia para que se lleve a cabo la transferencia de calor. Mediante el análisis de transferencia de calor haciendo uso de ecuaciones canónicas y del software ProCAST, en el sistema estudiado, teniendo en consideración la forma geométrica del molde, se obtendría el valor correspondiente del coeficiente de transferencia de calor [2].

Justificación.

Actualmente en el país especialmente la micro, pequeña y mediana empresa, la fabricación de moldes utiliza como sistema de moldeo la arena aglutinada como su principal forma de producción con el uso o sin el uso de herramientas de simulación especializadas de manera limitada para el diseño, así como durante su operación. Si bien es una tecnología madura y que tiene un amplio rango de aplicación, la utilización de moldes metálicos es una oportunidad importante para que las empresas mejoren su calidad y productividad.

La industria del aluminio, trata de resolver sus problemas de forma empírica y sin cambios en el modelo que ya se encuentra bien establecido, debido a las condiciones de operación y complejidades inherentes a la velocidad de enfriamiento de la pieza vaciada, donde la necesidad de implementar un estudio sistemático y tecnológico con el uso de herramientas de simulación en el proceso de fabricación, así como la proyección térmica de recubrimientos (TBC´s), surge por el alto porcentaje de piezas desechadas o retrabajadas en la planta, debido a la mala operación del molde, el cual, tiene que ser reparado e incluso en ocasiones rediseñado o siendo scrap, teniendo aumentos en el costo de producción. Lo anterior ha promovido la optimización en los procesos de fundición de piezas de las aleaciones de aluminio 356, en cuanto a su producción anual, mundial y nacional, de piezas producidas mediante moldes permanentes por gravedad con el uso de herramientas tecnológicas.

Se pretende desarrollar el estudio pertinente para poder atacar este problema, mediante el desarrollo de procesos de diseño y de alta tecnología como el desarrollo de recubrimientos por proyección térmica, para el molde metálico permanente y con el uso de software de simulación para su diseño, lo cual

disminuirá la presencia de defectos, teniendo mejores propiedades metalúrgicas y aumentando la productividad del molde, ya que el tipo de recubrimiento térmico en estudio, se puede usar ampliamente para la fabricación de una amplia gama de componentes.

Las barreras térmicas, son sistemas metal-cerámico multicapa, cuya principal aplicación se da en turbinas aeronáuticas, por lo que llevarlos al campo de fabricación de moldes, representa un reto tecnológico importante y una excelente oportunidad de innovación en el campo de la fundición.

Existe, sin embargo, muy poca información reportada en la literatura científica relacionada con este proceso tecnológico implementado en la fundición industrial, lo que hace necesario desarrollar conocimiento sobre el comportamiento térmico del proceso de fundición en aleaciones de aluminio con este nuevo proceso.

Como una evidente necesidad, se ha identificado que es necesario investigar el efecto de la tasa de enfriamiento y los tipos de recubrimientos disponibles en el proceso de solidificación, como lo son las pinturas y las barreras térmicas.

La aportación principal de este trabajo es científica, donde el beneficio involucrará, principalmente, a la industria del aluminio, ya que el tipo de recubrimientos en estudio, son usados ampliamente para la fabricación de elementos como abanicos, monoblocks de automóviles y una amplia gama de equipos de este tipo de material.

Impacto social y tecnológico.

El proyecto propuesto es de importancia relevante para desarrollar liderazgo en la industria de fundición de aluminio. Este trabajo estuvo apoyado por el Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ), por el CINVESTAV Unidad Querétaro, El Centro Nacional de Proyección Térmica (CENAPROT), que es un laboratorio nacional, y soportado en la parte financiera por el CONACYT.

En general, el amplio impacto de esta investigación, consiste en aportar los conocimientos científicos en la introducción de una nueva tecnología en el sector de la industria de la fundición, para mejorar las características de la pieza obtenida y la pieza final, enfocándose primordialmente en la parte de transferencia de calor que permita fabricar piezas de aluminio más seguras, con mejores propiedades mecánicas, generando así un incremento de la productividad y competitividad en esta rama industrial, tratando de aminorar las necesidades actuales en la industria y evitar pérdidas en producción.

Adicionalmente, este trabajo servirá como inicio a continuar las investigaciones, incentivando a los investigadores interesados en los problemas de la industria de la fundición, particularmente, en aleaciones de aluminio; además, de seguir formando recursos humanos en esta área de gran interés industrial.

Finalmente, con la tecnología aplicada como lo son las barreras térmicas, se tendrá un mejor control del proceso de solidificación que se lleva a cabo en procesos reales, que será la base para el desarrollo de conocimiento y así tener una industria nacional enfocada en la competitividad, con la estrategia de ofrecer un valor agregado en los productos que se comercializan, tratando de evitar las grandes importaciones existentes por falta de desarrollo tecnológico presente en la industria nacional.

Antecedentes.

Se han llevado a cabo una infinidad de estudios respecto al cálculo de coeficientes de transferencia de calor respecto al gap de aire o interfase que se forma entre el molde y la pieza vaciada debido a la contracción de las piezas al solidificar, lo cual entorpece la transferencia de calor entre las piezas presentes, así como sus cálculos, lo cual ha arrojado una amplia variedad de valores del mismo, ya que no solo dependen de las característica del sistema, como el tipo de material del molde o el recubrimiento, si no de condiciones que no se puede tener un control total. Los valores publicados en la literatura oscilan desde los 25,000 W/m^2K [3] a 80 W/m^2K [4] y han sido determinados para diferentes aleaciones de aluminio en moldes permanentes de fundición [5].

Debido a la gran variación de los valores del coeficiente de transferencia de calor, por el gap de aire presente, se requiere un análisis muy minucioso, donde se consideren ciertos criterios para la medición del mismo, como el caso de estudio de Trovant y Agryropoulos [6], que analizaron esta característica manipulando ciertas variables para entender el comportamiento del gap de aire, tales como: la rugosidad en el molde, el tipo de molde, el tipo de aleación, etc., obteniendo coeficientes de transferencia de calor entre el molde y la pieza vaciada para la aleación de A356 de 1,700 W/m^2K, para molde de grafito y de 3,200 W/m^2K, para molde de cobre, que tanto para aluminio puro de 2,400 W/m^2K y 5,000 W/m^2K respectivamente para cada tipo de molde. Otra investigación que se llevó a cabo fue respecto a los efectos de la temperatura del molde a través de un modelo matemático sobre la variación del coeficiente de transferencia de calor de metal/molde, utilizando A356/ SAE 1010, respectivamente, la cual fue llevada a cabo por Bencomo, A.I., Bisbal, R.I., Morales, R.II [7], donde además se analizó

el contacto perfecto e imperfecto de la pieza vaciada/molde, con el uso de los tiempos de solidificación de la pieza vaciada.

Por su parte, García [8], realizó un estudio con dos tipos de pinturas refractarias en una geometría cilíndrica, reportando valores de coeficientes de calor en rangos de 780 a 2,800 W/m^2K.

Además, Pehlke R.D., et. al [9] estudiaron algunas aleaciones y reportaron la influencia que tienen los recubrimientos ya sea con bajo, medio o alto espesor en el molde, sobre el coeficiente de transferencia de calor, encontrando que el coeficiente de transferencia de calor disminuía conforme el espesor de recubrimiento aumentaba y por tal está controlado por los parámetros del recubrimiento.

En la tabla 1.1, se muestra la literatura reportada acerca de los estudios sobre el coeficiente de transferencia de calor en diferentes geometrías, así como diferentes tipos de aleación de aluminio.

Tabla1.1. Cálculos de coeficiente de transferencia de calor reportados en literatura.

Fuente	Aleación	Molde	Termocople.	Geometría	Variable analizada	HTC (W/m^2K)
Kuo, Hsu, Hwang, el al. [10]	A356	H-13	lateral	Placa con dicotte-39		940-1890.
Sully [2.12]	Aluminio	acero	lateral	placa	Espesor molde	1,930
Nishida [1,13]	Aluminio	acero	parte superior	cilíndrica	Interfases limitantes	3,000
Sekhar [3,14]	Al-Si eutéctico	H-13	parte superior	cilíndrica	Diferentes medios de enfriamiento	6,000
Ho & Pehlke [4]	Aluminio	cobre	parte superior fondo	cilíndrica	Temperatura	2,200 5,000
Ho and Pehlke [4]	Al-bronce	cobre	parte superior fondo	cilíndrica	Temperatura	1,500 3,000
R.D. Pehlke [9]	Aluminio	H-13	Sección lateral	circular	Refractario 50,100 µm	1,938,1,465
Isaac [5,15]	Aluminio	hierro fundido	lateral	placa	Temperatura en zonas del molde	9,000
Nishida [7,16]	Aluminio	acero	en la pieza vaciada	cilíndrica	Gap de aire	2,200
Nishida [7,16]	Aluminio	acero	en la pieza vaciada	placa	Gap de aire	2,800
El-Mahallawy [11, 17]	Aluminio	cobre	fondo	cilíndrica	Rugosidad de interfase	12,000
Chiesa [10,18]	356	hierro gris	lateral	placa	Temperatura de enfriamiento	2,700
Chiesa [18]	356	hierro gris	lateral	Placa con grafito.	Moderado espesor de grafito	1,630
Chiesa [18]	356	hierro gris	lateral	Placa con aislante	Moderado espesor de aislante	870

Taha [15,19]	Al-4.5 %w/w Cu	cobre	fondo	cilíndrica	Temperaturas en zonas de molde	14,000
Muojeku [20,21]	Al-7 %w/w Si	hierro gris	parte superior	placa	Rugosidad, espesor molde	4,000
Cho [21,22]	Al-4.5 %w/w Cu	acero	lateral	cilíndrica	Presión en proceso de fundición	2,000
Kim [24, 23]	A356	acero	lateral	Cilíndrica hueca.	Sin recubrimiento, cóncavo-convexo	2,700 exterior 20,000Interior
Trovant [28, 6]	A356	cobre	lateral	cilíndrica		3,200
Nguyen [27,24]	Al-7Si-0.3Mg	H-13	lateral	cilíndrica	moderado	13,500
Griffiths. [11]	Al-7 wt % Si	cobre-agua	Fondo Lateral	cilíndrica	Velocidad de enfriamiento, sin recubrimiento	7,100 5,000

Las mediciones que se han llevado a cabo, son con el uso de pinturas refractarias comerciales, las cuales sirven como un obstáculo entre la pieza vaciada y el molde para controlar la temperatura, las barreras térmicas aplicadas por rociado térmico, son usadas ampliamente para este tipo de característica, pero en otro tipo de proceso industrial, teniendo poca literatura del uso de las mismas en la industria de la fundición.

En este tipo de proceso industrial se usará como medio aislante, contando con información bibliográfica relevante a cerca de los procesos de aplicación de las barreras, para llevar a cabo un proceso eficiente y que realice una buena función dicha barrera aplicada.

Lo que se encuentra reportado en la literatura, es acerca de los estudios sobre la aplicación de barreras cerámicas sobre diferentes sustratos y una amplia gama de polvos cerámicos aplicados, así como la variación de las condiciones de aplicación en cada proceso, como los son APS Y HVOF.

Anand A. Kulkarni, Allen Goland and Herbert Herman, University at Stony Brook, NY, 11794 [29], estudiaron minuciosamente la microestructura de la barrera térmica usando YSZ parcialmente estabilizada mediante la aplicación de una pistola 3MB plasma gun, SULZER METCO manteniendo constante SOD (*stand off distance*) de 100mm y con corriente de 650 À, voltaje de 67v, condiciones de flujo de gas de arrastre, gas primario y secundario estándar, viendo el efecto que tiene la morfología del polvo cerámico alimentado en el vuelo de la partícula y la morfología del *splat*, así como también después de la aplicación de ciclos térmicos, datos que fueron utilizados para llevar a cabo diversos estudios como C. David Lozano Mandujano, Dr. Juan Muñoz Saldaña, Dr. Carlos Agustín Poblano Salas [26], quienes llevaron a cabo el estudio de las propiedades de aplicación por APS para la aplicación de la capa cerámica de YSZ en la barrera térmica, variando la distancia de rociado, la corriente aplicada, precalentamiento del sustrato, flujo de alimentación del polvo cerámico, dejando condiciones de voltaje, flujo de gas acarreador fijos; estos parámetros fueron analizados mediante características particulares como, forma del splat y espesor, eficiencia de depósito, esfuerzos residuales y desprendimiento de la barrera cerámica causados por la distancia de rociado, la porosidad presente así como el porcentaje de la fase monoclínica presente, debido a su importancia en la barrera térmica llevando a cabo el proceso mediante el uso de una pistola SULZER METCO 9MB plasma gun mediante el uso de un brazo robótico.

El análisis se llevó haciendo uso de un software *design expert*, para la elaboración del diseño factorial de segundo orden (DoE), para después, poder llevar a cabo un diseño central compuesto, obteniendo una optimización de las condiciones de aplicación, teniendo como resultado que a distancias intermedias

de 90mm a 120mm se obtiene un mejor espesor y eficiencia de depósito a bajos flujos de alimentación de polvo cerámico (20g/min) y a altas corrientes (600 À).

Por su parte H. Ruiz-Luna, et. al [27], estudiaron el comportamiento de la capa de enlace de la barrera térmica mediante la aplicación de HVOF, usando una pistola *Diamond Jet Gun* y un brazo robótico, teniendo como variantes los flujos de oxígeno, flujo de combustible, distancia de rociado, los cuales se llevó un diseño factorial de segundo orden (DoE), mediante el uso del software *design expert* y fueron evaluados mediante las respuestas arrojadas tales como porosidad presente, contenido de óxidos, eficiencia de depósito así como el estrés residual, donde después de su evaluación se llevó a cabo un diseño central compuesto para la optimización de los parámetros de aplicación, obteniendo que las mejores condiciones de aplicación son en condiciones de flujo rico de combustible así como una distancia de rociado intermedio de 250mm a 300mm.

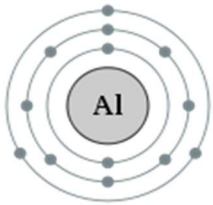
En la tabla 1.2 se muestran los diversos estudios que se han llevado a cabo para el análisis de estas técnicas de rociado térmico y así como las optimizaciones de la aplicación de los diferentes tipos de polvos usados comúnmente.

Tabla 1.2. Literatura encontrada sobre el proceso de rociado térmico.

Título	Autores	fecha
Multi objective Optimization of Atmospheric Plasma Spray Process Parameters to Deposit Yttria-Stabilized Zirconia Coatings Using Response Surface Methodology [25]	.S. Ramachandran, V. Balasubramanian, and P.V. Ananthapadmanabhan,	2011
Fabricación de recubrimientos para barreras térmicas de materiales base $La_2Zr_2O_7$ depositados mediante APS, y caracterización de sus propiedades mecánicas y estructurales". [26]	C. David Lozano Mandujano, Dr. Juan Muñoz Saldaña, Dr. Carlos Agustín Poblano Salas,	Mayo del 2014
Effect of HVOF Processing Parameters on the Properties of NiCoCrAlY Coatings by design experiment. [27]	H. Ruiz-Luna, D. Lozano-Mandujano, J.M. Alvarado-Orozco, A. Valarezo, C.A. Poblano-Salas, L.G. Trápaga-Martínez, F.J. Espinoza-Beltrán, and J. Muñoz-Saldaña	21 de abril de 2014
Parameter Studies on High-Velocity Oxy-Fuel Spraying of NiCoCrAlY Coatings. [28]	E. Lugscheider, C. Herbst, and L. Zhao	1998
Advanced Microstructural Characterization of Plasma-Sprayed Zirconia Coatings Over Extended Length Scales [29]	Anand A. Kulkarni, Allen Goland and Herbert Herman University at Stony Brook, Stony Brook, NY, 11794	

Capítulo 1. Marco teórico.

1.1 Aluminio y sus propiedades físicas y químicas.



El aluminio se encuentra en la tabla periódica con el símbolo químico ‘’Al’’, numero atómico 13 y se encuentra en la familia del Boro.

Es el segundo elemento metálico más importante a nivel mundial, solo por debajo del acero, debido a sus propiedades físicas que lo caracterizan y es el tercer elemento metálico más abundante en la corteza terrestre con un 8%, todo esto hace que este metal, el cual pertenece al grupo de los metales no férreos, sea idóneo para utilizarlo en aplicaciones ingenieriles.

Figura 1.1. Estructura atómica Al.

El aluminio cuenta con las siguientes características, propiedades físicas y químicas [30, 31, 36]:

- Sólido, color grisáceo, no ferromagnético y con un punto de fusión de 660°C.
- superficie metálica, reflectante y formadora de una capa pasiva, alúmina (Al_2O_3), lo cual le da mucha durabilidad.
- ligero, debido a su baja densidad de 2,700 g / cm^3, que es la tercera parte de la del acero, lo que lo hace muy indicado para la construcción de una amplia gama de materiales.

- Calor específico 0-100°C de 917 J/Kg-K, alta conductividad térmica 20-100°C de 238 W/m-K, coeficiente de expansión térmica 0-100 °C de $23.5x10^6$ /K.
- buena maleabilidad con valores de 160-200MPa en tracción.
- módulo de elasticidad de 70 MPa.
- resistente a la corrosión, dando un amplio uso en la construcción.
- Impermeable al agua y a los olores, cualidad indispensable para envases para la industria de los alimentos.
- gran poder reductor.
- conductividad eléctrica de 37.7X106 S/m y una resistividad eléctrica a 20°C de 2.67 m-ohm/cm, por ello es muy útil en instalaciones eléctricas.
- al combinarlo con otros metales puede dar lugar a infinidad de aleaciones, algunas de ellas con propiedades mecánicas comparables a las del acero, pero con la tercera parte de densidad y fácilmente reciclable.
- se encuentra ubicado en la tabla periódica en la serie del bloque P.
- tiene un número atómico de 13 y una masa atómica de 26.98154 uma, diámetro atómico 0.28 nm, parámetro de red 0.404 nm y estructura cristalina FCC.
- tiene una valencia de +3 y radio atómico de 1.43À y configuración electrónica $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$.

1.1.1 Historia del aluminio y su producción.

El aluminio, realmente es uno de los metales más versátiles del mercado y más utilizado en la industria desde 1886, cuando se empezó a producir por electrolisis, llevando a que se incrementará su producción en los años 1990, y así, como en otras muchas aplicaciones de la vida cotidiana, gracias a su densidad, su buen

comportamiento en cuanto a la formación de aleaciones con un amplia gama de elementos, de las cuales se obtienen aleaciones de buena resistencia mecánica, muchas de sus aleaciones, su alta conductividad térmica y eléctrica, su durabilidad y resistencia a la corrosión, alta conductividad, buenas propiedades eléctricas, por lo tanto, esto hace de este material ideal, para innumerables soluciones, tanto estructurales, como decorativas o de cualquier otra índole.

La producción de aluminio, se da a partir de la electrolisis de la alúmina (Al_2O_3), que es un óxido de aluminio, el cual existe termodinámicamente estable en la forma de corindón u obtenido por el proceso Bayer a partir del mineral llamado bauxita, que consiste en óxidos de aluminio hidratados, para la producción de una tonelada de aluminio se requiere aproximadamente dos toneladas de alúmina o corindón, proceso para el cual se requiere una gran demanda de energía eléctrica, lo cual se ve disminuido por su alto tiempo de vida así como su fácil reciclado.

Figura 1.2. Mineral de alúmina.

Gracias al estudio y avances de la tecnología, la producción del aluminio tuvo un aumento acelerado desde los años de su descubrimiento de su producción, como lo muestra la figura 1.3 [32].

Figura 1.3. Tendencia de producción mundial del aluminio [32].

La producción del aluminio a nivel mundial se cifra en 33 millones de toneladas siendo china y rusia los productores más destacados con 8.7 y 3.7 millones de toneladas respectivamente, una parte importante es por reciclaje debido a su facilidad de manejo, en la figura 1.4, se muestra la producción mundial actual de este elemento, en toneladas métricas por año del 2010 al 2017.

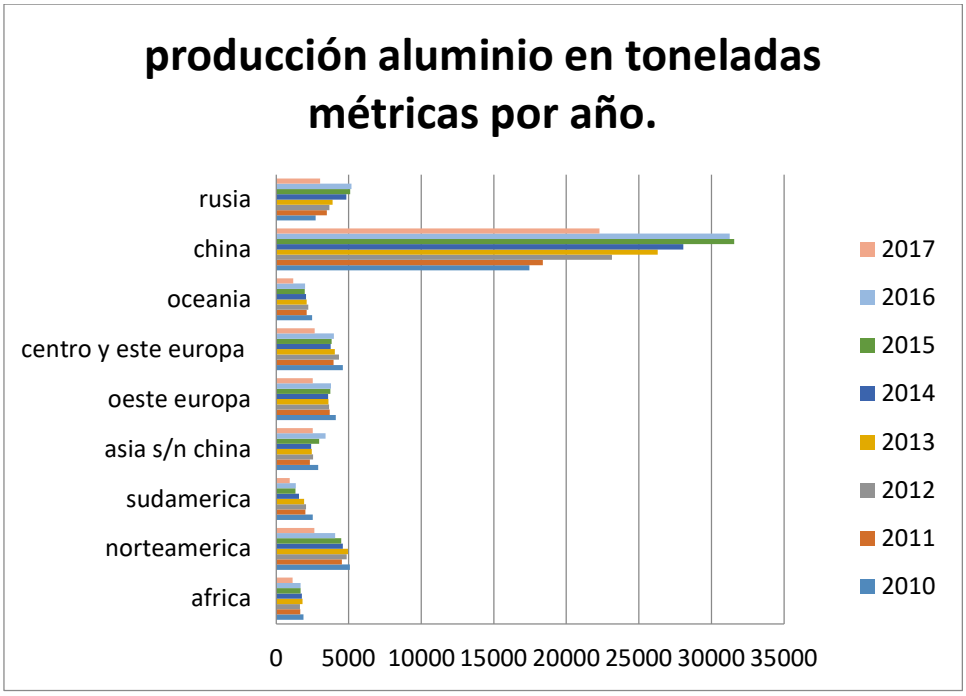


Figura 1.4. Producción mundial de principales productores de aluminio por año [32].

1.1.2 Tipos de aleantes y tipos de designaciones de las aleaciones de aluminio.

El aluminio puro, prácticamente no tiene aplicación, dado que se trata de un material blando y de poca resistencia mecánica, debido a que existe en una combinación estable con otros elementos que particularmente son formadores de óxidos, como la bauxita, por ello adquiere dichas propiedades, sin embargo, aleados con otros elementos permite aumentar su resistencia y adquirir otras características, que varían según la naturaleza de los aleantes utilizados y que forman parte de las aleaciones ligeras existentes.

Los elementos o metales comúnmente utilizados para formar aleaciones ligeras con el aluminio son principalmente, Cobre (Cu), silicio (Si), zinc (Zn), magnesio

(Mg), y manganeso (Mn), los que pudiéramos considerar como secundarios o usados en menor medida como aditivos, son níquel (Ni), titanio (Ti), hierro (Fe), cromo (Cr), cobalto (Co) y sólo en casos especiales se adicionan: plomo (Pb), cadmio (Cd), antimonio (Sb) y bismuto (Bi) [31], los cuales el total de los aleantes no pasa del 15%.

Debido a la gran cantidad de aleantes, existen diversos países o sociedades que han realizado una clasificación de las aleaciones de aluminio, las clasificaciones más importantes son las que han realizado las siguientes instituciones, *American National Standard Institute* (ANSI), *International Alloy Designation System* (ANSI), *International Alloy Designation System* (IADS), ambas basadas en la *Aluminum Association of the United States*, como también la International *Organization for Standarization* (ISO) y la *Unified Numbering Systmes* (UNS) [36].

Una clasificación del aluminio de acuerdo a las instituciones mencionadas, es en series, que van desde la 1000, hasta la 8000, las cuales siguen el proceso de designación se denomina sistema numérico de cuatro cifras y es válido para todas las formas de productos de aluminios, tanto conformados como aluminios de moldeo, excepto en los lingotes, la cual se presenta en la figura 1.5:

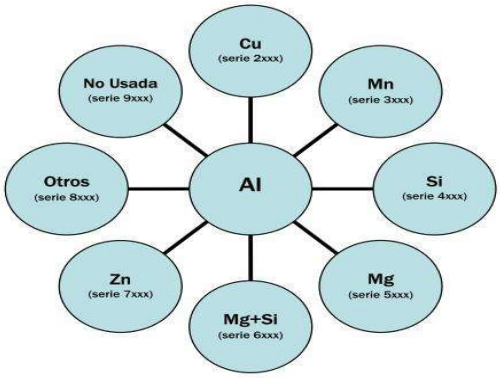


Figura 1.5. Principales elementos aleantes del aluminio y series según el sistema de designación de aleaciones de aluminio [31].

La aleación del tipo 2000, 6000, 7000 son de interés debido a que son tratables térmicamente, sobresaliendo la serie 6000 debido a que contiene como elementos aleantes el magnesio (Mg) y el silicio (Si), principalmente, estos elementos son formadores de precipitados de siliciuro de magnesio (Mg_2Si), el cual se encarga de reforzar al material debido a que no permite el libre desplazamiento de dislocaciones, los cuales forman zonas de Guinier-Preston o zonas GP, esta precipitación se ve facilitada por la presencia de defectos en la red, tales como dislocaciones.

El sistema utilizado para las aleaciones para moldeo, es apenas diferente: el dígito que designa el grupo de aleación es esencialmente el mismo. Los segundos dos dígitos sirven para identificar una composición en particular. Con el cero después del punto decimal, se identifica el producto como una fundición.

La serie 3XX.X está reservado para las aleaciones que contienen silicio y / o adiciones de cobre y magnesio.

La serie 6XX.X no es utilizada, y la serie es 8XX.X es utilizado para aleaciones que contienen estaño como el principal elemento aleante.

La tabla 1.3 muestra las designaciones para las aleaciones para moldeo de aluminio, debido a la presencia de los elementos presentes en él, con el fin de obtener las características requeridas como producto final.

Tabla 1.3. Sistemas de designación para aleaciones de aluminio [31].

Designación	1XX.X	2XX.X	3XX.X	4XX.X	5XX.X	7XX.X	8XX.X	9XX.X
Aleación de aluminio.	99% mínimo de aluminio	cobre	silicio con cobre y/o magnesio	silicio	magnesio	zinc	estaño	otros

1.1.3 Tratamiento térmico y especificaciones en aleaciones de aluminio.

Un tratamiento térmico, en sentido amplio de la palabra, se refiere al calentamiento y enfriamiento de los metales en estado sólido, para modificar sus propiedades mecánicas, su estructura o eliminar tensiones residuales. En el aluminio, se denotan con la letra ‘’T’’, que se agregan al final del número de la aleación correspondiente, para denotar el estado de entrega del material de aluminio o los tempers resultantes de los tratamientos térmicos, y va seguido de varias cifras, las cuales denotan la naturaleza del tipo de tratamiento. La tabla 1.4 muestra los tratamientos térmicos llevados a cabo en las aleaciones de aluminio.

Tabla 1.4. Tipos de tratamiento para aleaciones de aluminio por designación de ‘’standard american association’’ [33].

F	Estado en bruto.
O	Temple, recristalización (sólo para productos forjados).
H	Endurecimiento por deformación (sólo para el producto de forja).
T	Tratado térmicamente para producir temple estable.
T1	Enfriamiento desde una temperatura elevada, provocando un proceso de envejecimiento.
T2	Temple (sólo para productos de fundición).
T3	Tratamiento de puesta en solución, trabajo en frío.
T4	Tratamiento de puesta en solución, envejecimiento natural.
T5	Enfriamiento desde una temperatura elevada en el proceso de conformado y envejecimiento artificial (tratamiento térmico de precipitación).
T6	Puesta en solución, tratamiento artificial.

T7	Puesta en solución, estabilización.
T8	Puesta en solución, trabajo en frio, envejecimiento artificial.
T9	Puesta en solución, envejecimiento artificial, trabajo en frío.
T10	Enfriamiento desde una temperatura elevada, envejecimiento artificial, trabajo en frío.

1.1.4 Química de la aleación 356 y efectos de los elementos químicos.

La aleación que se manejara en el presente trabajo es la aleación 356.0, la cual es ampliamente utilizada en la industria automotriz como cajas de transmisión, accesorios de piezas de control, bloques de cilindros refrigerados por agua, partes de aeronaves y en otro tipo de aplicaciones, en las que se necesitan buena soldabilidad, estanqueidad a la presión y buena resistencia a la corrosión.

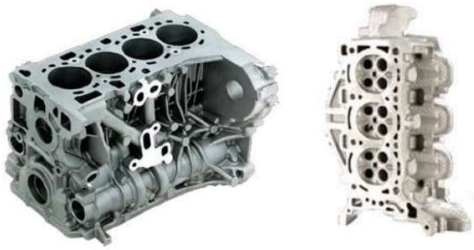


Figura 1.6. Monobloque (parte izquierda) y cabezal de aluminio (parte derecha), partes de un automóvil.

La aleación 356.0 presenta contenidos de 6.5-7.5% silicio principalmente y como aleantes 0.25% de titanio, 0.2- 0.45% magnesio, 0.1-0.25% cobre, la tabla 1.5 muestra la composición completa de esta aleación.

Tabla 1.5. Composición química del aluminio 356.0.

Elementos %p/p	silicio	fierro	cobre	manganeso	magnesio	zinc	titanio	otros	aluminio
aleación 356.0	6.5-7.5	0.6	0.25	0.35	0.20-0.45	0.35	0.25	0.15	balance

La composición química de la aleación determina el potencial para obtener propiedades físicas y mecánicas específicas. Los contenidos de la aleación, están diseñados para producir en específico ciertas características dentro de las cuales se incluye la maquinabilidad, su moldeo, etc. La interacción de los elementos de la aleación promueve características microestructurales, fases y efectos en soluciones sólidas para el desarrollo de propiedades en específico.
Los efectos que tienen los elementos químicos en el aluminio y sus aleaciones pueden ser muy diversos, tanto en mejora como perjuicio en sus propiedades mecánicas, a continuación, se mencionarán una pequeña descripción del efecto de los elementos sobre el aluminio y a sus aleaciones [34].

- Antimonio (Sb): solo reacciona con elementos que tienen una valencia de 2, tales como calcio (Ca^{+2}) o estroncio (Sr^{+2}), dando lugar a un producto Inter metálico burdo. Está clasificado como un metal pesado, con potencial toxicidad especialmente asociado con la formación del gas.
- Bismuto (Bi): el agregado de un porcentaje mayor 0.15% en peso, disminuye la tenacidad del aluminio, dándole mejor maquinabilidad.

- Boro (B): principal formador de boruros o bromuros con otros metales como el aluminio y titanio. El boruro de titanio forma sitios de nucleación estable, lo cual promueve la refinación del grano tales como el TiAl3.
- Calcio (Ca): es un modificador débil del eutéctico Al-Si, a menudo es el responsable de la porosidad presente en la pieza vaciada y en contenido mayor a 0.005% afecta adversamente la ductilidad en las aleaciones Al-Mg.
- Zinc (Zn): en compañía de aleantes como el cobre o magnesio, beneficia el tratamiento térmico o envejecido natural.
- Cobre (Cu): aumenta un poco la resistencia y dureza en piezas vaciadas, así como después de tratamiento térmico, con contenidos que rondan de 4 a 5.5%, además reduce la resistencia al agrietamiento en caliente, pero incrementa el riesgo potencial a generar rechupes inter dendríticos.
- Cromo (Cr): al agregado de bajos porcentajes, favorece el envejecido a temperatura ambiente, forma típicamente el compuesto $CrAl_7$, el cual suprime la tendencia del crecimiento de grano, otra función importante dentro de las aleaciones Al-Si, es la mejora a la resistencia de oxidación.
- Estroncio (Sr): modificador del eutéctico Al-Si de una manera efectiva con adiciones de bajos niveles, los valores recomendados de adición oscilan de 0.008 a 0.04%, combinadas con altas velocidades de solidificación, algunos investigadores han reportado efectos benéficos en aleaciones 319.0 y 356.0 con contenidos mayores a 200 ppm de estroncio. Las adiciones de altos niveles están asociadas con la formación de porosidad, lo cual afecta la eficiencia del desgasificado de la aleación.

- Fósforo (P): En aleaciones Al-Si hipereutécticas, el fósforo nuclea y refina la fase de silicio primario en formación. En adiciones bajas, disminuye la efectividad de sodio y estroncio como modificadores del eutéctico Al-Si.
- Hierro (Fe): mejora la resistencia al agrietamiento en caliente y disminuye la tendencia a la adhesión (die sticking), en moldes permanentes, pero Incrementos en el contenido de hierro son acompañados por una disminución significativa de la ductilidad. Este reacciona para formar fases ínter metálicas, las más comunes son $FeAl_3$, $FeMnAl_6$ y AlFeSi, las cuales son fases insolubles que afectan las propiedades.
- Magnesio (Mg): es un elemento fundamental en el desarrollo de dureza principalmente en las aleaciones Al-Si tratadas térmicamente, comúnmente usado en aleaciones complejas conteniendo Cu, Ni y otros elementos con el mismo fin. La fase endurecible Mg_2Si, muestra un límite de solubilidad aproximadamente 0.70%. Las aleaciones binarias Al-Mg son ampliamente usadas en aplicaciones en las que se requiere un acabado superficial, resistencia a la corrosión y una atractiva combinación de resistencia y ductilidad. El contenido de Mg oscila de 4 a 10%, donde las aleaciones que contienen más del 7% de magnesio, son tratables térmicamente. Su desventaja es que se pierde rápidamente por oxidación y potencialmente afecta la calidad de la pieza por inclusión de óxidos.
- Manganeso (Mn): es normalmente controlado a niveles bajos para el endurecimiento por trabajo y reducir el efecto perjudicial del Fe sobre la ductilidad en la aleación.
- Níquel (Ni): es comúnmente usado con Cu para reducir el coeficiente de expansión térmica, mejorando las propiedades a temperaturas elevadas.

- Plomo (Pb): el plomo es usado para mejorar las características de maquinabilidad en concentraciones mayores a 0.1%.
- Silicio (Si): mejora las características de las piezas, como la fluidez, alimentación de paredes delgadas, resistencia al agrietamiento en caliente o ‘’hot tear’’. A bajas adiciones de silicio que rondan entre 5 a 7% son ideales en procesos de enfriamiento lento, como moldes de arena, y con adiciones de silicio que rondan de 8 y 12% se maneja en procesos con velocidades de enfriamiento altos, como en molde permanente.
- Sodio (Na): modificador del eutéctico Al-Si, bajo todas las condiciones de solidificación. El sodio interactúa con el fósforo para reducir su efectividad en la modificación del eutéctico y el refinamiento de la fase primaria de Al-Si. En bajas concentraciones actúa como frágilizante en aleaciones Al-Mg. El sodio se pierde rápidamente en el aluminio fundido a través del tiempo, así que el efecto modificador es transitorio por lo que requiere de adiciones periódicas para mantener los niveles de modificación.
- Titanio (Ti): es usado como refinador de la estructura del grano de aleaciones de aluminio vaciado, es agregado comúnmente en forma de TiBAl. El titanio es a menudo empleado adicionalmente para reducir las tendencias al agrietamiento en caliente, y la dispersión de defectos por contracción como los rechupes.

1.1.5 Principales fases en la aleación 356.

La aleación 356.0 tiene principalmente contenidos altos de silicio y aluminio dando lugar a una aleación de Al-Si, estas constituyen el 90% del total de los productos vaciados de aluminio, debido a las propiedades presentes en ellas como la maquinabilidad, soldabilidad y sus propiedades de fundición; otorgadas principalmente por sus aleantes como Cu, Mg, Zn y Mn, en combinación con el eutéctico Al-Si [35]. El silicio endurece al aluminio y, sobre todo, aumenta su fluidez en la colada y su resistencia a la corrosión. Estas aleaciones son de gran importancia para piezas fundidas porque son muy dúctiles y resistentes al choque; tienen un bajo coeficiente de dilatación y una elevada conductividad calorífica y eléctrica, pero son difíciles de mecanizar por la naturaleza abrasiva del silicio. Estas aleaciones se dividen de acuerdo del porcentaje de silicio tomando como referencia el diagrama de equilibrio Al-Si, según las relaciones que guarda su constitución al equilibrio como función de la composición y temperatura en la figura 1.7, teniendo 3 grupos:

- Aleaciones hipo eutécticas de 5 a 11% Si, donde el aluminio solidifica formando una red dendrítica y el eutéctico Al-Si precipita Inter dendríticamente.
- Aleaciones eutécticas de 11 a 13% Si, donde la estructura final es completamente eutéctica.
- Aleaciones hipereutécticas de 13 a 20% Si, donde la reacción primaria de solidificación involucra la precipitación de partículas de Si primario hasta que la temperatura eutéctica se alcance y el líquido remanente forma el eutéctico característico.

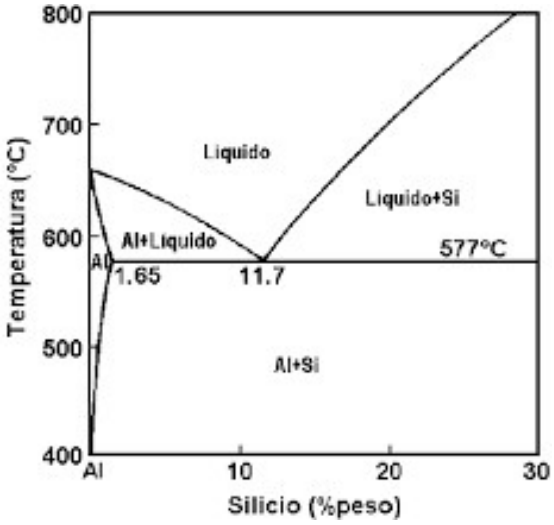


Figura 1.7. Diagrama de Equilibrio Al-Si, mostrando los tipos de aleaciones [37].

La optimización o mejora de las condiciones mecánicas de la aleación, se da principalmente en el tratamiento del metal líquido al reducir el contenido de H_2 y remoción de inclusiones, así como la adición correcta de los elementos aleantes, la refinación de grano mediante agentes nucleantes como el TiBAl, la modificación del eutéctico Al-Si, que corresponde a la proporción de 11,6% de Si y cuya temperatura es 577ºC, por adición de modificadores como Sr, el cual se agrega como liga Al-Sr, la reducción del espaciamiento dendrítico secundario debido a una mayor velocidad de solidificación, dependiendo del tipo de molde.

El tipo de aleaciones del tipo Al-Mg-Si se da a partir de la aleación de Al-Si al añadir 0.35% de Mg, debido a que produce un envejecimiento por precipitación.

Estas aleaciones son vaciadas tanto en moldes de arena como metálicos y son utilizadas preferentemente para producir piezas automotrices, entre otras aplicaciones; Las aleaciones 356.0 se utilizan en aplicaciones automotrices como rines y cilindros maestros de frenado y la aleación 357.0 en aplicaciones aeronáuticas, así como la 356.0.

1.2 Fundición

La fundición, es el proceso u operación que hace cambiar de estado de agregación de un material como el aluminio o acero, mediante el uso del calor necesario, a través de la combustión o inducción de un equipo, con el fin de fabricar una pieza en específico a través de la colada del material fundido en un molde, el cual tiene la forma de la pieza deseada.

Figura 1.8. Piezas fundidas.

La temperatura de fusión de los materiales depende de los constituyentes principalmente, así como de su pureza. Se da en el equilibrio de fases del estado sólido y líquido, donde el cambio de fase ocurre a temperatura constante, la cual depende de la capacidad calorífica de los elementos (*Cp*). Las temperaturas de fusión de los principales metales sometidos a fundición son las mostradas en la figura 1.9.

Figura 1.9. Temperaturas de fusión de principales elementos en fundición.

1.2.1 Tipos de fundición.

Los tipos de fundición son muy específicos, según el tipo de fundición que se deseé llevar a cabo. Existen diferentes tipos de fundición, dentro de los cuales se mencionan los más comunes como, fundición a la cera pérdida o *investment casting*, en molde permanente, molde de arena o consumible y existen procesos especiales tales como vaciado semisólido y continuo.

En todos los procesos se inicia con la creación del molde de la pieza que se desea producir, haciendo los análisis necesarios con los programas a disposición, para tener las óptimas condiciones para una pieza sana o ya sea con el diseño de gente con experiencia. Se procede con el maquinado o moldeo con arena del molde de la pieza a producir y finalmente su vaciado para la obtención de la pieza, después de una serie de pasos como cortes, pulido, etc.

En la figura 1.10, se muestran los diferentes tipos de fundición existentes en la industria de la fundición.

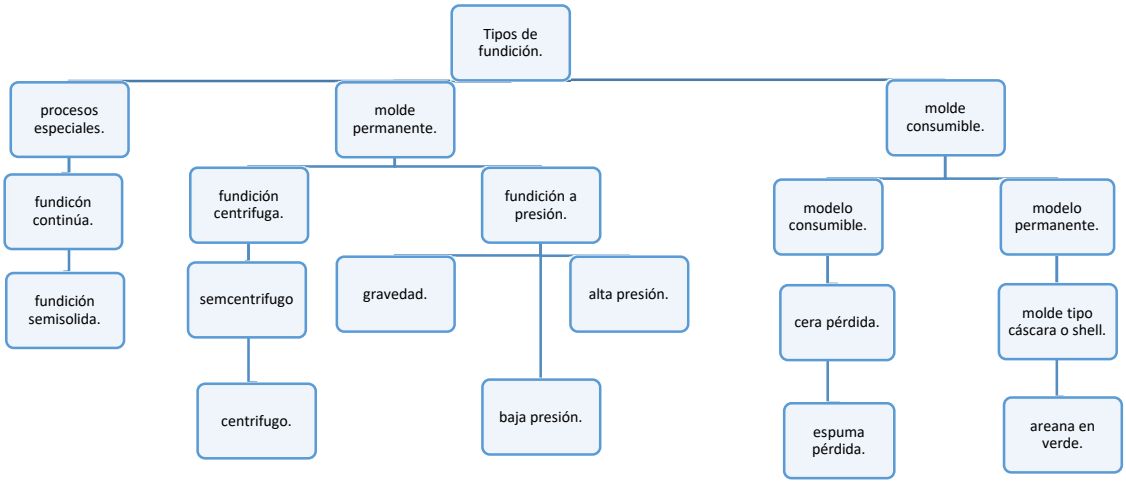


Figura 1.10. Diferentes tipos de procesos de fundición en la industria.

1.2.2 Procesos de fundición más comunes.

Dentro de los casos más comunes en los principales tipos de proceso de fundición, por los que normalmente se realiza la fundición en las aleaciones de aluminio, que es el caso de interés, se muestra en la siguiente tabla de procesos idóneos para 4 tipos de materiales como lo son, las aleaciones de aluminio y los aceros como el acero inoxidable, hierro fundido y hierro dúctil.

Tabla 1.6. Idóneos para la fundición de aceros y aleaciones de aluminio.

Proceso.	hierro gris.	hierro dúctil .	acero inoxidable.	aleación de aluminio.
• arena en verde	• OK	• OK	• OK	• OK
• arena tipo shell	• OK	• OK	• OK	• NO
• cera pérdida	• NO	• NO	• OK	• NO
• espuma pérdida	• NO	• OK	• OK	• NO
• fundición por gravedad	• NO	• NO	• NO	• OK
• fundición a baja presión	• NO	• NO	• NO	• OK
• fundición a alta presión	• NO	• NO	• NO	• OK

El proceso de fundición es muy distinto para cada caso, a continuación, se abordarán algunos de ellos, mostrando sus principales beneficios que los caracteriza, así como la serie de pasos que hay que llevar a cabo para su buena práctica. La fundición a la cera pérdida o *investment casting,* se caracteriza por obtener la parte positiva o exterior de la pieza a partir de cera, ya que es un material maleable y fácilmente fundible, con la cual se logra hacer características de la pieza por más pequeñas que sean, y después está se recubre de un material como sílice o arcilla, el cual tiene que ser refractario y que no se altere con el calor, se aplican tantas capas como sean necesarias para obtener un molde de una única pieza muy firme.

Hay dos tipos de procesos en este tipo de fundición, la directa y la indirecta, en donde la directa se usa sólo para una pieza, sin que pueda haber más reproducciones de la pieza y la indirecta se puede usar para obtener más ejemplares de la pieza, por lo cual es la más común en la industria.

Al cumplir con el espesor del molde (capas de sílice o arcilla), se procede hacer unos canales por donde se desfogará la cera o se usa el canal principal para su desfogue, en seguida la pieza se coloca en el horno de manera invertida a la temperatura necesaria para poder retirar la cera de la parte interna del molde y poder usarlo para la fundición requerida de la pieza. Para retirar o desmoldar la pieza fundida, se requiere la remoción completa del molde de arcilla o sílice, debido a que es una sola pieza, obteniendo así la pieza pre final debido a que se obtiene con los bebederos y con un acabado áspero, teniendo que hacer diversas aplicaciones de corte y pulido para obtener la pieza final. Las características obtenidas por este método, son una estrecha tolerancia en dimensión, con un acabado superficial excelente, mostrado en la figura 1.11.

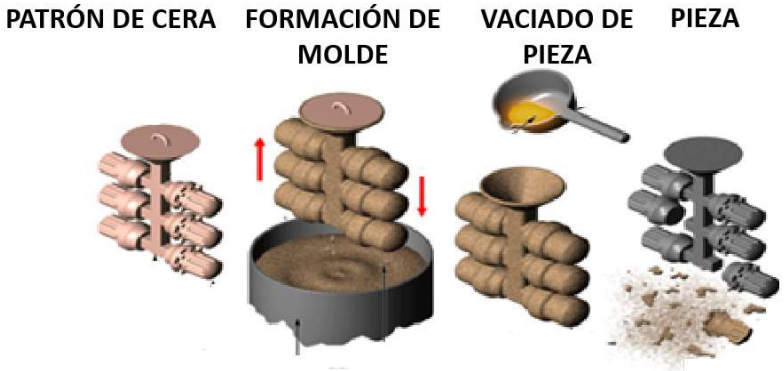


Figura 1.11. Proceso de fundición de cera pérdida o *investment casting*.

La fundición en molde permanente por gravedad, se caracteriza por tener un uso muy extenso del molde y por fácil reproducibilidad de las piezas en fundición.

La fabricación del molde inicia con la selección del material, normalmente se utiliza material H-13, debido a sus buenas propiedades para la transferencia de calor en el la pieza vaciada, pero en ocasiones se usa hierro gris, en piezas de no gran dimensión.

Se analizan variables y características en prototipos de dibujo, en los cuales se busca la simetría, debido a que este tipo de moldes son de dos partes, los modelos se simulan a través de un software para tener un buen desempeño del molde, variando como lo son las extracciones de calor a través de las mazarotas, las bajantes, el área de choque, venteos, entre otras; Las cuales ayudarán a tener una pieza sana, es decir, sin rechupes que entorpezcan las dimensiones de importancia, inclusiones de aire, puntos calientes, etc. Ya analizado el sistema, teniendo las variables definidas y las dimensiones junto con tolerancias necesarias, se procede al maquinado de la pieza a través de un CNC o un brazo robótico con múltiples grados de libertad, el cual ya maquinado se procede al vaciado de la pieza usando los desmoldantes pertinentes y la pieza se obtiene en cuestión de segundos, la pieza final se obtiene con el alimentador así como las mazarotas usadas, con lo cual se hace necesario el uso de cortes y pulido, para obtener la pieza requerida, mostrado en la figura 1.12.

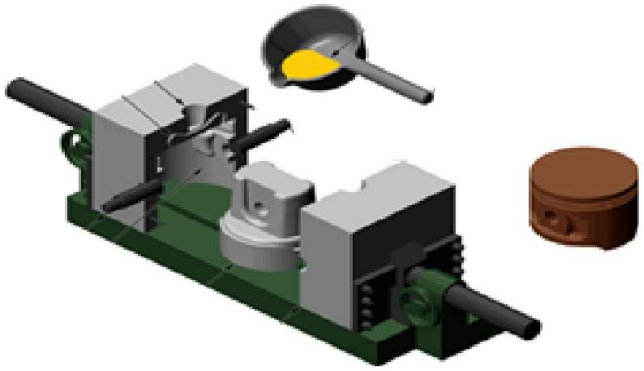


Figura 1.12. Proceso de fundición en molde permanente.

La fundición de arena, se caracteriza por el fácil reciclado de la arena y por la facilidad de poder obtener piezas reproducibles, debido a que se generan los positivos de las piezas en material de madera o plástico ya dependiendo de las aplicaciones y costos de las empresas.

Se inicia con el dibujo de la pieza en cuestión a fundir (modelo) y es hecho de madera, la cual es comúnmente utilizada en la fabricación de modelos; con sus respectivas tolerancias, debido a la contracción presente por el metal o aleación seleccionado para el material de vaciado de la pieza. Este ya queda de uso para réplicas de piezas posteriores, lo que logra una gran reproducibilidad. Ya obtenida la pieza siguiente es obtener la parte positiva del modelo en un molde de arena, la cual lleva una preparación respectiva con las resinas y catalizador en las partes ya especificadas en el producto, teniendo la mesura del uso de corazones, en caso de ser necesarios, así como colocar los alimentadores o runners adecuados, para lograr un llenado óptimo sin burbujas y sin material del molde, lo cual deja sin la pieza vaciada zonas llamado misrun o unfill. Para la obtención del producto final se requiere llevar a cabo operaciones de corte y pulido para tener la pieza sana y de calidad.

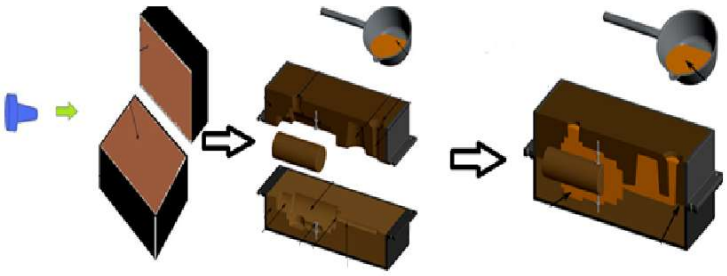


Figura 1.13. Proceso de fundición en arena.

1.2.3 Tipos de moldes.

Dentro de los diferentes tipos de fundición, se constituyen del uso de dos categorías muy bien definidas de moldes, como ya antes se mencionó, como lo son: moldes consumibles y moldes permanentes.

En las operaciones de fundición con molde consumible, los cuales se usan para metales con alto punto de fusión, como en el caso de fundición de arena, al igual de otros tipos de fundición como cera pérdida, espuma pérdida, el molde se

sacrifica con el fin de obtener la pieza fundida, por lo tanto, cada pieza requiere un nuevo molde para la obtención de piezas sucesivas, como se muestra en la figura 1.14 a). En las operaciones de fundición con molde permanente, como la fundición a presión o la fundición centrifuga, los cuales son para metales con bajo punto de fusión, el molde es fabricado con un metal, el cual cumpla con las características de enfriamiento para la pieza vaciada y tenga un tiempo de vida considerable, debido a que el molde se usa una cantidad muy numerosa para la elaboración de piezas fundidas, como se muestra en la figura 1.14 b).

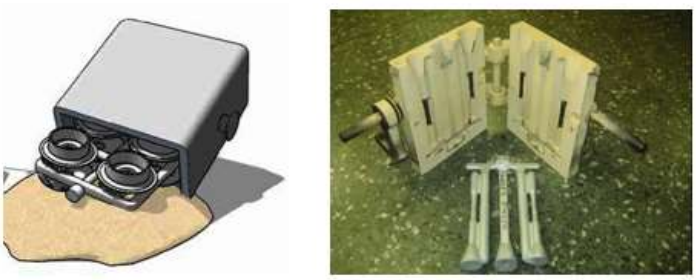


Figura 1.14. Tipos de molde a) consumible b) permanente.

1.2.4 Características en el diseño de moldes.

El diseño de moldes es muy importante en el proceso de fundición, debido a que de él dependen muchas de las propiedades del producto final o la pieza vaciada. Su diseño empieza por el amplio conocimiento de la parte a diseñar, tales como la geometría, la función que va a desempeñar, las dimensiones de importancia para su maquinado, las propiedades específicas del producto final, el tipo de material, así como su calidad y productividad. El orden de criterio para el diseño del molde se muestra en la figura 1.15.

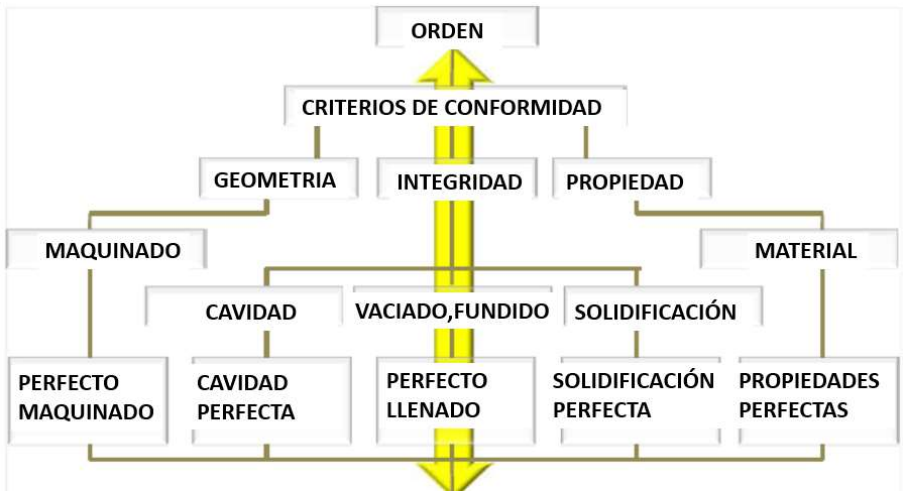


Figura 1.15. Orden de criterio para el diseño de moldes.

Parte de la geometría empieza con hacer una pieza con simetría donde se distribuye el volumen de la pieza en dos partes las cuales son llamadas core y drag mostradas en la figura 1.16, donde muestra otros elementos tales como la parte positiva de la pieza vaciada (modelo o patrón), con el cual se obtiene el área de llenado del molde, para el caso de molde de arena, en el caso de molde permanente solo se llevan a cabo los corazones, las cuales delimitan el espesor necesario o huecos en la pieza final y la parte del core y drag son maquinadas con el empleo de una maquina CNC.

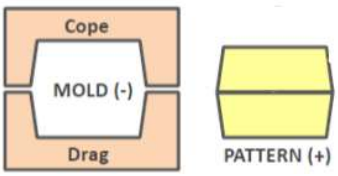


Figura 1.16. Molde con simetría con su parte inferior y posterior (core y drag).

El diseño de la geometría incluye el fácil manejo de las operaciones unitarias después del vaciado con la pieza obtenida como lo son el corte de las mazarotas

o alimentadores, el fácil desmolde de la pieza con el uso de pines, el fácil retiro de los corazones presentes en la pieza, así como su maquinado final.

Figura 1.17. Pieza obtenida de fundición con mazarotas o alimentadores.

El diseño de la integridad de la pieza abarca las condiciones de cómo crear la parte positiva del molde, el llenado del molde y la correcta solidificación de la pieza. La creación de la cavidad del molde tiene primordial importancia, debido que se crea una línea de partición jugando con la orientación de la pieza donde se evita tener ciertas formas dentro del molde tales como evitar los cortes de la pieza teniendo la mayor parte de la pieza vaciada dentro del molde, agregar el mínimo de corazones necesarios, evitar tener zonas no planas en el molde, y evitar zonas con ángulo, mostrado en la figura 1.18.

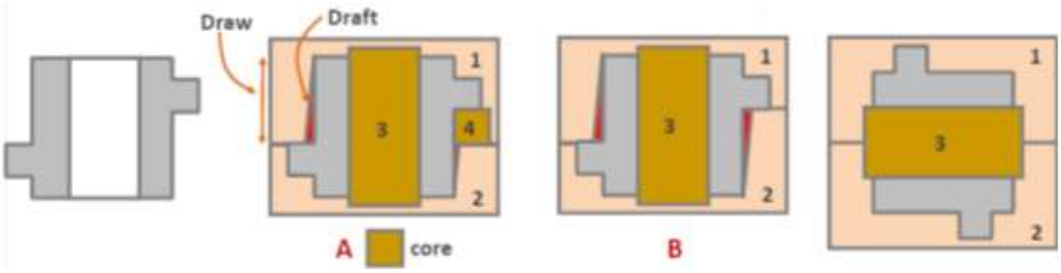


Figura 1.18. Selección de la cavidad de un molde.

El ´´*draft*´´ es requerido en la cavidad para partes lejanas o no tan próximas del área de división del molde, para poder tener un desmolde adecuado y sin problemas de atascos o pérdidas de tiempo por desmolde. Normalmente, la

medida del ángulo del draft está en función de la altura o lejanía de la parte de la pieza, medida desde la partición del molde, como lo muestra la figura 1.19.

A) cara cercana a la partición del molde menores de 5 cm, ´´draft´´ mínimo 0. 5º parte externa y 1º parte interna.

B) cara muy lejana de la partición del molde de 5-10 cm cara externa 0. 75º y 1. 5º cara interna y mayor de 10 cm 1º cara externa y 2º cara interna.

C) en las caras internas se aplica un máximo de *´´draft´´*.

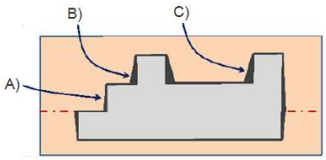


Figura 1.19. Partes de diseño de un molde para su correcto llenado.

Otros elementos que se diseñan en la cavidad del molde, que también son necesarios para una pieza sana, son los siguientes: 1) área de vertido de la pieza vaciada o pouring basin, 2) bajante o sprue, 3) el área de choque o well, 4) las correderas o runner, así como sus extensiones, 6) entrada de la pieza vaciada al molde o gate, 7) feeder o mazarota, las cuales se identifican en la figura 1.20, donde se muestra cada uno de los elementos mencionados.

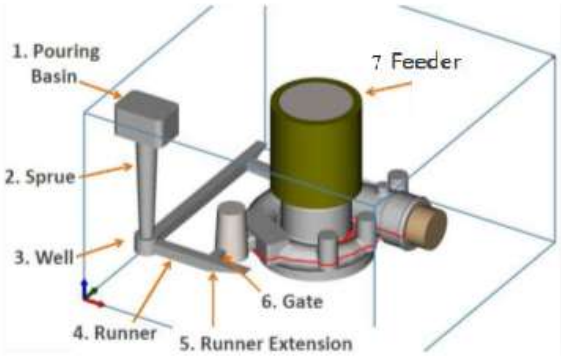


Figura 1.20. Partes de diseño de un molde.

Otro elemento que se aplica con el fin de mejorar el moldeo y un mejor flujo del metal fundido son los fillets a las zonas esquinadas o de ángulos de 90º, además de tener en consideración las tolerancias para el maquinado de la pieza final, por los defectos que se pudieran presentar, dando mayor tolerancia a las partes superiores, las cuales rondan de 2-10 mm para aceros y de 1-5 mm para metales no ferrosos, así como las tolerancias de contracción, las cuales varían según cada aleación a fundir, como lo muestra la tabla 1.7.

Tabla 1.7. Tolerancias de contracción según la aleación.

Metal	mm/m
Al-alloys	13-15
Cu-alloys	16-20
Grey iron	8-12
Steels	20-25

A todo el diseño de la cavidad del molde dentro del draft, fillets y las tolerancias aplicadas en el mismo, agregan un exceso de material al modelo original alrededor de 5-15% de peso. Después de obtener una perfecta cavidad, se requiere obtener un perfecto llenado en la misma, para lo cual se requiere del análisis de herramientas de simulación o experimentos o llámense pruebas piloto del molde, donde se analiza el perfil de flujo de alimentación, con la pieza vaciada obtenido, y se modifica a través de pendientes para reducir la velocidad del metal fundido, así como aplicar variantes para evitar cualquier otra característica de importancia para la pieza vaciada, como el área de choque, el número de gates, el basin, etcétera.

Dichas condiciones de llenado deben propiciar una pieza vaciada con las propiedades idóneas, pero en ocasiones no se cuenta con características importantes como el volumen de la pieza, zonas muy grandes que tardan en llenar, por lo cual tenemos variaciones en los perfiles de enfriamiento y hay que hacer uso de elementos feedaids como feeders o alimentadores, mangas o sleeves, ya sean endotérmicas o exotérmicas, algunos enfriamientos o chillers, y algunas pequeñas aletas de enfriamiento o fins, estos con el fin de obtener un perfil de enfriamiento que cumpla con la temperatura necesaria, para que se puedan llevar a cabo procesos indispensables, se lleve a cabo el crecimiento de la estructura o microestructura requerida en la pieza vaciada y poder contar con las propiedades adecuadas para el funcionamiento de la pieza. Los modelos también se pueden llevar a cabo de modo matriz, teniendo en común características de las piezas a fundir tales como las cavidades y sus formas, teniendo un mejor uso del material del molde y una producción mayor, teniendo en cuenta la separación o gap entre cada pieza, debido a la transferencia de calor presente en el sistema, o seguir modelos ya existentes, como en la figura 1.21.

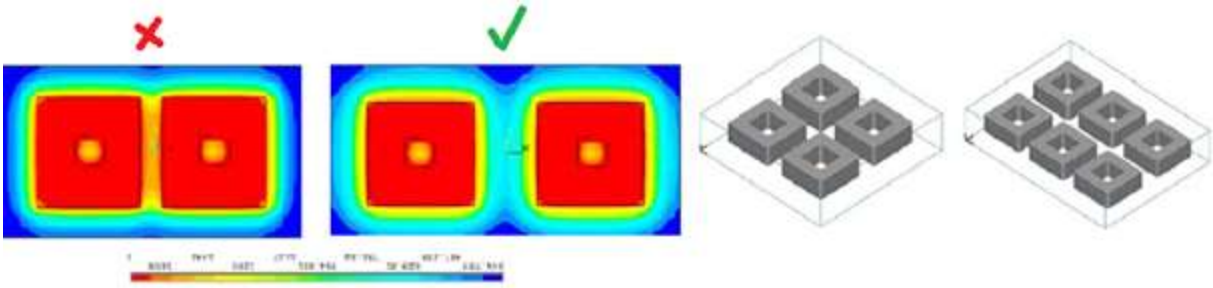
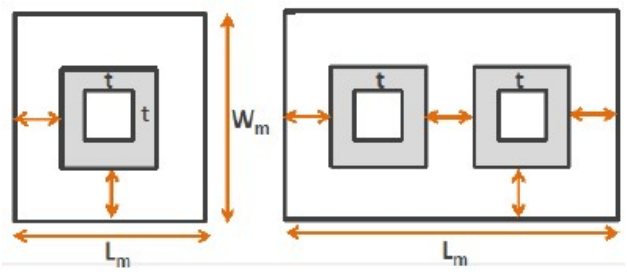


Figura 1.21. Modelo de fundición empleando el tipo matriz con gap adecuado.

El diseño o estimación del gap adecuado, es fácil de obtener, debido a que depende básicamente del espesor de las partes de la pieza o parte a fundir, con el uso de una sencilla fórmula y el uso de la figura 1.22.



Mínimo gap = F_g X t F_g = 1.5-2.0

Figura 1.22. Layout de modelo de fundición en matriz.

El diseño de los elementos que se llevan a cabo en la cavidad, lleva a el siguiente paso del proceso de la creación del molde, que es tener un buen llenado, donde se llevan a cabo una serie de fórmulas según el tamaño, el tipo de material y el tipo de forma de la pieza a obtener, lo cual nos permite obtener una buena calidad de la pieza, tal como tener un metal limpio, libre de arena u otras impurezas como la escoria e inclusiones de gases. Un llenado completo del molde, se logra, teniendo la temperatura adecuada de vaciado, una velocidad de llenado estándar para tener baja turbulencia al llenarse la cavidad y tener un llenado uniforme en toda el área de la cavidad, contando con múltiples entradas de material o gates, además de feeders o mazarotas. Existen 2 tipos de disposiciones para el tipo de molde, ya que podemos tener un molde horizontal o vertical, dependiendo de la geometría de la pieza, si es muy alta se recomienda una disposición vertical y para piezas con geometría planas o bajas una disposición horizontal, como se muestra en la figura 1.23.

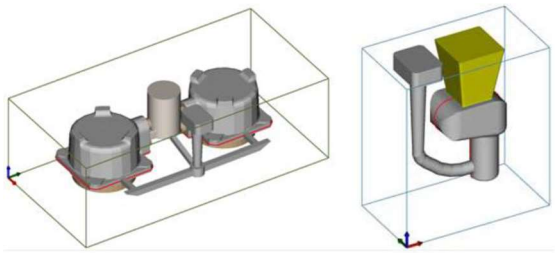


Figura 1.23. Tipos de disposición de un molde.

Los feeders son necesarios debido a que:

A) evitan los hot spot.

B) evitan los rechupes o contracciones volumétricas.

C) direccionan el perfil de solidificación de la pieza.

(Mostrados en la figura 1.24).

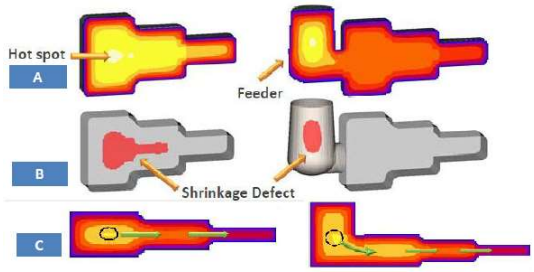


Figura 1.24. Tipos de defectos evitados con el uso de mazarotas.

1.2.5 Principales defectos de fundición.

En la fundición, existen diversos defectos que están presentes en la producción de piezas en la industria, siendo esta, la rama de la industria con mayor número de incidencias, debido a él gran número de variables presentes, como lo muestra la tabla 1.8.

Tabla 1.8. Porcentajes de defectos en fundición.

Metal	Producción	Trabajo
hierro gris grado60	2-5%	4-8%
acero	5-10%	8-15%
aluminio	10-15%	10-20%

Esto da lugar a una gran variedad de defectos, dentro de los cuales se podrían mencionar, los que se muestran en el exterior, los que se presentan en el interior, por ejecución y se muestran englobados en la figura 1.25.

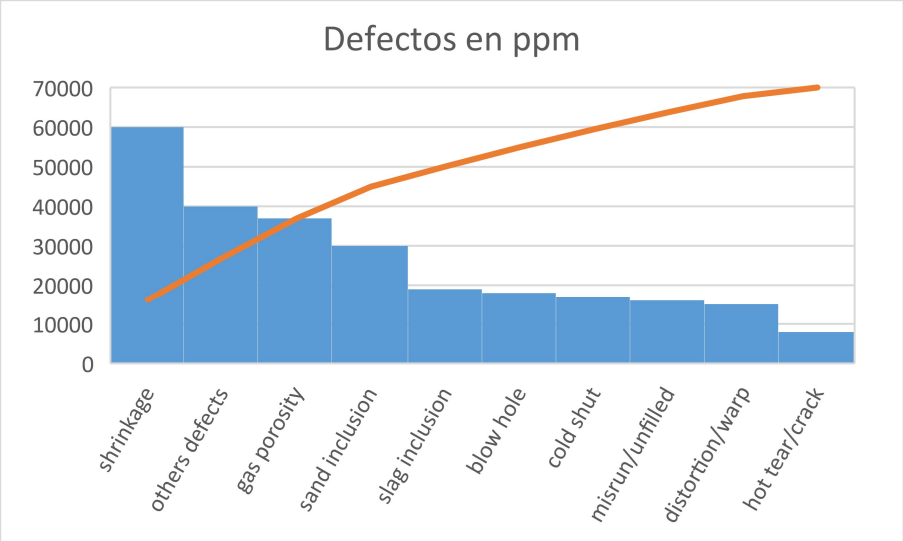


Figura 1.25. Tipos de defectos presentes en las fundiciones.

Dentro de los primeros se presentan como deformaciones, aplastamientos, hundimientos, empujes, rebabas, movimiento de molde o cajas (core y drag) en cuanto a la forma, aspecto basto, abombamientos e inclusiones de arena en cuanto a la superficie, mostrándose algunos en la figura 1.26.

Figura 1.26. Tipos de defectos presentes en las fundiciones en el exterior.

Dentro de los segundos se podrían mencionar porosidades, burbujas, sopladuras, rechupes, contracciones, grietas en cuanto a soluciones internas de continuidad, segregaciones e inclusiones, etc., mostrándose algunos en la figura 1.27.

Figura 1.27. Tipos de defectos presentes en las fundiciones en el interior.

Dentro de las de ejecución, no se consideran en si como defectos de fundición verdaderos, pero suelen presentarse como causa efecto de mal maquinado del molde o el modelo en general, mostrándose algunos en la figura 1.28.

Figura 1.28. Tipos de defectos presentes en las fundiciones en ejecución.

El estudio de los defectos es algo muy importante para los que intervienen dentro del proceso, ya que las condiciones de resguardo de material, condiciones atmosféricas e incluso el estado de vida de los equipos de fundición podrían ser los causantes de los mismos, por tal, deben de ser analizados y comprendidos, para llegar a su corrección.

Las principales causas de los defectos presentes se podrían mencionar las siguientes, las cavidades diseñadas, que ocasionan los desalineamientos de las cajas ocasionando una simetría desigual, porosidades, sopladuras podrían ser causadas por el momento de la colada o mala desgasificación de la pieza vaciada, contracciones en áreas importantes, distorsiones o grietas, por la solidificación no controlada en el molde, por mencionar las causas más comunes en la fundición.

1.3 Transferencia de calor

La transferencia de calor es un fenómeno que ocurre debido a las diferencias de energía en dos sistemas, donde la energía viaja del sistema con mayor energía al sistema con menor energía, con el fin de encontrar un equilibrio en los sistemas en un lapso de tiempo [38].

La transferencia de calor puede llevarse a cabo por diferentes tipos de medios, como lo son por conducción, convección y radiación [2,38], donde todos los modos de transferencia de calor requieren la existencia de una diferencia de temperatura

y todos ellos ocurren del medio que posee la temperatura más elevada hacia uno de temperatura más baja, tal como se muestra en la figura 1.29 y muestra que los tres medios pueden ocurrir al mismo tiempo en un sistema.

Figura 1.29. Tipos de transferencia de calor [2].

1.3.1 Conducción

La conducción es el mecanismo de transferencia de calor debido a la interacción entre partículas más energéticas de un elemento, hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas del medio. Como lo muestra la figura 1.30, tiene lugar preferencialmente en sólidos, no estando asociada al desplazamiento de las partículas, sino que, a su colisión, donde la rapidez o razón de la conducción de calor a través de un medio, depende de la configuración geométrica, su espesor y el material del que está hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él.

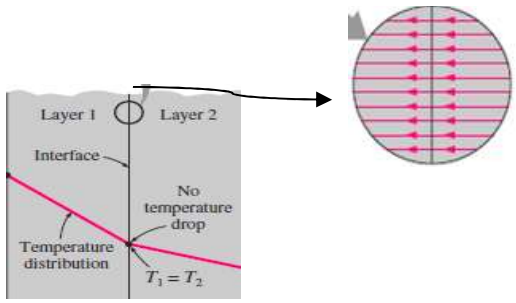


Figura 1.30. Mecanismo de transferencia de calor por conducción [2].

La razón de la conducción de calor a través de una capa plana, es proporcional a la diferencia de temperatura a través de ésta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa; es decir:

$$\text{Razón de conducción de calor } \alpha \ \frac{(\text{área})(\text{diferencia de temperatura})}{(\text{espesor})}$$

donde la constante de proporcionalidad, es la conductividad térmica K, del material, que es una medida de la capacidad de un material para conducir calor, reduciendo los términos a su forma diferencial, se obtiene la ley de Fourier de la conducción de calor, debido a J. Fourier, quien la describió en 1822, la cual se muestra en la ecuación 1, siendo la fuerza impulsora el gradiente de temperatura.

$$q = -kA\frac{dT}{dx} \qquad \text{Ecuación 1.}$$

Donde:

q = tasa de transferencia de calor.

A = área de transferencia de calor.

K = conductividad térmica del material.

dT/dx = gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor.

1.3.2 Convección

La convección es el modo en que se transfiere la energía entre una superficie sólida y el fluido adyacente, ya sea líquido o gas. Existe un movimiento macroscópico del fluido que mientras más rápido, mayor es la transferencia de calor por este mecanismo, como se muestra en la figura 1.31.

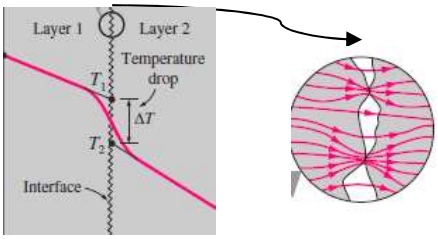


Figura 1.31. Mecanismo de transferencia de calor por convección [2].

En la transferencia de calor por convección la fuerza impulsora es el movimiento del fluido sobre la superficie, la cual esta descrita con la ley de newton de enfriamiento.

$$q = hA(T_w - T_\infty) \qquad \text{Ecuación 2.}$$

Donde:

q = tasa de transferencia de calor.

h = coeficiente de convección de transferencia de calor.

A = área de transferencia de calor.

T_w = Temperatura de la superficie del metal.

T_∞ = Temperatura del metal fundido.

1.3.3 Radiación

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas o fotones, como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas, mediante la radiación térmica, como lo muestra la figura 1.32, que muestra la radiación solar emitida hacia una pared, la cual por no ser un cuerpo negro refleja una cantidad de la radiación solar y una parte absorbida por el material.

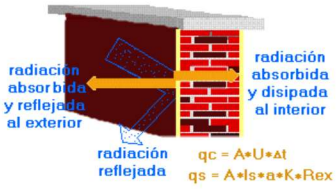


Figura 1.32. Mecanismo de transferencia de calor por radiación [2].

La radiación térmica es la energía emitida por los cuerpos de acuerdo a su temperatura y en diferencia a la conducción y la convección, en la transferencia de calor por radiación no se requiere un medio de transferencia, además de ser un medio de transferencia de calor muy rápido y se rige por la ecuación de Estefan Boltzmann, donde se considera que es llevada a cabo por un cuerpo negro o radiación ideal.

$$q = \sigma A T^4 \qquad \text{Ecuación 3.}$$

Donde:

q = tasa de transferencia de calor.

σ = constante de Stefan-Boltzmann (5.669×10^{-8} W/m^2-k^4)

A = área de transferencia de calor.

T = Temperatura de los alrededores.

Diariamente todos los mecanismos de transferencia de calor están presentes en nuestro entorno y hay diversos estudios y ecuaciones canónicas para diferentes modelos de moldes permanentes para poder entender bien el comportamiento de la transferencia de calor, que, gracias a ese comportamiento, el proceso de solidificación en la fundición ocurre.

1.3.4 Transferencia de calor en moldes permanentes.

El análisis de la transferencia de calor durante la solidificación de metales en moldes permanentes está gobernado por la conducción y convección, despreciando la otra forma de transferencia de calor tal como la radiación.

La al ser vaciados en moldes metálicos se enfría rápidamente y las temperaturas tanto del molde como de la pieza vaciada cambian drásticamente debido a las características de conductividad del molde y del metal líquido.

La conductividad térmica del metal líquido forma una parte importante de la resistencia al flujo calorífico. Esto lleva a que la temperatura de la superficie del molde llegue a estar por debajo de la temperatura de fusión y que existan gradientes importantes de temperatura, está disminución de la temperatura superficial del metal a valores menores a la temperatura de fusión, ocasiona que se remueva mayor calor durante la solidificación.

Esta remoción de calor genera la contracción característica de la pieza vaciada reportados en la tabla 1.7, lo cual se crea un gap de aire entre la pieza vaciada y el molde, lo cual entorpece la transferencia de calor y entorpece el control de la solidificación de la pieza vaciada.

El mecanismo de transferencia de calor en la interfase o gap de aire, no está claramente establecido, generalmente se acepta que se trata de convección, pero también puede deberse a conducción a través del aire, dado que la separación es muy pequeña (menor a 1 mm). Sin importar si el calor se transfiere

por conducción o por convección, la resistencia en la interfase o gap de aire se caracteriza utilizando un coeficiente de transferencia de calor convectivo.

El valor del coeficiente de transferencia de calor depende de varios factores, incluyendo el tipo de aleación, el material del molde, la temperatura de vaciado, la temperatura del molde, la rugosidad de la interfase y el tipo de recubrimiento ya sea pintura o barrera térmica, lo cual incluye a la difusividad, porosidad y otros factores del recubrimiento.

1.4 Solidificación.

El proceso de solidificación ha estado presente desde la formación de la tierra y ha seguido estando presente en el mundo industrial hasta hoy en día. Haciendo énfasis en la pieza vaciada, estos parten de un estado líquido hacía uno sólido, este proceso es llamado solidificación y es por el cual las piezas adquieren sus características y defectos. La solidificación es un proceso que involucra una compleja interacción de variables de efectos físicos, donde la interfase sólido-líquido es limite libre activo del que se libera calor latente durante la transformación de fase. Este calor se aleja de la interfase a través del sólido-líquido, resultando en la presencia de capas límite térmicas cerca de la interfase, lo cual la densidad cambia dentro de la interfaz sólido-líquido provocando que el material se contraiga conforme la solidificación avanza [39], teniendo los valores de contracción en la tabla 1.7.

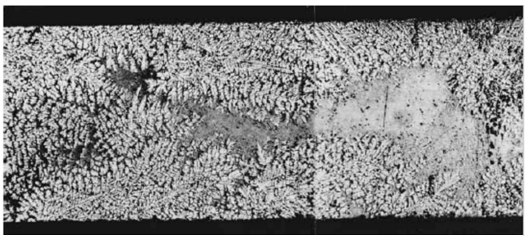


Figura 1.33. Sección longitudinal de aleación Zn-27%Al [39].

1.4.1 Nucleación en la solidificación.

La solidificación se puede dividir en dos etapas: la nucleación de la fase sólida en la líquida y el crecimiento de los núcleos conforme desciende la temperatura. La coexistencia de las fases durante la solidificación y la relación entre rapidez de nucleación y crecimiento determinarán la forma y el tamaño de los granos sólidos. En estas etapas se encuentran dos significantes resistencias: la formación de una superficie entre el líquido y el sólido; y el ordenamiento de los átomos en el sólido en formación. Existen dos tipos de nucleaciones:

a) La Nucleación Homogénea: ocurre cuando no hay sustratos en el interior de la fase liquida. Por lo tanto, cuando el líquido se enfría lentamente por debajo de su temperatura de equilibrio, se genera un núcleo cuyo radio crítico está formado por un cierto número de átomos. Cuando el tamaño critico es alcanzado, el núcleo crece por la adición continua de átomos.

b) La Nucleación Heterogénea: ocurre cuando existen objetos especiales denominados sustratos en el interior de la fase liquida, los cuales ayudan a la formación de núcleos.

Estas exigen un sobre enfriamiento para que se inicie el proceso de solidificación, que será mayor para una nucleación homogénea, es decir, aquella por la cual se forma un núcleo en el seno mismo del líquido.

Por otra parte, la nucleación heterogénea está caracterizada por la formación de núcleos sobre superficies sólidas existentes como paredes del molde o partículas sólidas en suspensión. Esto se puede apreciar en un diagrama Temperatura (T) v/s tiempo (t) como se muestra en la figura 1.34.

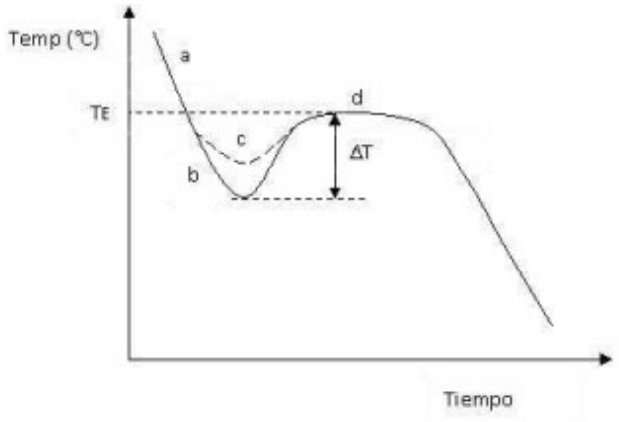


Figura 1.34. Diagrama de solidificación para un metal puro [39].

En la figura 1.34 podemos ver que el líquido es enfriado hasta TE, corresponde a la zona a, el líquido debe ser sobre-enfriado en una cantidad ΔT para comenzar la nucleación. El ΔT será mayor para nucleación homogénea, (Curva b), comparado con la nucleación heterogénea, (Curva c), como se había mencionado, y si continúa el crecimiento de los núcleos, se eleva la temperatura hasta TE, producto del calor latente de solidificación, y de esta manera se mantiene constante esta temperatura. Cuando la solidificación termina y ya no hay más calor latente entregado al sistema, la temperatura de sólido comienza a descender, zona d.

1.4.2 Solidificación en *die casting*.

En el proceso de fundición, como el método de interés, die-casting, la solidificación es de vital importancia.

El *die casting* es un método de producción de piezas fundidas que fuerza al metal líquido dentro de un molde metálico a fluir por gravedad, donde dicho molde está preparado para poder ser abierto y extraer la pieza después de que esta ha solidificado.

La solidificación inicia desde el vaciado de la pieza vaciada en el molde, como se puede observar en la figura 1.35, donde la pieza vaciada adquiere características estructurales duraderas, por medio de la *´´mushy zon´´e* o zona pastosa.

La *´´mushy zone´´* o zona pastosa es el área de líquido más sólido, siendo la región más importante debido a que es la zona donde todas las características microestructurales son determinadas, por decir, forma, medida, distribución de concentraciones, precipitados y porosidades presentes, lo cual da lugar al crecimiento del sólido [40].

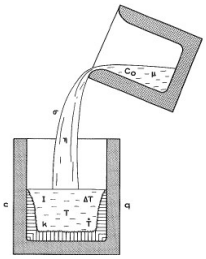


Figura 1.35. Vaciado de la pieza vaciada y solidificación en zona de enfriamiento [40].

Existen diferentes zonas de solidificación presentes en los procesos de solidificación, tales como, la zona de enfriamiento, zona columnar y la zona equi-axial, tal como se muestra en la figura 1.36.

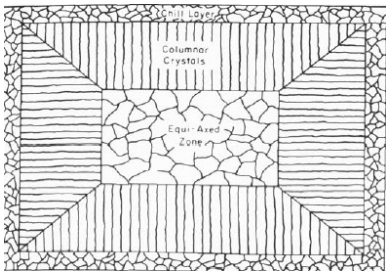


Figura 1.36. Sección transversal de una pieza fundida mostrando diferentes zonas de solidificación [46].

Las diferentes zonas de solidificación se dan por el crecimiento del sólido y este a su vez mediante dendritas, las cuales pueden tener cambios microestructurales a medida que aumenta el enfriamiento, donde su longitud como el radio de la punta se ven disminuidos, además de la microescala [41,42], esto se conoce como refinamiento espontaneo de granos, lo cual se ha observado en la solidificación a partir de fundiciones metálicas puras subenfriadas [43] y en aleaciones [44,45]. Por tal en cada zona de solidificación, se puede controlar su crecimiento, controlando variables como la composición de la aleación, la temperatura de vaciado, la tasa de enfriamiento, el coeficiente de transferencia de calor y material del molde, logrando obtener las microestructuras deseadas como en la figura 1.37, donde a) muestra una zona completamente columnar, b) parcialmente zona columnar y parcialmente zona equi-axial y c) zona completamente equi-axial.

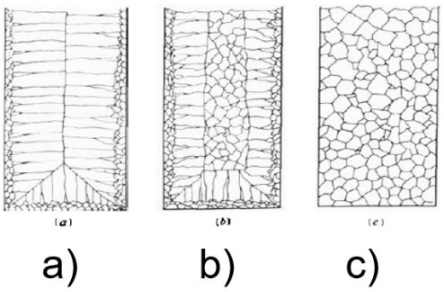


Figura 1.37. Diferentes zonas de una solidificación controlada [46].

Cada fase se distingue por sus propiedades brindadas al material, por lo tanto, se explica cada una de ellas:

A) Zona de enfriamiento.

Esta zona de solidificación, los cristales nuclean sobre o cerca de la pared del molde, algunos estudios demuestran que son resultados de una nucleación heterogénea [46, 47], donde la nucleación fue determinada en gran medida por la temperatura de la pared del molde además de la contribución de la eficiencia de la pared del molde como sustrato para la nucleación. Por lo tanto, la cantidad de cristales en la zona fría, depende del sobrecalentamiento de la pieza vaciada, la temperatura del molde, las propiedades térmicas del metal de la pieza vaciada y del molde y de mayor importancia, la potencia de nucleación de la pared del molde.

Otro mecanismo extremo que se presenta en este tipo de zona fría, es que los cristales formados se vuelvan a fundir, dando lugar a una modificación de la nucleación que indica la multiplicación del cristal por la fragmentación de los núcleos iniciales producidas por la convección [48], esto se muestra en la figura 1.38, donde se puede apreciar le refundición de brazos dendríticos fácilmente.

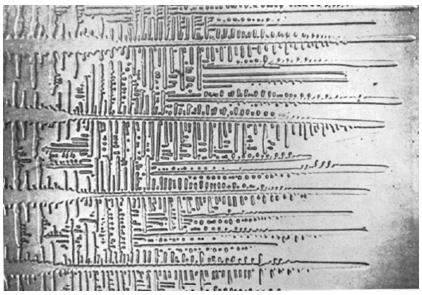


Figura 1.38. Estructura dendrítica de tetrabromuro de carbono, después de una fluctuación en la tasa de crecimiento [48].

Ambos mecanismos están presentes en la formación de cristales en la zona fría y cada una con su relativa importancia dependiendo de las condiciones de la pieza vaciada, lo cual le da su formación característica normalmente axial con orientación aleatoria, de acuerdo a Biloni [49].

B) Zona columnar.

Los cristales en la zona columnar se desarrollan predominantemente a partir de la zona fría, estos muestran una orientación preferida, que corresponde a las direcciones cristalográficas preferidas del crecimiento dendrítico [50,51].

La zona columnar, puede mostrar todas las etapas de desarrollo desde planar a celular y a celular dendrítico [49], donde los ejes de los cristales columnares son normalmente paralelos a la dirección del flujo de calor, por lo tanto, se tiene un crecimiento competitivo entre los cristales que crecen en la zona fría, de modo que aquellos con el gradiente térmico más pronunciado y paralelo a la dirección preferida de crecimiento crecen más rápido que los vecinos de orientación menos favorable, controlando el mecanismo de crecimiento.

Algunas consideraciones se podrían atribuir para poder controlar el crecimiento en estas zonas, teniendo en cuenta que la propagación de la orientación disminuye a medida que se extiende la zona columnar y la medida promedio de

tamaño de grano aumenta [50], al igual que la extensión de la zona columnar aumenta a medida que la temperatura de vaciado o recalentamiento aumenta y la extensión columnar disminuye a medida que aumenta el contenido [47]. En caso contrario para metales puros el crecimiento es totalmente plano y no hay crecimiento dendrítico significativo.

C) Zona equi-axial.

Los cristales en la zona equi-axial usualmente tienen un tamaño de grano más grande que los cristales de la zona fría y su orientación es totalmente aleatoria, teniendo en cuenta los estudios llevados a cabo por Chalmers [47], se tiene que el crecimiento de cristales en esta zona es favorecido por temperatura de vaciada baja o de recalentamiento y un contenido de aleación alto. No sin mencionar, que la formación de granos en la zona equi-axial disminuye conforme aumenta la temperatura de vaciado, pero aumenta el tamaño de los mismos [52], aplicando sólo para pequeñas fundiciones, como lo muestra la figura 1.39.

Figura 1.39. Relación tamaño cristal columnar y tamaño de grano equi-axial [52].

1.4.3 Refinación de grano

La refinación de grano es muy importante en algunos tipos de aplicaciones especiales, donde la estructura de grano fino equi-axial son requeridos en las piezas obtenidas, debido a que son isotrópicas y tienen unas propiedades muy altas.

Este tipo de estructura se puede desarrollar suprimiendo el crecimiento columnar y promoviendo las condiciones favorables para la estructura deseada, figura 1.40.

Se tienen dos procesos para poder tener esta estructura:

1) Controlando la nucleación con las condiciones de la pieza vaciada o usar inoculantes (refinadores de grano).
2) El uso de métodos físicos como agitación, vibración ultrasónica, etc.

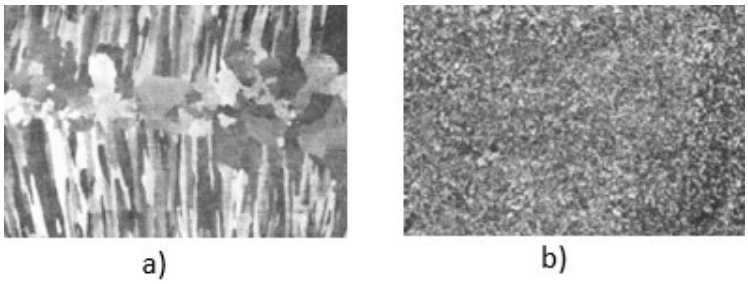


Figura 1.40. A) Estructura de acero vaciado normal 18%Cr-12%Ni y b) mismo metal refinado por inoculación [56].

De modo que el uso de inoculantes es la mejor vía y la más usada hoy en día, ya que se requiere tener una zona liquida cerca de la superficie del molde, para promover la nucleación heterogénea y hay moldes muy complejos, en los cuales existen un amplio rango de condiciones térmicas y por lo tanto, requerimiento de fluidez, lo cual hacen que la pieza vaciada tenga un elevado grado de recalentamiento. Para la selección de un inoculante se requiere tomar en cuenta factores químicos y estructurales para poder tener una efectividad en la nucleación.

La tabla 1.9, muestra algunos refinadores de grano de algunos estudios que se han llevado a cabo en aleaciones de aluminio [52,53,54], aleaciones de magnesio [53,55] y aceros [56].

Tabla 1.9. Refinadores de grano para cierto tipo de aleaciones.

Aleación o Metal	Refinador de Grano	Comentarios
Mg & Mg-Zr alloy	Sal de Zr	Zr enriquece nucleación del peritéctico del Mg.
Mg-Al	Carbono/Hexacloroetano	Al_4C_3 o $AlNAl_4C_3$ nuclean en presencia de carbono.
Mg-Al-Mn	Cloruro Férrico	Al_4C_3 o Fe-Al-Mn nuclean
Mg-Zn	Cloruro Férrico o Zn-Fe	Fe nuclea.
Aleaciones de Al	Sales de haluro de Ti, Ti-Al como endurecedor, sales de haluro de Ti-B o endurecedor Ti-B-Al. Sal de haluro de Boro.	Ti-C o Ti-Al_3 peritéctico nuclean. Ti-B_2 nuclea. Al-B_2 nuclea.
Aleaciones de Cu	Fe como metal	Fe en peritéctico nuclea
Aleaciones de bajo C	Ti	
Aleaciones de Sn	Germanio o indio	
Monel	Litio	
Fe-C	Carbono	Refina eutéctico
Hierro Gris	Aleaciones de Si-Al con tierras raras	

1.5 Barreras térmicas.

Las barreras térmicas son sistemas metal-cerámico multicapa que consiste típicamente de una capa de protección a la oxidación (bond coat), así como de una capa superior, cuya función principal es el aislamiento del calor [57, 58], con el fin de conservar la integridad del material revestido, como se muestra en la figura 1.41.

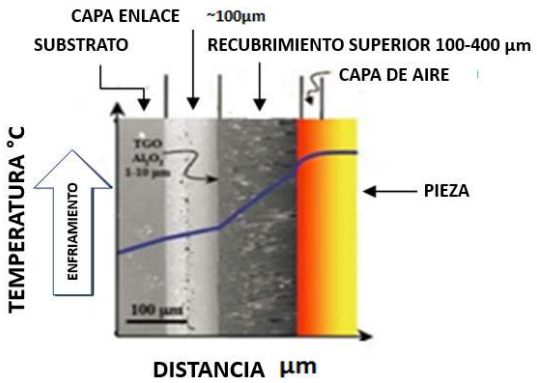


Figura 1.41. Composición de una barrera térmica.

Actualmente, la capa de metal o bond coat se produce principalmente por un tipo de proceso de rociado térmico de alta velocidad (HVOF- por sus siglas en inglés), la cual crea un enlace ideal y una capa oxidante mediante el crecimiento térmico de óxido (TGO-por sus siglas en inglés) en la superficie, lo cual se da desde que este se rocía al sustrato o metal a cubrir con la barrera térmica.

Esta capa provee una superficie adherente y permite acomodar los esfuerzos o stress producido por la diferencia entre el coeficiente de expansión térmica entre el sustrato y la barrera térmica. La capa superior se produce principalmente mediante dos procesos de deposición, uno de ellos es el depósito físico de vapor mediante haz de electrones (EB-PVD - por sus siglas en inglés), y el otro que es el de interés. el proceso de rociado térmico por plasma atmosférico (APS – por

sus siglas en inglés). Los recubrimientos depositados por EB-PVD tienen una microestructura columnar, útil en los alabes de las turbinas de gas, las cuales son sometidas a altas cargas termo-mecánicas y tiene una conductividad térmica alta [59,60]. Por su parte, los recubrimientos obtenidos por APS presentan una microestructura laminar con porosidad alineada perpendicularmente al flujo de calor, lo cual permite una reducción de la conductividad térmica [61], dando lugar a controlar el coeficiente de transferencia de calor de un sistema con su aplicación como se muestra en la figura 1.42. Debido a que esta capa de recubrimiento debe de ser de baja conductividad térmica, el proceso de APS es el más adecuado, además de ofrecer robustez operacional mayor en comparación al otro método.

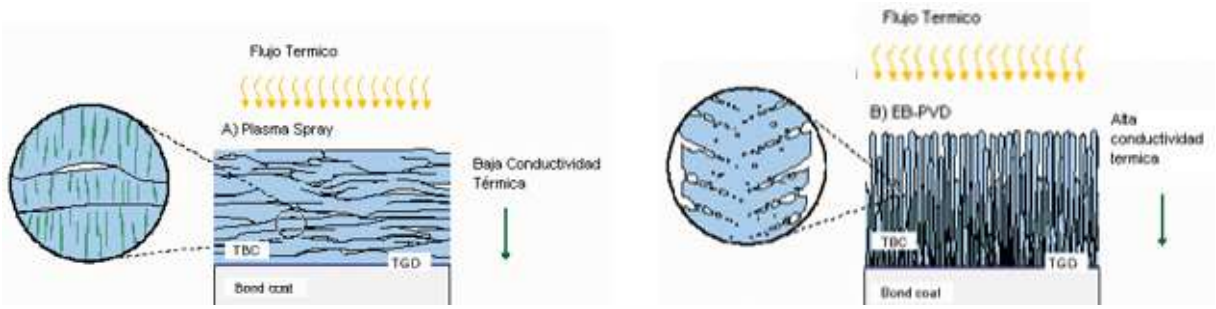


Figura 1.42. Comparación de barreras térmicas por diferentes métodos [62].

1.5.1 Conformación de una barrera térmica.

Su conformación principalmente son dos componentes, la capa metálica o de enlace que normalmente es una superaleación y la capa aislante o cerámica que normalmente son óxidos, como se muestra en la figura 1.41.

Dentro de los materiales a elegir se muestran en la figura 1.43, donde se pueden observar los diferentes tipos de aleaciones y óxidos que podrían conformar una barrera térmica.

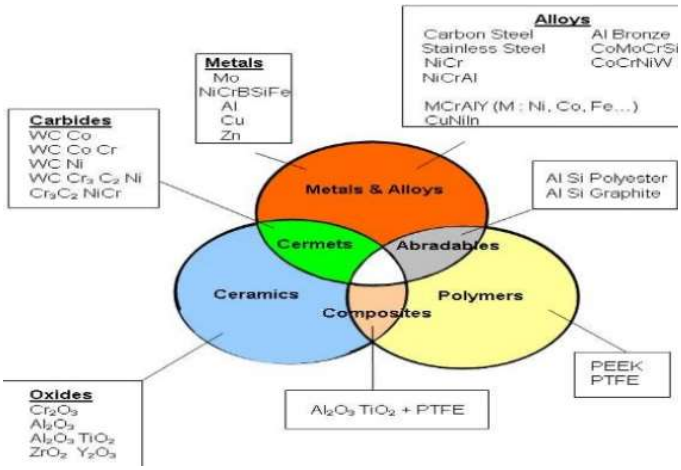


Figura 1.43. Diversidad de materiales para barreras térmicas.

Estas capas juegan un papel importante dentro de la composición de la barrera térmica, debido a que en conjunto se complementan teniendo buenas condiciones de trabajo tanto como físicas y mecánicas, cumpliendo con el objetivo requerido. La capa de enlace, es principalmente una capa delgada resistente a la oxidación que ronda entre los 50-125µm, con similares características al del metal del sustrato, debido a que, si tienen diferencias, la contracción entre estos, serán diferentes provocando su desprendimiento o spalling [63], principalmente se lleva a cabo de MCrAlX, donde la M, son los metales los cuales deben ser similares al sustrato y la X es el elemento que ayuda a la formación del óxido en la capa por medio del TGO. Por lo tanto, normalmente se usa NiCoCrAlY ya que es ampliamente usada como recubrimiento para superaleaciones en altas temperaturas como en máquinas de turbinas debido a la resistencia a la corrosión y oxidación [64], es de vital importancia, ya que esta crea una barrera de óxido Al_2O_3 de 1 a 3 µm, la cual su formación debe de ser el menor posible [65] y proporcionar una superficie adherente para la capa cerámica.

Seguido se tiene una capa de material cerámico que ronda entre los 125-500 µm, el cual su principal función es brindar una superficie con menos porosidades y con un bajo valor de conductividad térmica tal como lo brinda YSZ con 8% en peso de Y_2O_3, tal como lo muestra la figura 1.44, por el cual ha sido utilizado ampliamente en el campo de los recubrimientos térmicos, debido a sus características, tales como un buen desempeño a temperaturas altas, cercanas a los 1200 °C [66].

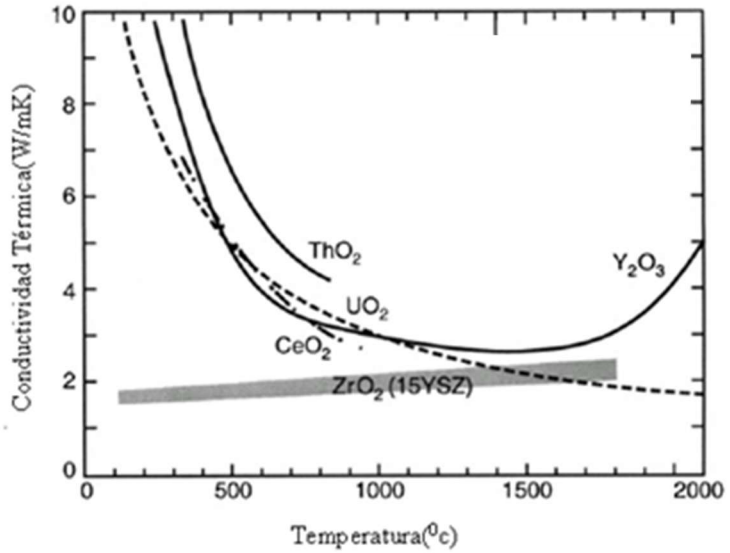


Figura 1.44. Conductividad térmica de distintos óxidos aislantes como una función de la temperatura [67].

De modo que la capa cerámica es el aislante térmico, la Al_2O_3 sobre la capa enlace provee la protección contra la oxidación y la superaleación contiene la carga estructural de todo el elemento, por lo tanto, se vuelve indispensable la selección de dichos materiales.

1.5.2 Selección de materiales de una barrera térmica.

La selección de materiales para una barrera térmica es una tarea ardua, ya que se requiere conocer del procedimiento de rociado térmico, así como del mecanismo de deposición del polvo fundido en el sustrato, porque la solidificación y transferencia de calor son los procesos gobernantes de la microestructura y propiedades termo-mecánicas de la barrera térmica.

Otros puntos a considerar son el impulso y la transferencia de masa, ya que gobiernan todo el proceso de deposición que controlan la calidad de los recubrimientos.

Los esfuerzos residuales que puedan soportar la barrera térmica son de primordial importancia, debido a que, se generan una gran cantidad durante su deposición, así como en su servicio, ya que estos generan agrietamientos o desprendimientos.

Por tal motivo, es importante tener en cuenta las principales características para su correcta selección, garantizando un tiempo de vida útil adecuado, así como su desempeño, tales como:

- Propiedad de mojado en el sustrato
- Propiedades físicas y mecánicas
- Buena adherencia
- Influencia de la oxidación
- Influencia a la corrosión
- Baja conductividad térmica
- Coeficiente térmico de expansión grande
- Estabilidad de fase
- Baja razón de sinterización
- Bajo módulo de Young
- Características del polvo

Dentro de las propiedades físicas se encuentran la temperatura de fusión y vaporización del material en bulto, sus propiedades de transferencia de calor (calor específico, conductividad térmica y calor latente de fusión) y su densidad. La densidad afectará la trayectoria de la partícula, a un tamaño de partícula y características de la pluma del método de rociado. Las características del polvo incluyen la distribución del tamaño y forma, los cuales son importantes desde el punto de vista de transferencia de calor. Partículas grandes pueden no fundirse completamente, mientras que partículas pequeñas pueden vaporizarse. Por lo tanto, hay un tamaño de partícula óptimo. Las características de las partículas que más afecta el desempeño, al momento de fluir con el gas, son principalmente: su forma, la cual controla su flotabilidad, su densidad, que afecta su aceleración al igual que su calentamiento, y su pureza.

En la tabla 1.10 se muestran propiedades de algunos materiales usados para la elaboración de barreras térmicas.

Tabla 1.10. Propiedades de recubrimientos de barreras térmicas [68].

Cerámico	Propiedades	Cerámico	Propiedades
ZrO_2	T_{PF}=2,973 K D_T=0.43x10^{-6} m^2/s λ=2.71 W/m-K(1,273K) E=21GPa (1,373K) α=15.3x10-^{6}/K(1,273K) v=0.25	$La_2Zr_2O_7$	T_{PF}=2,573 K D_T=0.54x10^{-6} m^2/s C_p=0.49 J/g K λ=1.56 W/m-K(1,273K) E=175 GPa(1373K) α=9.1x10-^{6}/K(1,273K) v=0.25
8YSZ (APS)	T_{PF}=2,973 K D_T=0.58x10^{-6} m^2/s λ=2.12 W/m-K(1,273K) C_p=0.64 J/g K E=21GPa(293K) α=10.7x10-^{6}/K(1,273K) v=0.22	$BaZrO_7$	T_{PF}=2,963 K D_T=1.25x10^{-6} m^2/s C_p=0.45 J/g K λ=3.42 W/m-K(1,273K) E=181 GPa(1373K) α=8.1x10-^{6}/K(1,273K)
Al_2O_3	T_{PF}=2,323 K D_T=0.47x10^{-6} m^2/s λ=5.8 W/m-K(1,400K) E=30 GPa(293K) α=9.6x10-^{6}/K(1,273K) v=0.26	TiO_2	T_{PF}=2,098 K D_T=0.52x10^{-6} m^2/s (1,073) λ=3.3 W/m-K(1,400K) E=283 GPa(293K) α=9.4x10-^{6}/K(293-1,500K) v=0.28
Al_2O_3 TGO	E=360 GPa(293K) α=8x10-^{6}/K(1,273K) v=0.22	NiCoCrAlY	E=86 GPa(293K) α=15.7x10-^{6}/K(293-1,273K) v=0.3

CeO_2	T_{PF}=2,873 K D_T=0.86x10^{-6} m^2/s (1,273 K) λ=2.77 W/m-K(1,273K) C_p=0.47 J/g K (1,273 K) E=172 GPa(293K) α=13x10-^{6}/K(293-1,500K) v=0.27-0.31	IN737 Super Aleación (sustrato-barrera térmica)	E=197 GPa(293K) α=16x10-^{6}/K(293-1,273K) v=0.3
Los símbolos es esta tabla se refieren a: D_T (Difusividad Térmica), E (Módulo de Young), α (Coeficiente de Expansión Térmica), λ (Conductividad Térmica), C_p (Capacidad Calorífica), v (Número de Poisson), T_{PF} (Punto de Fusión), TGO (Óxido crecido térmicamente sobre la capa enlace).			

Por lo cual en el siguiente estudio se seleccionaron los polvos mencionados en la sección 1.5.1, como lo son NiCoCrAlY, debido a que el sustrato es una superaleación y por lo tanto, tienen un coeficiente de expansión térmica similares, también a la formación de alúmina para la protección contra la oxidación y la adherencia requerida por la barrera cerámica además de tener un coeficiente de expansión térmica similar al de una superaleación como lo muestra la figura 1.45.

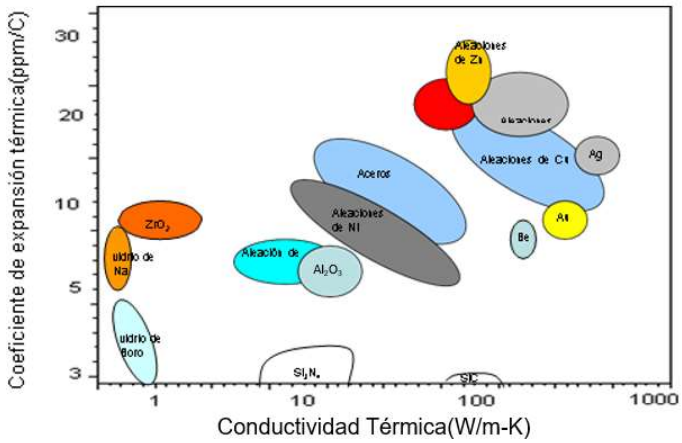


Figura 1.45. Coeficientes de expansión térmica en función de conductividad térmica de distintos óxidos y aleaciones [67].

Por otra parte, el YSZ 8%, ya que es un aislador térmico con baja conductividad térmica como se muestra en la figura 1.44, tolerante al óxido y a la tensión ya que el Zirconio es estabilizado con itrio dentro de su estructura cúbica/tetragonal, además a la trayectoria libre de conducción que es gobernada por defectos estructurales como vacancias. estos materiales muestran las propiedades adecuadas para la conformación de una barrera térmica.

1.5.3 Técnicas de deposición de barreras térmicas.

Existen varios métodos para depositar barreras térmicas y en general todos ellos se fundamentan en el método usado para incrementar la temperatura del material a depositar a un valor muy cercano o igual a su temperatura de fusión.

Entre las técnicas más comunes de deposición podemos mencionar el térmico APS y la deposición física de vapor producido por un haz de electrones EB-PVD, las cuales son las que depositan las capas cerámicas debido a su alta de temperatura, también existen otros métodos que la variación del proceso de

rociado térmico lo hacen los materiales que se alimentan en el rociado, el método de calentamiento y el método de propulsión del material al sustrato. Algunos tipos de procesos de rociado térmico son LVOF, HVOF, VPS o LPPS, Rociado en frío, los cuales se hablarán en puntos más adelante según su fuente de calentamiento. El EB-PVD es una de las técnicas primeramente usadas, esta brinda una microestructura columnar con porosidad multiescalar como se muestra en la figura 1.42. El proceso es hacer incidir un haz de electrones sobre la superficie del material que se desea depositar al sustrato, evaporando el óxido, el cual entra en un gas portador inerte y se dirige al sustrato precalentado, en la figura 1.46 se muestra una ilustración esquemática del proceso, las condiciones de deposición se especifican, para poder expandir a diferentes velocidades el gas inerte, lo cual depende del inyector, llegando a la cámara, donde la variación de presión influye para obtener la microestructura característica de este proceso que provee tolerancia a la tensión.

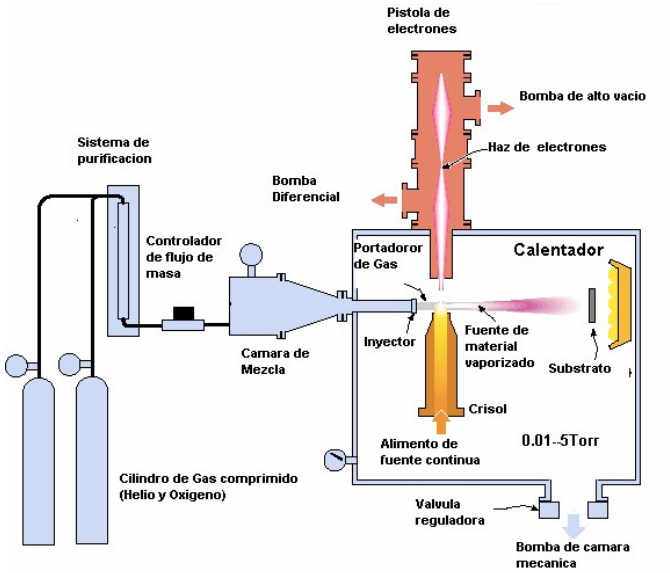


Figura 1.46. Proceso de deposición EB-PVD [62].

La otra técnica de deposición es el APS, esta técnica brinda un mejor acabado de microestructura laminar, una porosidad alineada perpendicular al flujo de calor, una alta capacidad de soportar las cargas residuales, disminución de la conductividad térmicas y una mayor robustez mecánica, como lo muestra la figura 1.42. El proceso de la técnica de APS, el material que se va a utilizar como capa protectora es colocado dentro de un dispositivo, el cual calienta los materiales a un estado plástico o fundido, luego es acelerado por un gas comprimido inerte hacia el sustrato. Las partículas golpean la superficie y se aplanan formando delgadas plaquetas que se conforman y adhieren las irregularidades de la superficie preparada, Figura 1.47. Tiene una gran versatilidad debido a las posibilidades estructurales y densidades que se logran con esta técnica de deposición, hasta es posible que los parámetros del proceso se puedan optimizar para la aplicación de interés. Esto sumado con los bajos costos involucrados hace esta técnica atractiva para aplicaciones industriales.

Otra técnica de deposición es el HVOF que es una técnica de rociado térmico usada para las capas de enlace debido a que produce un fuerte enlace con el sustrato, poca formación o contenido de óxido y una capa densa y homogénea a un precio bajo. Ha sido empleada para producir recubrimientos a componentes críticos usados en aplicaciones industriales de bajas y altas temperaturas con ambientes agresivos como oxidación, corrosión a altas temperaturas y fenómeno de erosión y desgaste [69], pero debido a que su temperatura no es tan elevada como para poder fundir las partículas cerámicas de la capa superior de la barrera térmica, no es usada en la formación de la capa superior. Por lo tanto, las técnicas que son normalmente usadas en deposición y de interés en este estudio son HVOF y APS debido a sus características obtenidas.

1.6 Rociado térmico.

El rociado térmico es un proceso que tiene poco costo de operación, fácil de usar y donde la mayoría de los materiales pueden ser utilizados para atribuir un incremento de vida en los componentes de diversas aplicaciones en la mayoría de las industrias.

El rociado térmico es un grupo de procesos en los cuales los materiales metálicos o cerámicos son depositados en estado fundido o semi-fundido sobre un sustrato previamente preparado, brindándole protección contra la corrosión, oxidación y al desgaste de muchos tipos tales como: la abrasión, la adherencia, fricción y erosión, mejorando así el funcionamiento de dicha superficie, además de brindarle un aislamiento térmico. Esta preparación se conforma por el acabado de la superficie a recubrir mediante técnicas específicas que generan una rugosidad en la superficie al igual de una carga electrostática que contribuye a la adhesión de dichas capas. El proceso involucra la formación de una flama por combustión o plasma, la alimentación de partículas metálicas o cerámicas dentro de la zona caliente de la flama, y la deposición de las partículas sobre los sustratos previamente preparados. como se muestra en la figura 1.47.

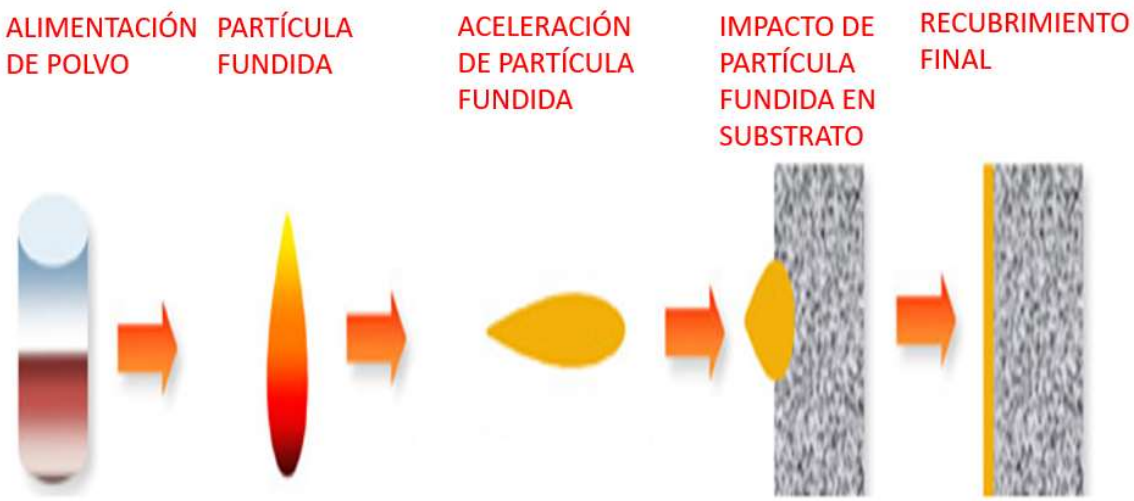


Figura 1.47. Proceso de deposición de rociado térmico.

Durante el corto tiempo de vuelo, las partículas son rápidamente calentadas y aceleradas, formando un rocío de partículas completamente o parcialmente fundidas, facilitando así, el proceso de impacto de las partículas, esparciéndose y solidificándose sobre el sustrato, el cual tiene su acabado ideal que contribuye a su adhesión. El polvo fundido es arrojado hacia una superficie previamente tratada, las cuales viajan una distancia, para impactar con dicha superficie, dicho polvo fundido/semi-fundido al impactar se deforma en una capa aplanada y así sucesivamente en el área a recubrir, a esta formación se le llama splat, el cual se muestra en la figura 1.48, así el área es recubierta por una gran cantidad de splat hasta obtener el espesor deseado.

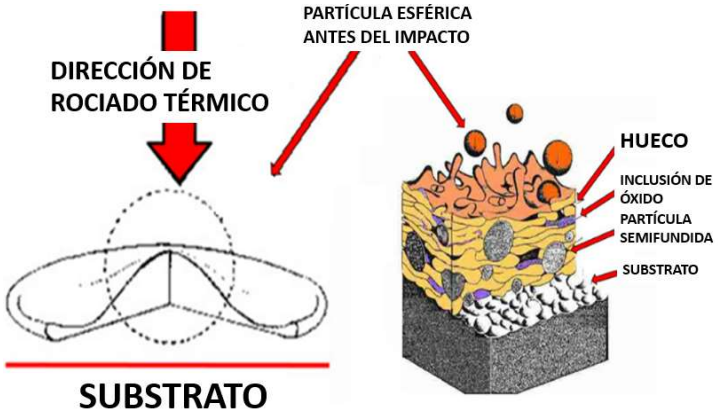


Figura 1.48. Forma característica de un splat.

Debido a que hay diferentes bordes o espesores, se crean huecos o poros, los cuales son requeridos para poder absorber los esfuerzos residuales debido a la operación cíclica y su proceso de deposición, como se logra percibir en la figura 1.48. Normalmente en los sistemas de barrera térmica, es deseable una alta porosidad, ya que la conductividad térmica disminuye en su presencia y normalmente se manejan porosidades de un 15% y pueden variar de 3-20% [70].

1.6.1 Factores que contribuyen a la formación de un splat.

La formación de los splat, depende básicamente de los siguientes factores:

Temperatura de la partícula.

Velocidad de la partícula.

Composición del polvo.

Morfología del polvo.

Dimensión de la partícula.

Temperatura del substrato.

Rugosidad del substrato.

Distancia de pistola a substrato (SOD).

Como se puede observar en la figura 1.49, la mayor influencia en la formación de los splat son la temperatura de la partícula, velocidad de la partícula y la distancia de separación de rociado.

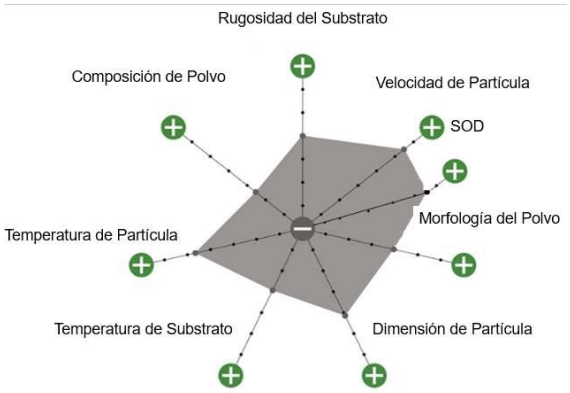


Figura 1.49. Factores que influyen en la formación de un splat.

De acuerdo a estudios de Vardelle et al. y Fauchais [71] sobre la influencia de los parámetros de las partículas, durante el impacto, sobre la formación y solidificación del splat de polvo de zirconia en procesos de rociado térmico y encontraron que el tiempo de aplanamiento de la gota (inversamente proporcional a la velocidad de enfriamiento) decrece con el incremento de la velocidad y temperatura de la partícula, mientras que la razón de aplanamiento aumenta con el incremento de la velocidad y temperatura, en la figura 1.50, se muestra el efecto que se tiene por la distancia de rociado.

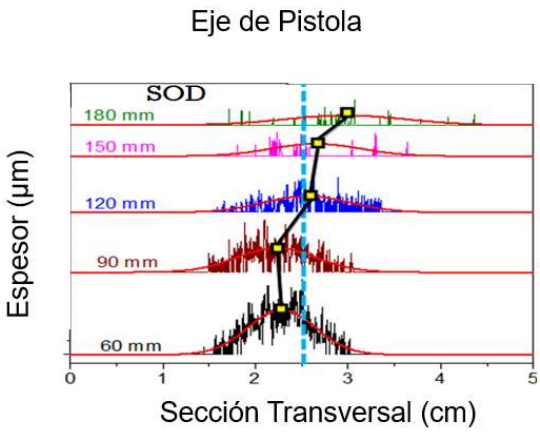


Figura 1.50. Influencia de distancia de rociado en la formación de un splat.

Otro factor que se ha analizado es la influencia de la temperatura del substrato ya que la morfología de los splat ocurre tanto para metales como para cerámicos y Bianchi et al. [72] demostraron que al rociar zirconia sobre “sustratos fríos”, alrededor de 100 °C, se produce un splat con morfología altamente fragmentada y “viscosa”, mientras que, al depositarla en un “sustrato caliente”, alrededor de 300 °C, el splat es un disco bien formado, como lo muestra la figura 1.51.

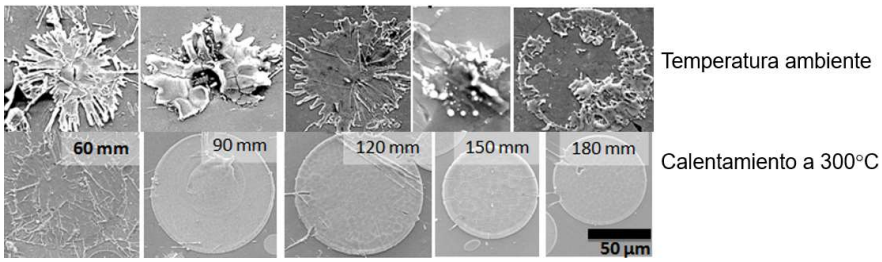


Figura 1.51. Influencia de calentamiento del substrato en la formación de un splat [72].

Como la integridad del depósito y sus propiedades están altamente controladas por la morfología del splat por lo que, el fenómeno que ocurre durante la

formación del splat es vital para poder ligar las condiciones de proceso a la microestructura y propiedades del depósito.

1.6.2 Ventajas del rociado térmico.

Algunas ventajas del rociado térmico, como se ha venido mencionando en puntos anteriores son sin lugar a duda su bajo costo de su aplicación además de que su operación es eficiente, confiable y fácil de manejar. También tiene algunas ventajas técnicas con respecto a otros procesos de deposición, ya que permite la deposición eficiente tanto de metales, cerámicos o combinaciones de estos, dando oportunidad a que una cantidad sustancial pueda ser aplicada, debido a que las altas temperaturas que maneja permiten el rociado de materiales con altos puntos de fusión como cerámicos refractarios. Además, las altas velocidades de partícula generan microestructuras con porosidad relativamente baja y alta fuerza de adhesión y es ampliamente usado en la deposición de óxidos cerámicos, ya que la oxidación no tiene importancia siendo lo contrario el proceso puede realizarse en un ambiente protector o inerte o en todo caso optimizar los parámetros de proceso para la aplicación de interés. Por otra parte, la medición de los esfuerzos residuales de un recubrimiento usando el rociado térmico se puede llevar a cabo mediante técnicas basadas en la curvatura la cual tiene ventajas en términos de preparación mínima de la muestra.

Por lo tanto, el proceso de rociado térmico es atractivo desde el punto de vista costo-beneficio y debido a estas ventajas el rociado térmico se ha convertido en uno de las técnicas más comunes para producir recubrimientos funcionales y reproducibles. Algunas de sus ventajas de deposición se ven en la tabla 1.11 con respecto a otras técnicas que normalmente son usadas en la industria.

Tabla 1.11. Ventajas de rociado térmico en deposición de barreras térmicas.

Propiedades	revestimiento electrolítico	CVD	PVD	Rociado térmico
costo de equipo	bajo	moderado	Moderado-alto	moderado a alto
costo de operación	bajo	bajo a moderado	Moderado- alto	bajo a alto
espesor deposición	10µm a mm	10µm a mm	muy delgado a moderado	50µm a mm
adherencia	moderadas condiciones mecánicas y buen enlace	buen enlace y buena difusión	moderadas condiciones mecánicas y buen enlace	buen enlace mecánico
materiales de recubrimiento	metales	metales, cerámicos y polímeros	metales, cerámicos y polímeros	metales, insertos, cerámicos y polímeros
acabado superficial	moderadamente grueso brilloso	suave a brilloso	suave a brilloso	grueso a suave 0.12-0.5 µm

1.6.3 Tipos de Rociado térmico

El rociado térmico tiene diferentes tipos y los distinguen los materiales que se alimentan en el rociado, el método de calentamiento y el método de propulsión de los materiales al substrato. En la figura 1.52 se muestran algunos tipos de procesos de rociado térmico existentes en la industria y sus aplicaciones son de uso amplio para sistemas de barreras térmicas, recubrimientos para equipos especiales de alta temperatura en la industria, para evitar su desgaste ya sea por oxidación, erosión, etc.

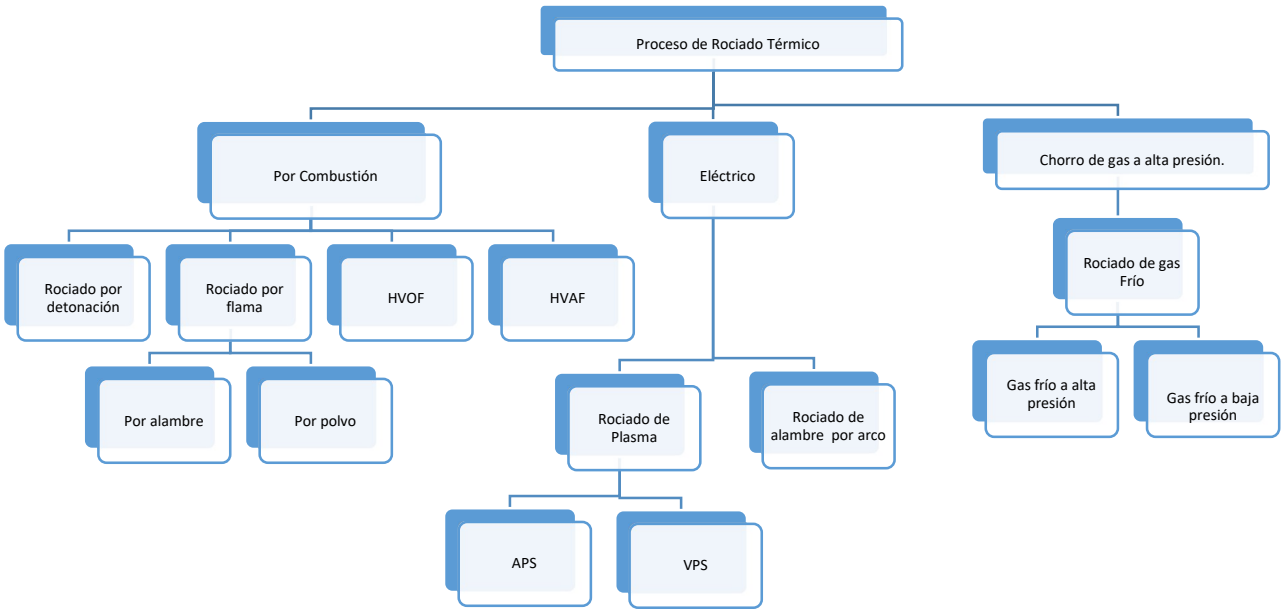


Figura 1.52. Tipos de técnicas de rociado térmico.

Dependiendo de la aplicación que tenga el elemento a recubrir es utilizado un cierto tipo de técnica de rociado térmico, para poder hacer que las partículas sean más o menos aceleradas y poder seleccionar a preferencia la utilización de uno u otro material, para cumplir con la función del elemento, por ello se habla a continuación de los diversos tipos de rociado térmico más comunes.

A) Combustión.

En estos dispositivos se usa la energía liberada en la combustión de gases como propano o hidrógeno para aumentar la temperatura del material a rociar, así como su velocidad, existen diversos tipos como el rociado con llama a baja velocidad,

conocido como flame spray y rociado con flama a alta velocidad. En el tipo de rociado con llama a baja velocidad, el material utilizado para la deposición se encuentra en forma de cilindro, polvo o alambre. La llama normalmente es de oxígeno de acetileno, por las altas temperaturas que este permite, otros gases combustibles tales como: propano, gas natural, hidrógeno o metil - acetileno también pueden ser utilizados. Comparado con otros métodos de recubrimiento la energía cinética de las partículas y las temperaturas son más bajas, las velocidades de las partículas alcanzan unos 50 m/s [73], ver Tabla 1.12, produciendo más poros, capas con más baja densidad y una baja adherencia. Esta técnica es utilizada para metales y materiales con bajo punto de fusión una pistola que se usa en este tipo de método se muestra en figura 1.53.

a) b)

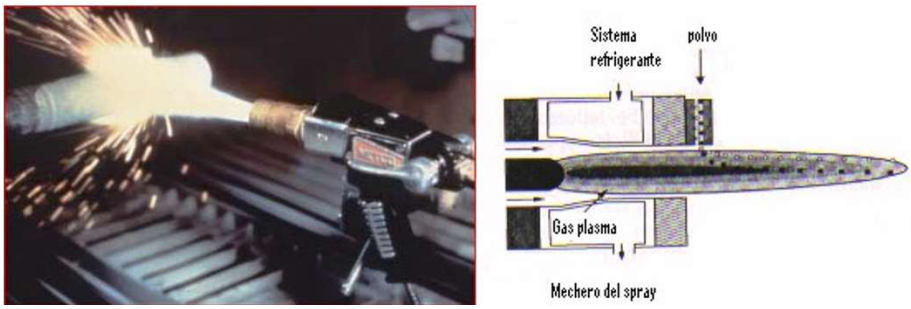


Figura 1.53. (a) Fotografía de un dispositivo LVFS (Sulter Metco), low velocity flame spray, donde la fuente de calentamiento de las partículas es generada por combustión y el rociado es de baja velocidad. (b)Esquema de proceso de calentamiento usando como fuente de calentamiento un combustible [73].

En la forma más simple de rociado de flama, el oxígeno aspira el polvo de un depósito adjunta al dispositivo e inyecta este dentro de la flama de oxígeno, figura 1.53 (b). El gas inerte presurizado lleva el polvo dentro de la flama. En este tipo de dispositivos el gas inerte o presurizado incrementa la velocidad de las

partículas, para aumentar la adherencia y la densidad del recubrimiento, mientras se enfría el sustrato. La utilización de gas inerte sirve para ayudar a reducir la oxidación de las partículas y el sustrato. Cuando el material que alimenta el rociado es un alambre o un cilindro, se empuja el material a través del dispositivo dentro de la flama de combustión para fundirlo. El gas comprimido, usualmente aire, fluye alrededor de la flama atomizando el material, ya que este funde la punta del alambre o el cilindro, propulsando el material fundido o semi-fundido sobre el sustrato. La técnica del rociado de flama de polvo puede ser usado para depositar cualquier material que se funda por debajo de la temperatura de la flama (40000F- 50000F) o (22040C-27600C). En la técnica de rociado de flama de alambre puede usarse cualquier material alimentador, usualmente metales. La cerámica formada dentro de un cilindro puede ser rociada con pistola para rociado de alambre. Usualmente, el rociado de flama es usada para depositar recubrimientos de metales o aleaciones metálicas con un bajo punto de fusión.

En el caso del rociado térmico con llama a alta velocidad, el polvo, de 10μm a 40μm de diámetro [73], se alimenta axialmente dentro del inyector, Figura 1.54 (b). Las partículas son llevadas a un gas de combustión de alta presión. Los gases se expanden rápidamente a través de un inyector restringido cuando se realiza la combustión con oxígeno se aceleran las partículas fundidas a velocidades supersónicas, ver Tabla 1.12.

a) b)

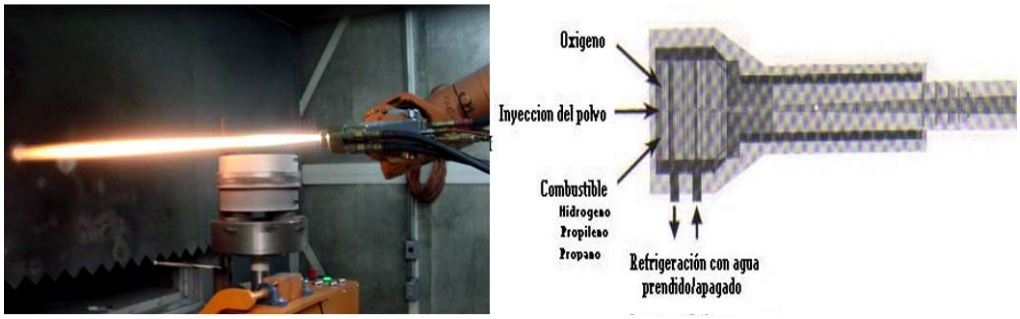


Figura 1.54. (a) Fotografía de una pistola de HVOF (Cortesía de CENAPROT). (b)Esquema de una fuente de spray de HVOF [73].

El combustible es kerosene, propileno, propano, o combustible de hidrógeno y oxígeno a baja presión alcanzando temperaturas que rondan entre 2,800 a 3,000 °C. La energía cinética de las partículas es muy alta y el rendimiento de la energía térmica es controlada, produciendo capas de baja porosidad de 1-2% y por lo tanto, una alta densidad, con una alta adherencia superior a >70 MPA, buen acabado de la superficie rociada y bajo stress residual. La alta aceleración del gas incrementa la densidad del recubrimiento, la adherencia y un bajo contenido en óxido.

B) Eléctrico

En estos dispositivos se usa una diferencia de potencial entre dos placas paralelas para aumentar la temperatura y la velocidad del material a rociar, el tipo de rociado más particular es el proceso de rociado con plasma, que fundamentalmente usa microondas, campos acoplados por inducción y voltaje AC o DC como fuente de energía para plasmas térmicos.

El material es inyectado en la forma de polvo dentro de la flama de un plasma a alta temperatura donde este es calentado rápidamente y acelerado.

Figura 1.55. Muestra de la flama producida utilizando una fuente de calentamiento eléctrico (cortesía CENAPROT).

El material caliente impacta sobre la superficie del sustrato y rápidamente se enfría formando una capa. El alto grado de fusión y la relativa alta velocidad de las partículas proveen al recubrimiento una alta densidad y un fuerte enlace. Controlando la atmósfera del rociado de plasma, usando en la cámara gas inerte, reducimos la cantidad de óxido y se mejora la densidad del recubrimiento.

Existen dentro de este tipo de rociado térmico con algunas variantes el rociado térmico con plasma atmosférico y el proceso de arco alambre.

En el proceso de rociado térmico con plasma atmosférico se produce un recubrimiento limpio libre de óxido, alta densidad y mejoramiento significativo de la fuerza de los enlaces.

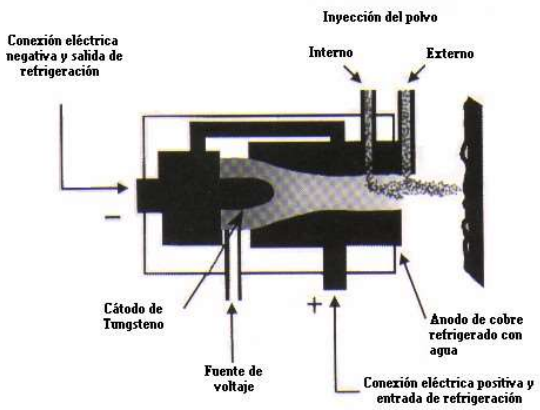


Figura 1.56. Esquema detallado de una fuente de APS [73].

El dispositivo de rociado de plasma comprende un ánodo de cobre y un cátodo de tungsteno, figura 1.56, ambos de los cuales son enfriados con un sistema refrigerante. El gas de plasma (puede ser de argón, nitrógeno, hidrógeno y helio), fluye alrededor del cátodo y a través del ánodo el cual es formado como un inyector construido, inicialmente se produce una descarga con alto voltaje que causa la ionización y una trayectoria conductiva para un voltaje DC el cual se forma entre el cátodo y el ánodo. La resistencia al calentamiento causa que el gas alcance temperaturas extremas disociando e ionizando a forma de plasma. El gas gira en un vórtice y sale fuera del extremo del ánodo. El voltaje eléctrico del cátodo al ánodo completa el circuito formando una flama de plasma que sale rotando debido al momentum que tiene en el vórtice el gas plasma. La temperatura del plasma al momento en que sale lleva una temperatura de 150,000 K [73]. Para una fuente directa, que opera a 40 kW [73]. La temperatura del plasma cae rápidamente y ronda una temperatura de 12,000 a 15,000 °C al salir del ánodo por esto el polvo es colocado en el punto más caliente de la llama. Las partículas de polvo, de aproximadamente 40μm de diámetro, son aceleradas y fundidas obteniendo una velocidad al impactar al sustrato de 100 – 300 m/s [73].

Desplazándose al sustrato donde impactan y rápidamente se solidifican 106 K/s. El APS es usado para formar depósitos de espesor >2μm (comúnmente en el rango de >50μm). El acumulado de pocos splats en algunos milisegundos constituye una pasada. El espesor de una pasada varía de entre 3 y 60 micras. El flujo de alimentación típico en el proceso APS es de 3 a 5 kg/h. Puede ser utilizado un amplio rango de materiales como níquel, aleaciones de hierro, cerámicas tales como óxidos de aluminio y cerámicas basados en zirconio. El polvo es rápidamente calentado y acelerado rociado a una distancia de rociado del orden de 25 a 150 mm. Durante el proceso, el flujo y la transferencia de calor durante el impacto y solidificación de las partículas controlan la microestructura y las propiedades termo-mecánicas del recubrimiento. En el proceso de rociado térmico con arco alambre se usan dos portadores de corriente, alambres conductores de electricidad que son alimentados dentro de un voltaje donde ocurre la fusión. El material fundido es continuamente atomizado por aire comprimido. Utiliza un voltaje eléctrico DC fundiendo directamente el aislante del alambre del electrodo. Al consumirse el alambre del electrodo avanza a un punto donde la diferencia de potencial aplicada a través del alambre inicia un voltaje que funde la punta del alambre en un gas atomizador. Fundamentalmente el gas de argón es utilizado para atomizar el material fundido y acelerar las partículas hasta el sustrato. Las partículas generadas por la mayoría de los procesos de rociado de voltaje de alambre tienden a ser más grandes y más irregulares en medida de distribución que en proceso de rociado térmico alimentado con polvo. Generalmente la baja presión en el aire atomizado, resulta en un perfil de capa rugosa, mientras que la alta presión produce una textura en la superficie suave y finas capas. El óxido puede ser reducido al utilizar como gas atomizador nitrógeno, helio o argón.

C) Chorro de gas a alta presión.

En estos dispositivos se usa un chorro supersónico de gas para aumentar la velocidad del material para que impacte y cause una deformación sobre el material a recubrir, aprovechando su energía cinética, el proceso de rociado más conocido por este método es el rociado en frío. En este proceso las partículas de polvo inyectadas dentro de un chorro supersónico de gas comprimido impactan sobre la superficie del sustrato con suficiente energía causando deformaciones plásticas, figura 1.57.

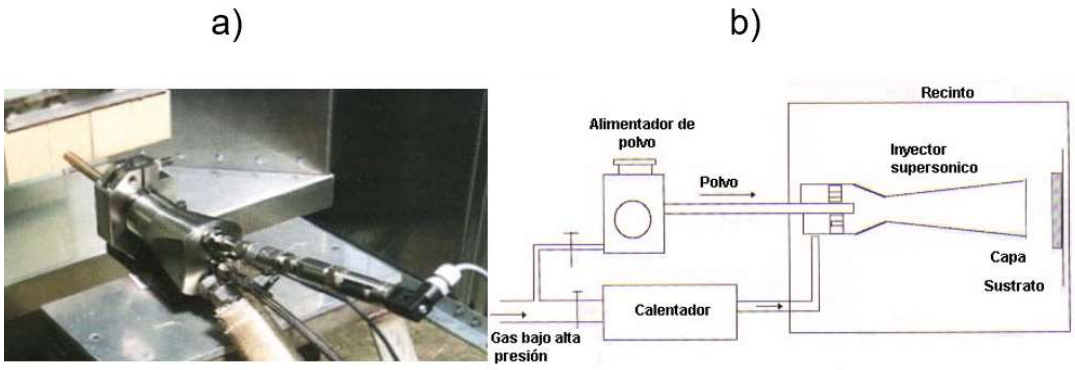


Figura 1.57. (a) Fotografía de un dispositivo para el rociado en frío. (b) Esquema de una fuente de rociado en frío [73].

Es una nueva tecnología que puede rápidamente depositar muchos metales y algunos materiales compuestos cerca de la temperatura ambiente sin tener que calentar el material sustancialmente. El rociado en frio ofrece distintas ventajas para algunas aplicaciones como: pequeña o ninguna oxidación, ningún cambio de fase durante la deposición, alta conductividad eléctrica y térmica y poco stress residual.

1.6.4 Microestructura de una barrera térmica con rociado térmico.

Como se ha venido mencionando los recubrimientos por rociado térmico son construidos partícula por partícula, es decir, su microestructura, tiene característica laminar o de placas heterogénea. Esta microestructura es creada cuando las partículas esféricas fundidas impactan sobre la superficie, solidificándose y fijándose en el substrato o capa, donde las partículas esféricas fundidas, a el momento del impacto se aplanan hacia fuera en laminas alargadas, las cuales forman los contornos ondulados, de las partículas rociadas. Debido a los contornos hay diferentes niveles de porosidad, así como cantidad de óxido incluido, estos se pueden ajustar en función de la velocidad de las partículas fundidas y el medio ambiente, aire o inerte, que es usado. Las capas son típicamente enlazadas al sustrato por enclaves mecánicos, llamado así por la rugosidad presente en el substrato el cual normalmente, es un fuerte enlace adhesivo, otro enlace existente es la adhesión partícula a partícula que es llamado enlace cohesivo. Por lo tanto, la microestructura de los recubrimientos producidos por rociado térmicos es diferente a la mayoría de otros métodos de deposición [58], ya que la microestructura está compuesta por algunas partículas parcialmente fundidas, óxidos y porosidades o huecos los cuales se pueden ajustar con los parámetros de proceso, como se puede apreciar en la figura 1.58.

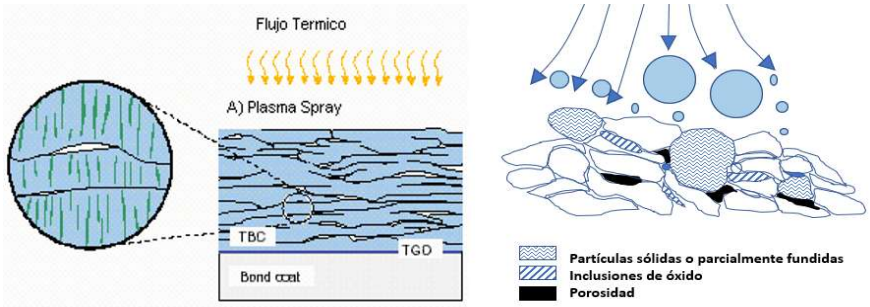


Figura 1.58. Microestructura característica del rociado térmico.

En la tabla 1.12 podemos observar las diferentes microestructuras de los sistemas de principal uso en la industria, estas varían ya que como se ha mencionado que la microestructura está estrechamente relacionada con el método de deposición del material, ya que esta depende de la velocidad de las partículas, de la temperatura de estas antes del impacto sobre el sustrato y si se encuentran en forma de polvo o de alambre, entre otros.

Tabla 1.12. Tipos de microestructuras obtenidas por rociado térmico para barreras térmicas y otras características.

Tipo de spray	Tipo material	Temp. de la llama	Velocidad partículas (m/s)	Materiales	Microestructura	Aplicaciones
Combustión	Alambre /Polvo	3000 ^{0}C	40-100	Metales, polímeros, cerámicas	Relativamente alta porosidad y oxidación	Recuperación, Protección a la corrosión
HVOF	Polvo	3000 ^{0}C	400-800	Metales y cerámicas de bajo punto de fusión	Alta densidad, buena adherencia y tensión compresiva	protección al desgaste
APS	Polvo o alambre	(5000-25000) °C	80-300	Metales y cerámicas	Porosidad en depósitos cerámicos	Barreras térmicas, aislador
Rociado en frío	Polvo	Temperatura ambiente	400-800	Metales	Tensión compresiva	Conductor

1.7 Simulación númerica del proceso de fundición-solidificación.

Los procesos de fundición han recurrido a la experiencia en planta o bien poka-yoke, lo cual requiere de muchos ensayos y por lo tanto, de mucho tiempo. Todo esto lleva a no tener la rastreabilidad de los procesos físicos que se llevan a cabo, por eso se han tenido avances tecnológicos en el área, lo cual llevó al rápido crecimiento de la disponibilidad de equipo de cómputo con ese propósito, teniendo el poder de la tecnología se desarrollaron métodos numéricos eficientes y junto con la formación de profesionales capaces de entender dichos fenómenos físicos, se han promovido la aplicación de modelos matemáticos para simular el comportamiento de las piezas vaciadas durante el proceso de fundición-solidificación, lo cual es posible de realizar combinando métodos numéricos con fenómenos de transporte como de calor y masa, los cuales intervienen en el proceso y a la gran capacidad de memoria existente en los equipos de cómputo. Por lo tanto, la modelación matemática junto con la simulación computacional ha alcanzado tal grado de desarrollo que existen varios paquetes comerciales que implementan soluciones numéricas para la resolución de transferencia de calor en la fundición-solidificación de la pieza vaciadas. Algunos ofrecen datos sobre la microestructura y los defectos de la pieza vaciada. Entre los paquetes de simulación comerciales que son capaces de adquirir datos de sistemas CAD se encuentra ProCAST y MAGMA. Que son Software 3D de análisis que llevan a cabo simulación y optimización de procesos de fundición, enfocados en el análisis del proceso de fundición de diferentes materiales como acero y aluminio, con una tecnología orientada para entender mejor el llenado, solidificación, propiedades mecánicas, esfuerzos térmicos, etc. Se manejan a través de una interface grafica de menús fácil de usar y operan bajo un modelador de sólidos. Contienen una base de datos para apoyar todo el proceso de diseño, producción y calidad.

Ayuda a evitar y predecir problemas de llenado debido al diseño de colada, problemas de diseño de moldes lo que ayuda a bajar costos de proceso.

Las ventajas de usarlos son: optimizar los sistemas de alimentación, predecir defectos causados durante el llenado, zonas de turbulencia, óxidos y escoria atrapada, erosión de moldes, problemas causados durante la solidificación además de conocer posibles zonas de defectos provocados por la generación de puntos calientes, validar diseños de colada, proponer prototipos que aseguren piezas de calidad y conocer el efecto que producen el uso de sistemas de enfriamiento y mazarotas. En nuestro caso se podrá utilizar el software ProCAST y se hablará de él más adelante. Al igual se hablará acerca de algunos modelos matemáticos que comprenden el comportamiento de la transferencia de calor durante la solidificación, uno de ellos es el realizado por Poirier et al [74]. En la figura 1.59 se muestra la distribución de temperatura en un sistema de fundición, como se puede apreciar, existe una separación entre el metal y el molde, como se había mencionado anteriormente. Su solución analítica es compleja debido a que es por ciclo iterativo además de tener que llevar a cabo una seri de aproximaciones en el molde, como que sea suficientemente grande para ser considerado semi infinito y que el flujo de calor se dé en una sola dirección.

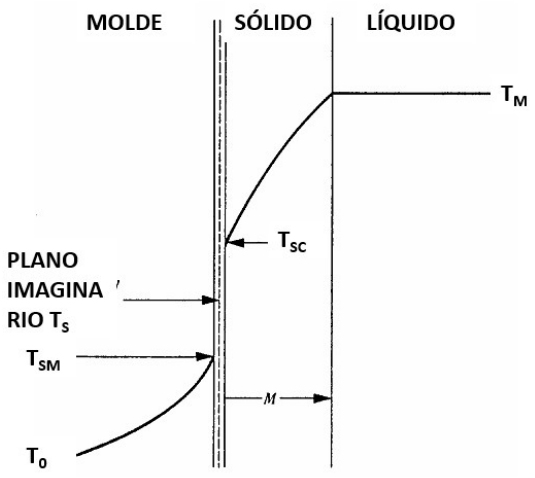


Figura 1.59. Representación esquemática de la interfase metal-molde durante la solidificación.

El flujo de calor que se extrae del metal solidificándose está dado por la primera ley de Fourier

$$\vec{q} = -k_m \nabla T \qquad \text{Ecuación 4.}$$

y la ecuación de energía está dada por la segunda ley de Fourier

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_m \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \qquad \text{Ecuación 5.}$$

Suponiendo al molde como un sólido semi-infinito, podemos considerar que no existe un incremento de temperatura en su superficie exterior.

Primero se consideró un caso con gradientes de temperatura tanto en el metal solidificando como en el molde metálico, sin resistencia en la interface.

Entonces T_s la temperatura en la interface molde-metal. Para determinar T_s se desarrolla una solución que cumpla con la primera condición de frontera:

$$\lim_{\varepsilon \to 0}\left[k\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{x=0-\varepsilon} - k'\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{x=0+\varepsilon}\right] = 0$$

Ecuación 6.

es decir, en la interface metal-molde, el flujo de calor que sale por la superficie del metal solidificando debe ser el mismo que el flujo de calor entrando por la superficie interna del molde.

Deben satisfacerse otras dos condiciones de frontera, por lo tanto, la segunda condición frontera:

$$T(M,t) = T_M$$

Ecuación 7.

Es decir, que la temperatura en la interface sólido-líquido es la temperatura de fusión y la tercera condición frontera:

$$k'\frac{\partial T}{\partial t}(M,t) = \rho' H_f \frac{\partial M}{\partial t}$$

Ecuación 8.

lo cual indica que la velocidad de evolución del calor latente de fusión es igual al flujo de calor hacia el sólido en la interface.

Tomando en cuenta estas dos condiciones de frontera y conducción de calor unidimensional en coordenadas cartesianas, la solución para la distribución de temperaturas en el molde es la del molde semi infinito:

$$\frac{T - T_s}{T_0 - T_s} = erf\frac{-x}{2\sqrt{\alpha t}}$$

Ecuación 9.

donde T_0 es la temperatura uniforme inicial del molde.

Para la distribución de temperaturas en el metal solidificando se tiene una expresión similar dada por:

$$\frac{T - T_s}{T_\infty - T_s} = erf\frac{x}{2\sqrt{\alpha' t}}$$

Ecuación 10.

dada la condición de frontera 2, se aprecia que el argumento de la función error es constante, definido como β. Entonces puede aplicarse que el espesor del metal solidificado está dado por:

$$M = 2\beta\sqrt{\alpha' t}$$

Ecuación 11.

al diferenciar las ecuaciones 9 y 10; y aplicando las ecuaciones 6, 7 y 8 obtenemos que:

$$\frac{(T_M - T_S)C_P^{'}}{H_f\sqrt{\pi}} = \beta e^{\beta^2} erf\,\beta$$

Ecuación 12.

$$\frac{(T_M - T_0)C_p^{'}}{H_f\sqrt{\pi}} = \beta e^{\beta^2}\left(\sqrt{\frac{k^{'}\rho^{'}C_P^{'}}{k\rho C_P}} + erf\,\beta\right)$$

Ecuación 13.

$$\frac{(T_\infty - T_S)C_P^{'}}{H_f\sqrt{\pi}} = \beta e^{\beta^2}$$

Ecuación 14.

$$\frac{T_S - T_0}{T_\infty - T_S} = \sqrt{\frac{k^{'}\rho^{'}C_P^{'}}{k\rho C_P}}$$

Ecuación 15.

En resumen, con este desarrollo se obtienen los perfiles de temperatura tanto en el molde como en el metal solidificando, además de la velocidad de solidificación. Para los perfiles de temperatura en el molde, primero se calcula la temperatura en la interface T_s a partir de las propiedades térmicas conocidas, con las ecuaciones 16 y 17.

$$(T_M - T_0)\left(\frac{C_P^{'}}{H_f}\right)$$

Ecuación 16.

$$\sqrt{\frac{k^{'}\rho^{'}C_P^{'}}{k\rho C_P}}$$

Ecuación 17.

Para poder hacer uso de la gráfica de la figura 1.60 (la cual se deriva del cálculo de β mediante prueba y error) y finalmente con la ecuación 12.

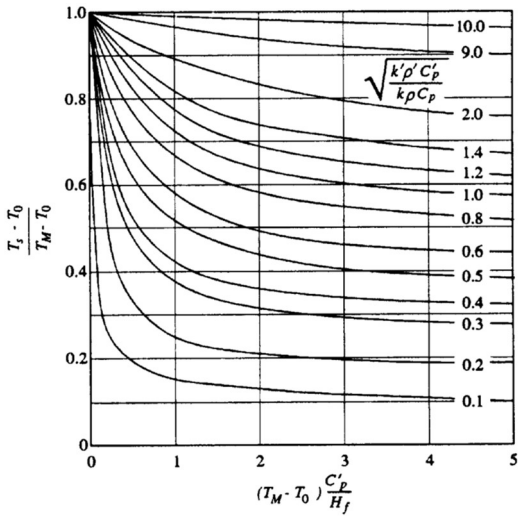


Figura 1.60. Temperaturas relativas en la interface metal-molde para solidificación unidireccional, sin resistencia en la interface.

Como segundo paso, el valor de T_s así obtenido se utiliza en la ecuación 9, para tener el perfil de temperaturas del molde. Para determinar el perfil de temperaturas en el metal solidificando a partir de T_s, se utiliza ya sea la ecuación 14 o 15 para calcular T, una vez obtenidos los valores de Ts y T, éstos se substituyen en la ecuación 10, para el perfil de temperatura en el metal solidificando. Si se deseara calcular el espesor del metal solidificado, a partir de la figura 1.60, se obtiene el valor de T_s. Posteriormente, con ayuda de la figura 1.61 se determina el valor de β. Finalmente, estos dos datos se sustituyen en la ecuación 11.

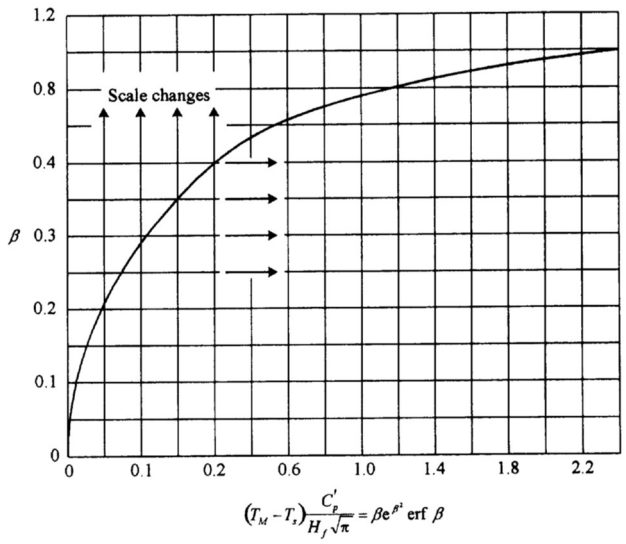


Figura 1.61. Evaluación del valor de β.

El desarrollo mostrado muestra la solución para un caso simplificado para la solidificación en moldes metálicos, para poder entrar a la solución del modelo con la resistencia a la transferencia de calor en la interfase o gap de aire, la cual se caracteriza utilizando un coeficiente de transferencia de calor convectivo, determinado experimentalmente para cada caso. Primero se usa nuevamente la figura 1.59, como puede verse no existe una temperatura constante en la interfase metal-molde; por el contrario, existen dos temperaturas superficiales, ninguna de las cuales es constante. Para resolver este problema se considera un plano imaginario de referencia entre el metal y el molde a una temperatura T_s, la cual es constante. El valor de T_s, se calcula a través del método descrito en la sección anterior, como si no hubiera resistencia de contacto. Hecho esto, se calcula la resistencia de contacto en cada lado del plano imaginario a través de:

$$h_M = \left(1 + \sqrt{\frac{k\,\rho\,C_P}{k'\,\rho'\,C'_P}}\right)h \qquad \text{Ecuación 18.}$$

$$h_C = \left(1 + \sqrt{\frac{k'\,\rho'\,C'_P}{k\,\rho\,C_P}}\right)h \qquad \text{Ecuación 19.}$$

En estas expresiones, h es el coeficiente de transferencia de calor total a través de la interfase, h_M es el coeficiente del lado del molde y h_c es el coeficiente del lado del metal.

Para resolver este caso son necesarios los siguientes pasos:

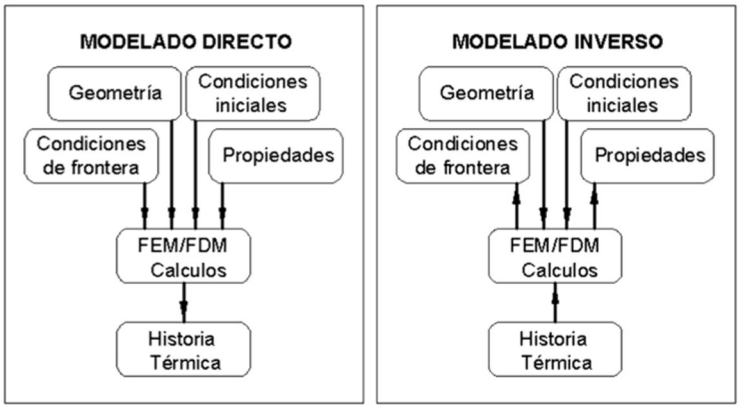
1. Se obtiene el valor T_s como si no existiera resistencia en la interfase.
2. Con el valor de T_s, se aplica la ecuación 19 para aislar la mitad del metal solidificando y se analiza utilizando el método de la sección anterior. Para esta mitad, el calor es transferido de T_{sC} a T_s, a través de h_c.
3. Si se desea estudiar la mitad del molde, se retoma la solución para el molde semi-infinito. En este caso, el calor es transferido desde una fuente a la temperatura T_s hacia la superficie la cual posee una temperatura T_{sM} todo esto mediante un valor específico h_M.

1.8 Método inverso.

Debido a la no-linealidad de los problemas que intervienen en la conducción de calor, en particular durante la solidificación del metal, los métodos numéricos son generalmente requeridos, por lo tanto, el análisis de ciclo térmico de solidificación, se lleva a cabo mediante el uso de un software, en este caso ProCAST, donde las ecuaciones que resuelve este paquete son las mismas que se han presentado en las secciones anteriores, ya que se ha estudiado para poder trabajar con él. ProCAST es un paquete comercial, usado en la industria de la fundición con fines de estudiar, analizar las principales variables de los procesos en particular y está diseñado mediante la teoría del elemento finito, es utilizado para diseño de moldes dentro de la metalurgia, además cuenta con una herramienta ´´módulo inverso´´. El ´´módulo inverso´´, es usado para determinar las causas basadas en la observación de los efectos (mediciones), en este caso, la causa a determinar son los coeficientes de transferencia de calor en la interfase molde- barrera térmica –metal, del perfil de solidificación de la pieza vaciada, mientras los efectos observados son los diferentes valores de la temperatura en diferentes distancias de un molde. Todos los problemas inversos son resueltos empleando una descripción matemática completa del proceso físico para determinar los correspondientes valores de los efectos observados. Estos valores del modelo matemáticamente calculados son comparados con los valores medidos experimentalmente. Cuando los valores calculados y observados cumplen satisfactoriamente entonces la solución al problema inverso ha sido encontrada.

Para el análisis de problemas en transferencia de calor, un adecuado arreglo de ecuaciones es determinante para describir el fenómeno físico. En este caso la

ecuación que rige el proceso de interés está dada por la relación de Fourier. Con las condiciones de frontera, condiciones iniciales, y propiedades termo-físicas de los materiales, es posible obtener una distribución y variación de temperaturas en todo el sistema. Sin embargo, si una de las propiedades termo-físicas del material es desconocida, más sin embargo los datos de temperatura pueden ser obtenidos, es posible calcular dicha propiedad desconocida mediante un ´´módulo inverso´´, su principio, es proveer la historia térmica como una entrada (i. e, medición de curvas de enfriamiento a diferentes distancias) y definir como una salida las condiciones de frontera o propiedades del material a interés, como se observa en la figura 1.62.



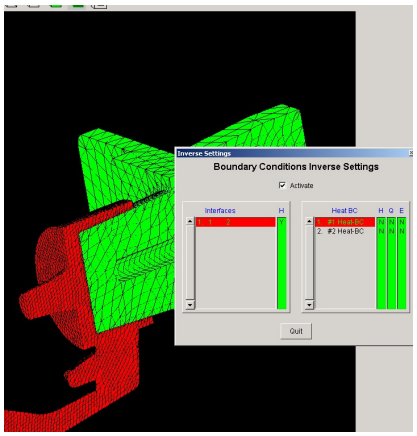


Figura 1.62. Modelado en ProCAST.

La validación de la simulación es llevada a cabo en planta, mediante la práctica, ya que un modelo numérico es inservible si no ha sido validado apropiadamente. Ya sea que un estudio físico sea llevado a cabo antes de la simulación y que esta sirva, en primera instancia, para ejemplificar y entender lo que sucede en el sistema, o que se diseñe una simulación y después se validen los resultados obtenidos mediante un estudio físico, siempre debe haber la correlación directa entre lo tangible de la práctica y lo abstracto de la modelación numérica.

Capítulo 2 Modelación.

2.1 Modelo

Para la realización de las pruebas de solidificación se desarrolló un concepto para un molde con geometría sencilla que tuviera dimensiones necesarias para poder desarrollar su análisis en una sola dirección, es decir tendencia a semi infinito y poder facilitar su entendimiento como se mencionó en puntos anteriores, considerando el fácil desmolde con la finalidad de facilitar el retiro de la pieza vaciada, así como los puntos de referencia para poder llevar a cabo las mediciones correspondientes del perfil de solidificación y poder facilitar la modelación del mismo. El modelo físico tuvo como función proporcionar las facilidades para realizar los estudios necesarios y obtener un conocimiento fundamental de los aspectos involucrados durante la solidificación de la aleación 356.0, así como la determinación aproximada el coeficiente de transferencia de calor convectivo en la interfase molde-metal.

Figura 2.1. Detalle del modelo para realizar la pieza vaciada.

Con el fin de optimizar la experimentación, se desarrollaron 4 moldes, para poder llevar a cabo en par los experimentos y poder discretizar de una mejor manera el modelo de perfil de solidificación. El metal para la preparación del molde se llevó a cabo de acero grado herramienta AISI-SAE H-13, debido a que la mayoría de los moldes que trabajan con este tipo de aleación son elaborados con este tipo de material gracias a sus propiedades físicas, como coeficiente de expansión lineal debido a su composición química, como se muestra en las tablas 2.1 y 2.2.

Tabla 2.1. Composición química del material H-13

elemento	C	Mn	P	S	Si	Cr
Porciento %	0.37	0.35	0.03	0.03	1	5.25

Tabla 2.2. Variación del coeficiente de expansión lineal con la temperatura.

Rango Temperatura	X10-6/°C
27 – 93	11
27 – 204	11.5
27 – 427	12.2
27 – 538	12.4
27 – 649	13.1
27 – 788	13.5

2.2 Descripción del modelo.

El modelo consta de los siguientes equipos y aditamentos:

Molde, que consta de tres partes, dos partes que conforman el molde en la parte superior y una tercera parte que es la inferior, en la cual embonan las dos partes superiores, lo cual permite el llenado de su interior al momento de la vaciada, como se puede apreciar en la figura 2.1. Sistema de medición de temperaturas, está conformado por termopares tipo K, en cuatro diferentes posiciones del molde, el cual esta enlazado a un receptor de datos tipo DAQ ASSITENT de national instrument de receptor o lector de datos de termopares, el cual con un programa de LabVIEW se hacían las conversiones necesarias para que la computadora se recibieran los perfiles de temperatura en cada punto del molde, como se muestra en la figura 2.2.

Figura 2.2. Sistema de recepción de datos de perfil de solidificación.

Sistema de fundición, se contó con un soplador, para satisfacer la relación de oxígeno, un horno tipo retorta y su respectiva tapa, ambos con recubrimiento refractario, donde se introducía un crisol adecuado para las temperaturas de

trabajo, de carburo de silicio A-30, en el cual se alimentaban los minerales para la aleación en cuestión a un 80% y el gas para combustión gas butano, alimentado al sistema por medio del tubo de conexión de soplador-retorta, así como el escoriador, nitrógeno y lanza de grafito para poder sacar los gases de la pieza vaciada e impurezas, como se muestra en la figura 2.3.

Figura 2.3. Sistema de fundición de la pieza.

2.3 Instrumentación del modelo.

La instrumentación requerida para llevar a cabo la experimentación consta de una tarjeta de adquisición de datos NATIONAL INSTRUMENT Hi speed USB carrier Modelo NI-9213, mostrado en la figura 2.4.

Figura 2.4. Sistema de recolección de datos de termopares.

La cual cuenta con las siguientes características:

- Sistema de adquisición de datos multifuncional con conexión serial (Compatible con USB 1.0 & 2.0).
- Alta resolución, cuenta con un convertidor de 24 -bit A/D.
- Conectores para terminales tipo desarmador.
- Entradas programables con rango de ±78 mV.
- Expandible hasta 16 canales de entradas analógicas y digitales.
- Calibración digital.
- Registro de temperaturas por medio del software LABVIEW.

Los termopares son sensores que miden la temperatura, a través del efecto SEEBECK y se componen principalmente de dos metales diferentes unidos por un extremo, donde el punto de unión es el punto de medición o punto caliente, como se observa en la figura 2.5.

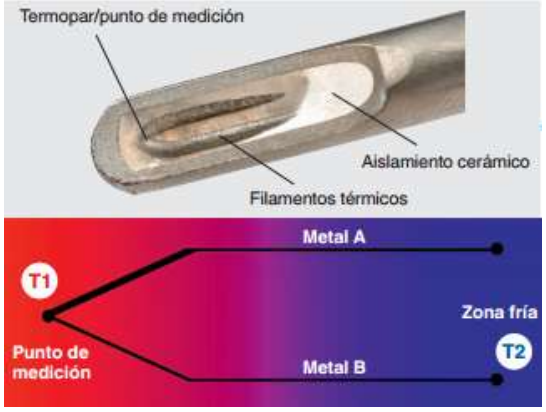


Figura 2.5. Sistema de un termopar.

El rango de medición de temperatura de trabajo del termopar tipo K, es de 550-1200 Celsius y los materiales de sus puntos son mostrados en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Materiales de fabricación de las puntas en el termopar tipo k.

tipo de punto	material
punto frio	Ni-Al
punto caliente	Ni-Cr

Estos se usaron para obtener el historial térmico de solidificación de la aleación, el cual se llevó a cabo mediante la medición respectiva del cambio de temperatura en el transcurso del tiempo de la pieza vaciada en 4 perforaciones radiales a la mitad del largo del molde de 4 pulgadas y repartidas en 180°, tales que tenían diferentes profundidades ¼”, ½”, ¾” y a contacto, mostradas en la figura 2.6.

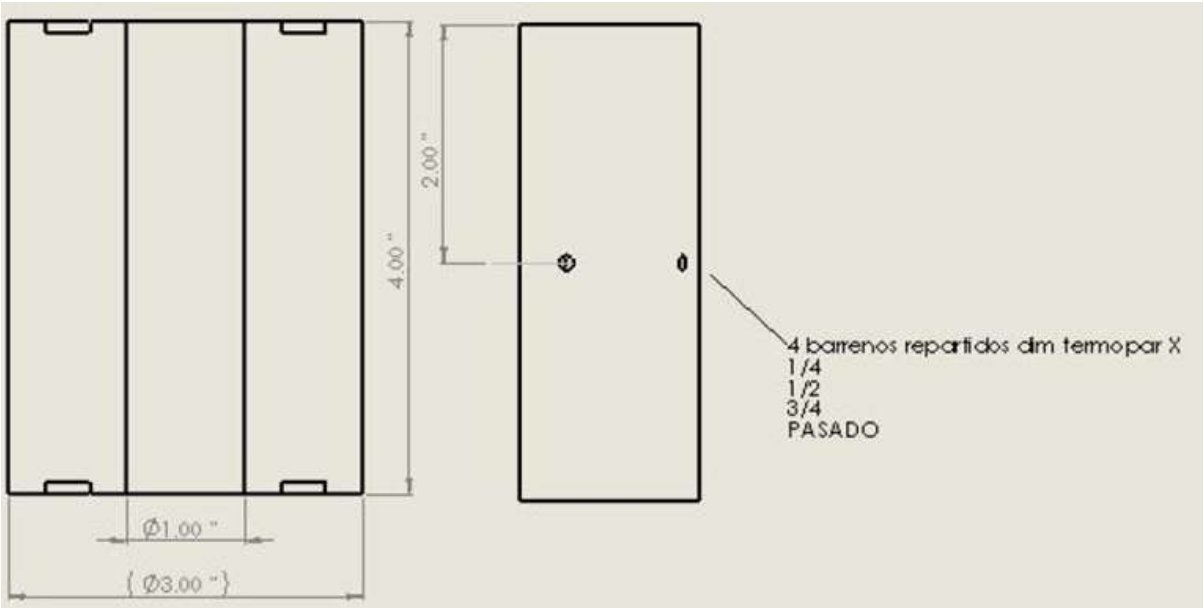


Figura 2.6. Dimensión de molde de geometría sencilla con ubicación de termopozos.

El diámetro de los agujeros fue de 1.6 mm, debido a que se trató de ser lo menos intrusivo con el proceso de solidificación de la pieza vaciada, por ello se utilizaron los termopares en forma de bayonetas delgadas de acero inoxidable, con un diámetro de 1.5mm y se utilizaron conectores rápidos para poder unir extensiones y facilitar su manejo.

2.4 Aleación 356.

Para el vaciado de la pieza, se seleccionó la aleación 356.0, cuya composición se muestra en la tabla 1.5 y sus propiedades térmicas las cuales fueron extraídas del software pueden observarse en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Propiedades térmicas de la aleación 356.0

propiedad	aleación 356
temperatura liquidus °C	644
temperatura solidus °C	510
cp líquido J/Kg K	1443
cp sólido J/ Kg K	1700
calor latente de fusión J/Kg	758734

Posteriormente estos datos serán utilizados para realizar la simulación numérica.

2.5 Tipo de pintura.

En la actualidad, se utilizan diferentes tipos de pintura para el proceso de fundición de piezas, en el caso particular se usaron la pintura WALLACAOT, que es de base silicio/alúmina y la otra es de MICA base vermiculita, ya que estas son utilizadas para el aislamiento de los moldes, y otro tipo de recubrimiento de tipo desmoldante (base grafito) que se utiliza para pintar las aristas y zonas de contacto en el molde de manera que las piezas se separen fácilmente al inicio y final del ciclo. Este tipo de recubrimientos fueron aplicados en el modelo físico para brindar las siguientes características:

- Dirigir la solidificación.

Las pinturas aislantes conductoras hacen que solidifique el metal en forma lenta o rápida. Esto orienta o dirige la solidificación, sobre todo para eliminar defectos de contracción o rechupes y para aumentar también la vida útil de molde.

- Protección del molde.

Al contar con una película en la interfase molde-metal, que evite el contacto directo entre los dos metales se prolonga la vida útil productiva del molde y se disminuye la erosión.

- Acabado superficial.

El molde metálico es ya una condición favorable para obtener superficies tersas. Las pinturas aislantes dejan un acabado un poco rugoso. Las pinturas lubricantes y conductoras dejan un acabado terso y de agradable apariencia rellenando todos aquellos espacios e irregularidades que se van dando con el uso continuo del molde.

- Separación pieza-molde.

Las películas de pintura lubricante hacen que la separación de las piezas del molde sea sencilla. También se evita la adherencia de las piezas al molde y favorece la repetitividad de los vaciados y extracciones de las piezas, sobre todo en sistemas automatizados.

2.6 Tipo de barrera térmica.

El recubrimiento cerámico a elegir fue uno compuesto por una capa de enlace, es principalmente un polvo comercial NiCoCrAlY surtido por la compañía SULZER, de nombre comercial METCO 365-4, el cual tiene una distribución de partícula de forma esférica de -45 a +20 μm, su composición nominal del polvo NiCoCrAlY se muestra en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Composición química del polvo comercial METCO 365-4.

Muestra	Ni	Co	Cr	Al	Y
Polvo	47.5	23	17	12	0.5

La barrera térmica, es un polvo cerámico de ZrO_2 (óxido de zirconio), estabilizada con 8 % en peso de Y_2O_2 (óxido de itrio), surtido por la empresa SULZER de nombre comercial METCO 204NS, que presenta una morfología tipo HOSP (polvo de óxido esférico hueco), el tamaño nominal del polvo comercial 8YSZ proporcionado es de 40 µm. La composición del polvo cerámico 8YSZ consta en su mayoría de zirconia en su fase tetragonal, que es la de interés, el que no esté a su 100% es debido al resultado del proceso de su fabricación, ya que las partículas más grandes no logran una fundición completa y no logran interactuar o formar ninguna solución sólida de itrio-zirconia por lo cual no se logra la estabilización en su fase tetragonal.
Las fases presentes se muestran en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Composición de fases del polvo comercial METCO 204NS.

Fase	monoclínica	Tetragonal
Porciento %	21.64	78.36

Los polvos usados fueron rociados mediante las técnicas de rociado térmico usando en específico HVOF (High velocity Oxygen Fuel) Y APS (Air Plasma Spraying), estos usados respectivamente para enlace-barrera térmica, esto por las temperaturas de fusión de los polvos, la cual se muestra en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Temperaturas de fusión de los polvos cerámicos comerciales METCO365-4 Y 204NS.

polvo	TF (º C)
365-4	1500
204NS	2800

Capítulo 3 Procedimiento Experimental.

3.1 Planeación experimental.

Se realizan diferentes corridas experimentales bajo las mismas condiciones teniendo sólo como variante el número de capas de pintura, así como los diferentes espesores de barrera térmica, para poder evaluar de manera adecuada el efecto en el coeficiente de transferencia de calor bajo los dos diferentes tipos de recubrimiento. Es necesario tener una idea clara de la operación del proceso, desde los parámetros que intervienen, los pesos de los materiales para llevar a cabo la aleación comercial 356.0, las temperaturas de fundición de la aleación, los tiempos de vaciado y los recubrimientos del molde en cuestión de la pintura. El propósito experimental fue de obtener las historias térmicas en las piezas vaciadas bajo diferentes condiciones de recubrimientos usados por la industria y la barrera térmica, con el fin de mostrar la versatilidad del uso de la barrera térmica en los moldes permanentes, con el fin de aumentar su tiempo de vida debido a que la barrera térmica resiste más el desgaste, así como poder controlar el perfil de solidificación de las piezas vaciadas eliminando defectos que normalmente se presentan en la industria de la fundición. Las historias térmicas fueron alimentadas y validados en un modelo numérico con el fin de estimar de los coeficientes de transferencia de calor en la interfase molde - metal. El proceso de fabricación de una pieza puede representarse mediante el proceso de bloques donde hay datos de entrada, los cuales con otras variables medibles se transforman en salidas o datos del experimento o proceso en cuestión, como se muestra en la figura 3.1.

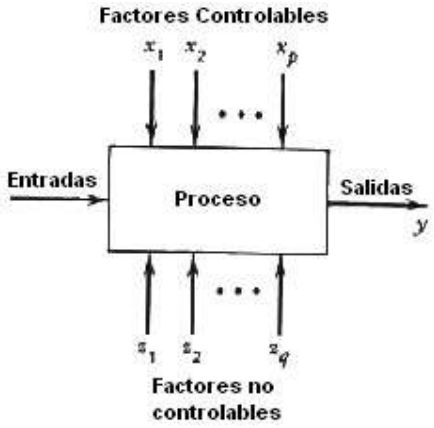


Figura 3.1. Entradas y Salida de un experimento con variables involucradas.

Los factores que influyen sobre el proceso de fundición de piezas de aluminio son numerosos y pueden encontrarse desde la preparación de la aleación hasta los parámetros de vaciado y condiciones del molde.

3.2 Proceso experimental.

El proceso de fundición que se analizará en la experimentación es de moldeo por gravedad, el cual involucra los siguientes pasos:

Caso molde con pintura:

a) Se prepara la carga con los pesos de los minerales adecuados para la fabricación de la aleación, según los porcentajes en peso.

b) Se pone a calentar el crisol de carburo de silicio dentro del horno con los minerales a un 80% hasta alcanzar la temperatura de fusión.

c) Se burbujea nitrógeno dentro de la aleación para eliminar oxígeno incluido, mediante una lanza de grafito.

d) Se agrega escoriador a la aleación para eliminar impurezas y obtener una pieza pura.

e) El molde es precalentado a 100 º C y se le aplica un espesor de pintura refractaria en la superficie que estará en contacto directo con la aleación.

f) La aleación, ya que está a la temperatura requerida, es vaciada en el molde, a través de una cuchara de colecta de aluminio fundido, recubierta con desmoldante.

g) Después que la pieza se solidifica y se obtiene el perfil de temperaturas, se retiran los termopares del sistema, se abre el molde, la pieza es retirada y etiquetada.

e) Se repiten los pasos e, f y g para los espesores de capa sucesivos, obteniendo dos piezas por espesor de pintura.

Caso molde con recubrimiento:

Se repiten los pasos a, b, c y d.

e) El molde se le aplica un espesor de desmoldante en las partes de cierre del molde.

f) La aleación, ya que está a la temperatura requerida, es vaciada en el molde, a través de una cuchara de colecta de aluminio fundido, recubierta con desmoldante.

g) Después que la pieza se solidifica y se obtiene el perfil de temperaturas, se retiran los termopares del sistema, se abre el molde, la pieza es retirada y etiquetada.

e) Se repiten los pasos e, f y g para los espesores de capa sucesivos, obteniendo dos piezas por espesor de recubrimiento.

El proceso de fundición se muestra en la figura 3.2.

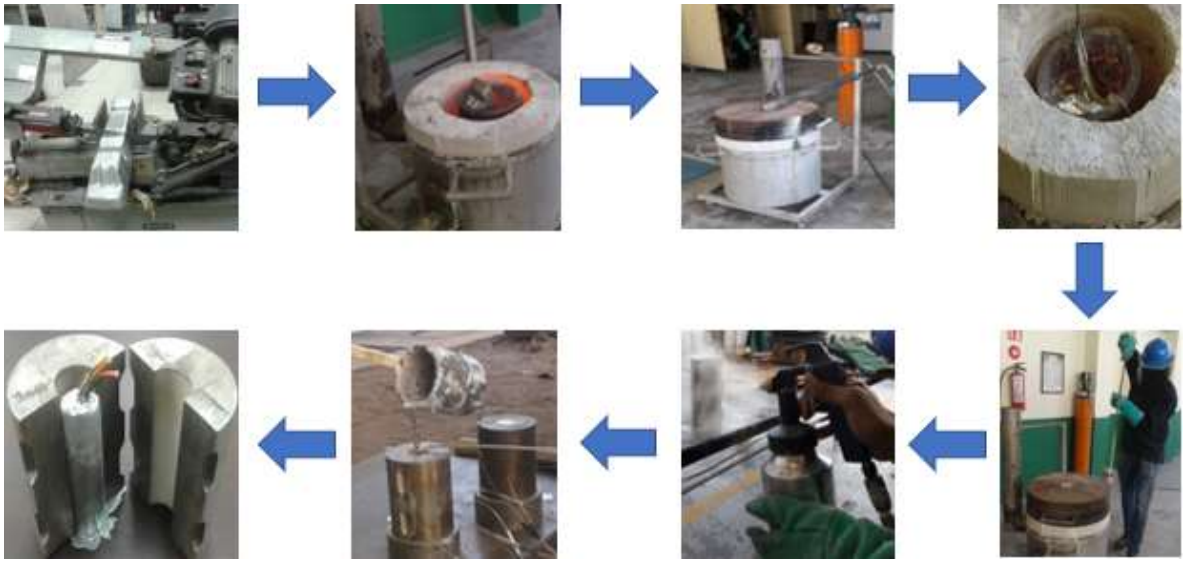


Figura 3.2. Proceso de fundición y vaciado de experimentación.

3.3 Factores críticos en la experimentación.

Los factores que se controlan durante el proceso de experimentación en el vaciado de pieza son los siguientes: tipo de pintura, espesor de pintura, tipo de barrera térmica y su espesor, así como las condiciones de temperatura del vaciado. El espesor de pintura se determinó mediante el agregado de capas las cuales se consideraron de 1, 2, 4, 6 y 8 capas y el tipo de barrera térmica se seleccionaron polvos comerciales y se seleccionó espesores de 380 y 550 micrómetros, dichos materiales especificados en el capítulo 2.

El tiempo de llenado del molde se estableció entre 2-3 segundos.

En resumen, los factores a experimentar en el modelo quedan establecidos como se muestra a continuación:

- Espesor de pintura.
- Espesor de recubrimiento.

3.4 Diseño experimental.

Se selecciona un diseño experimental sencillo y utiliza el tamaño de muestra mínimo. En muchos experimentos interviene el estudio de los efectos de dos o más factores. En general, los diseños factoriales son los más eficientes para este tipo de experimentos, en este caso solo se utilizarán como variable el tipo de recubrimiento y los espesores.

3.5 Aplicación de espesores de la película de pintura.

El espesor de la película de pintura se llevó a cabo por medio de capas, las cuales se llevaron a cabo usando una pistola de gravedad a una presión de 20 psi mostrada en la figura 3.3.

Figura 3.3. Pistola de gravedad utilizada en experimentación.

Se llevó a cabo una prueba a esas condiciones en una placa del mismo material del sustrato con calentamiento en una plancha de resistencia a una temperatura constante de 100°C para la fijación de la película de las pinturas en la placa o en las capas superiores de pintura, con el fin de tomar el espesor añadido por capa, como se muestra en la figura 3.4.

Figura 3.4. Sistema de medición de espesor por capa de pintura.

Se tomaron mediciones después de cada capa aplicada en la placa de ambos lados en tres diferentes alturas parte superior, inferior y media, de las cuales se tomó un promedio obteniendo el espesor por capa y se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Espesor de pintura aplicado por capa con pistola de gravedad pintura WALLACOAT y MICA.

número capas	WALLACOAT espesor (µm)	MICA espesor (µm)
1	16	31
2	37	62
3	57	93
4	78	124
5	99	162
10	203	326
15	307	493
20	411	603
25	515	713
30	619	817
40	827	1010
50	1035	1140

Se obtuvo una regresión lineal de los espesores aplicados, mostrada en la ecuación 20 y 21, para poder aplicarlo al número de capas a selección, por lo tanto, el molde se recubrió por 1, 2, 4, 6, 8 capas y 1, 2, 4 capas respectivamente.

$espesor\ WALLACOAT = ((0.0208\ x\ \#capas) - 0.005)x1000$ Ecuación 20.

$espesor\ MICA = (0.0238\ x\ \#capas) + 0.0584$ Ecuación 21.

3.6 Aplicación de espesores de barrera térmica.

Los espesores de las barreras térmicas se llevaron a cabo mediante las condiciones óptimas de deposición tomadas de bibliografía, las cuales se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Condiciones de rociado térmico óptimas para HVOF y APS [26].

	Rociado térmico		Rociado térmico
Condiciones	HVOF	Condiciones	APS
Distancia de rociado	30 cm	Distancia de rociado	90 cm
Vel. robot	1 m/s	Vel. robot	1 m/s
Oxígeno	150 psi	Argón	100 psi/80SCFH
Propano	90 psi	Hidrógeno	50 psi/15SCFH
A}Aire	100 psi	amperes	600
Depósito	35 gr/min	volts	67
Nitrógeno	150 psi	depósito	25 gr/min

Se uso brazo robótico del tipo KUKA *roboter gmbh* tipo KR15/2, número de serie 742694, modelo 2001, para la deposición química de la barrera térmica, mostrado en la figura 3.5.

Figura 3.5. Robot KUKA usado para la deposición química.

Durante el depósito, la inyección del polvo fue externa y perpendicular al flujo del rociado y paralela a la trayectoria del robot. El robot fue programado para realizar un barrido paralelo al sustrato metálico 10 veces, con flujo de alimentación de 35 g/min, para la capa de enlace y 20 veces, con un flujo de alimentación de 25 gr/min, para la capa cerámica con el objetivo de obtener un espesor considerable para la barrera térmica con un precalentamiento de molde de 300 °C. Después del ajuste de los parámetros para cada polvo a usar ya sea en enlace o cerámica, se llevaron a cabo los procedimientos de acabado del sustrato, mediante un sand blast o granallado con alúmina de tamaño de grado ANSI G20, a una presión de 100 psig, para generar una rugosidad Ra de 5-10 µm y una carga electrostática, protegiendo el área que no sería rociada con cinta. Su preparación después debido a que no se debe de pasar más de dos horas después de su acabado, para llevar el rociado, como se muestra en la figura 3.6.

Figura 3.6. Procedimiento de preparación del sustrato.

Con el ajuste pertinente y teniendo la cantidad de espesor por pasada, se llevó a cabo el recubrimiento y los espesores de barrera térmica obtenidos mediante la deposición por rociado térmico en los moldes son mostrados en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Espesores depositados de la barrera térmica en moldes.

Molde	Cerámico	Enlace	Cerámico	Barrera
1 H-13	8% YSZ	230	155	385
2 H-13	8% YSZ	230	310	540
Hierro gris grado 60	Óxido Magnesio	230	310	540

Los recubrimientos obtenidos se muestran en la figura 3.7.

Figura 3.7. Recubrimiento obtenido por rociado térmico.

3.7 Acabados de pintura y barrera térmica mediante microscopio óptico.

Los acabados obtenidos por ambos medios de aislamiento para la pieza vaciada, fueron analizados por medio de microscopio óptico tipo *stereo* marca Discovery v12, en el Centro de Investigación e Innovación de Ingeniería Aeronáutica (CIIA), como se muestra en la figura 3.8, para poder ver las diferencias entre ellos y poder discretizar los beneficios que brinda cada uno, debido a las diferentes condiciones de deposición del material, así como de sus constituyentes.

Figura 3.8. Equipo usado para obtención de acabados de pintura y barrera térmica.

3.8 Desarrollo de programa para monitorear temperaturas.

Se llevó a cabo un diseño de monitoreo térmico para la captura del historial térmico de cada experimentación, por medio del programa LabVIEW, el cual se muestra en la figura 3.9. Dicho programa fue comprobado mediante la medición

de la temperatura corporal de cada uno de los sensores, con el fin de verificar su funcionalidad, así como la polaridad correspondiente en cada uno de ellos y evitar posibles retrasos en los tiempos de experimentación.

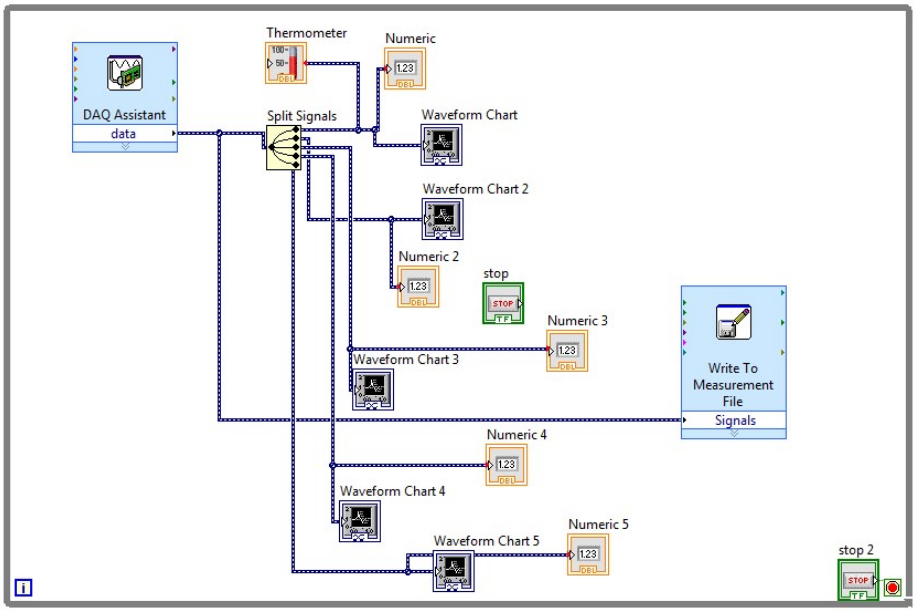


Figura 3.9. Programa de LabVIEW para medición de temperaturas.

3.9 Preparación de carga.

La preparación de la carga para la aleación 356.0 comercial, se llevó a cabo con los cálculos de porcentaje en peso de la tabla 1.5, llevando a cabo los cortes correspondientes, con una cortadora marca *phase II*, modelo MSX712 metal *bandsaw* 7” x 12”, motor 110V, 60Hz, mostrada en la figura 3.10.

Figura 3.10. Cortadora usada en la experimentación.

Los pesos se llevaron a cabo a la composición correspondiente, en una báscula TORREY serie L-EQ, mostrada en la figura 3.11, agregando por último el balance del elemento aluminio.

Figura 3.11. Báscula usada en la experimentación.

3.10. Preparación de la Instrumentación.

Después de tener comprobado el sistema de medición de temperaturas, se procedió a la preparación de la instrumentación, la cual fue mediante termopares

tipo K en dirección radial en cuatro diferentes posiciones del molde, enlazados a la tarjeta de adquisición de national instrument, con ayuda del programa realizado. En el área de experimentación se usaron conectores rápidos, así como una computadora portátil DELL, para ver los gráficos de temperatura versus tiempo del historial arrojado por las solidificaciones de las piezas con diferentes recubrimientos, como lo muestra la figura 3.12.

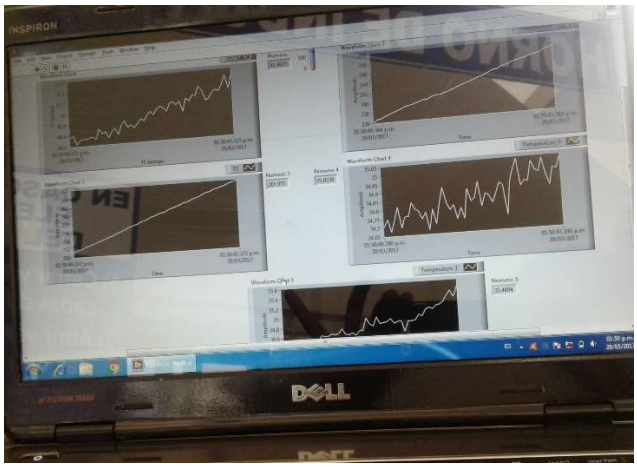


Figura 3.12. Medición de temperatura obtenida por lector de datos tipo DAQ.

3.11. Preparación de la carga en horno.

Se prepara la carga para la fundición de la pieza, en un crisol A-30 de carburo silicio colocado en el horno tipo retorta, usando para la combustión gas butano en correcta proporción con aire a través de un soplador el cual está conectado por un tubo de 2 pulgadas al horno, mostrado en la figura 3.13.

Figura 3.13. Equipo de fundición usado en experimentación.

Se espera el tiempo necesario para la fundición de los componentes, burbujeando nitrógeno durante 15 minutos, con una lanza de grafito, para eliminar el hidrógeno disuelto, como se ilustra en la figura 3.14.

Figura 3.14. Eliminación de hidrógeno disuelto con lanza de grafito.

Seguido se agrega escoriador al metal líquido, para eliminar restos de óxidos, mostrado en la figura 3.15.

Figura 3.15. Eliminación de impurezas.

3.12. Preparación del molde.

Posteriormente se procede al calentamiento y pintado del molde, a las condiciones llevadas a cabo para la obtención de la ecuación 20, en caso del recubrimiento de pintura, en el caso de barrera térmica, solo se procede a su calentamiento. Se prepara el molde ya con la superficie recubierta de pintura o material cerámico, en el área correspondiente, junto con las bayonetas insertadas en el lugar indicado para la toma del historial térmico, mostrado en la figura 3.16.

Figura 3.16. Proceso de pintura y preparación de molde.

3.13. Vaciado del metal líquido

El vaciado dura dentro de 2 a 3 segundo, dentro del orificio del molde de 1 pulgada por 4 pulgadas de largo, y esperando un tiempo de 1 a 2 minutos para la solidificación de la pieza y obtener el historial térmico para su análisis, se retira

el molde con la ayuda de un desarmador plano para obtener la pieza y volver a prepararlo para la siguiente vaciada, como se aprecia en la figura 3.17.

Figura 3.17. Proceso de desmolde para obtención de piezas.

En el caso del molde con recubrimiento se agrega desmoldante en las partes del contacto del molde para un correcto cierre y proceder de la misma forma.

3.14 Captura de datos de historial térmico durante experimentación.

La captura de datos se lleva mediante el tipo de formato arrojado por el receptor de datos o lector de termopares tipo DAQ, se recibían datos en lapsos de 0.1 segundos, para poder tener un mejor rango en los historiales térmicos obtenidos, los cuales se obtienen en tipo de archivo LVM y se leen a través del block de notas, como se muestra en la siguiente figura 3.18.

Y_Unit_Label	Deg C	Deg C	Deg C	Deg C	Deg C	
X_Dimension	Time	Time	Time	Time	Time	
X0	0.0000000000000000E+0	0.0000000000000000E+0		0.0000000000000000E+0		
Delta_X	0.100000	0.100000	0.100000		0.100000	
End_of_Header						
X_Value T1	X_Value T2	X_Value Temperature	X_Value Temperature_0		X_Value Temperature_1	
0.000000	23.688749	0.000000	23.308341	0.000000	23.270686	0.000000
0.100000	23.554322	0.100000	23.304628	0.100000	23.179644	0.100000
0.200000	23.523762	0.200000	23.235019	0.200000	23.080453	0.200000
0.300000	23.543805	0.300000	23.248829	0.300000	23.123146	0.300000
0.400000	23.662611	0.400000	23.330476	0.400000	23.190016	0.400000
0.500000	23.511937	0.500000	23.134473	0.500000	23.097505	0.500000
0.600000	23.532800	0.600000	23.153495	0.600000	23.196467	0.600000
0.700000	23.520521	0.700000	23.311709	0.700000	23.191809	0.700000
0.800000	23.551853	0.800000	23.108555	0.800000	23.099544	0.800000
0.900000	23.523361	0.900000	23.098305	0.900000	23.101539	0.900000
1.000000	23.479104	1.000000	23.244641	1.000000	23.181570	1.000000
1.100000	23.608173	1.100000	23.222424	1.100000	23.273711	1.100000
1.200000	23.655096	1.200000	23.253192	1.200000	23.190122	1.200000
1.300000	23.731992	1.300000	23.202825	1.300000	23.116185	1.300000
1.400000	23.546053	1.400000	23.104370	1.400000	23.059545	1.400000
1.500000	23.693002	1.500000	23.346785	1.500000	23.203787	1.500000
1.600000	23.735621	1.600000	23.269988	1.600000	23.244345	1.600000

Figura 3.18. Captura de datos de historial térmico de enfriamiento.

3.15 Preparación de las muestras para caracterización.

Las muestras fueron seleccionadas de manera representativas del total de cantidad de piezas obtenidas durante la experimentación, como se muestra en la figura 3.19, para tratar de disminuir el tiempo de análisis debido a su preparación para poder ser analizadas, así como el tiempo para obtener las microestructuras.

Figura 3.19. Probetas de las piezas obtenidas durante la experimentación.

Las piezas representativas de cada corrida experimental fueron preparados para inspección metalográfica con la finalidad de conocer el efecto de los espesores de pintura y de barrera térmica, checando el perfil de solidificación, así como la

microestructura obtenida de cada una, en diferentes zonas del área de la pieza, mediante el uso de SEM y EDXS. Todas las muestras de cada corrida experimental fueron cortadas de manera transversal. Todas las caras de la pieza donde se llevó a cabo el corte, se realizó el desbaste con una pulidora struers usando lijas de carburo de silicio de los grados 320, 500, 800, 1200, y 2400. En cada cambio de lija, la pieza se rotó 90º para obtener un mejor resultado en el desbaste. El desbaste se llevó a cabo con una velocidad de 300 rpm; posteriormente se le dio un acabado a espejo utilizando paño y pasta de diamante, como se muestra en la figura 3.20

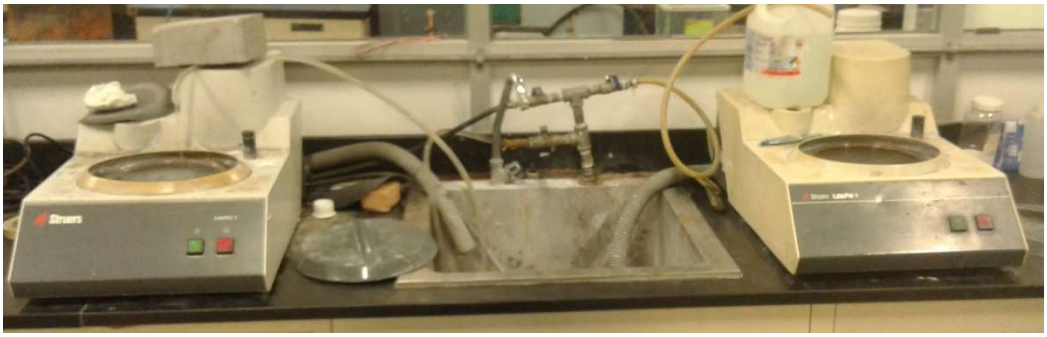


Figura 3.20. Pulidora utilizada para el desbaste y acabado espejo.

Las piezas fueron analizadas por medio de un equipo JEOL JSM-6510LV, como se muestra en la figura 3.21, obteniendo sus microestructuras, composiciones puntuales, así como mapeos de elementos constituyentes en la pieza vaciada.

Figura 3.21. Equipo utilizado para análisis de las piezas vaciadas.

3.16 Modelación numérica.

La modelación numérica, tiene como primordial tarea, simular el llenado y ciclos de una pieza real de aleación de aluminio, en condiciones de operación. Para conseguir esto, es necesario tener bien establecidos varios parámetros, propiedades, condiciones de frontera y de operación. Las propiedades termo físicas de la aleación 356.0 fueron tomadas de la base de datos del software. Las condiciones de frontera, especialmente el coeficiente de transferencia de calor metal-molde, son particularmente difíciles de obtener. De hecho, los experimentos realizados anteriormente nos proporcionan la historia térmica del sistema de enfriamiento para calcular el coeficiente de transferencia de calor para los diferentes recubrimientos utilizados. Para obtener este valor y validar simultáneamente el código se utilizó un modelo físico de geometría sencilla para solidificar la aleación. La utilización de esta geometría simplifica los cálculos al considerar que el calor es extraído únicamente de manera radial. Esto facilitó también la instrumentación posterior para la validación del modelo, pues permitió utilizar termopares para obtener las historias térmicas.

De esta manera, los objetivos de la modelación numérica fueron los siguientes:

- Simular el llenado de la pieza real de fundición.
- Determinar el coeficiente de transferencia de calor en la interfase metal-molde haciendo uso del método inverso y los historiales térmicos
- Validar los resultados del método inverso, comparando el ajuste de las historias térmicas de la simulación con respecto a las experimentales.

Las simulaciones del proceso se realizaron con el paquete de simulación ProCAST. Este paquete resuelve las ecuaciones de conservación utilizando el método de elementos finitos. Para definir un modelo se deben realizar los pasos siguientes:

1. Definición del problema.
2. Desarrollar la geometría del problema como modelos de CAD.
3. Realizar el mallado mediante el programa MeshCAST.
4. Analizar la malla por posibles incongruencias (Jacobianos negativos, elementos erróneos, nodos abiertos) y corregirlas.
5. Asignar las propiedades del molde mediante el programa PreCAST.
6. Asignar las propiedades de la aleación correspondiente.
7. Marcar la interface fluido-molde y asignarle condiciones de frontera.
8. Definir condiciones de frontera (enfriamiento por convección natural, entrada de material)
9. Definir las condiciones iníciales.
10. Asignar las condiciones globales del problema.
11. Activar las ecuaciones y modelos a resolver.
12. Fijar las opciones de solución (i. e. tamaño del paso de tiempo, ajustes de convergencia, etc.)

13. Resolver el caso mediante ProCAST
14. Analizar los resultados con ViewCAST.
15. Exportar datos nodales con PostCAST.

Tabla 3.4. Descripción de elementos en software ProCAST.

Nombre del módulo	Descripción
MeshCAST	Realiza el mallado computacional de elementos finitos.
PreCAST	Se utiliza para fijar las condiciones de la simulación (propiedades de materiales, condiciones de frontera, ecuaciones a resolver)
ProCAST	Resuelve el modelo introducido.
ProSTATUS	Provee datos sobre el estado de la corrida actual (% de llenado, % de solidificación, número de pasos).
ViewCAST	Muestra los resultados gráficamente.
PostCAST	Permite analizar nodo a nodo los resultados obtenidos.

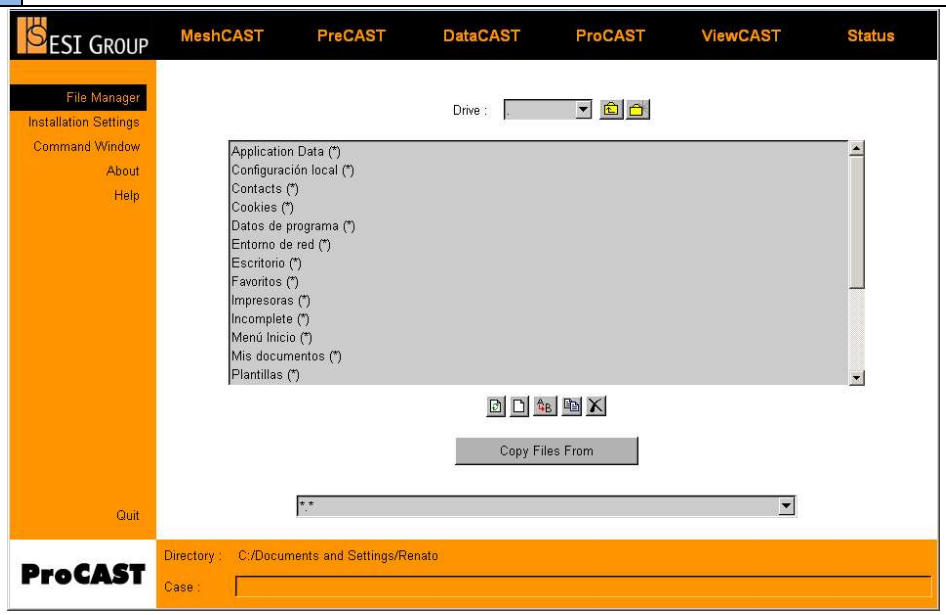


Figura 3.22. Entrada principal del software ProCAST.

Las simulaciones de ProCAST fueron corridas en una computadora con las características adecuadas, ya que consume una gran cantidad de espacio, por tal se llevó en una computadora con doble procesador, con 2 GB de RAM y 120 GB de disco duro.

3.17. Geometría y mallado.

Como primer paso es definir las geometrías involucradas para el análisis. Para esto se generan los modelos utilizando un programa de diseño asistido por computadora (CAD), en la figura 3.23 se muestran los componentes.

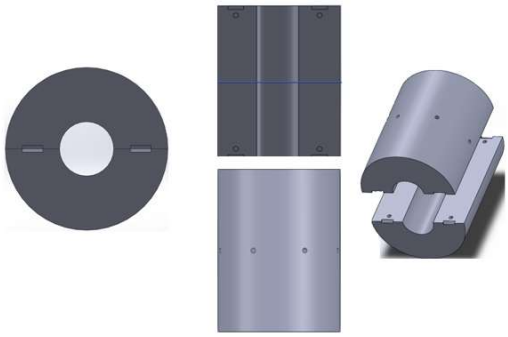


Figura 3.23. Componentes del molde en CAD.

Se determinó que el modelo puede ser representado haciendo uso de la simetría que ésta presenta, así, el tiempo de procesamiento puede disminuirse al reducir la cantidad de elementos necesarios para describir el modelo, como se aprecia en la figura 3.23. Es muy importante establecer el tamaño de malla a utilizar, un mallado muy fino reduce el error numérico en los resultados, pero incrementa el tiempo de cálculo en el computador, en el caso de un tamaño de malla muy grueso aumenta el error numérico y disminuye el tiempo de cálculo. En este caso los componentes más importantes para estimar los coeficientes de transferencia de calor son las dos partes del superiores del molde, por lo que se aplicó un mallado fino en ambos componentes con la finalidad de reducir el error numérico

en los resultados. La generación del mallado se realiza en el módulo MeshCAST, el cual es capaz de leer diferentes formatos de archivos CAD, en este caso se utilizaron los archivos con una extensión *.sldprt. En la figura 3.24 se muestran los mallados de cada componente del molde.

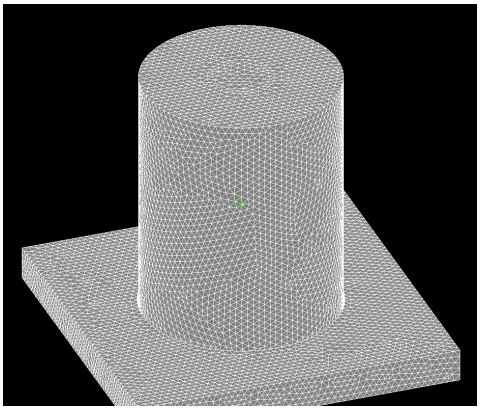


Figura 3.24. Mallado de los componentes del molde en MeshCAST.

3.18. Condiciones iniciales y frontera.

Una vez generadas las mallas, el siguiente paso es acoplar todos los componentes. Para realizar el ensamble se requiere utilizar el módulo PreCAST. Esté módulo cuenta con una barra de herramientas la cual permite localizar los archivos generados en el mallado de los componentes. En la figura 3.25, se muestra el sistema ensamblado listo para declarar las condiciones iníciales y de frontera.

Figura 3.25. Condiciones iniciales en molde PreCAST.

Las propiedades termo físicas de los materiales fueron obtenidas de la base de datos de ProCAST, para las propiedades termo físicas del material refractario se tomaron de bibliografía de la tabla 1.10 y las condiciones de frontera utilizadas en las simulaciones se presentan en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Condiciones frontera de molde.

Condiciones de frontera	Valor
Área de entrada in^2	0.15
Área de pared de pieza in^2	12.57
Área exterior de molde in^2	71.72
Temperatura del metal (ºC)	700
Temperatura de aire (ºC)	20 convección Natural

El enfriamiento del molde por convección natural fue obtenido de la base de datos de ProCAST de la BC tipo 1 (aire a 20ºC, 10 W/m2K) y el valor inicial del coeficiente de transferencia de calor usado para las simulaciones numéricas fue de 2000 W/m2K basado en la bibliografía compilada, como se muestra en la figura 3.25, la interfase del tipo coincidente entre los materiales y convección interior (wall) sin condición. Las condiciones frontera pueden observarse en la figura 3.26.

Figura 3.26. Condiciones frontera en molde PreCAST.

Como se trata de un proceso de *die casting*, el proceso es llevado a cabo por gravedad, se tiene que ajustar en las coordenadas este parámetro agregando en la coordenada Z el valor de la gravedad como lo muestra la figura 3.27.

Figura 3.27. Condición constante por *die casting* en PreCAST.

3.19. Simulación de llenado.

La simulación de llenado en el molde, se realizó comparando los tiempos de llenado en los experimentos. El llenado fue realizado por el centro del molde en un área de 0.15 pulgadas cuadradas, con una alimentación de $3.9X10^{-3}$ Kg/segundo a 700°C, para observar la manera en la que ocurre.

Se ajustan los parámetros de corrida y se selecciona la casilla mostrada en la figura 3.28.

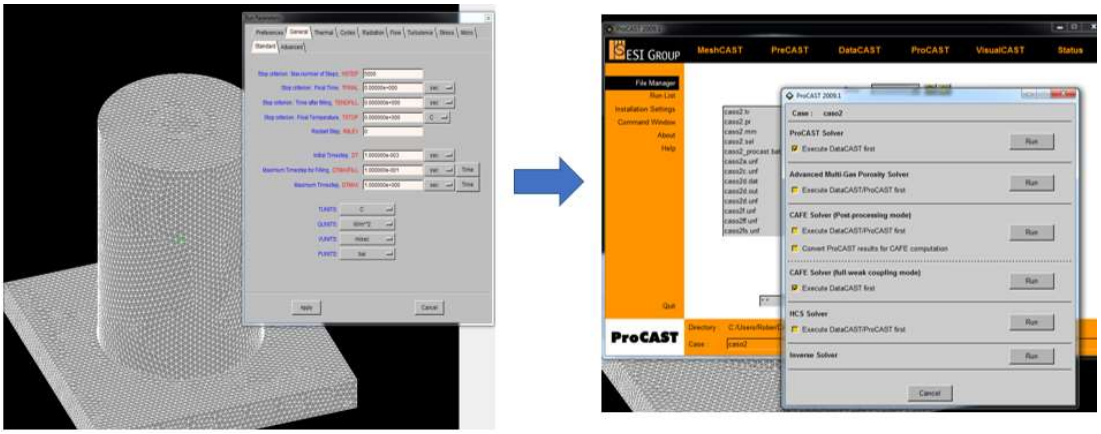


Figura 3.28 Parámetros y activación de simulación en PreCAST.

Capítulo 4 Análisis de resultados y discusión.

4.1 Acabados de pintura.

Los acabados obtenidos por la pintura base silicio/alúmina muestran poca porosidad presente en la superficie, un acabado uniforme.

Se obtuvieron diferentes imágenes a diferentes tamaños de lentes como 8x, 40x, 60x y 80x como se aprecia en la figura 4.1.

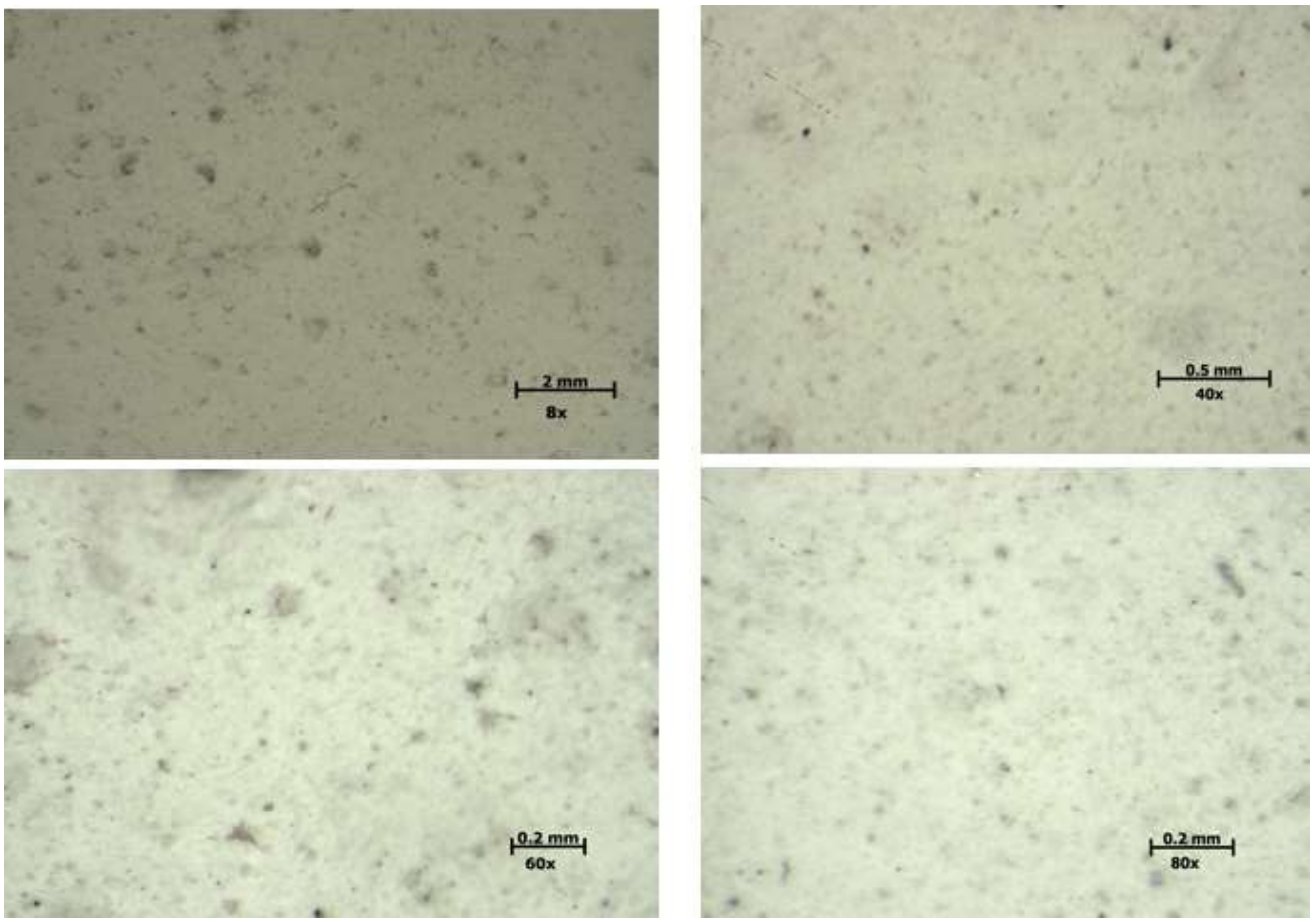


Figura 4.1. Acabado de deposición de pintura base silicio/alúmina.

Los acabados obtenidos por la pintura de mica, muestran una porosidad presente en la superficie, mayor a la otra pintura y un acabado menos uniforme, así como, su textura. Se obtuvieron diferentes imágenes a diferentes tamaños de lentes como 8x, 40x, 60x y 70x como se aprecia en la figura 4.2.

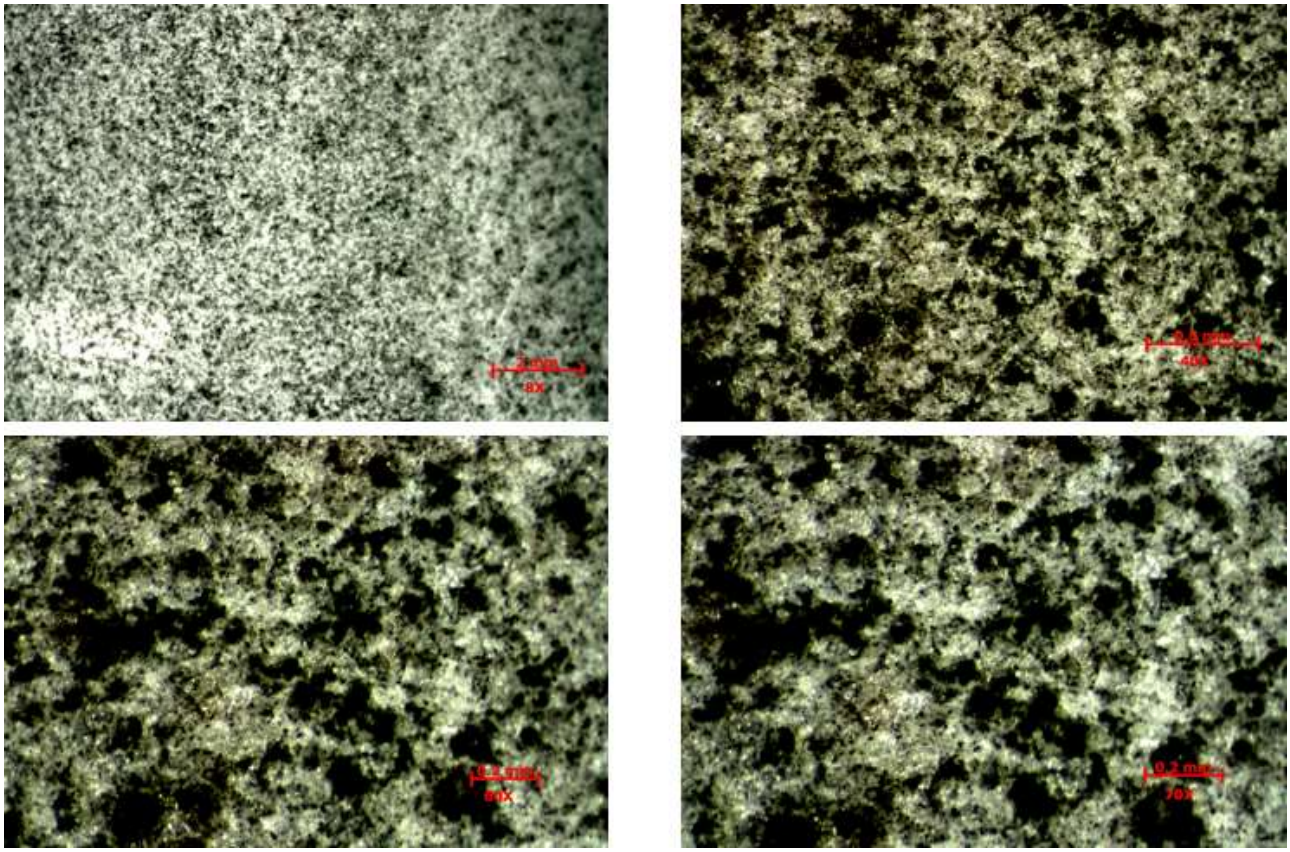


Figura 4.2. Acabado de deposición de pintura mica.

4.2 Acabados de barrera térmica.

Los acabados superficiales obtenidos por medio de rociado térmico de polvo cerámico de zirconia estabilizada con 8% ytria , a condiciones optimizadas obtenidas de bibliografía, se muestran en la figura 4.3, donde se aprecia un acabado más uniforme, con una superficie cristalina, debido a que la zirconia

estabilizada se presenta en su forma cúbica y tetragonal, los huecos presentes se deben a que en la zirconia se presentan algunas vacancias, las cuales le dan la propiedad de bajo conductor de calor, otorgando una pérdida de calor menos brusca a la pieza vaciada.

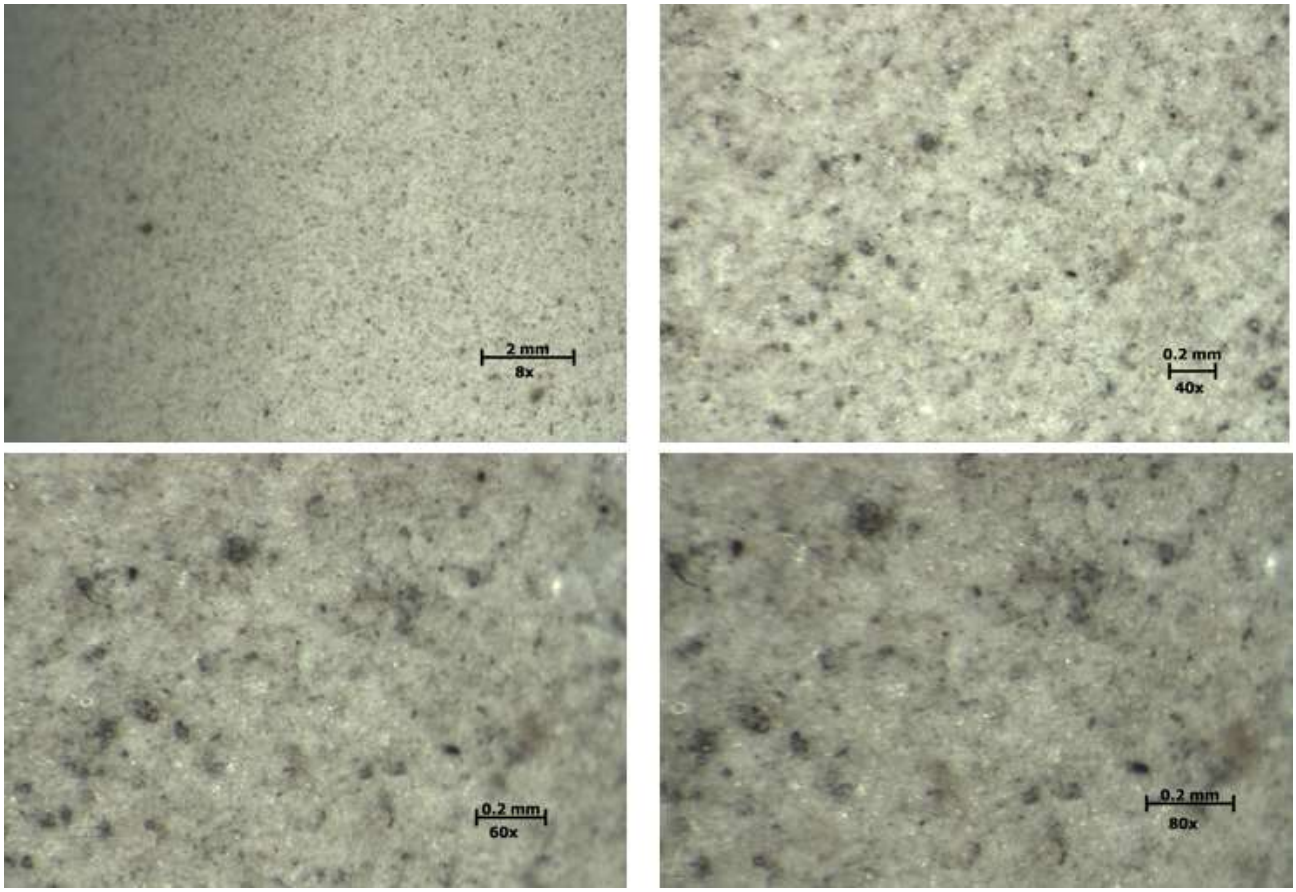


Figura 4.3. Acabado superficial de recubrimiento Zirconia estabilizado con 8% Itria.

Los acabados superficiales obtenidos por medio de rociado térmico de polvo cerámico de óxido de magnesio, a las mismas condiciones optimizadas obtenidas

de bibliografía, se muestran en la figura 4.4, donde se aprecia una estructura con más huecos presentes en la superficie, debido a las características del magnesio.

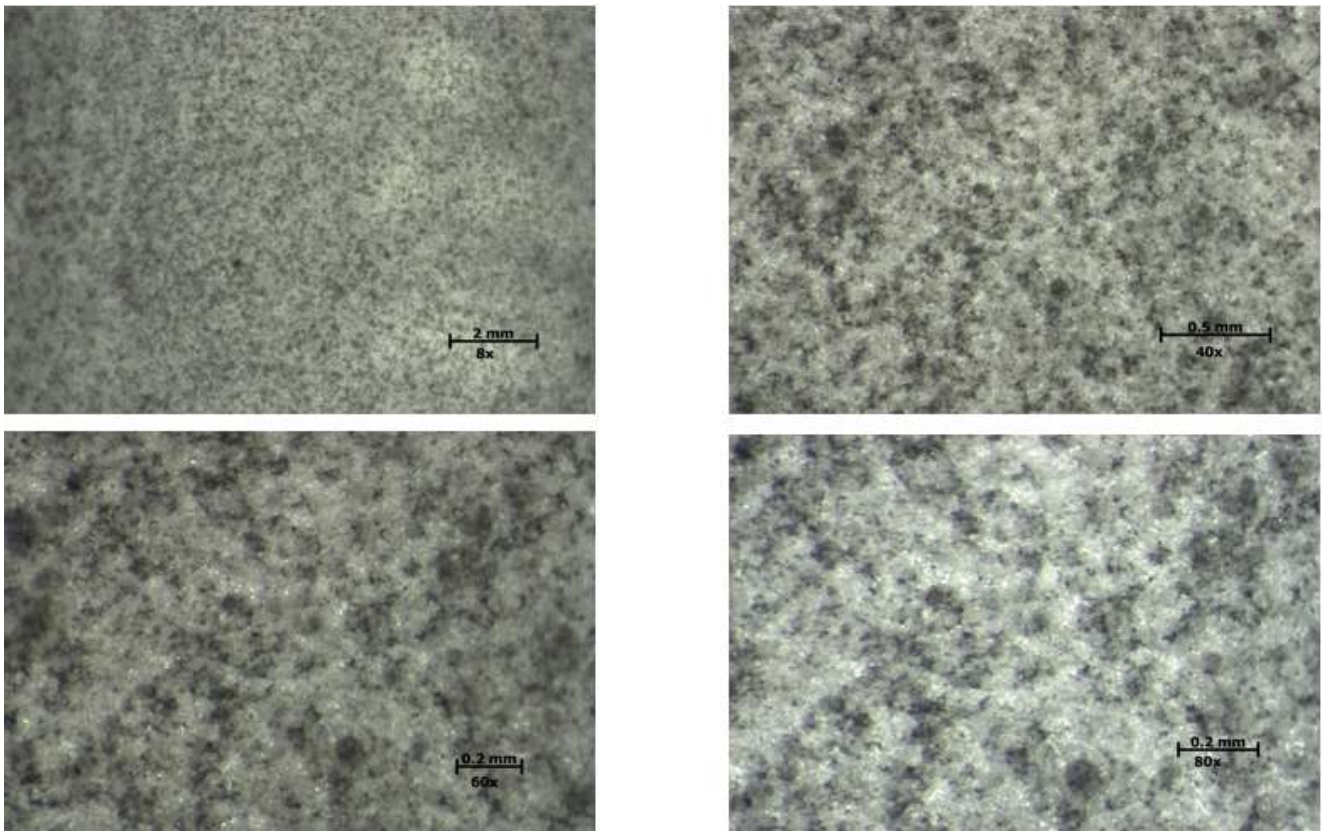


Figura 4.4. Acabado superficial de recubrimiento de óxido de magnesio

4.3 Microestructuras obtenidas con pintura.

Las microestructuras obtenidas fueron de dos pinturas diferentes, una es base de vermiculita y la otra es base silicio/alúmina, de las experimentaciones correspondientes se obtuvieron dos muestras características de cada colada con dicho recubrimiento, con el fin de verificar las condiciones brindadas por diferentes tipos de pinturas con espesores iguales, para después compararlo con el de una barrera térmica. De forma similar se obtuvieron mapeos por medios de

EDXs a una magnificación de 1000x a 20eV, para diferenciar los elementos presentes en las microestructuras.

Las microestructuras correspondientes a la pieza con una magnificación de 50X, 500X y 1000X, sin ningún recubrimiento tan sólo grafito como desmoldante, son mostradas en la figura 4.5.

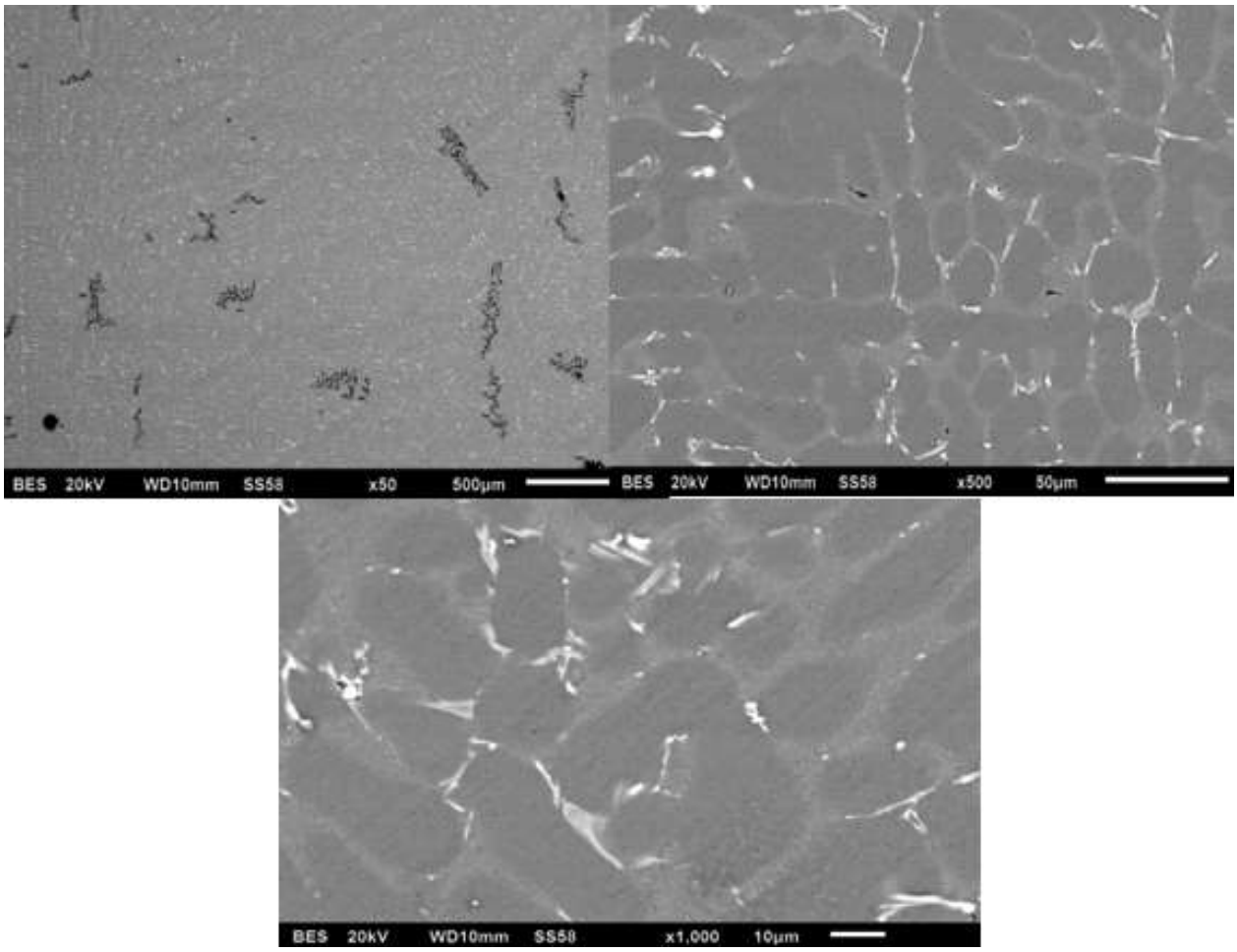


Figura 4.5. Microestructura de molde H-13, sin recubrimiento.

Como se aprecia en las microestructuras, se percibe un enfriamiento rápido debido al tamaño de la formación de la fase α-aluminio.

Las microestructuras correspondientes a la pintura de mica base vermiculita con un espesor de 124 µm correspondiente a 4 capas se muestran en la figura 4.6.

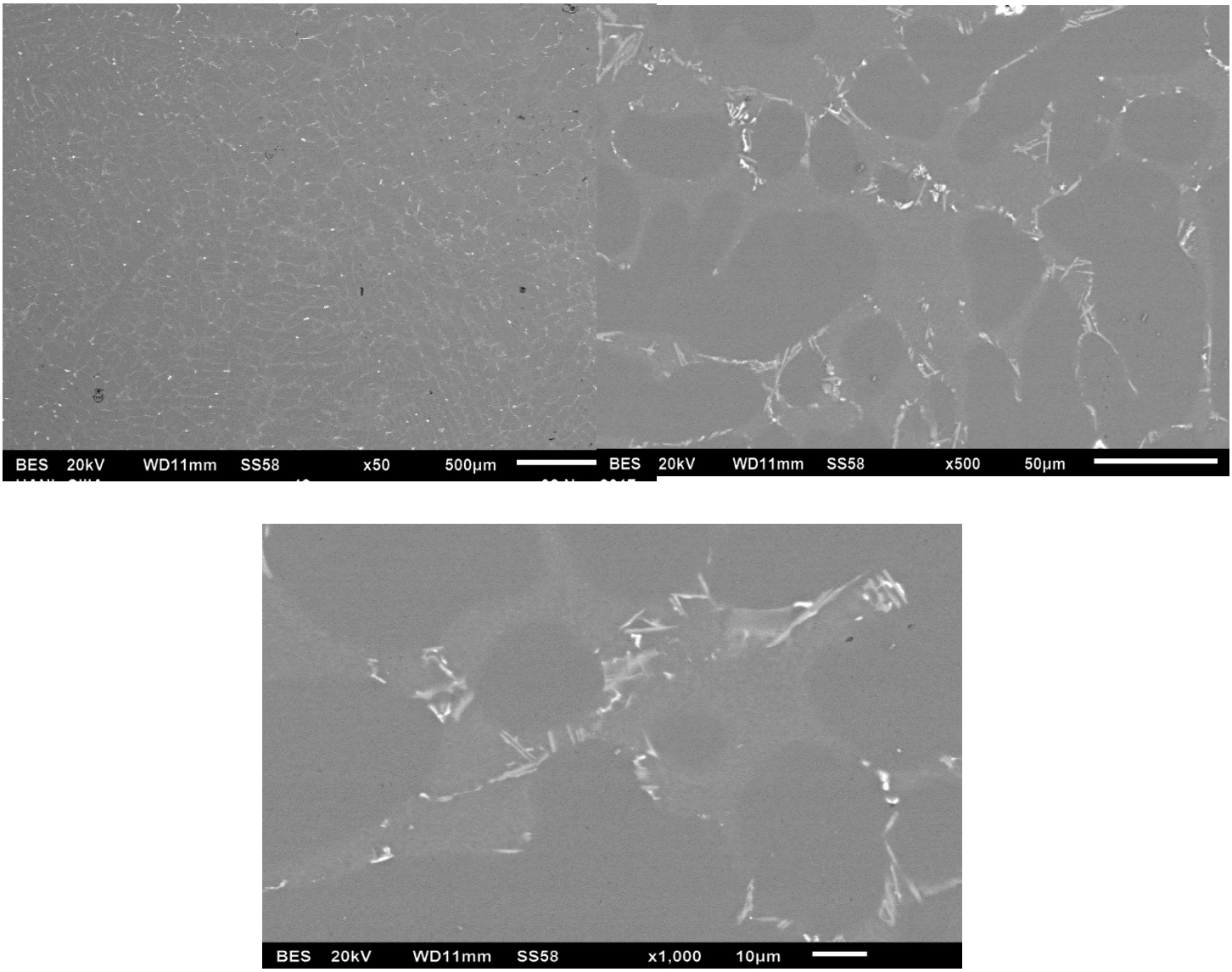


Figura 4.6. Microestructura de molde H-13, con pintura de mica 124µm.

Como se aprecia en las microestructuras, se logra percibir una estructura fibrosa, con silicio presente en la zona Inter dendrítica, lo cual habla de una disminución de enfriamiento en las piezas vaciadas.

Las microestructuras correspondientes a la pintura base de silicio/alúmina se llevaron a cabo en diferentes tipos de moldes uno de material H-13 y el otro de hierro gris grado 60 con espesores iguales de 162 µm correspondiente a 8 capas y se muestran en las figuras 4.7 y 4.8, respectivamente.

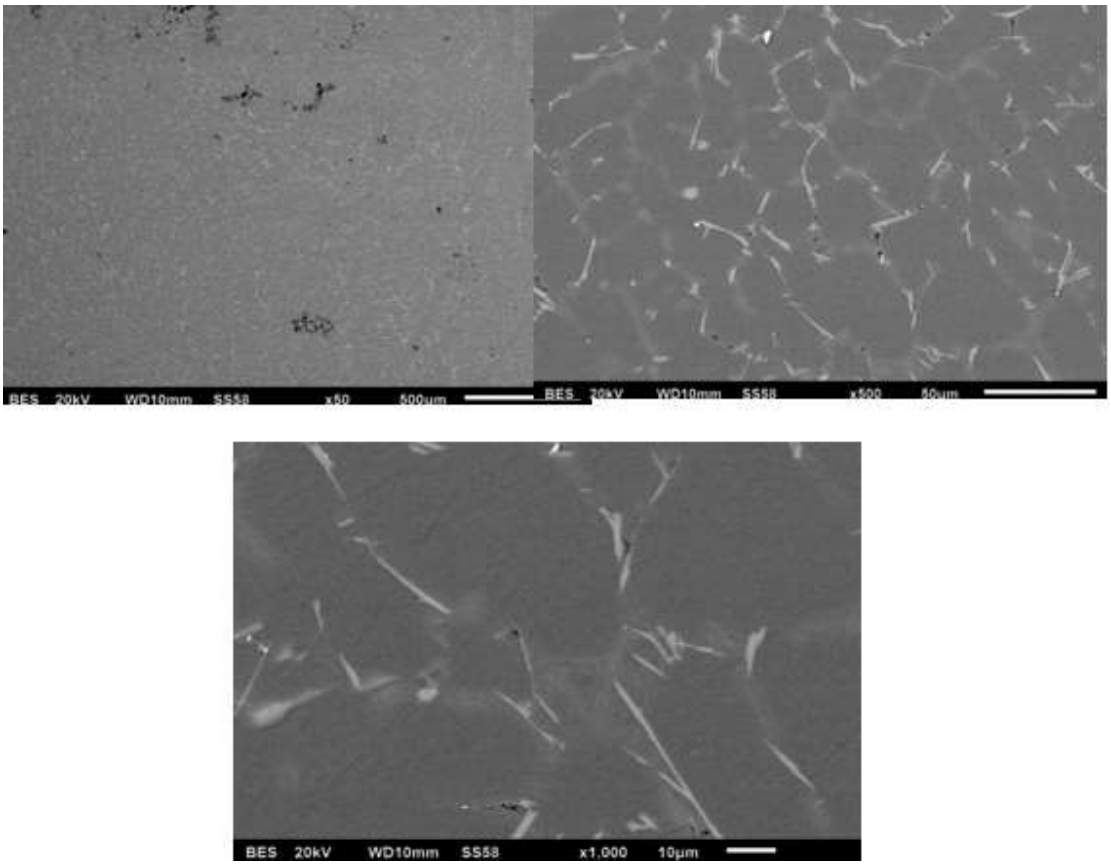


Figura 4.7. Microestructura molde H-13, con pintura base sílice/alúmina con 162 µm.

Se logra apreciar una mayor cantidad de silicio en la zona Inter dendrítica y una formación de fase α-aluminio un poco mayor a las recubiertas con mica, por lo tanto, se enfrió de una forma más lenta.

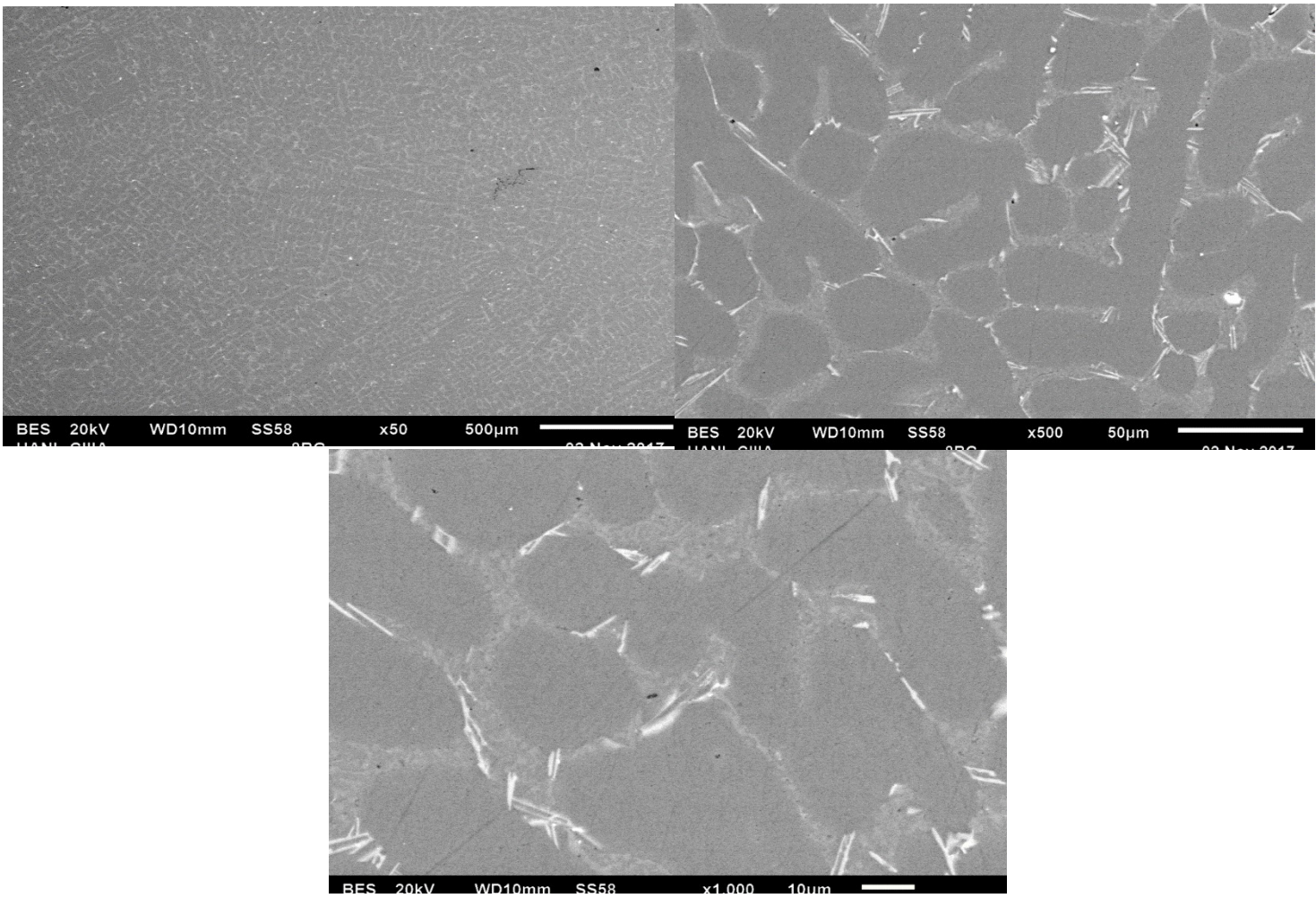


Figura 4.8. Microestructura de molde Hierro gris grado 60, con pintura base sílice/alúmina 162 µm.

Se aprecia que se tuvo un enfriamiento más rápido que el molde de H-13, al tener el mismo espesor de pintura refractaria.

Los mapeos muestran los elementos existentes mostrados en las microestructuras, se llevan a cabo por medio de EDXs, en este caso, se obtuvieron mapeos y análisis puntuales, con el fin de ver los elementos presentes en las diferentes estructuras obtenidas de la pieza vaciada por los diferentes medios de recubrimientos utilizados, en la figura 4.9 se muestran los mapeos correspondientes a molde H-13 sin recubrimiento y con pintura mica con un espesor de 124 µm.

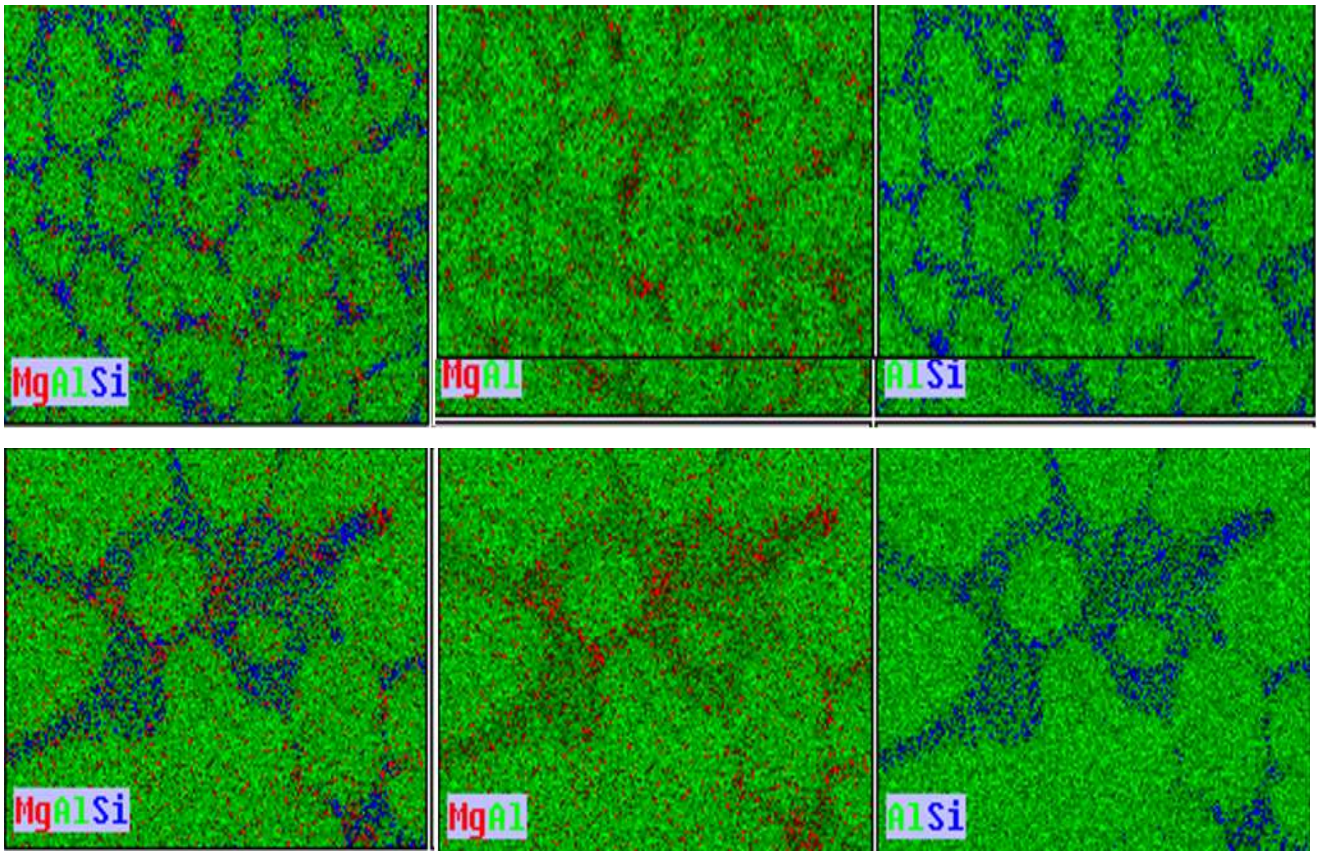


Figura 4.9. Mapeo de microestructura de molde H-13, grafito y 124 µm de espesor de mica, respectivamente.

Los mapeos correspondientes al molde de H-13 y hierro gris grado 60, son mostrados en la 4.10, utilizando pintura de base silicio/alúmina con un espesor de 162 µm.

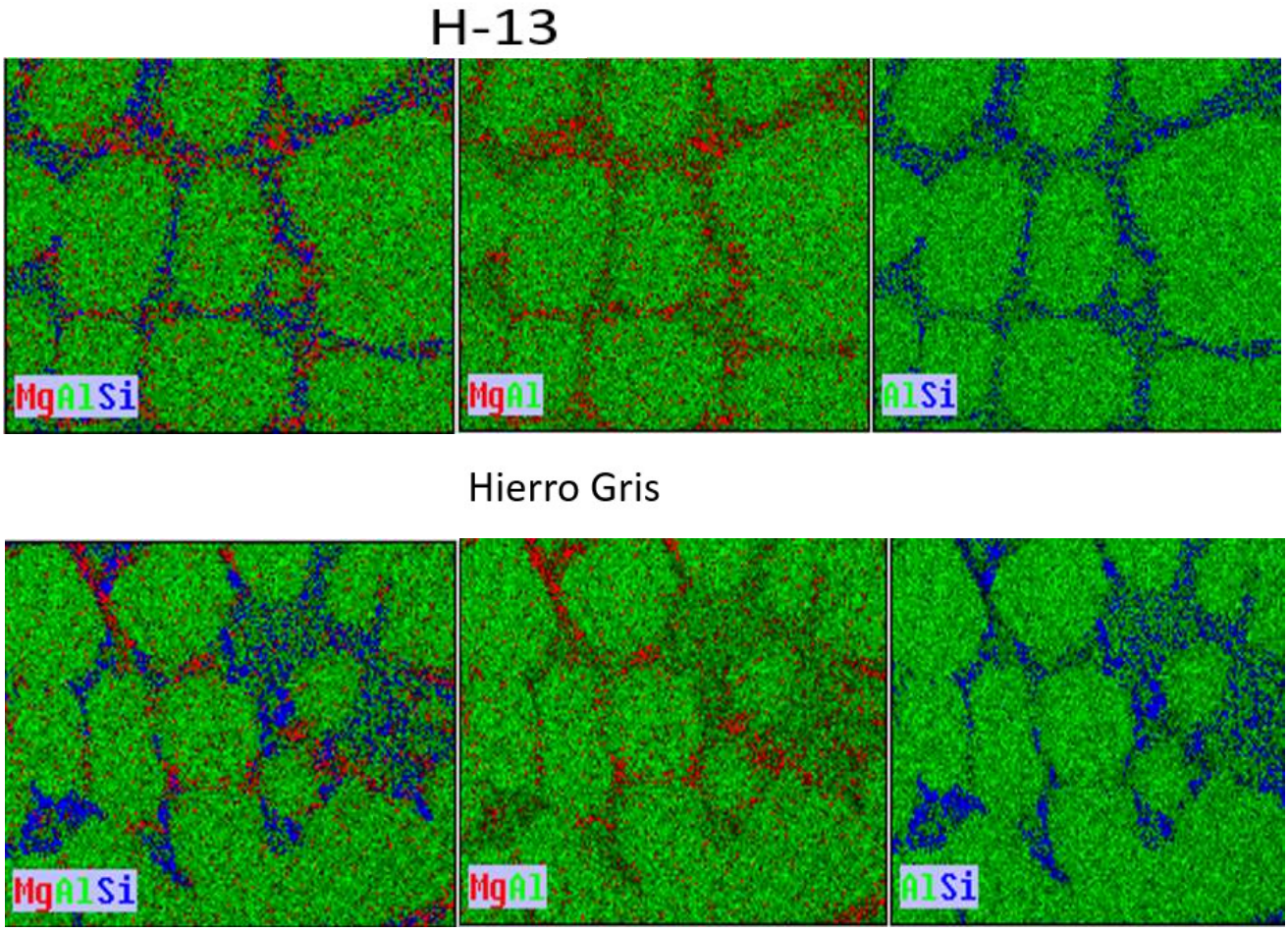
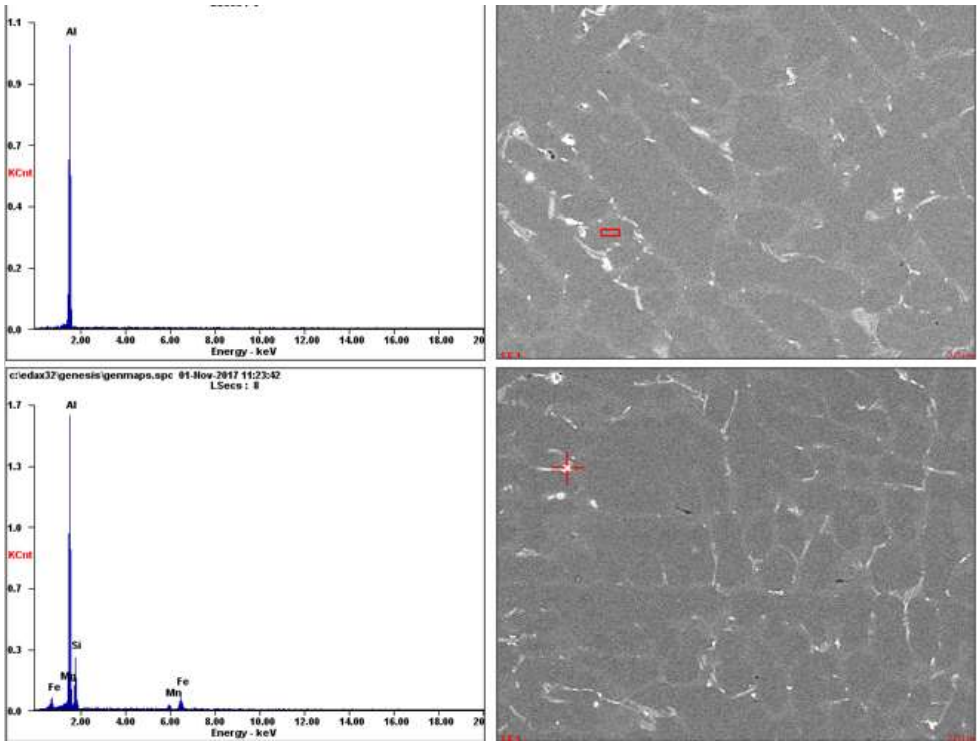


Figura 4.10. Mapeo de microestructura de molde H-13 y hierro gris grado 60, con pintura base silicio/alúmina con un espesor de 162 µm.

Haciendo un análisis para todas las pinturas de los mapeos estructurales, usando las figuras 4.9 y 4.10, se logra apreciar que los contenidos de silicio aumentan conforme se controla la pérdida de calor del molde mediante el aumento de la

capa de pintura en el interior del molde, por lo cual se llevó a cabo análisis puntuales en ciertas zonas.

En los análisis puntuales, se muestra, en el molde de H-13 sin recubrimiento, que existe la presencia de Manganeso, silicio y magnesio alrededor de la fase α-aluminio, así como, hierro como impureza presente en este tipo de aleaciones, como se muestra en la figura 4.11.

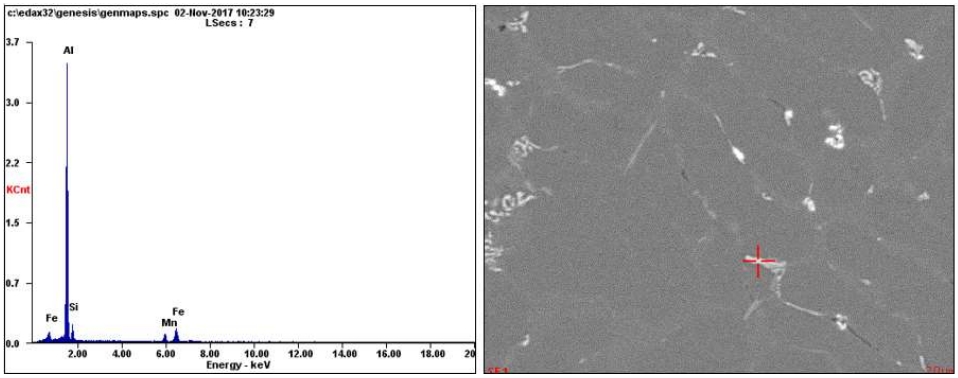


Element	Wt%	At%
AlK	100.00	100.00
Matrix	Correction	ZAF

Element	Wt%	At%
MgK	01.17	01.43
AlK	62.65	68.59
SiK	20.69	21.76
MnK	04.28	02.30
FeK	11.21	05.93
Matrix	Correction	ZAF

Figura 4.11. Análisis puntual en microestructura molde H-13, sin pintura.

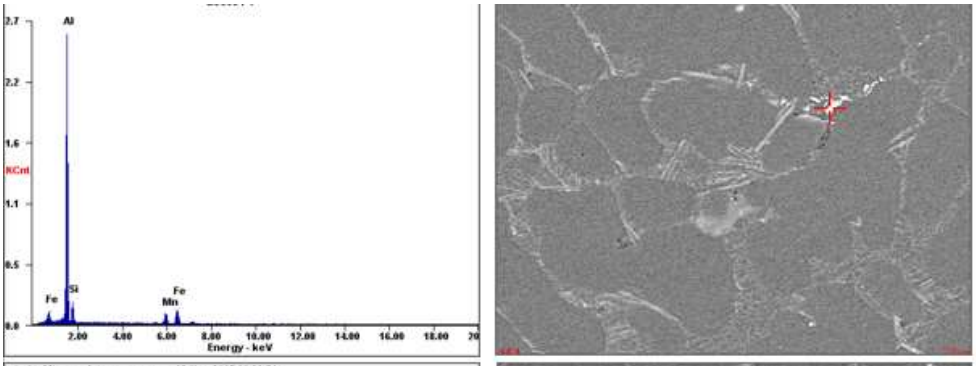
Lo cual también se presenta en la microestructura obtenida de H-13 con pintura de mica con un espesor de 124 µm, como se muestra en la figura 4.12.



Element	Wt%	At%
AlK	70.31	79.43
SiK	07.99	08.67
MnK	07.17	03.98
FeK	14.53	07.93
Matrix	Correction	ZAF

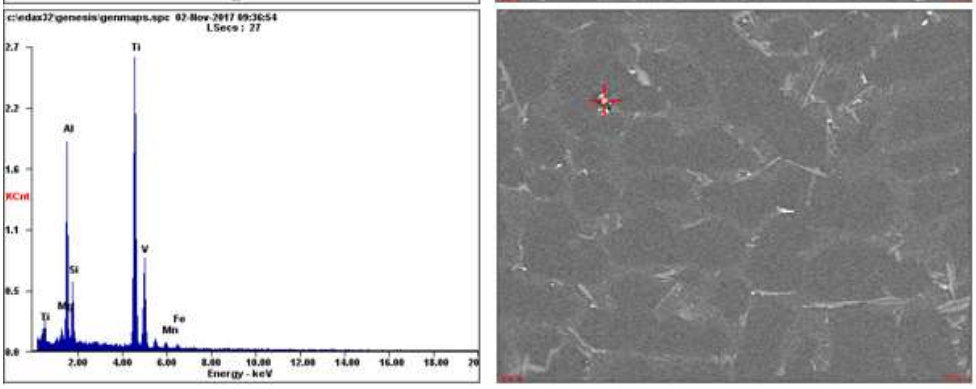
Figura 4.12. Análisis puntual en microestructura molde H-13, con 124 µm de espesor de mica.

Para los casos de H-13 y hierro gris grado 60 con pintura base silicio/alúmina con un espesor de 162 µm, los análisis puntuales son mostrados en la figura 4.13.



Element	Wt%	At%
AlK	65.19	74.99
SiK	10.14	11.21
MnK	09.89	05.59
FeK	14.77	08.21
Matrix	Correction	ZAF

H-13



Element	Wt%	At%
MgK	01.14	01.85
AlK	21.00	30.79
SiK	07.02	09.89
TiK	54.53	45.03
VK	12.64	09.81
MnK	02.09	01.50
FeK	01.58	01.12
Matrix	Correction	ZAF

Hierro Gris

Figura 4.13. Análisis puntual en microestructura molde H-13 y Hierro Gris grado 60 con pintura base silicio/alúmina con un espesor de 162 µm.

4.4 Microestructuras obtenidas por barrera térmica.

Las microestructuras obtenidas por medio del molde de H-13 con barrera térmica mediante deposición por rociado térmico se obtuvieron mediante dos espesores de barrera térmica de YZS al 8%, 385 µm y 540 µm, respectivamente; para el molde de hierro gris grado 60, se obtuvo por medio de otro tipo de material cerámico que es el óxido de magnesio, de mismo espesor usado en el H-13 correspondiente 540 µm. Las microestructuras obtenidas para el molde con barrera térmica de YSZ al 8% con un espesor de 385 µm, se muestran en la figura 4.14.

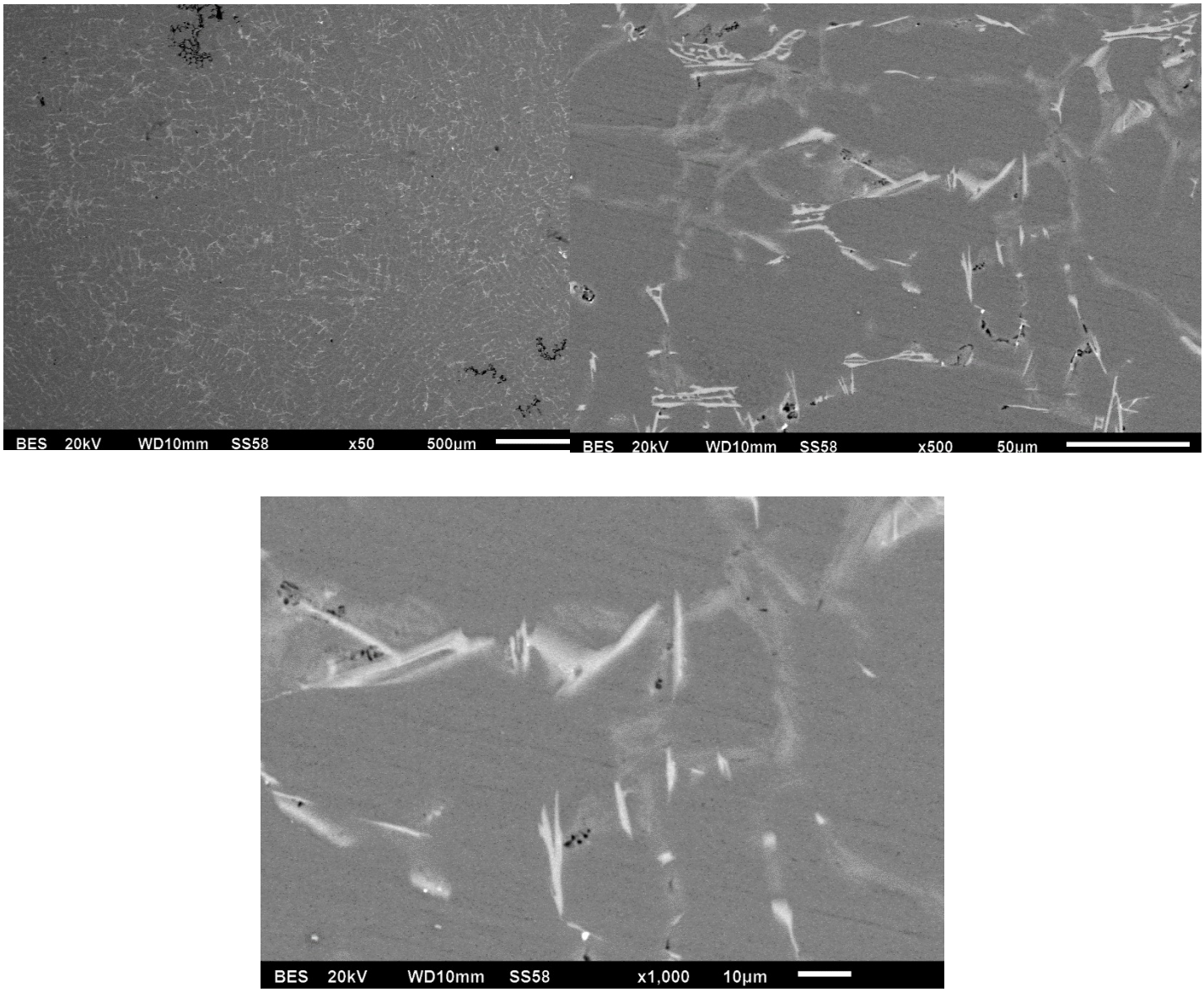


Figura 4.14. Microestructura molde H-13 con barrera térmica YSZ al 8% con un espesor de 385 µm.

Se aprecia una formación de fase α-aluminio mayor, así como, una mayor micro segregación, junto con el incremento de eutéctico de silicio en la región Inter dendrítica, dando lugar a un grado de menor enfriamiento de la pieza vaciada.

Las microestructuras obtenidas para el molde con una barrera térmica de YSZ al 8% de 540 µm de espesor, se muestran en la figura 4.15.

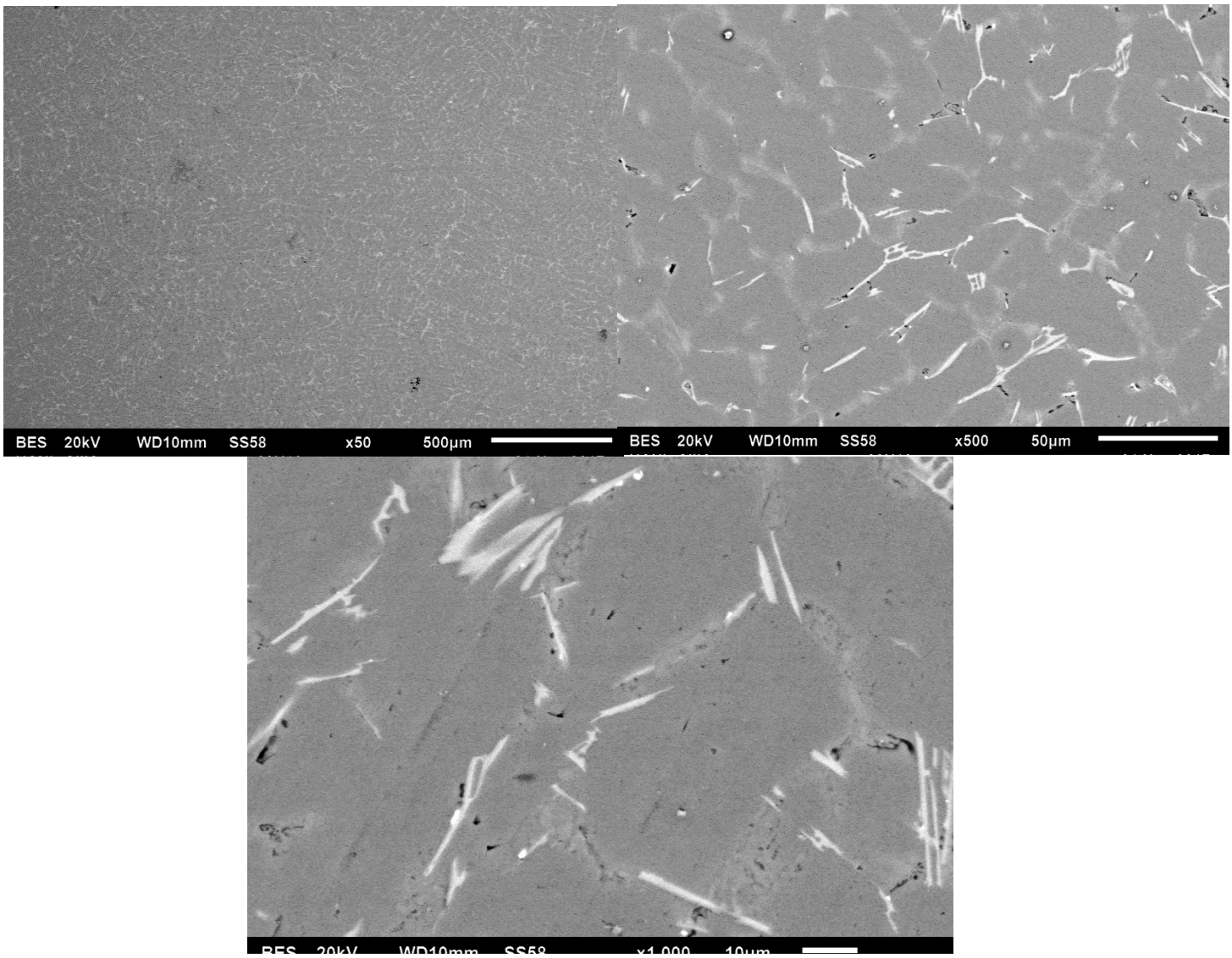


Figura 4.15. Microestructura molde H-13 con barrera térmica YSZ al 8% con un espesor de 540 μm.

Se logra apreciar en la región Inter dendrítica el eutéctico del silicio, al igual que el tamaño de formación de la fase α-aluminio es algo pequeño favoreciendo haber presentado un enfriamiento rápido.

Las microestructuras obtenidas para el recubrimiento de la barrera térmica de óxido de magnesio con un espesor de 540 µm, se muestran en la figura 4.1.

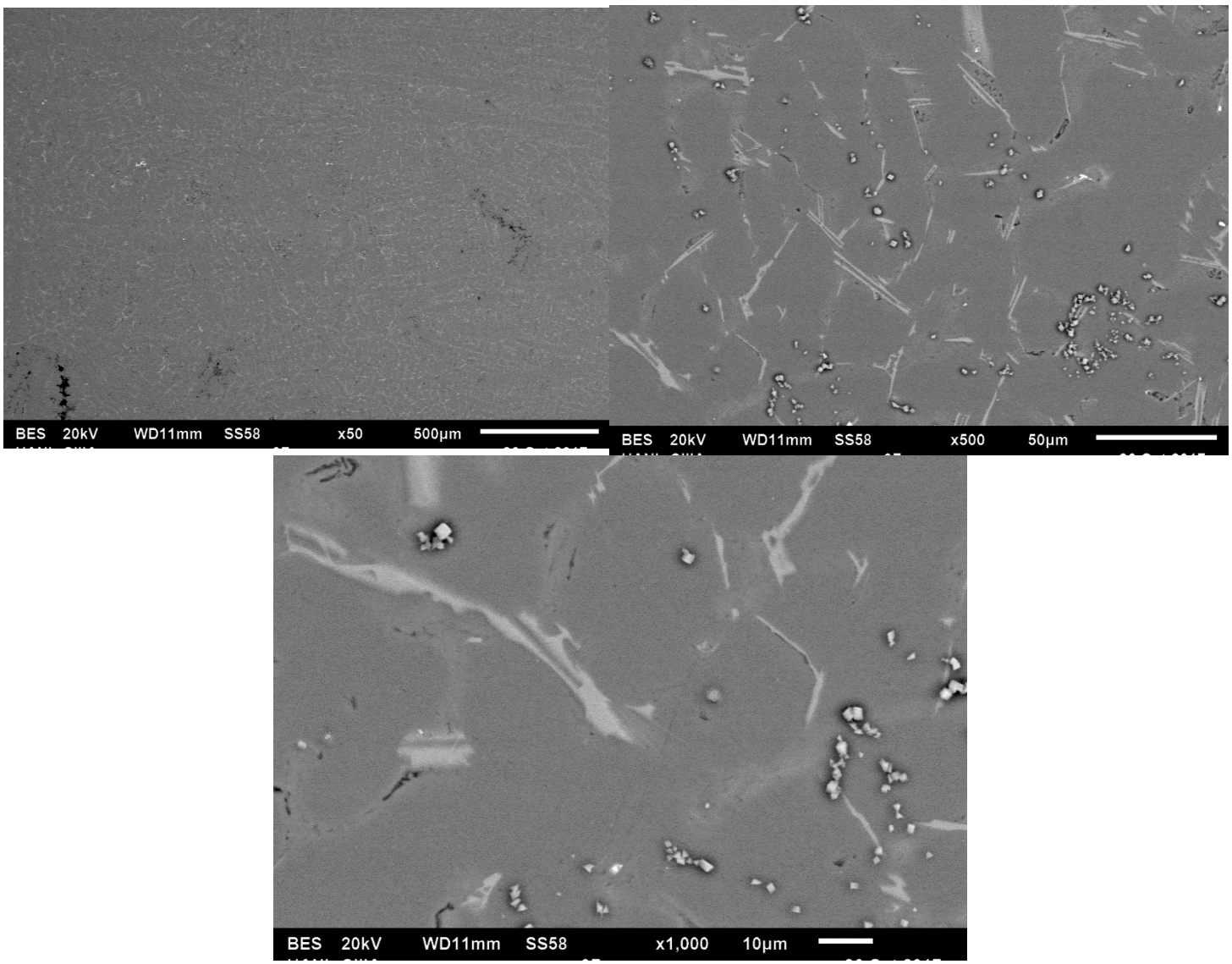


Figura 4.16. Microestructura molde Hierro gris grado 60 con barrera térmica de óxido de magnesio con un espesor de 540 µm.

Se aprecia un enfriamiento mucho más lento que el brindado por la barrera térmica de YSZ al 8%, ya que se muestra una formación de la fase α-aluminio mayor, teniendo una región de micro segregación dendrítica más desarrollada.

Se obtuvieron mapeos y análisis puntuales, con el fin de ver los elementos presentes en las diferentes estructuras obtenidas de la pieza vaciada obtenidas por barrera térmica, en la figura 4.17, se muestran los mapeos correspondientes a molde H-13 con 385 μm y 540 μm de espesor respectivamente.

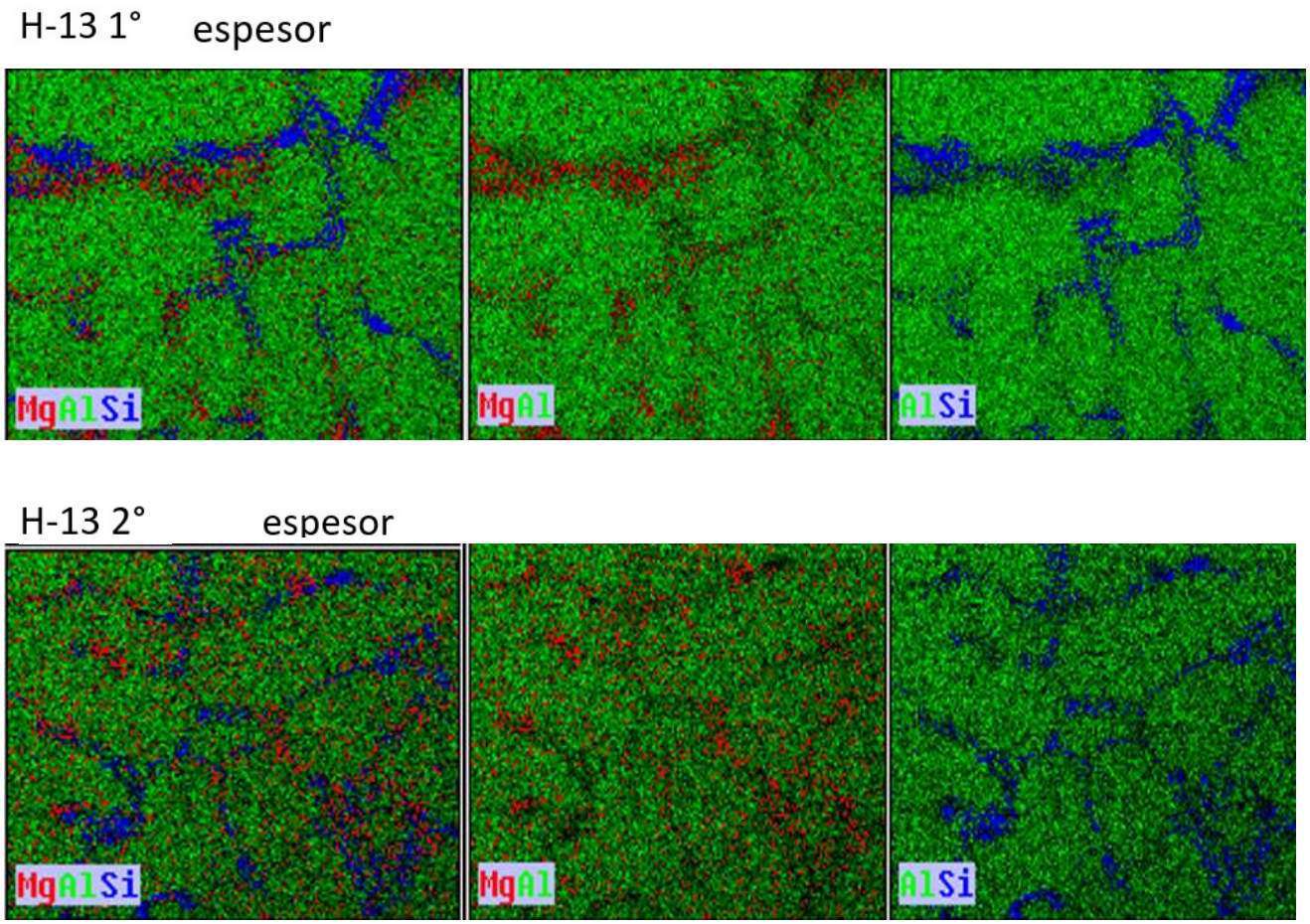


Figura 4.17. Mapeos de moldes de H-13 con barrera térmica YSZ al 8%, con un primer espesor de 385 μm y segundo espesor de 540 μm.

Los mapeos correspondientes a molde hierro gris grado 60 con barrera térmica de óxido de magnesio de un espesor total de 540 µm, se muestran en la figura 4.18.

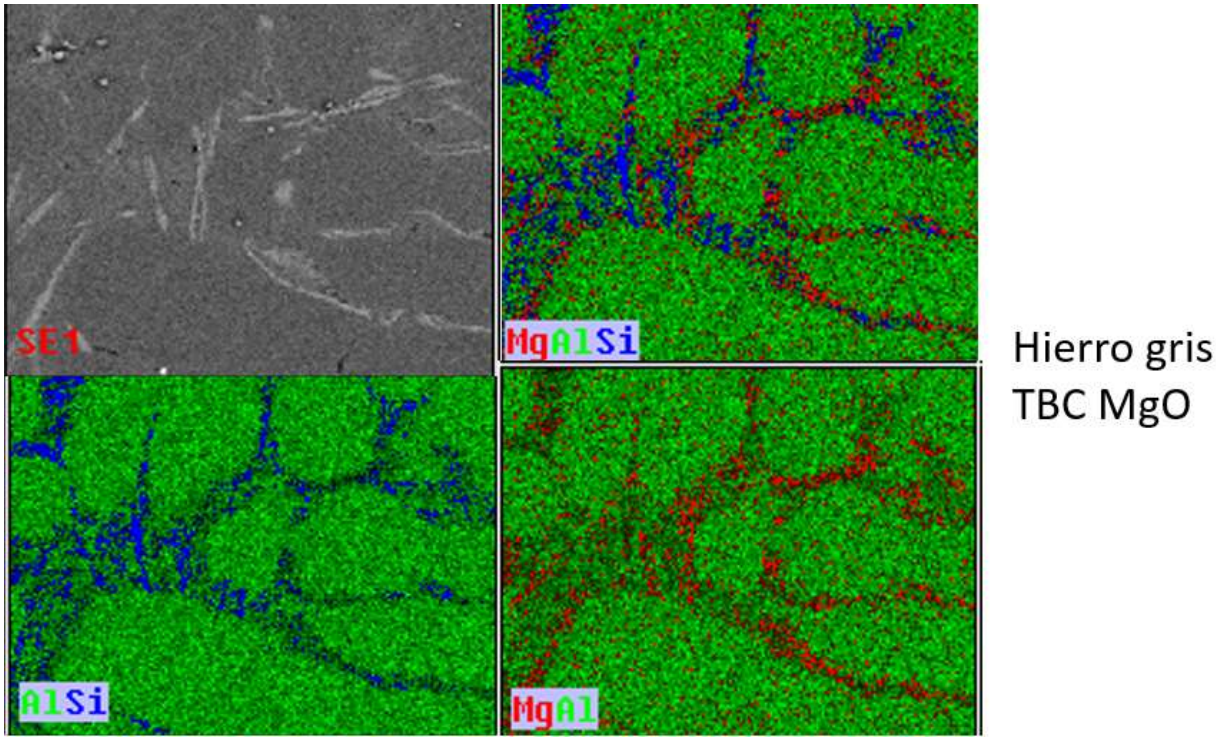
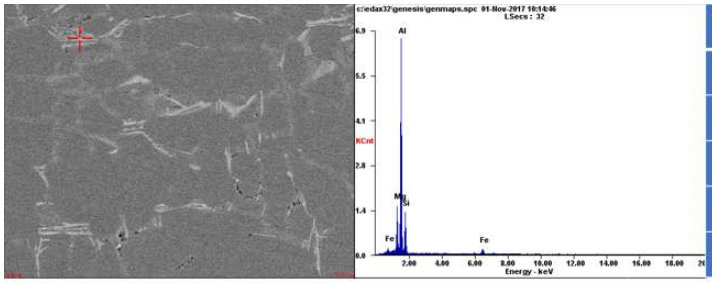


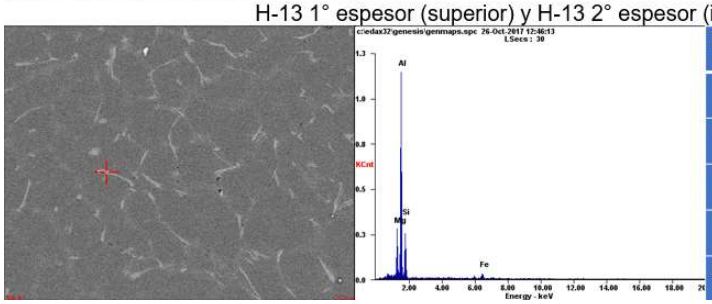
Figura 4.18. Mapeos de molde de Hierro gris grado 60 con barrera térmica de óxido de magnesio de 540 µm de espesor.

En los análisis puntuales se muestra que en ambos espesores de barrera térmica del molde de H-13, existe la presencia de hierro, silicio y magnesio alrededor del Aluminio, teniendo la ausencia de manganeso, como se muestra en la figura 4.19.



Element	Wt%	At%
MgK	10.70	12.26
AlK	60.86	62.84
SiK	21.73	21.55
FeK	06.72	03.35
Matrix	Correction	ZAF

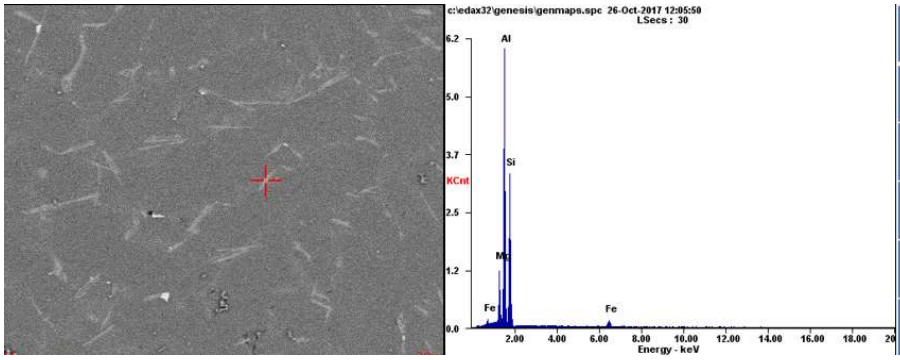
H-13 1° espesor (superior) y H-13 2° espesor (inferior)



Element	Wt%	At%
MgK	10.58	12.11
AlK	57.89	59.71
SiK	25.30	25.07
FeK	06.23	03.10
Matrix	Correction	ZAF

Figura 4.19. Análisis puntual a microestructura molde H-13 con barrera térmica de YSZ al 8% con un primer espesor 385 µm y segundo espesor 540 µm.

Para el caso de la barrera térmica de óxido de magnesio con un espesor de 540 µm en el molde de hierro gris grado 60, el análisis puntual se muestra en la figura 4.20, donde el hierro esta de igual forma presente, pero el magnesio tiene menor presencia y el silicio tiene una mayor presencia en comparación con los del molde de H-13 de barrera térmica de YSZ al 8% de ambos espesores.



Element	Wt%	At%
MgK	07.89	09.06
AlK	44.70	46.25
SiK	42.50	42.24
FeK	04.91	02.45
Matrix	Correction	ZAF

Figura 4.20. Análisis puntual a microestructura de molde Hierro gris grado 60 con barrera térmica de óxido de magnesio con un espesor de 540 µm.

4.5 Comportamiento térmico con pintura de MICA.

El comportamiento de la pintura de mica en el enfriamiento de las piezas vaciadas fue con un comportamiento distinto conforme se aumentaba el espesor de recubrimiento, los gráficos correspondientes para este tipo se muestran en las figuras 4.21-4.23.

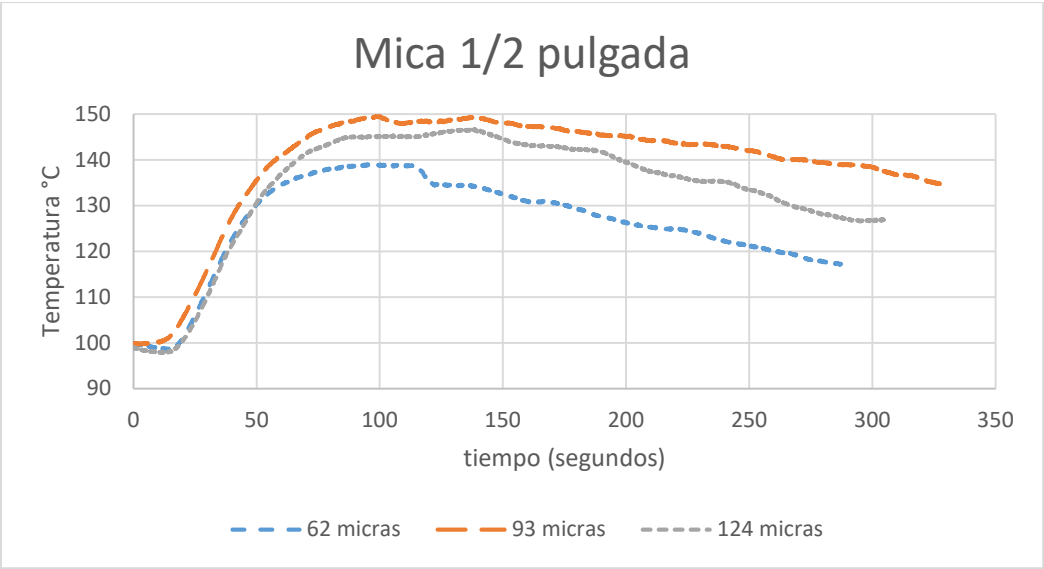


Figura 4.21. Isotermas molde H-13 con recubrimiento de mica a 1/2´´ de distancia.

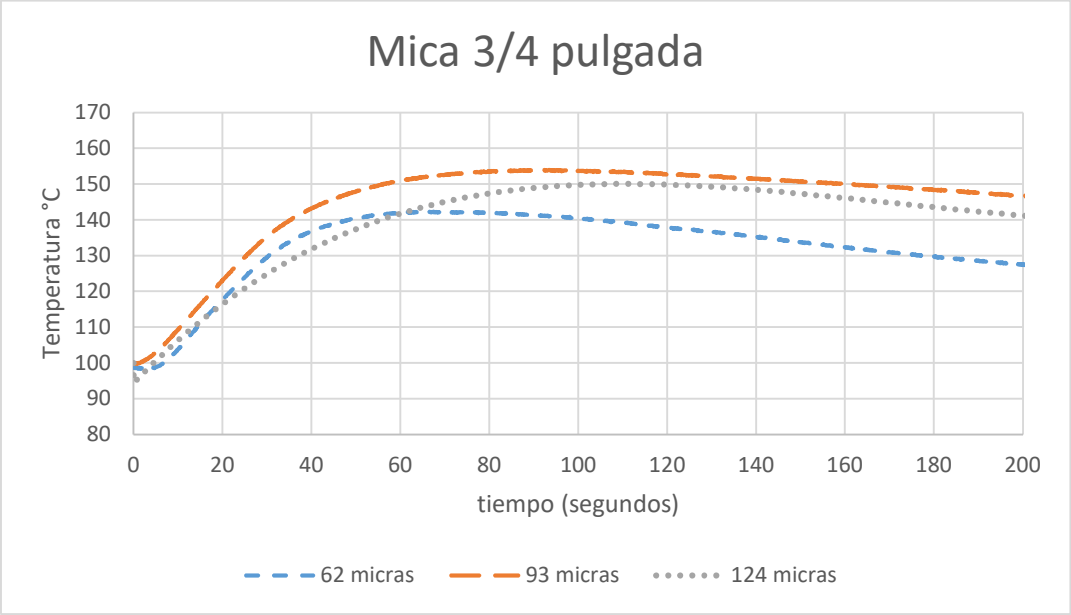


Figura 4.22. Isotermas molde H-13 con recubrimiento de mica a 3/4´´ de distancia.

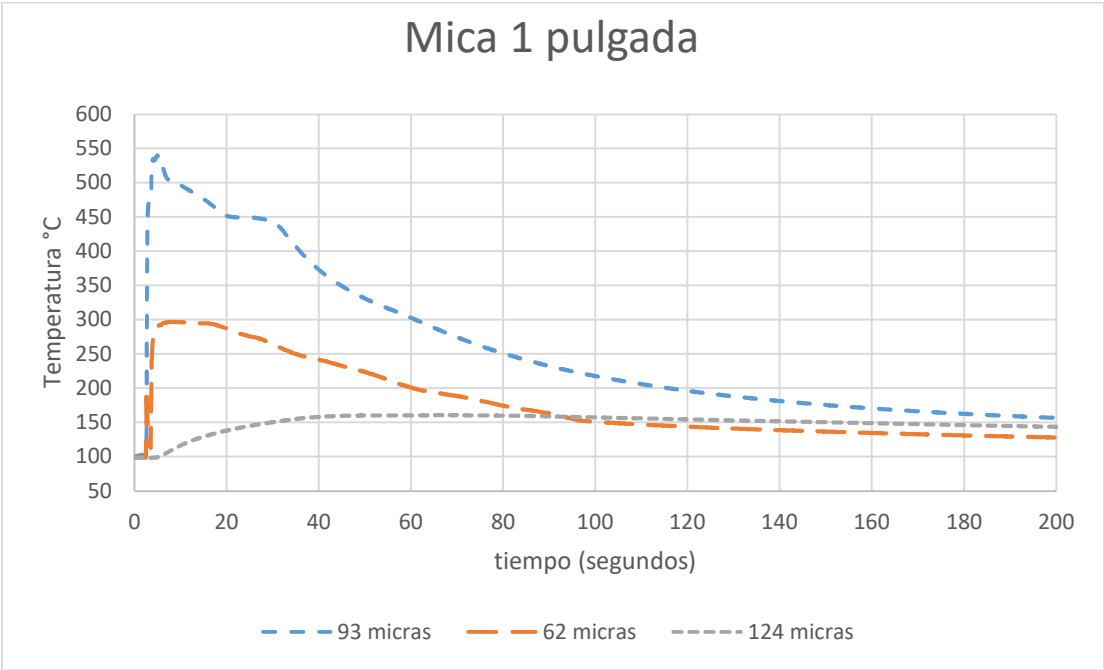


Figura 4.23. Isotermas molde H-13 con recubrimiento de mica a 1´´ de distancia.

4.6 Comportamiento térmico con pintura base silicio/alúmina.

El comportamiento de este recubrimiento se llevó a cabo mediante la aplicación en diferentes materiales tales como el H-13 AISI y el hierro gris grado 60, para ver la influencia del material respecto a sus propiedades físicas en el efecto del perfil de solidificación, variando los espesores depositados por medio de pistola de gravedad.

4.6.1 Comportamiento térmico H-13.

El comportamiento térmico del recubrimiento en el material de H-13 AISI es mostrado en las figuras 4.24-4.26.

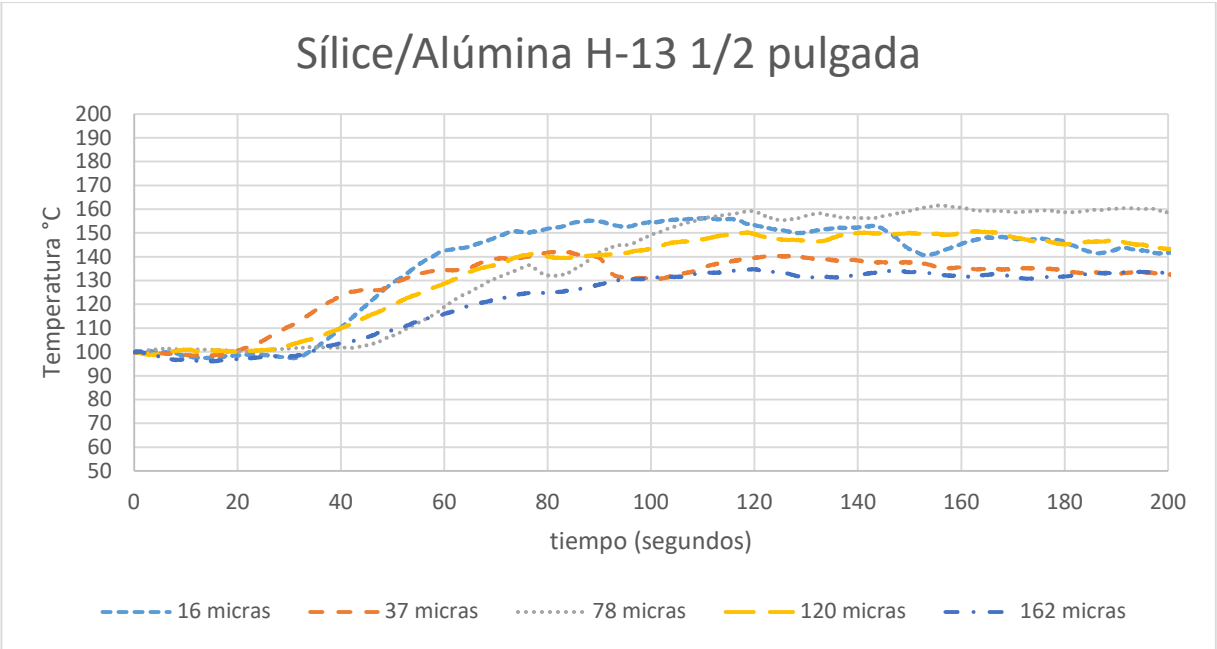


Figura 4.24. Isotermas molde H-13 con sílice/alúmina a 1/2´´ de distancia.

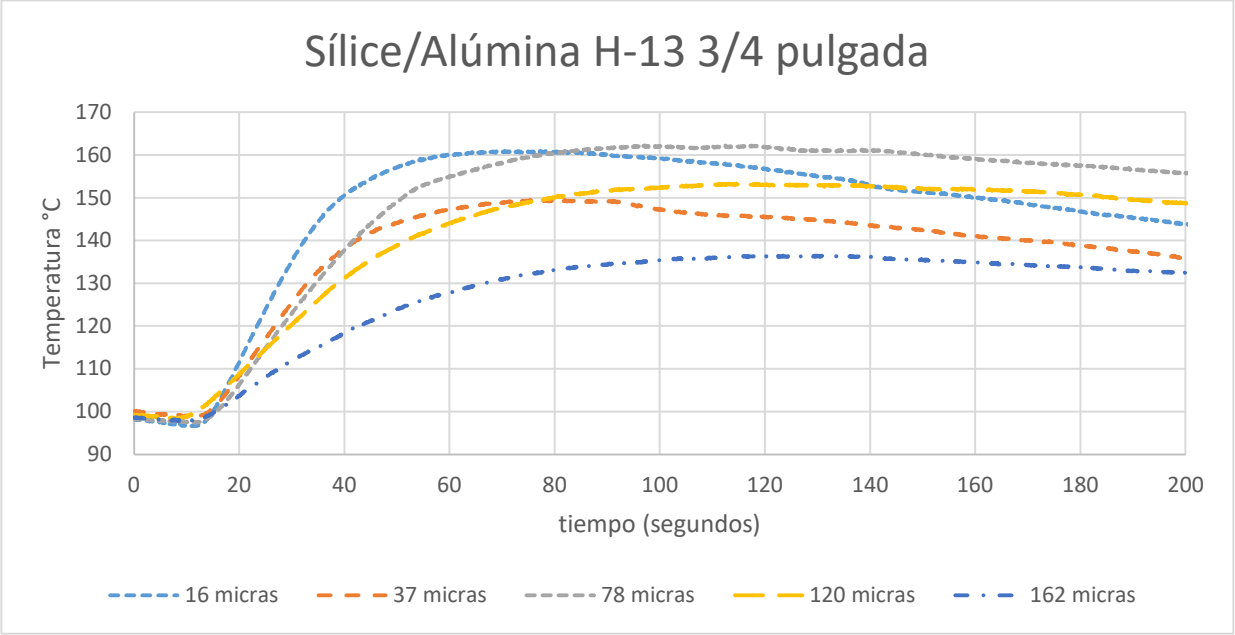


Figura 4.25. Isotermas molde H-13 con sílice/alúmina a 3/4´´ de distancia.

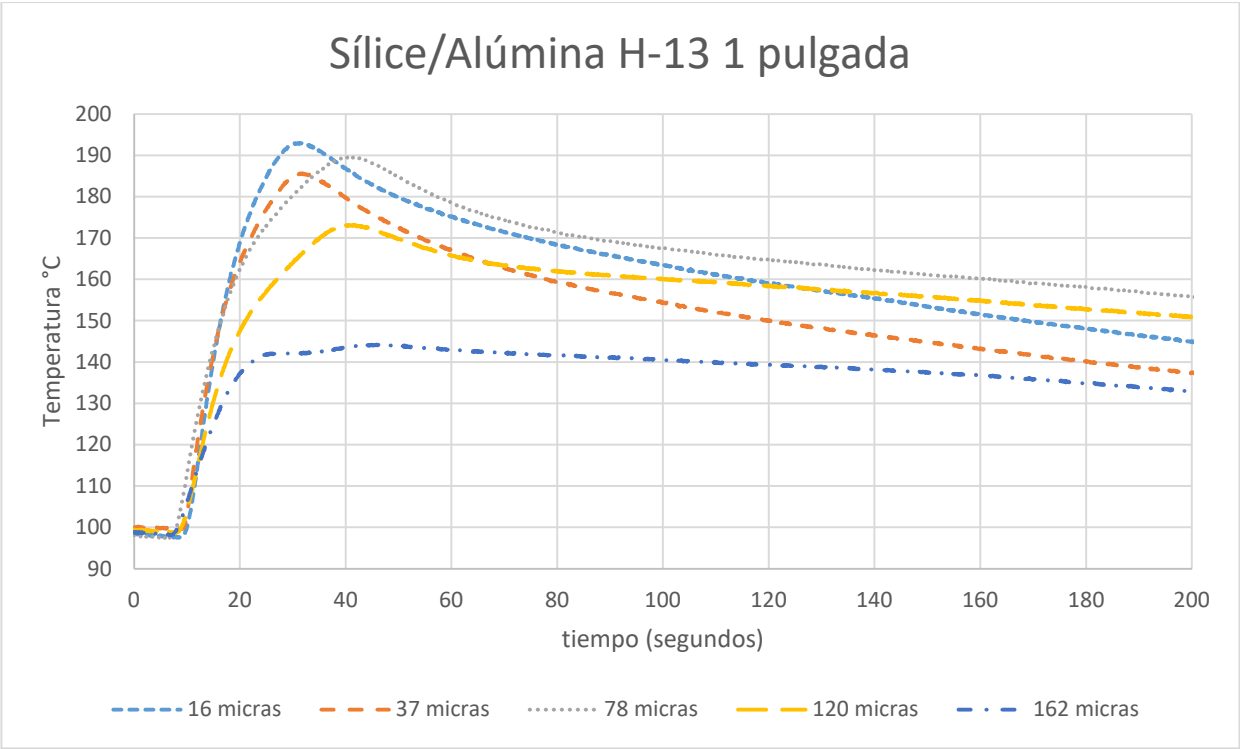


Figura 4.26. Isotermas molde H-13 con sílice/alúmina a 1´´ de distancia.

4.6.2 Comportamiento térmico hierro gris grado 60.

El comportamiento térmico del recubrimiento base sílice/alúmina en el material de hierro gris grado 60 es mostrado en las figuras 4.27-4.29.

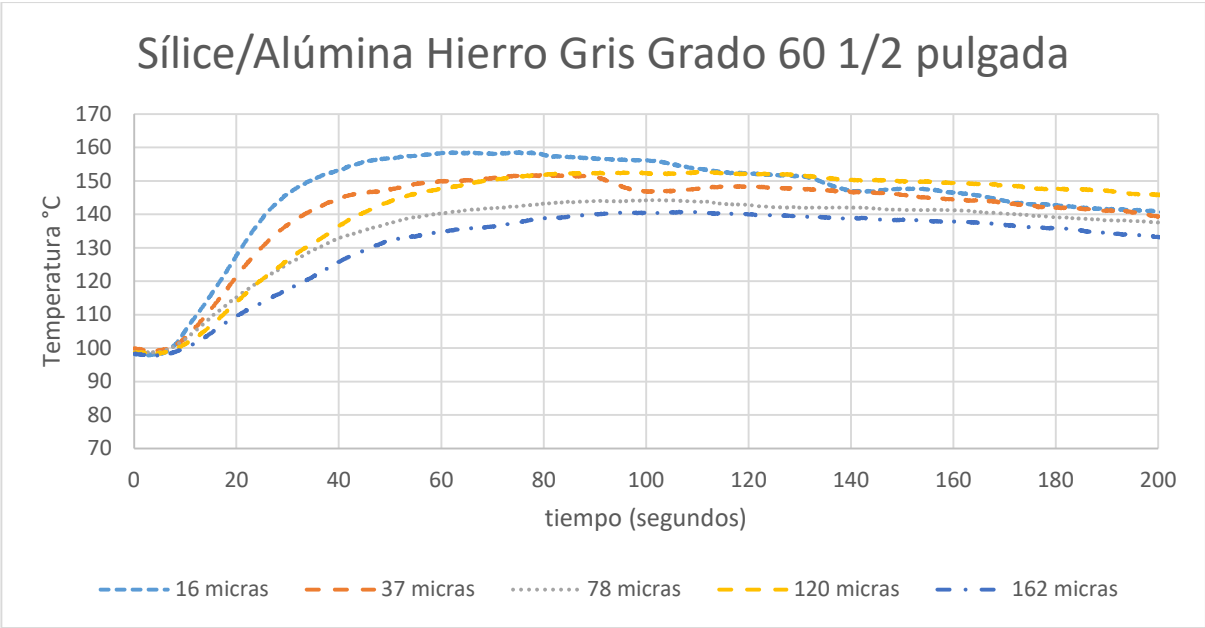


Figura 4.27. Isotermas molde hierro gris grado 60 con sílice/alúmina 1/2´´ de distancia.

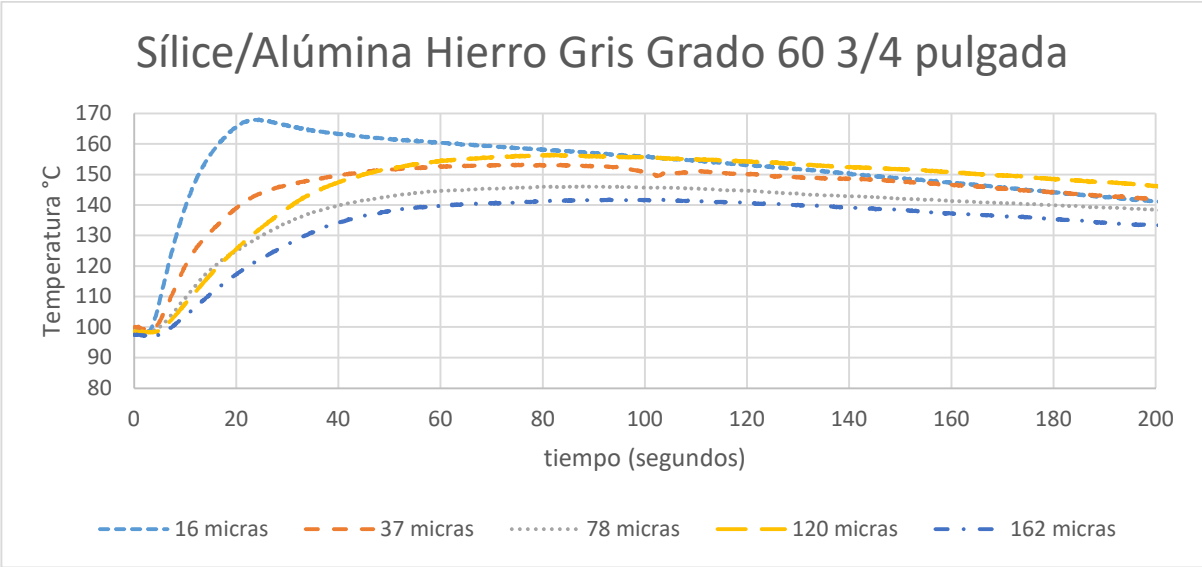


Figura 4.28. Isotermas molde hierro gris grado 60 con sílice/alúmina 3/4´´ de distancia.

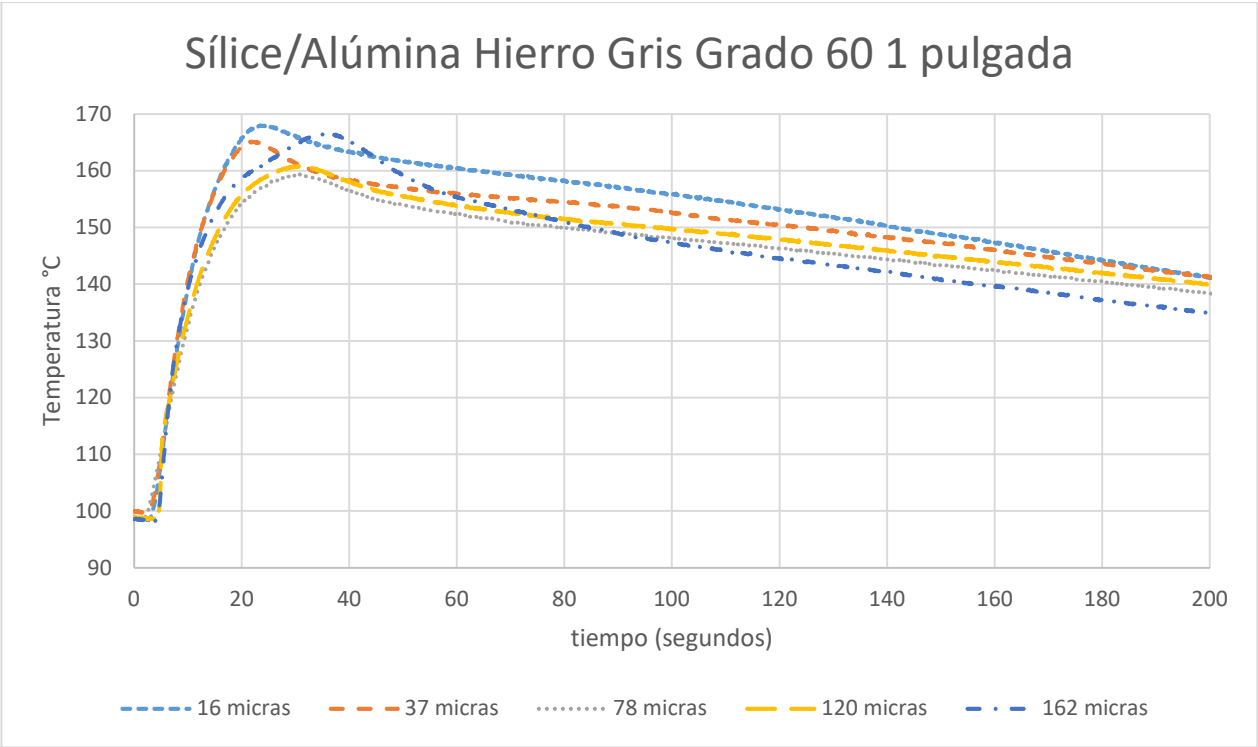


Figura 4.29. Isotermas molde hierro gris grado 60 con sílice/alúmina 1´´ de distancia.

4.7 Comportamiento térmico barrera térmica 8% YSZ.

El análisis en el material de sustrato H-13 con recubrimiento cerámico de YSZ 8% se llevó a cabo para su estudio con dos espesores de barrera térmica el primero se llevó con un espesor total de 385 µm y el segundo de 540 µm, los análisis para cada termopar se muestran en las figuras 4.30-4.34.

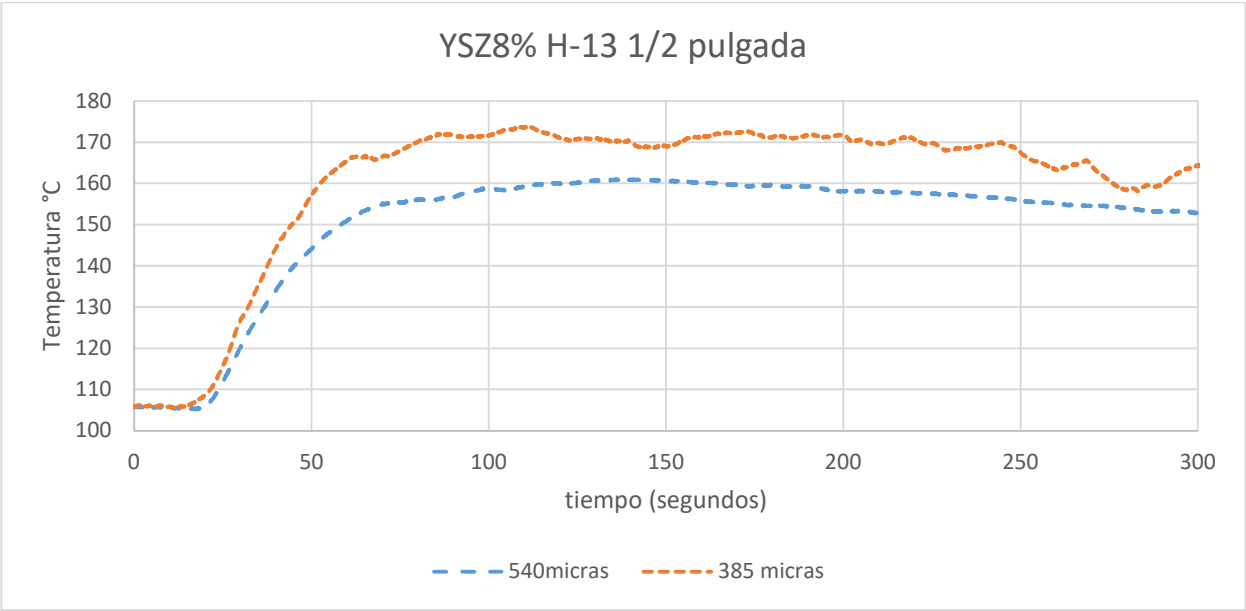


Figura 4.30. Isotermas molde H-13 con 8% YSZ a 1/2´´ de distancia.

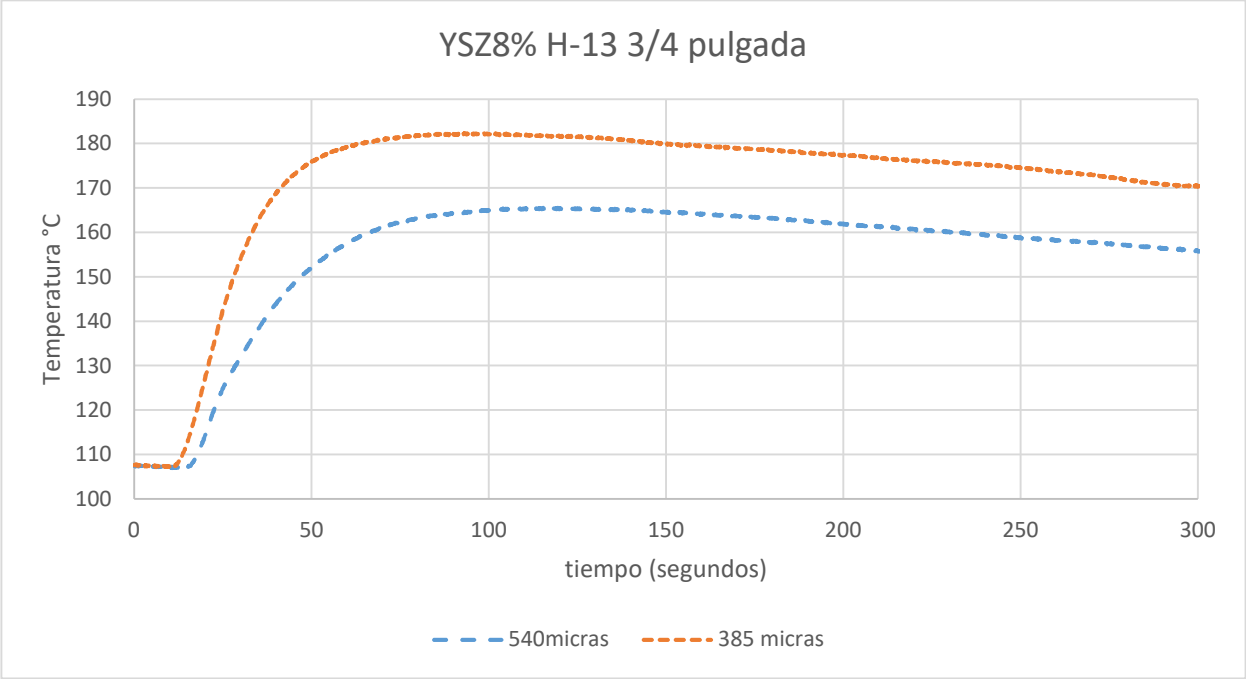


Figura 4.31. Isotermas molde H-13 con 8% YSZ a 3/4´´ de distancia.

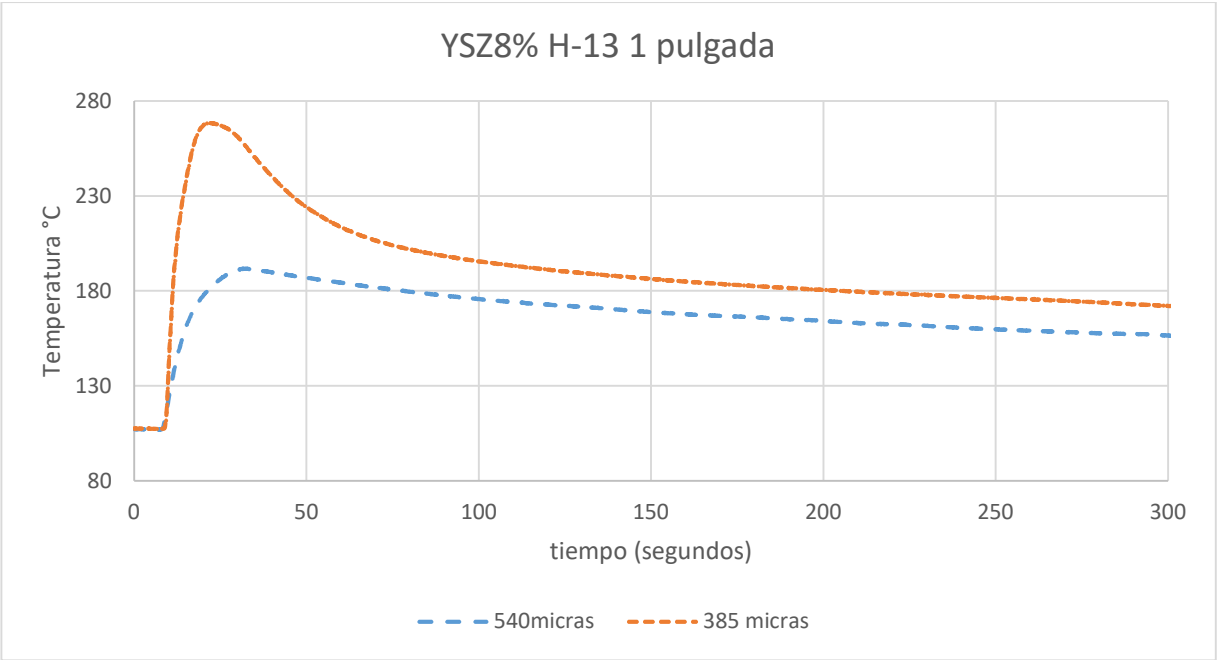


Figura 4.32. Isotermas molde H-13 con 8% YSZ a 1´´ de distancia.

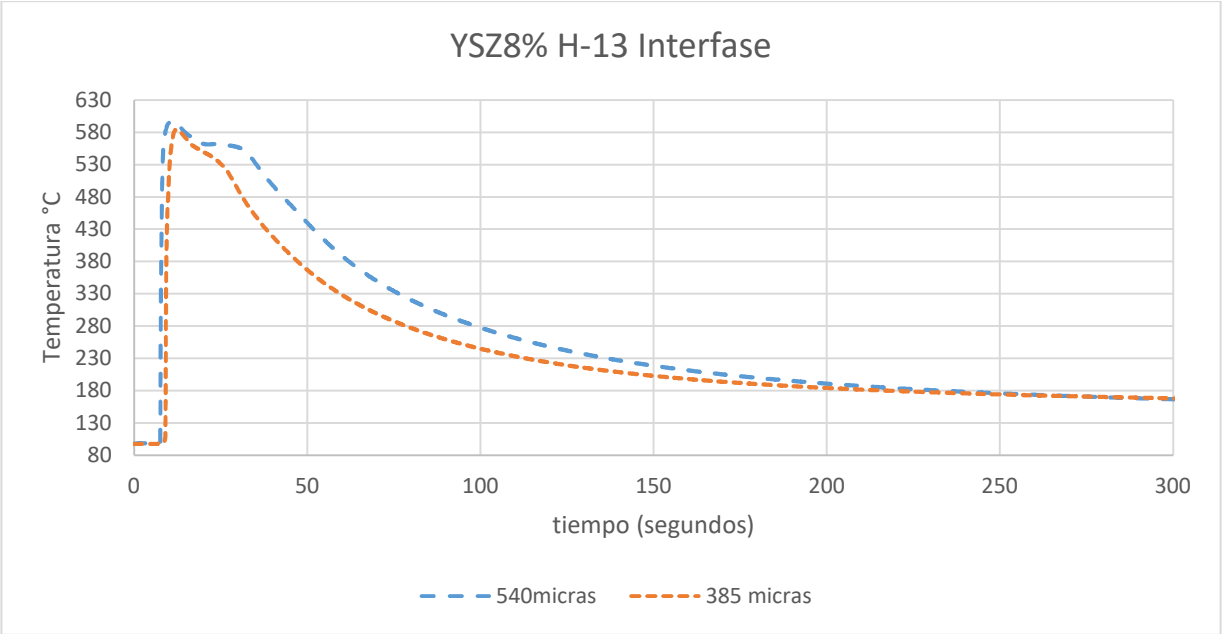


Figura 4.33. Isotermas molde H-13 con 8% YSZ interfase.

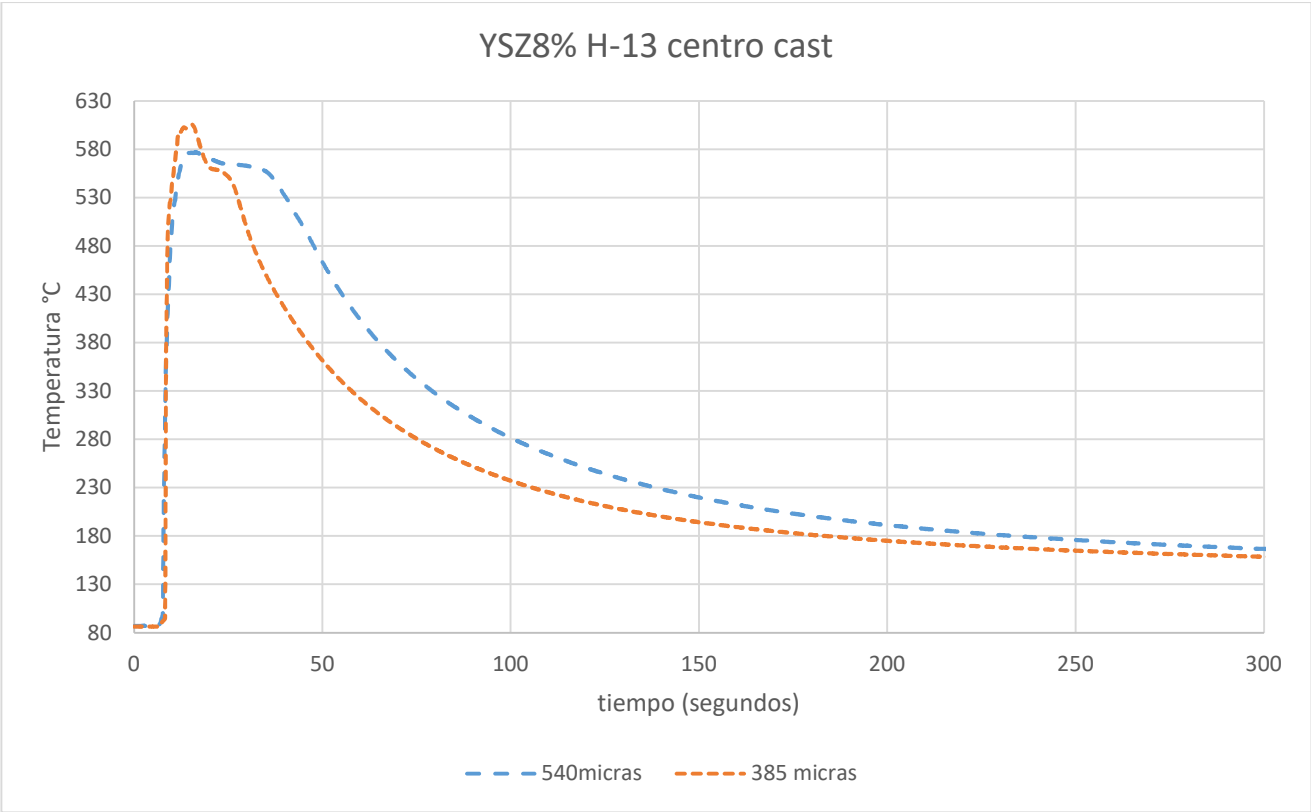


Figura 4.34. Isotermas molde H-13 con 8% YSZ a centro pieza.

4.8 Comportamiento térmico de barrera térmica de óxido de magnesio.

El análisis en el material de sustrato de hierro gris grado 60 con barrera térmica de óxido de magnesio, se llevó a cabo para su estudio con un solo espesor, con tres diferentes pruebas, con un espesor total de 540 µm, los análisis para cada termopar se muestran en las figuras 4.35-4.39 respectivamente.

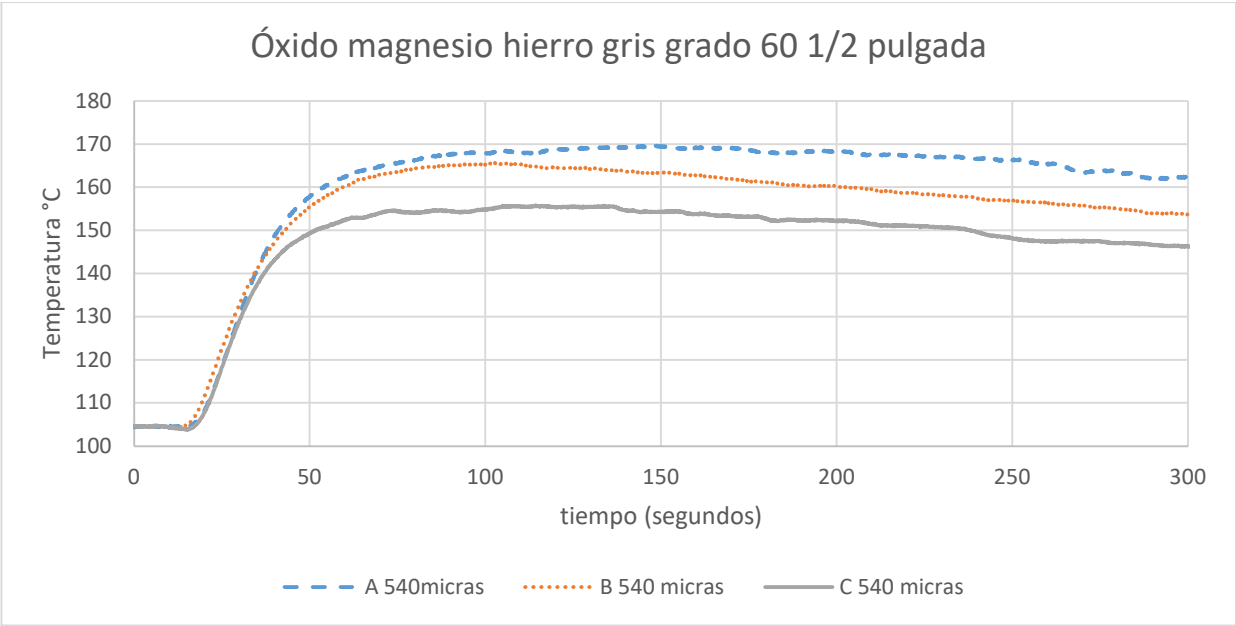


Figura 4.35. Isotermas molde hierro gris grado 60 Óxido de Mg a 1/2´´ de distancia.

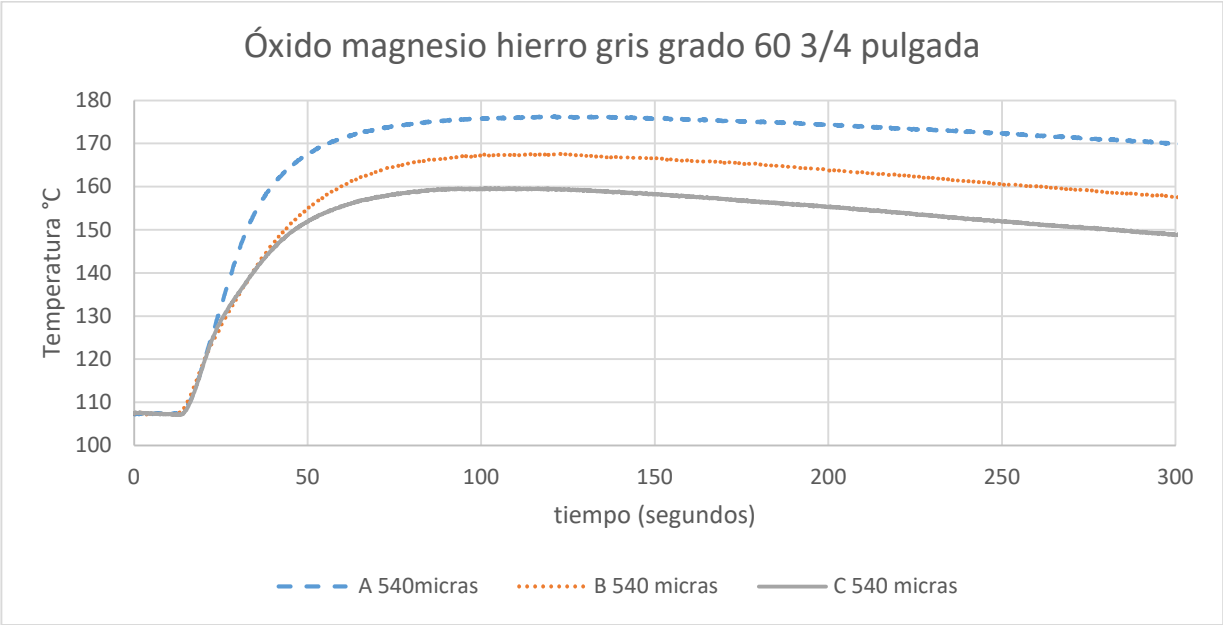


Figura 4.36. Isotermas molde hierro gris grado 60 Óxido de Mg 3/4´´ de distancia.

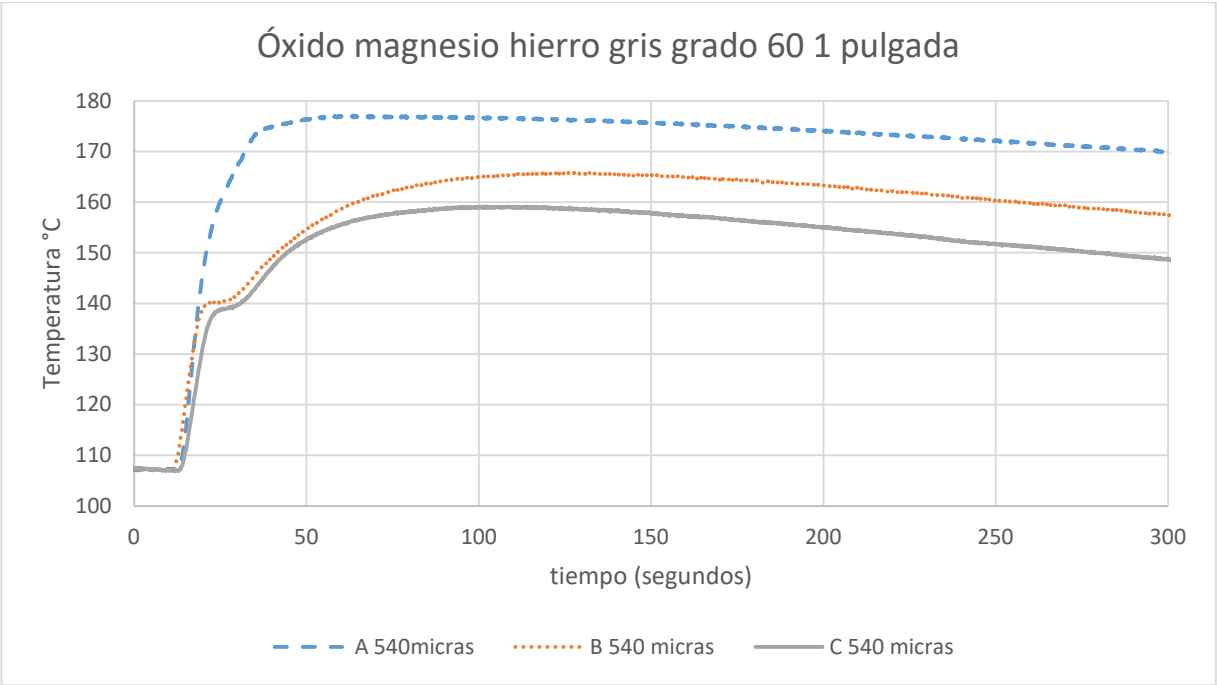


Figura 4.37. Isotermas molde hierro gris grado 60 Óxido de Mg 1´´ de distancia.

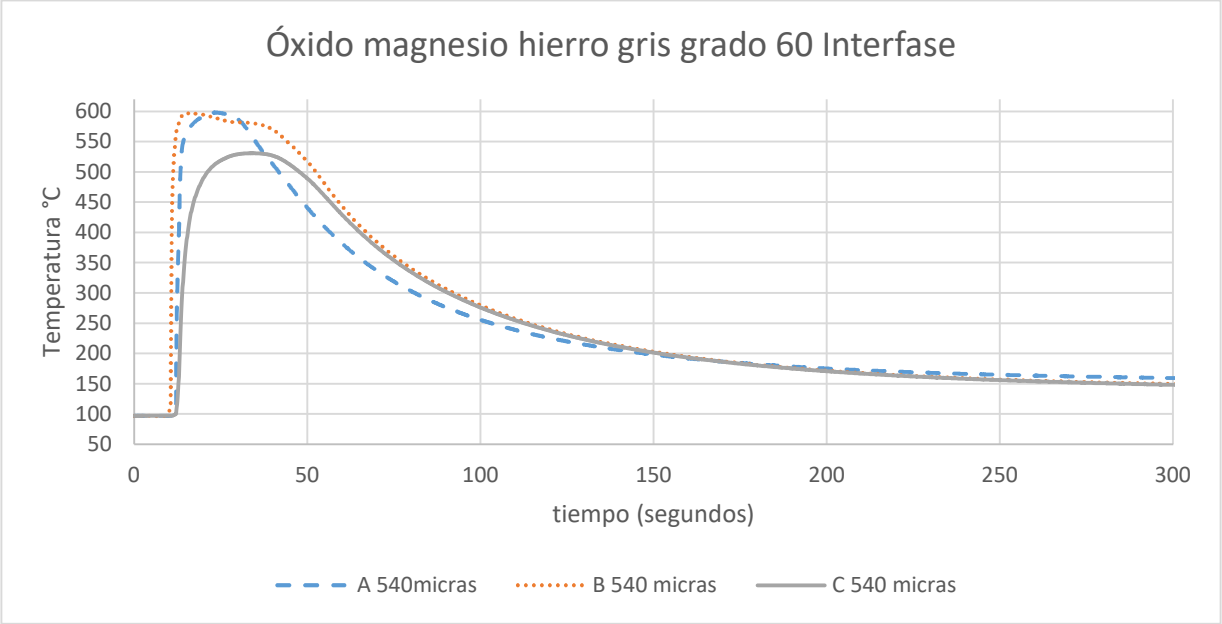


Figura 4.38. Isotermas molde hierro gris grado 60 Óxido de Magnesio interfase.

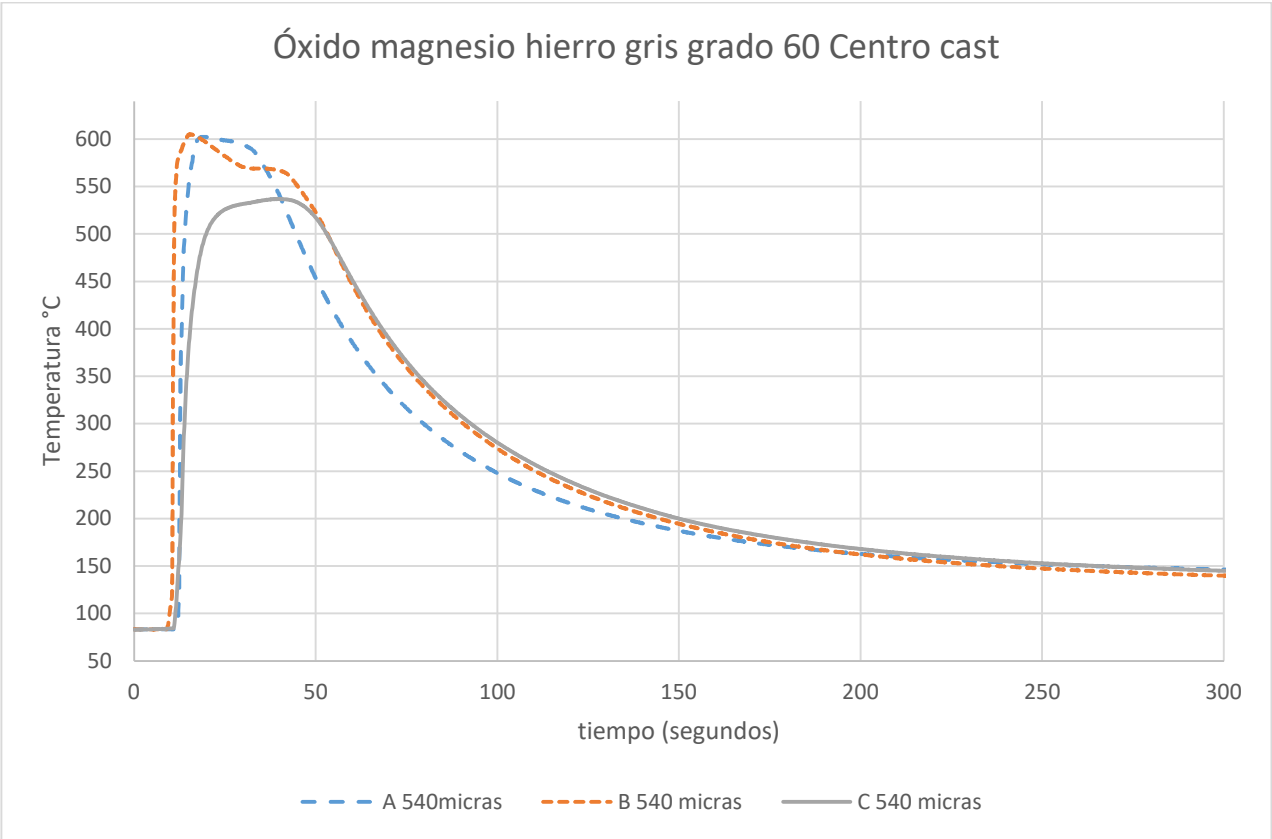


Figura 4.39. Isotermas molde hierro gris grado 60 Óxido de Magnesio centro pieza.

4.9 Comparación térmica entre pinturas y barreras térmicas.

Dichas comparaciones se llevaron a cabo en los diferentes materiales de sustrato como lo es el H-13 y el hierro gris grado 60, para ver la diferencia en la pérdida de calor con el uso de cada recubrimiento.

4.9.1 Comparación térmica H-13.

Las comparaciones se muestran en las figuras 4.40-4.42.

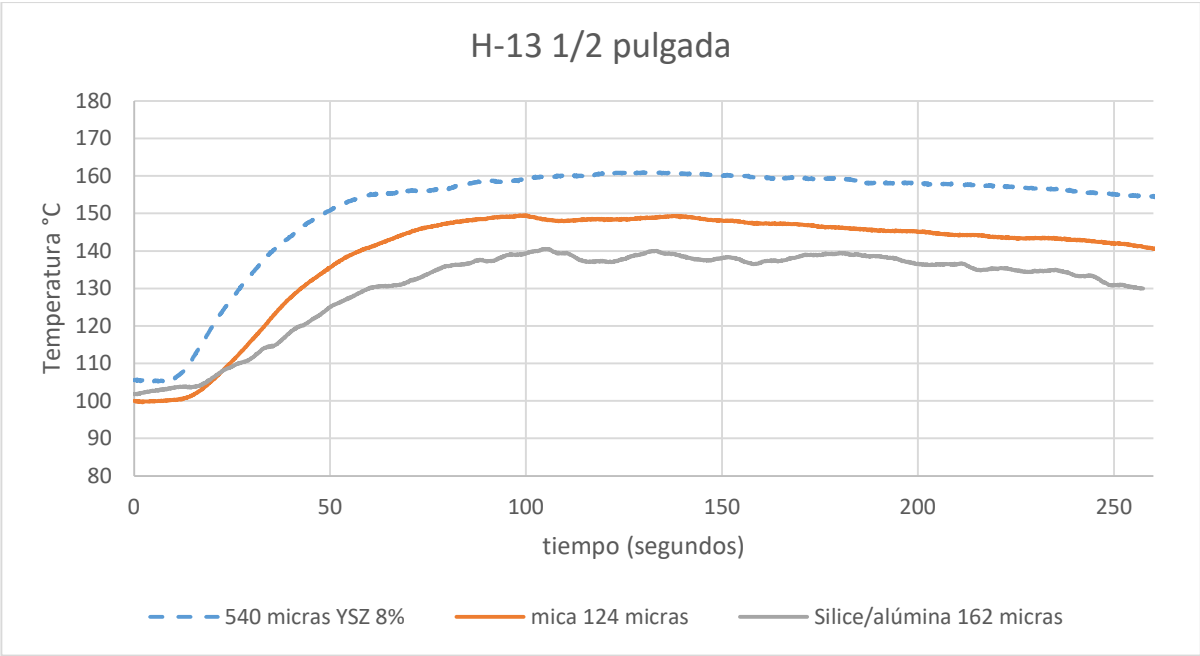


Figura 4.40. Isotermas molde H-13 diferentes depósitos a 1/2´´ de distancia.

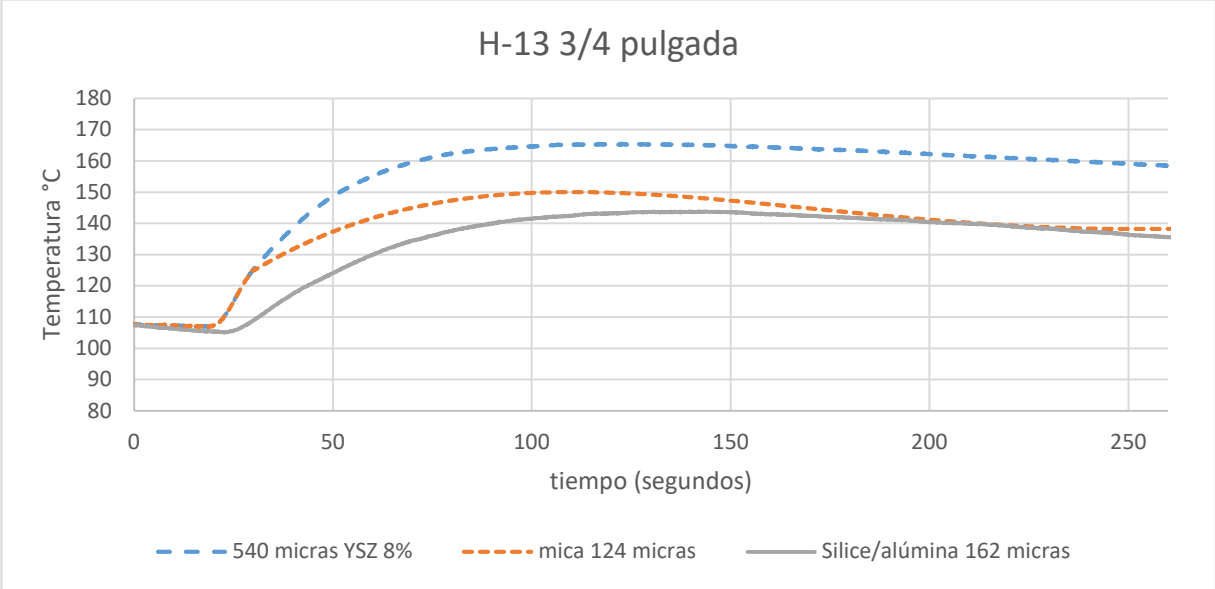


Figura 4.41. Isotermas molde H-13 diferentes depósitos a 3/4´´ de distancia.

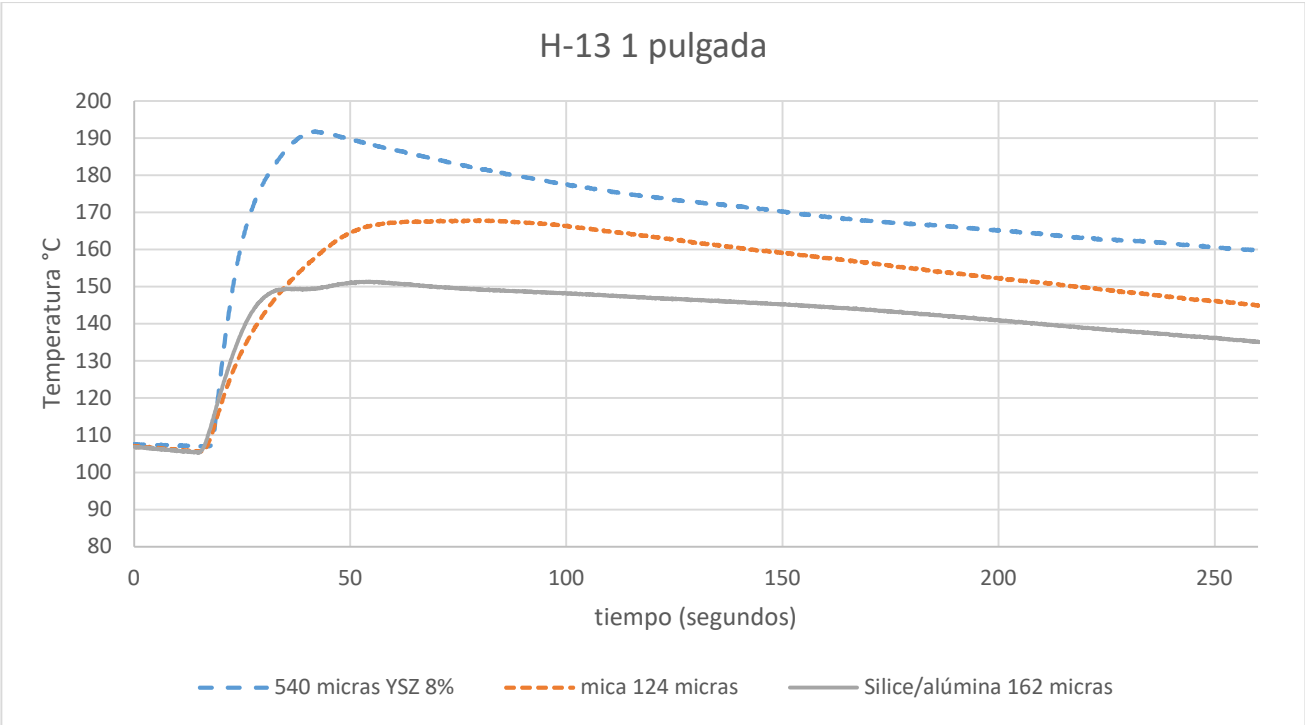


Figura 4.42. Isotermas molde H-13 diferentes depósitos a 1´´ de distancia.

4.9.2. Comparación térmica hierro gris grado 60.

Las comparaciones se muestran en las figuras 4.43-4.45.

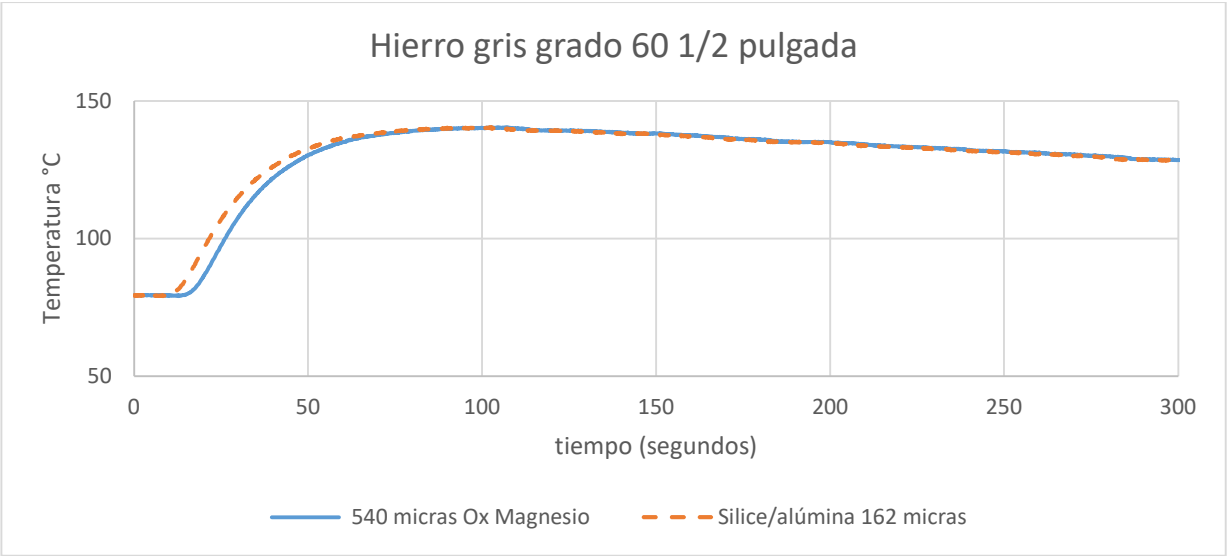


Figura 4.43. Isotermas molde hierro gris grado 60 diferentes depósitos 1/2´´ distancia.

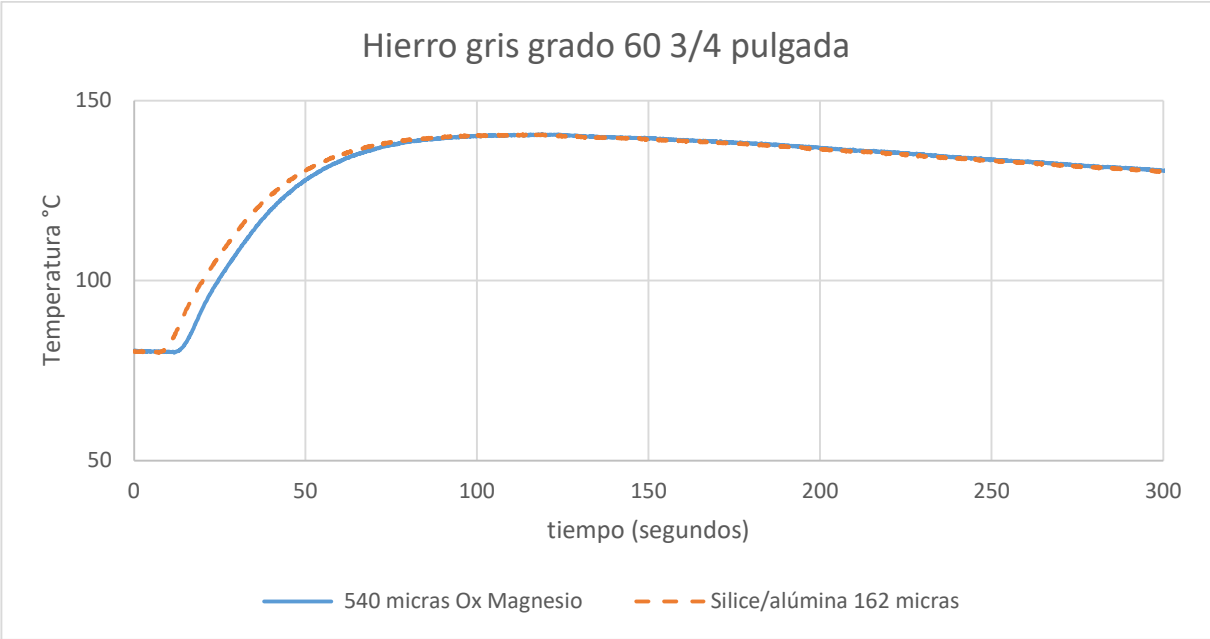


Figura 4.44. Isotermas molde hierro gris grado 60 diferentes depósitos 3/4´´ distancia.

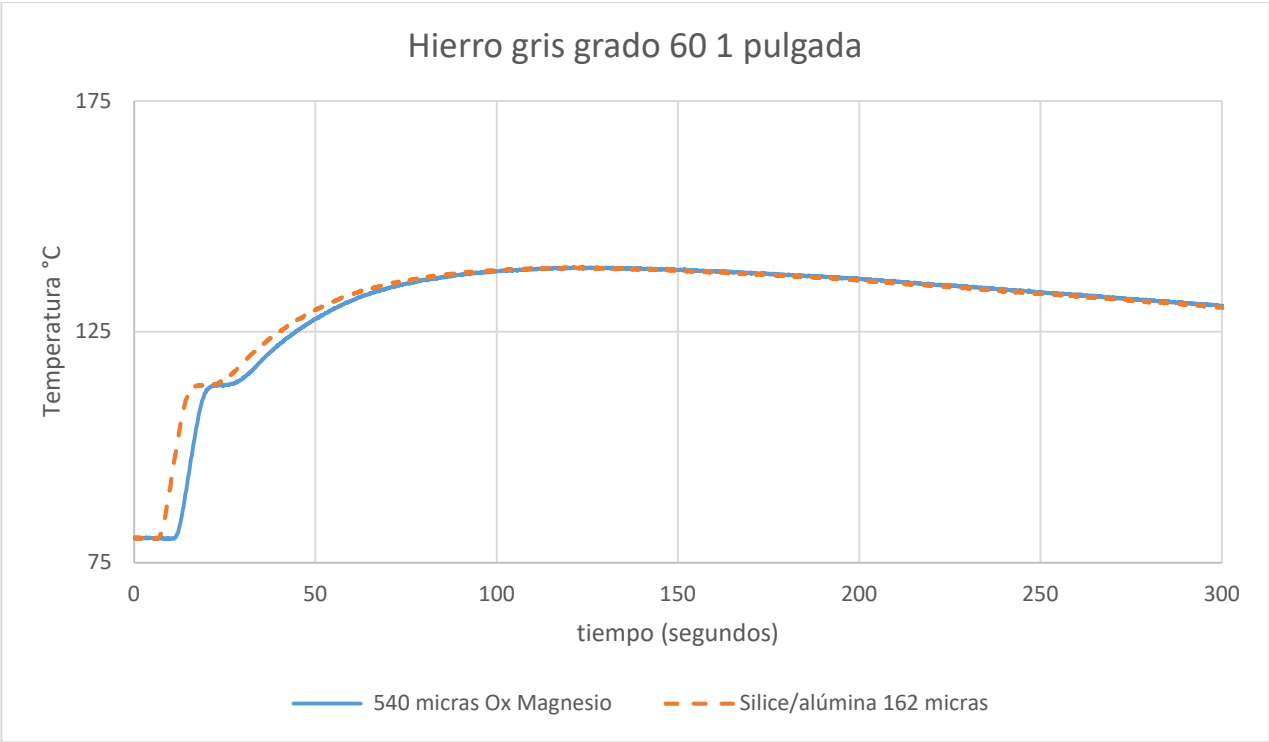


Figura 4.45. Isotermas molde hierro gris grado 60 diferentes depósitos 1´´ distancia.

4.10 Resultados de modelo inverso.

Los resultados para el proceso inverso se muestran en la figura 4.46, donde muestra un perfil de temperaturas conforme la pieza va solidificando.

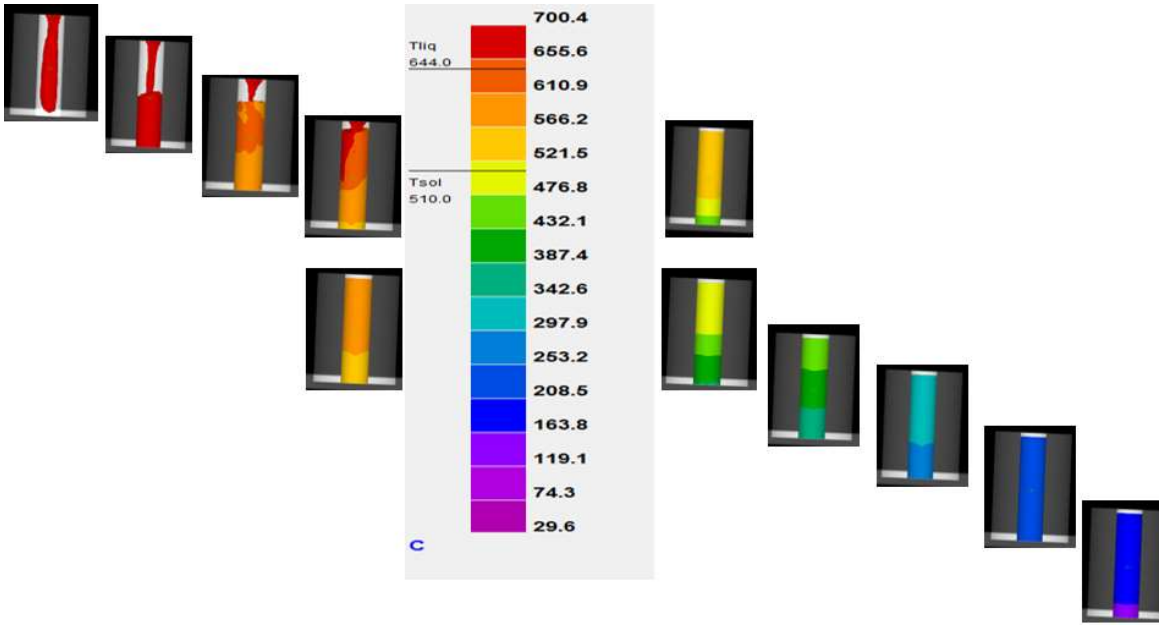


Figura 4.46. Simulación de enfriamiento en ViewCAST.

La base de datos generados durante la simulación de llenado se encuentra en un archivo con extensión *.tt, con la cual se procede a llevar a cabo el análisis por el método inverso. El proceso de simulación del módulo inverso de ProCAST consiste en comparar los perfiles de temperatura experimentales con los generados por el programa en los nodos correspondientes para un determinado coeficiente de transferencia de calor. Para aproximar los perfiles de temperatura teóricos y experimentales es necesario utilizar un nuevo valor del coeficiente de transferencia de calor en la simulación hasta que la diferencia en los gradientes de temperatura sea muy cerrada.

Las simulaciones en el módulo inverso se llevaron a cabo siguiendo los siguientes pasos:

1. Realizar la simulación de llenado con las condiciones de experimentales utilizando los datos de temperatura del molde.

2. Localizar los nodos en las posiciones donde fueron ubicados los termopares en el experimento, figura 4.47.

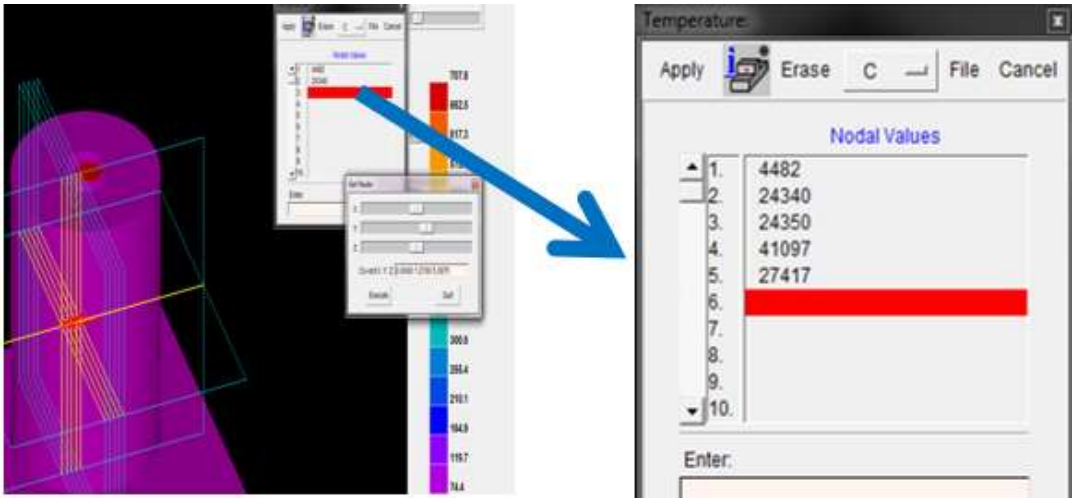


Figura 4.47. Localización de nodos de termopares en PreCAST.

3. Graficar los datos desde el ViewCAST correspondientes a los nodos previamente identificados. Al graficar, se genera un archivo *.tt donde se localizan los datos de tiempo y temperatura para cada nodo, como se muestra en la figura 4.48.

File Edit Format View Help

26.0	40.6365	42.8027	63.5977	91.9966
26.1	40.9442	42.9283	63.8937	92.0672
26.2	40.9678	42.9659	64.1633	92.2218
26.3	41.0289	43.1340	64.4954	92.4656
26.4	41.2819	43.2329	64.6552	92.5799
26.5	41.2650	43.3833	64.8620	92.8145
26.6	41.4488	43.4899	65.1261	93.0305
26.7	41.6574	43.7516	65.4461	93.1055
26.8	41.7917	43.8068	65.6480	93.3966
26.9	41.9642	43.9144	66.0648	93.4572
27.0	42.0996	44.0514	66.3205	93.7591
27.1	42.2983	44.1940	66.5217	93.8726
27.2	42.4710	44.2325	66.7669	94.1522
27.3	42.6508	44.4818	66.8495	94.2556

Figura 4.48. Obtención de datos tipo .tt.

4. Ajustar los datos obtenidos experimentalmente a los tiempos obtenidos al graficar cada nodo. Se genera un nuevo archivo *.tt que contiene los datos experimentales y el cual es abierto por *Word pad*.
5. Se introduce el archivo experimental al módulo inverso, teniendo la siguiente terminación im.dat, por ejemplo, si el caso a analizar se llama “pieza” el archivo experimental deberá llamarse piezaim.dat y guardado como archivo de texto, el cual deberá estar en una forma especial, teniendo solo los datos necesarios ahorita mencionados:

   Número de lecturas cantidad de termopares número de los nodos seleccionados.
6. Correr el módulo inverso con el ultimo “*time step*” del llenado. Se deben poner las condiciones en la pestaña “*inverse*”, en este caso debemos seleccionar el cálculo del coeficiente metal-molde activando la casilla y seleccionando las interfases. Posteriormente se definen los nodos previamente identificados, mostrado en la figura 4.49.

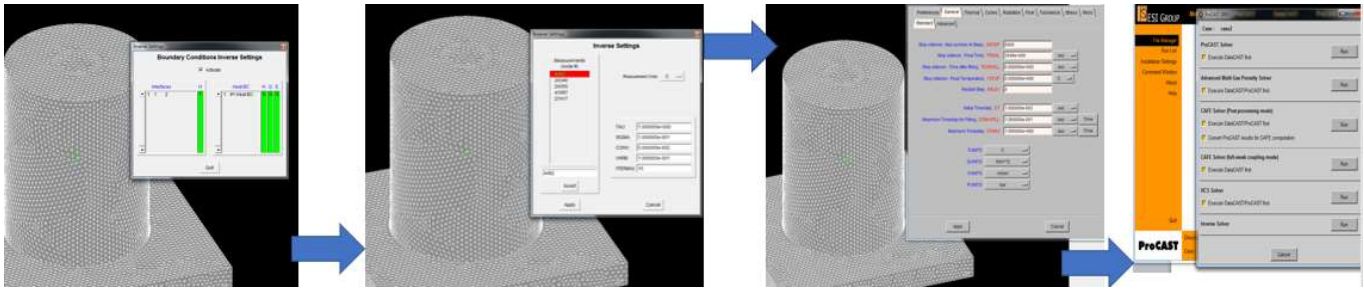


Figura 4.49. Proceso de selección de módulo inverso.

Las simulaciones numéricas del proceso inverso fueron efectuadas en condiciones similares en cada condición de recubrimiento a las experimentales. Inicialmente, el valor para el coeficiente de transferencia en la interfase molde-metal fue tomado del trabajo realizado anteriormente [8]. Previamente se realizó un modelado directo tomando como referencia un valor de 2000 W/m^{2}K, donde se obtuvieron curvas de enfriamiento en 5 nodos. Posteriormente la historia térmica obtenida fue alimentada en el modelado inverso para obtener el coeficiente cuyo valor fue de 2103 W/m^{2}K, como para el valor de 1000 W/m^{2}K, obteniendo 983 W/m^{2}K, después de corregir ciertos *bugs* en las corridas generadas por el historial térmico t.unf, con estos valores, se realizó un modelado directo, donde se compararon las curvas térmicas con el coeficiente calculado.

Los resultados obtenidos para las corridas experimentales son un promedio con una tolerancia de +300, -300 y se presentan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Estimación de ´h´(W/m^{2}K), pintura y barrera cerámica en molde H-13.

H-13				
Recubrimiento	Espesor (µm)	Mediciones		
grafito	10	7,525.6	7,255.9	7,835.3
mica	62	6,769.5	6,304.9	6920.8
	124	5,296.3	4,968.4	5594.2
sílice / alúmina	37	6,898.5	7,112.4	6989.2
	162	3,846.3	3,482.6	4089.9
YZS 8%	540	1,034.2	981.5	1308.4
	385	1,884.8	1,605.1	2216.2

Tabla 4.2. Estimación de ´´h´´(W/m^{2}K), pintura y barrera cerámica en molde hierro gris grado 60.

Hierro gris grado 60				
Recubrimiento	Espesor (µm)	Mediciones		
óxido Mg	540	2,217.7	1,994.8	2343.2
sílice / alúmina	37	7,615.0	7,536.0	7319.0
	162	4,276.3	4,588.2	4192.4

Se obtuvieron ciertas variaciones en cada curva debido por el error de cálculo, pero dentro de lo reportado en la literatura. De los valores obtenidos de la tabla 4.1 y 4.2, se observa lo siguiente:

a) Para cada tipo de pintura, se apreció que conforme aumenta el espesor de recubrimiento de pintura el coeficiente de transferencia de calor se ve disminuido, ya que ciertos recubrimientos actúan como aislantes, se logra apreciar que el

recubrimiento de mica tiene un menor efecto aislante que la pintura base silicio, teniendo un mayor valor del coeficiente de transferencia de calor h.

b) El menor valor del coeficiente de transferencia de calor h en la pintura base silicio con diferente material de molde, se presentó en material de hierro gris, teniendo ambos moldes con una capa máxima de pintura y enfriado por convección natural. Teniendo como raíz las propiedades físicas del material.

c) El valor para el coeficiente de transferencia de calor h para los casos de recubrimiento cerámico, con mismo material de molde y diferentes espesores de material cerámico de material YSZ 8%, se obtuvo un coeficiente de transferencia de calor mayor para el caso de menor espesor de barrera cerámica, que comparado con los valores de coeficiente de transferencia de calor obtenidos de las pinturas se disminuye ampliamente, debido a las características inherentes de la deposición por rociado térmico, que brinda una textura con alta porosidad que influye altamente en el valor de coeficiente de transferencia de calor.

d) El valor para el coeficiente de transferencia de calor h para el caso de recubrimiento cerámico de óxido de magnesio, con material de molde de hierro gris, el coeficiente de transferencia de calor fue aún mayor comparado con los valores de coeficiente de transferencia de calor obtenidos del mismo espesor de recubrimiento de YSZ 8% de diferente material, a pesar de las propiedades físicas del hierro gris. Las simulaciones numéricas son una importante herramienta para el análisis de procesos en la fundición. En este caso se combinaron los datos experimentales con el programa de computación para determinar un valor en del coeficiente de transferencia de calor h. En la comparación numérica y experimental se presentaron variaciones en los perfiles de temperatura, sin embargo, muchos factores pudieron influir al momento del

análisis i. e. las propiedades de los materiales, el mallado de los modelos, el calentamiento del molde, etc.

Capítulo 5 Conclusiones preliminares.

Según los resultados obtenidos, se obtienen las siguientes conclusiones:

Acabados de recubrimiento:

El acabado superficial de los recubrimientos base agua como lo son base silicio y mica, presentan una superficie con acabado uniforme y pocas porosidades, ya que para los acabados de las barreras térmicas presentan un acabado muy uniforme y cristalina, con alta cantidad de porosidades presentes, debido a las vacancias existentes.

Microestructural:

Los análisis microestructurales obtenidos por los diversos recubrimientos en el molde, mostraron que los de base agua como lo son base silicio y mica, mostraron un mayor desarrollo del perfil de solidificación en la aleación, siendo la de mica la de mayor desarrollo, a comparación de las que se llevaron a cabo con recubrimiento cerámico, las cuales su perfil se ve con poco desarrollo.

Comportamiento térmico:

En el comportamiento térmico, el desempeño de los recubrimientos base agua, fue mucho menor a los presentados por las barreras térmica.

Coeficiente de transferencia de calor:

El coeficiente de transferencia de calor desempeñado por los recubrimientos base agua, fue mucho mayor que el desempeñado por los recubrimientos cerámicos.

Por lo tanto, de acuerdo a las conclusiones, se obtiene que la barrera térmica tiene alta influencia en disminuir el coeficiente de transferencia de calor h, debido a las propiedades inherentes que brinda, como su propiedad aislante, controlando las imperfecciones recurrentes en las piezas vaciadas de la industria, analizando los tiempos requeridos para obtener una sinergia entre calidad y producción de las piezas vaciadas, mejorando propiedades y teniendo tiempos relativamente cortos.

Capítulo 6 Trabajo futuro y recomendaciones.

Como trabajo futuro para el estudio llevado a cabo se recomiendan los siguientes:

- Analizar el desgaste presente en los moldes en la industria del aluminio.
- Llevar a cabo pruebas en planta de fundición de aluminio, con varias coladas comparativas.
- Analizar que medio de desgaste se presenta en los moldes con él recubrimiento, ya sea abrasión, erosión o corrosión.
- Llevar a cabo reparaciones de moldes con el espreado térmico.
- Llevar a cabo pruebas en diferentes industrias que lleven a cabo proceso con moldes.
- Analizar como medio de recubrimiento en el sector médico.

Como recomendaciones para futuros trabajos hay que tener en cuenta lo siguiente:

Simulación:

1. Establecer las condiciones de frontera.

a) Definir las propiedades termo-físicas y dimensiones del molde.

2. Calcular el coeficiente de transferencia de calor.

a) Definir la dirección en que se desea medir el coeficiente de transferencia de calor.

b) Para molde permanente es recomendable utilizar valores iníciales de 2000 en la interfase.

c) Usar mallado fino en las áreas de interés, como en las superficies de la interfase metal-molde, en las demás zonas trabajar con mallado mayor.

3. Determinar la distribución de temperatura del molde.

4. Aprovechar la simetría que presente el molde. Esto reduce el tiempo de cálculo de la computadora y permite realizar un mayor número de corridas numéricas.

5. Eliminar los archivos temporales, ya que pueden generar bug en las soluciones.

Experimental:

1. Utilizar termopares con diámetro menor a 1 mm para el monitoreo de temperatura, para asegurar la menor invasión al molde, mayor interacción de superficie de respuesta en el termopar-sistema.
2. Correr a condiciones similares la experimentación, ya que, el enfriamiento se lleva a cabo por medio de convección natural.
3. Considerar las condiciones de vaciado a la temperatura de molde establecida.

ANEXO1.

ANEXO 2.

Bibliografía

[1] http://www.metalmecanica.com/temas/Eslabones-de-la-industria-mexicana-de-moldes+7088684

[2] Cengel Yunus A., Transferencia de calor, un enfoque práctico, Mc Graw Hill Series, México, 2007

[3] U. Jerichow, T. Altan, P. Sahm: ``Formación de metales semisólidos de aleaciones de aluminio. Los efectos variables del proceso sobre el flujo del material, el llenado de cavidades y las propiedades mecánicas``, Ingeniería de Fundición por gravedad, Jan/feb, 1998, pp. 26-35.

[4] K. Ho and R.D. Pehlke ``Transferencia de calor de interface de molde de metal``, Transacciones metalúrgicas, vol. 16B, 1985, pp. 585-594.

[5] R.D. Pehlke, S.W. Hao: Transferencia de calor en el molde - Interfaz de metal en moldeado permanente de aleaciones de aluminio Informe anual de estado del proyecto Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales - Universidad de Michigan Ann Arbor, MI 48109-2136 Septiembre 30, 1998. Preparado para el PREMIO DEL DEPARTAMENTO DE ENERGÍA DE EE. UU. NO. DE-FC07-97ID13559.

[6] Michael Trovant and Stravos Agryropoulos: *Transacciones Metalúrgicas B, vol 16B*, 2000.

[7] BENCOMO, A.I ; BISBAL, R.I ; MORALES, R.II, Simulación de la solidificación de la aleación de aluminio A356 fundida en moldes permanentes cilíndricos, Revista Matéria, v. 13, n. 2, pp. 294 – 303, 2008.

[8] García Pastor J. Francisco. Implementación de modelos matemáticos para representar la solidificación de aleaciones de aluminio en molde permanentes. 2004.

[9] Pehlke R.D., John M. Cookson, Shouwei Hao, Prasad, Krishna, Kevin T. Bilkey: Transferencia de calor en la interfaz entre el molde y el metal en la fundición permanente en molde de aleaciones de aluminio Informe final del proyecto Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería La Universidad de Michigan Ann Arbor, MI48109-2136 Diciembre 4,2001 Preparado para el PREMIO DEL DEPARTAMENTO DE ENERGÍA DE EE. UU. NO. DE-FC07-97ID13559.

[10] Alloy Kuo J H, Hsu F L, Hwang W S, Yeh J L, Chen S J Efectos del revestimiento del molde y el material del molde sobre el coeficiente de transferencia de calor en la interfaz de fundición / molde para la fundición permanente de aluminio A356 Transacciones de la Sociedad Americana de Fundición, volumen 109, páginas 1-17, 2001.

[11] Griffiths, W.D. Coeficientes de transferencia de calor modelados para Al-7 wt. Fundiciones de aleación de% Si solidificadas unidireccionalmente horizontal y verticalmente hacia abajo, Ciencia y Tecnología de Materiales (UK), 2000, Vol. 16, No. 3, p. 255-260.

[12] L.J.D. Sully: *AFS Trans.,* 1976, vol. 84, pp. 735-44.

[13] Y. Nishida and H. Matsubara: *Br. Hombre de Fundición,* 1976, vol. 69, pp. 274-78.

[14] J.A. Sekhar, G.J. Abbaschian, and R. Mehrabian: *Mater. Sci. Eng.,* 1979, vol. 40, pp. 105-10.

[15] J. Isaac, G. Reddy, and G.K. Sharma: *Br. Fundidor,* 1985, vol. 78, pp. 465-68.

[16] Y. Nishida, W. Droste, and S. Engler: *Metall. Trans. B,* 1986, vol. 17B, pp. 833-44.
[17] N.A. El-Mahallawy and A.M. Assar: *J. Mater. Sci.,* 1991, vol. 26, pp. 1729-33.
[18] F. Chiesa: *AFS Trans.,* 1990, vol. 98, pp. 193-200.
[19] M.A. Taha, N.A. El-Mahallawy, A.W.M Assar, and R.M. Hammouda: *J. Mater. Sci.,* 1992, vol. 27, pp. 3467-73.
[20] M. Krishnan and D.G.R. Sharma: *AFS Trans.,* 1994, vol. 102, pp. 769-74.
[21] C.A. Muojekwu, I.V. Samarasekera, and J.K. Brimacombe: *Metal. Materia. Transcrito. B,* 1995, vol. 26B, pp. 361-82.
[22] I.S. Cho and C.P. Hong: *Int. J. Cast Met. Res.,* 1996, vol. 9, pp. 227-32.
[23] T.G. Kim and Z.H. Lee: *Int. J. Transferencia de masa de calor,* 1997, vol. 40, pp. 3513-25.
[24] T. Nguyen, D. Gunasegaram, L. Luo, and R. Eisdale: *Avanzada en tecnología de fundición de aluminio: Proc. Materiales Soluciones Conf. '98 sobre tecnología de fundición de aluminio,* Rosemont, IL, pp. 191-97.
[25] S. Ramachandran, V. Balasubramanian, and P.V. Ananthapadmanabhan, Optimización multiobjetivo de los parámetros del proceso de pulverización de plasma atmosférico para depositar recubrimientos de zirconia estabilizados con itria utilizando la metodología de superficie de respuesta, J. Tecnología de pulverización térmica., 2011.
[26] C. David Lozano Mandujano, Dr. Juan Muñoz Saldaña, Dr. Carlos Agustín Poblano Salas, Fabricación de recubrimientos para barreras térmicas de materiales base $La_2Zr_2O_7$ depositados mediante APS, y caracterización de sus propiedades mecánicas y estructurales, mayo del 2014.
[27] Efecto de los parámetros de procesamiento de HVOF sobre las propiedades de los recubrimientos de NiCoCrAlY mediante el diseño de experimentos, 29 de

diciembre de 2013; en forma revisada abril 21, 2014 by H. Ruiz-Luna, D. Lozano-Mandujano, J.M. Alvarado-Orozco, A. Valarezo, C.A. Poblano-Salas, L.G. Trápaga-Martinez, F.J. Espinoza-Beltrán, and J. Muñoz-Saldaña DOI: 10.1007/s11666-014-0121-2

[28] E. Lugscheider, C. Herbst, and L. Zhao, Estudios de parámetros sobre la pulverización de oxicombustible a alta velocidad de recubrimientos de NiCoCrAlY, 1998.

[29] Anand A. Kulkarni, Allen Universidad Goland y Herbert Herman en Stony Brook, Stony Brook, NY, 11794; Caracterización microestructural avanzada de recubrimientos de circonio rociados con plasma sobre, escalas de longitud extendida.

[30] http://www.aluminum-production.com/index.html.

[30] I.J. Polmear, “Aleaciones ligeras, metalurgia de los metales ligeros”, Edward Arnold, (1981).

[31] G. E. Dieter, “Metalurgia mecánica, SI edición métrica” McGraw-Hill, (1988), pp. 275-292.

[32] http://www.world-aluminium.org/statistics

[33] K.G. Budinski, “Materiales de ingeniería: propiedades y selección”, 5A Ed., EUA, E. Prentice Hall, (1996), pp. 29-37, 517-537.

[34] J.G. Kaufman, E. L. Rooy , ““Propiedades, procesos y aplicaciones de fundición de aleación de aluminio”, Sociedad Americana de Fundición / ASM Parque Industrial de Materiales OH., (2005).

[35] J. E. Gruzleski, B. M. Closset “Aluminum and Aluminum Alloys”, Des Plaines, Sociedad Americana de Fundidores, (1990).

[36] F.R.Morral, Emiliano Jimeno, P. Molera “Metalurgia General Volumen II”, reverte, 1985, ISBN: 8429160736, 9788429160734.

[36] E. L. Rooy, Pieza vaciada, ASM Manual, Vol. 15, ASM, Internacional Ohio, EUA, 1988.
[37] E. L. Rooy, Aluminio y aleaciones de aluminio, Compañía de Fundición de Aluminio de América, EUA, 1988.
[38] Holman J. P., Transferencia de Calor, McGraw Hill Inc, 8th edition. 1999.
[39] Stephen H. Davis, Teoría de la solidificación, monografías de Cambridge sobre mecánica, Universidad Northwestern,2003, ISBN 0511019246, page1-4.
[40] W. Kurz & D. J. Fisher, Fundamentos de solidificación, tercera edición 1989, publicación trans tech 1992, ISBN 0878495223, páginas 1-10.
[41] J.P. Gollub and J.S. Langer, Rev. Mod. Phys. 1999, 71, S396-S403.
[42] A. Karma en ramificación en la naturaleza (Ed.: V. Fleury, J.-F. Gouyet, and M. Leonetti)
Springer, Berlín, 2001, Capítulo 9.
[43] K. Dragevski, R. F. Cochrane, y A.M. Mullis, Phys. Rev. Lett. 2002, 89, 215502.
[44] R. Willnecker, D.M. Herlach, and B. Feuerbach, Appl. Phys. Lett. 1990,56, 324–326.
[45] M. Schwarz, A. Karma, K. Eckler, and D.M. Herlach, 1994, 73, 1380–83.
[46] Walker, J. L. (1958). Metales líquidos y solidificación, ASM, Cleveland, p. 319.
[47] Chalmers, B. (1964). Principios de Solidificación, John Wiley, New York, p. 259
[48] Jackson, K. A., Hunt, J. D., Uhlmann, D. R. and Seward, T. P. 111 (1966). Trans. Met. Soc. AIME, 236, 149.
[49] Biloni, H. (1968). La solidificación de metales, publicación IST 110, p. 74.
[50] Walton, D, and Chalmers, B. (1959). Trans. Met. Soc. AIE, 215, 447.

[51] Herbert, P. M. and Hellawell, A. (1962). Proc. Roy. Soc., A269, 560.
[52] Cibula, A. (1949). J. Inst. Metales, 76, 321.
[53] Glasson, E. L. and Emley, E. F. (1968). La solidificación de metales, primera publicación 110, p. 1.
[54] Cole, G. S., Casey, K. W. y Bolling, G. F. (1970). Met. Trans., 1st, 1413.
[55] Kattamis, T. Z., Holmberg, U. T. y Flemings, M. C. (1967). J. Inst. Metals, 95, 343.
[56] Hall, H. T. and Jackson, W. J. (1968). La solidificación de metales, primera publicación 110, p. 313.
[57] Fauchais P., and Vardelle M. Pulverización de plasma: presente y futuro, química pura y aplicada 66(6) (1994) 1247-1258.
[58] Sampath S., and Herman H. Desarrollo microestructural de recubrimientos proyectados por plasma. en la 12ª Conferencia Internacional sobre Pulverización Térmica. Editado por Berndt, C.C. El Instituto de Soldadura, Cambridge, U.K. (1989) 761-766.
[59] Nicholls J.R., Deakin M.J., and Rickerby, D.S. Una comparación entre el comportamiento de erosión de la pulverización térmica y los recubrimientos de barrera térmica de deposición de vapor físico por haz de electrones. 235 (1999) 352-361.
[60] Hass D.D., Slifka A.J., and Wadley H.N.G. Microestructuras de Zirconia depositadas en vapor de baja conductividad térmica. Acta Materialia 49(6) (2001) 973-983.
[61] Kulkarni A., Vaidya A., Goland A., Sampath S., and Herman H. Efectos del procesamiento sobre las correlaciones de la propiedad de porosidad en recubrimientos de zirconia estabilizados con itria pulverizados con plasma. Ciencia e Ingeniería de los Materiales A 359 (2003) 100-111.

[62] Hass, Derek. (2001). Deposición de vapor dirigida de recubrimientos de barrera térmica. Tesis (Ph. D.) - Universidad de Virginia, 2001.
[63] E. A. G. Shillington and D. R. Clarke, Fallo por desprendimiento de un revestimiento de barrera térmica asociado con el agotamiento del aluminio en la capa de unión, Departamento de Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad de California, 1998, 1-9.
[64] I. Gurrappa and A. Sambasiva Rao, Recubrimientos de barrera térmica para mejorar la eficiencia de los motores de turbina de gas, Surf. cov. Technol., 2006, 201(6), p 3016-3029.
[65] J. Rósler, M. Baker and M. Volgmann, Estado de tensión y mecanismo de falla de los recubrimientos de barrera térmica: papel de la fluencia en TGO. Acta materalia inc., 2001, p 3659-3670.
[66] Langhahr P.A, Oberacker R., and Hoffmann M.J. Comportamiento a largo plazo y límites de aplicación de los recubrimientos de barrera térmica de zirconia rociados con plasma. Revista de la Sociedad Americana de Cerámica 84(6) (2001) 1301-1208.
[67] 4. A.G. Evans, D.R. Mumm, J.W. Hutchinson, G.H. Meier, and F.S. Pettit, Progreso en ciencia de materiales 46, 505 (2001).
[68] X.Q. Cao, R. Vassen, and D. Stoever, Revista de la Sociedad Europea de Cerámica 24, 1 (2004).
[69] E. Lugscheider, C. Herbst, and L. Zhao, , Estudios de parámetros sobre la pulverización de oxicombustible a alta velocidad de recubrimientos MCrAlY, Surf. Coat. Technol., 1998, 108--109(1–3), p 16-23.
[70] Matejka D., and Benko B. Pulverización con plasma de materiales metálicos y cerámicos. (1989) John Wiley & Sons. 280.

[71] Vardelle M., Vardelle A., Leger A.C., Fauchais P., and Gobin D. Influencia de los parámetros de las partículas en el impacto sobre la formación y solidificación de las salpicaduras en los procesos de pulverización de plasma. Diario de spray térmico Technology 4(1) (1995) 50-58.
[72] Bianchi L., Blein F., Lucchese P., Vardelle M., Vardelle A., and Fauchais P. Efecto de la velocidad de las partículas y la temperatura del sustrato en la formación de placas de alúmina y zirconia. en Aplicaciones Industriales de Pulverización Térmica (1994) Boston, MA: ASM International, Materials Park, OH, USA.
[73] Herbert Herman, Sanjay Sampath, and Robert McCune, Boletín de la Sociedad de Investigación de Materiales, 17 (Julio, 2000). 12.
[74] D.R. Poirier, G.H. Geiger. Fenómenos de transporte en el procesamiento de materiales. TMS 1994.

Índice de figuras.

Figura 1.1. Estructura atómica Al. 30
Figura 1.2. Mineral de alúmina. 32
Figura 1.3. Tendencia de producción mundial del aluminio [32]. 33
Figura 1.4. Producción mundial de principales productores de aluminio por año [32]. 34
Figura 1.5. Principales elementos aleantes del aluminio y series según el sistema de designación de aleaciones de aluminio [31]. 35
Figura 1.6. Monobloque (parte izquierda) y cabezal de aluminio (parte derecha), partes de un automóvil. 38
Figura 1.7. Diagrama de Equilibrio Al-Si, mostrando los tipos de aleaciones [37]. 44
Figura 1.8. Piezas fundidas. 45
Figura 1.9. Temperaturas de fusión de principales elementos en fundición. 46
Figura 1.10. Diferentes tipos de procesos de fundición en la industria. 47
Figura 1.11. Proceso de fundición de cera pérdida o *investment casting*. 49
Figura 1.12. Proceso de fundición en molde permanente. 50
Figura 1.13. Proceso de fundición en arena. 51
Figura 1.14. Tipos de molde a) consumible b) permanente. 52
Figura 1.15. Orden de criterio para el diseño de moldes. 53
Figura 1.16. Molde con simetría con su parte inferior y posterior (core y drag). 53
Figura 1.17. Pieza obtenida de fundición con mazarotas o alimentadores. 54
Figura 1.18. Selección de la cavidad de un molde. 54
Figura 1.19. Partes de diseño de un molde para su correcto llenado. 55

Figura 1.20. Partes de diseño de un molde. 55
Figura 1.21. Modelo de fundición empleando el tipo matriz con gap adecuado.57
Figura 1.22. Layout de modelo de fundición en matriz. 58
Figura 1.23. Tipos de disposición de un molde. 59
Figura 1.24. Tipos de defectos evitados con el uso de mazarotas. 59
Figura 1.25. Tipos de defectos presentes en las fundiciones. 60
Figura 1.26. Tipos de defectos presentes en las fundiciones en el exterior. 61
Figura 1.27. Tipos de defectos presentes en las fundiciones en el interior. 61
Figura 1.28. Tipos de defectos presentes en las fundiciones en ejecución. 62
Figura 1.29. Tipos de transferencia de calor [2]. 63
Figura 1.30. Mecanismo de transferencia de calor por conducción [2]. 64
Figura 1.31. Mecanismo de transferencia de calor por convección [2]. 65
Figura 1.32. Mecanismo de transferencia de calor por radiación [2]. 66
Figura 1.33. Sección longitudinal de aleación Zn-27%Al [39]. 69
Figura 1.34. Diagrama de solidificación para un metal puro [39]. 70
Figura 1.35. Vaciado de la pieza vaciada y solidificación en zona de enfriamiento [40]. 71
Figura 1.36. Sección transversal de una pieza fundida mostrando diferentes zonas de solidificación [46]. 72
Figura 1.37. Diferentes zonas de una solidificación controlada [46]. 73
Figura 1.38. Estructura dendrítica de tetrabromuro de carbono, después de una fluctuación en la tasa de crecimiento [48]. 74
Figura 1.39. Relación tamaño cristal columnar y tamaño de grano equi-axial [52]. 75
Figura 1.40. A) Estructura de acero vaciado normal 18%Cr-12%Ni y b) mismo metal refinado por inoculación [56]. 76

Figura 1.41. Composición de una barrera térmica. 78
Figura 1.42. Comparación de barreras térmicas por diferentes métodos [62]. 79
Figura 1.43. Diversidad de materiales para barreras térmicas. 80
Figura 1.44. Conductividad térmica de distintos óxidos aislantes como una función de la temperatura [67]. 81
Figura 1.45. Coeficientes de expansión térmica en función de conductividad térmica de distintos óxidos y aleaciones [67]. 86
Figura 1.46. Proceso de deposición EB-PVD [62]. 87
Figura 1.47. Proceso de deposición de rociado térmico. 90
Figura 1.48. Forma característica de un splat. 91
Figura 1.49. Factores que influyen en la formación de un splat. 92
Figura 1.50. Influencia de distancia de rociado en la formación de un splat. 93
Figura 1.51. Influencia de calentamiento del substrato en la formación de un splat [72]. 93
Figura 1.52. Tipos de técnicas de rociado térmico. 96
Figura 1.53. (a) Fotografía de un dispositivo LVFS (Sulter Metco), low velocity flame spray, donde la fuente de calentamiento de las partículas es generada por combustión y el rociado es de baja velocidad. (b)Esquema de proceso de calentamiento usando como fuente de calentamiento un combustible [73]. 97
Figura 1.54. (a) Fotografía de una pistola de HVOF (Cortesía de CENAPROT). (b)Esquema de una fuente de spray de HVOF [73]. 99
Figura 1.55. Muestra de la flama producida utilizando una fuente de calentamiento eléctrico (cortesía CENAPROT). 100
Figura 1.56. Esquema detallado de una fuente de APS [73]. 101

Figura 1.57. (a) Fotografía de un dispositivo para el rociado en frío. (b) Esquema de una fuente de rociado en frío [73]. 103
Figura 1.58. Microestructura característica del rociado térmico. 104
Figura 1.59. Representación esquemática de la interfase metal-molde durante la solidificación. 108
Figura 1.60. Temperaturas relativas en la interface metal-molde para solidificación unidireccional, sin resistencia en la interface. 111
Figura 1.61. Evaluación del valor de β. 112
Figura 1.62. Modelado en ProCAST. 116
Figura 2.1. Detalle del modelo para realizar la pieza vaciada. 117
Figura 2.2. Sistema de recepción de datos de perfil de solidificación. 119
Figura 2.3. Sistema de fundición de la pieza. 120
Figura 2.4. Sistema de recolección de datos de termopares. 121
Figura 2.5. Sistema de un termopar. 122
Figura 2.6. Dimensión de molde de geometría sencilla con ubicación de termopozos. 123
Figura 3.1. Entradas y Salida de un experimento con variables involucradas. 129
Figura 3.2. Proceso de fundición y vaciado de experimentación. 131
Figura 3.3. Pistola de gravedad utilizada en experimentación. 132
Figura 3.4. Sistema de medición de espesor por capa de pintura. 133
Figura 3.5. Robot KUKA usado para la deposición química. 136
Figura 3.6. Procedimiento de preparación del sustrato. 137
Figura 3.7. Recubrimiento obtenido por rociado térmico. 137
Figura 3.8. Equipo usado para obtención de acabados de pintura y barrera térmica. 138
Figura 3.9. Programa de LabVIEW para medición de temperaturas. 139

Figura 3.10. Cortadora usada en la experimentación. 140
Figura 3.11. Báscula usada en la experimentación. 140
Figura 3.12. Medición de temperatura obtenida por lector de datos tipo DAQ.141
Figura 3.13. Equipo de fundición usado en experimentación. 142
Figura 3.14. Eliminación de hidrógeno disuelto con lanza de grafito. 142
Figura 3.15. Eliminación de impurezas. 143
Figura 3.16. Proceso de pintura y preparación de molde. 143
Figura 3.17. Proceso de desmolde para obtención de piezas. 144
Figura 3.18. Captura de datos de historial térmico de enfriamiento. 145
Figura 3.19. Probetas de las piezas obtenidas durante la experimentación. 145
Figura 3.20. Pulidora utilizada para el desbaste y acabado espejo. 146
Figura 3.21. Equipo utilizado para análisis de las piezas vaciadas. 147
149
Figura 3.22. Entrada principal del software ProCAST. 149
Figura 3.23. Componentes del molde en CAD. 150
Figura 3.24. Mallado de los componentes del molde en MeshCAST. 151
Figura 3.25. Condiciones iniciales en molde PreCAST. 151
Figura 3.26. Condiciones frontera en molde PreCAST. 153
Figura 3.27. Condición constante por *die casting* en PreCAST. 153
Figura 3.28 Parámetros y activación de simulación en PreCAST. 154
Figura 4.1. Acabado de deposición de pintura base silicio/alúmina. 155
Figura 4.2. Acabado de deposición de pintura mica. 156
Figura 4.3. Acabado superficial de recubrimiento Zirconia estabilizado con 8% Itria. 157
158
Figura 4.4. Acabado superficial de recubrimiento de óxido de magnesio 158

Figura 4.6. Microestructura de molde H-13, con pintura de mica 124µm. 160
Figura 4.7. Microestructura molde H-13, con pintura base sílice/alúmina con 162 µm. 161
Figura 4.8. Microestructura de molde Hierro gris grado 60, con pintura base sílice/alúmina 162 µm. 162
Figura 4.9. Mapeo de microestructura de molde H-13, grafito y 124 µm de espesor de mica, respectivamente. 163
Figura 4.10. Mapeo de microestructura de molde H-13 y hierro gris grado 60, con pintura base silicio/alúmina con un espesor de 162 µm. 164
Figura 4.11. Análisis puntual en microestructura molde H-13, sin pintura. 165
Figura 4.12. Análisis puntual en microestructura molde H-13, con 124 µm de espesor de mica. 166
Figura 4.13. Análisis puntual en microestructura molde H-13 y Hierro Gris grado 60 con pintura base silicio/alúmina con un espesor de 162 µm. 167
Figura 4.14. Microestructura molde H-13 con barrera térmica YSZ al 8% con un espesor de 385 µm. 168
Figura 4.15. Microestructura molde H-13 con barrera térmica YSZ al 8% con un espesor de 540 µm. 170
Figura 4.16. Microestructura molde Hierro gris grado 60 con barrera térmica de óxido de magnesio con un espesor de 540 µm. 171
Figura 4.17. Mapeos de moldes de H-13 con barrera térmica YSZ al 8%, con un primer espesor de 385 µm y segundo espesor de 540 µm. 172
Figura 4.18. Mapeos de molde de Hierro gris grado 60 con barrera térmica de óxido de magnesio de 540 µm de espesor. 173

Figura 4.19. Análisis puntual a microestructura molde H-13 con barrera térmica de YSZ al 8% con un primer espesor 385 µm y segundo espesor 540 µm. 174
Figura 4.20. Análisis puntual a microestructura de molde Hierro gris grado 60 con barrera térmica de óxido de magnesio con un espesor de 540 µm. 175
Figura 4.21. Isotermas molde H-13 con recubrimiento de mica a 1/2´´ de distancia. 176
Figura 4.22. Isotermas molde H-13 con recubrimiento de mica a 3/4´´ de distancia. 176
Figura 4.23. Isotermas molde H-13 con recubrimiento de mica a 1´´ de distancia. 177
Figura 4.24. Isotermas molde H-13 con sílice/alúmina a 1/2´´ de distancia. 178
Figura 4.25. Isotermas molde H-13 con sílice/alúmina a 3/4´´ de distancia. 178
Figura 4.26. Isotermas molde H-13 con sílice/alúmina a 1´´ de distancia. 179
Figura 4.27. Isotermas molde hierro gris grado 60 con sílice/alúmina 1/2´´ de distancia. 180
Figura 4.28. Isotermas molde hierro gris grado 60 con sílice/alúmina 3/4´´ de distancia. 180
Figura 4.29. Isotermas molde hierro gris grado 60 con sílice/alúmina 1´´ de distancia. 181
Figura 4.30. Isotermas molde H-13 con 8% YSZ a 1/2´´ de distancia. 182
Figura 4.31. Isotermas molde H-13 con 8% YSZ a 3/4´´ de distancia. 182
Figura 4.32. Isotermas molde H-13 con 8% YSZ a 1´´ de distancia. 183
Figura 4.33. Isotermas molde H-13 con 8% YSZ interfase. 183
Figura 4.34. Isotermas molde H-13 con 8% YSZ a centro pieza. 184

Figura 4.35. Isotermas molde hierro gris grado 60 Óxido de Mg a 1/2´´ de distancia. 185
Figura 4.36. Isotermas molde hierro gris grado 60 Óxido de Mg 3/4´´ de distancia. 185
Figura 4.37. Isotermas molde hierro gris grado 60 Óxido de Mg 1´´ de distancia. 186
Figura 4.38. Isotermas molde hierro gris grado 60 Óxido de Magnesio interfase. 186
Figura 4.39. Isotermas molde hierro gris grado 60 Óxido de Magnesio centro pieza. 187
Figura 4.40. Isotermas molde H-13 diferentes depósitos a 1/2´´ de distancia. 188
Figura 4.41. Isotermas molde H-13 diferentes depósitos a 3/4´´ de distancia. 188
Figura 4.42. Isotermas molde H-13 diferentes depósitos a 1´´ de distancia. 189
Figura 4.43. Isotermas molde hierro gris grado 60 diferentes depósitos 1/2´´ distancia. 190
Figura 4.44. Isotermas molde hierro gris grado 60 diferentes depósitos 3/4´´ distancia. 190
Figura 4.45. Isotermas molde hierro gris grado 60 diferentes depósitos 1´´ distancia. 191
Figura 4.46. Simulación de enfriamiento en ViewCAST. 192
Figura 4.47. Localización de nodos de termopares en PreCAST. 193
Figura 4.48. Obtención de datos tipo .tt. 194
Figura 4.49. Proceso de selección de módulo inverso. 195

Índice de tablas.

Tabla1.1. Cálculos de coeficiente de transferencia de calor reportados en literatura. 25
Tabla 1.2. Literatura encontrada sobre el proceso de rociado térmico. 29
Tabla 1.3. Sistemas de designación para aleaciones de aluminio [31]. 36
Tabla 1.5. Composición química del aluminio 356.0. 39
Tabla 1.6. Idóneos para la fundición de aceros y aleaciones de aluminio. 48
Tabla 1.7. Tolerancias de contracción según la aleación. 56
Tabla 1.8. Porcentajes de defectos en fundición. 60
Tabla 1.9. Refinadores de grano para cierto tipo de aleaciones. 77
Tabla 1.10. Propiedades de recubrimientos de barreras térmicas [68]. 84
Tabla 1.11. Ventajas de rociado térmico en deposición de barreras térmicas. . 95
Tabla 1.12. Tipos de microestructuras obtenidas por rociado térmico para barreras térmicas y otras características. 105
Tabla 2.1. Composición química del material H-13. 118
Tabla 2.2. Variación del coeficiente de expansión lineal con la temperatura. . 118
Tabla 2.3. Materiales de fabricación de las puntas en el termopar tipo k. 122
Tabla 2.4. Propiedades térmicas de la aleación 356.0 124
Tabla 2.5. Composición química del polvo comercial METCO 365-4. 126
Tabla 2.6. Composición de fases del polvo comercial METCO 204NS. 126
Tabla 2.7. Temperaturas de fusión de los polvos cerámicos comerciales METCO365-4 Y 204NS. 127
Tabla 3.1. Espesor de pintura aplicado por capa con pistola de gravedad pintura WALLACOAT y MICA. 134

Tabla 3.2. Condiciones de rociado térmico óptimas para HVOF y APS [26]. ... 135
Tabla 3.3. Espesores depositados de la barrera térmica en moldes. 137
Tabla 3.4. Descripción de elementos en software ProCAST. 149
Tabla 3.5. Condiciones frontera de molde. 152
Tabla 4.1.Estimación de ´h´(W/m^{2}K), pintura y barrera cerámica en molde H-13. 196