

INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

PROYECTO FINAL DE GRADO

Estudio del efecto de inoculantes sobre la macro y microestructura de las fundiciones de hierro con grafito

Autor: GONZÁLEZ, JUAN PEDRO

Legajo: 13.106

DNI: 40.758.986

Correo electrónico: juannpedro83@gmail.com

Director del proyecto: Dr. Ing. MASSONE, JUAN

Co-director del proyecto: Dr. Ing. LÓPEZ, MARCOS

Evaluadores: Dr. Ing. STRACK, JORGE LUÍS

Dr. Ing. FERNANDINO, DIEGO

Ing. MANDRI, ALEJO



RINFI es desarrollado por la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

PROYECTO FINAL DE GRADO

Estudio del efecto de inoculantes sobre la macro y microestructura de las fundiciones de hierro con grafito

Autor: GONZÁLEZ, JUAN PEDRO

Legajo: 13.106

DNI: 40.758.986

Correo electrónico: juannpedro83@gmail.com

Director del proyecto: Dr. Ing. MASSONE, JUAN

Co-director del proyecto: Dr. Ing. LÓPEZ, MARCOS

Evaluadores: Dr. Ing. STRACK, JORGE LUÍS

Dr. Ing. FERNANDINO, DIEGO

Ing. MANDRI, ALEJO

Índice

Índice	1
Resumen	4
Abstract	5
Objetivos generales y específicos:.....	6
Capítulo 1: Marco teórico	7
Introducción y metodología:.....	7
Objetivos:.....	7
1.1. Conceptos básicos de solidificación y tecnología de la fundición	7
1.1.1. Fundiciones de hierro con grafito.....	7
1.1.2. Fundamentos de la solidificación de aleaciones metálicas.....	12
1.1.3. Tecnologías de la fundición.....	15
1.1.3.1. Moldes, modelos y cajas.....	15
1.1.3.2. Inoculantes y métodos de inoculación.....	18
1.1.4. Técnicas de revelado de la estructura de solidificación.....	19
1.1.4.1. Direct Austempering After Solidification (DAAS).....	19
1.2. Análisis térmico	21
1.2.1. Principios del análisis térmico.....	21
1.2.2. Instrumental para realizar el análisis térmico.....	26
Conclusiones:.....	31
Bibliografía empleada en este capítulo:	32
Capítulo 2: Diseño de sistemas de alimentación	33
Introducción:.....	33
Objetivos:.....	33
Metodología:.....	33
2.1. Primer diseño de los sistemas de alimentación	34
2.1.1. Definición de los primeros sistemas.....	34
2.1.2. Simulación del flujo de fluido en las cámaras de inoculación.....	48
2.2. Segundo diseño y verificación de los sistemas	55
Conclusiones:.....	67
Bibliografía empleada en este capítulo	68
Capítulo 3: Preparación para la colada y selección del sistema más eficiente	69
Introducción:.....	69

Objetivos:.....	69
Metodología:.....	69
3.1. Preparativos previos a la colada.....	69
3.1.1. Armado de los moldes.....	69
3.1.2. Preparación del horno y cancha de colada.....	74
3.2. Procedimiento para realizar la colada.....	75
3.2.1. Preparación del metal líquido.....	75
3.3. Llenado de los moldes.....	75
3.3.1. Sistema único.....	75
3.4. Resultados de la colada.....	76
3.4.1. Rendimiento de las cámaras.....	76
3.4.2. Análisis espectrométrico.....	77
3.4.3. Conteo nodular.....	78
Conclusiones.....	88
Bibliografía empleada en este capítulo.....	90
Capítulo 4: Armado del molde instrumentado y desmoldeo en caliente.....	91
Introducción:.....	91
Objetivos:.....	91
Metodología:.....	91
4.1. Preparación de la colada para realizar el desmoldeo en caliente.....	92
4.1.1. Obtención del tiempo de desmoldeo.....	92
4.1.2. Organización de la cancha de colada.....	94
4.1.3. Designación de roles.....	96
4.2. Resultados de la primera colada con desmoldeo en caliente.....	98
4.2.1. Análisis de las piezas obtenidas.....	100
4.2.1.1. Análisis microscópico.....	103
4.2.1.2. Análisis macroscópico.....	105
4.3. Resultados de la segunda colada con desmoldeo en caliente.....	108
4.3.1. Análisis de las piezas obtenidas.....	108
4.3.1.1. Análisis microscópico.....	108
4.3.1.2. Análisis macroscópico.....	110
4.4. Validación de resultados.....	115
Conclusiones:.....	119
Bibliografía empleada en este capítulo.....	120
Conclusiones generales.....	121

Trabajos futuros.....	121
Anexo I.....	122

Resumen

Las fundiciones de hierro con grafito constituyen un conjunto de materiales ampliamente empleado desde hace muchas décadas en diversas aplicaciones en la industria automotriz, agrícola y metalmecánica, lo que las coloca, aún hoy en día, en una posición de relevancia tanto en el mercado nacional como internacional. Al tratarse de un material colado, es ampliamente reconocido que sus cualidades y prestaciones mecánicas tienen estrecha dependencia de su estructura de solidificación, por lo que resulta fundamental lograr una profunda comprensión del mecanismo de solidificación.

El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de distintos inoculantes sobre la macro y micro estructura de solidificación de las fundiciones de hierro con grafito, de forma tal de determinar las condiciones de inoculación más efectivas para refinar los granos primarios de austenita. Para eso, se busca diseñar un sistema de alimentación con una cámara de reacción que permita disolver el inoculante dentro de ella. Una vez que el inoculante se disuelve y se incorpora a la pieza, mediante la técnica de desmoldeo en caliente *Direct Austempering After Solidification*, se hace posible visualizar la estructura de solidificación, lo que permite estudiar las variaciones en la estructura en función de la cantidad de inoculante incorporado.

En este trabajo fue posible diseñar un sistema de alimentación con una cámara de reacción para inoculación que permite de manera eficiente incorporar inoculante y realizar el desmoldeo en caliente. En las experiencias realizadas se observó que la incorporación del inoculante *FeSi75* tiende a refinar la estructura de solidificación de las fundiciones esferoidales.

Abstract

Free graphite cast irons constitute a set of materials widely used for many decades in various applications in the automotive, agricultural, and metalworking industries, which places them, even today, in a position of relevance both in the national and international markets. As a cast material, it is widely recognized that its mechanical properties and performance are closely dependent on its solidification structure, making it essential to achieve a deep understanding of the solidification mechanism.

The objective of this work is to evaluate the effect of different inoculants on the macro and micro solidification structure of free graphite cast irons, in order to determine the most effective inoculation conditions for refining the primary austenite grains. To achieve this, a feeding system with a reaction chamber will be designed to allow the inoculant to dissolve within it. Once the inoculant is dissolved and incorporated into the piece, the hot shake-out technique known as Direct Austempering After Solidification will be used to visualize the solidification structure, which allows to study variations in this structure based on the amount of inoculant incorporated.

It was possible to design a feeding system with a reaction chamber for inoculation that efficiently incorporated the inoculant and performed hot demolding. With the conducted experiments, it was observed that the incorporation of the *FeSi75* inoculant tends to refine the solidification structure of free graphite cast iron.

Objetivos generales y específicos:

El presente proyecto final de grado tiene como objetivo general estudiar el efecto de los inoculantes en las fundiciones de hierro con grafito a partir del análisis de la macro y micro estructura de las piezas coladas. Para esto, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar un sistema de alimentación que permita utilizar una cámara de reacción para inoculación in-mould y realizar el desmoldeo en caliente, empleando modelado computacional del llenado y solidificación del metal líquido en el molde.
- Efectuar la colada del material utilizando el molde diseñado, empleando diferentes tipos y cantidades de inoculantes dispuestos en el interior del molde y llevando un registro de la temperatura del metal durante el llenado y solidificación.
- Efectuar el revelado de la macro y micro estructura de las piezas obtenidas, empleando la técnica *DAAS* y ataque con reactivos convencionales.
- Caracterizar el tamaño y la morfología de los granos primarios de austenita para cada muestra, correlacionando dicha información con el tipo y cantidad de inoculante empleado en cada caso.

Capítulo 1: Marco teórico

Introducción y metodología:

En este capítulo se presentan los conceptos teóricos básicos, extraídos a partir de proyectos finales de grado previos, tesis doctorales, papers y publicaciones entre otras fuentes, que fueron utilizados para establecer el marco teórico de este proyecto final. Se busca resaltar los puntos más relevantes de la bibliografía recopilada y justificar la importancia en la realización de este proyecto.

Objetivos:

En este capítulo se plantean los siguientes objetivos:

- Resumir y presentar las fuentes de información asociadas a los principios y tecnologías de fundición, la técnica *DAAS* y el análisis térmico para el estudio de la solidificación.
- Obtener conclusiones a partir de la documentación presentada.

1.1. Conceptos básicos de solidificación y tecnología de la fundición

1.1.1. Fundiciones de hierro con grafito

Se define como fundición de hierro al conjunto de aleaciones *Fe-C* que poseen más de 2,14% de carbono (generalmente entre 2,6 y 3,6%), las cuales son mayoritariamente utilizadas en procesos de colada para la fabricación de distintos tipos de piezas. Las fundiciones difieren de los aceros por su composición química y sus propiedades tecnológicas.

En las fundiciones de hierro, la fase metálica que se obtiene de la solidificación es el hierro γ (*gamma*), conocido como austenita. En cuanto al carbono, dependiendo de la fase rica en este elemento que se forme al solidificar, se distinguen dos tipos de fundiciones:

- Fundición blanca: En este tipo de fundición la fase rica en carbono que se forma durante la solidificación es la cementita (Fe_3C). La formación de la fundición blanca es promovida por:
 - bajo contenido de carbono;

- bajo contenido de silicio y presencia de elementos formadores de carburos;
- alta velocidad de enfriamiento.

En la Figura 1.1 se presenta una captura de la microestructura típica de una fundición blanca.

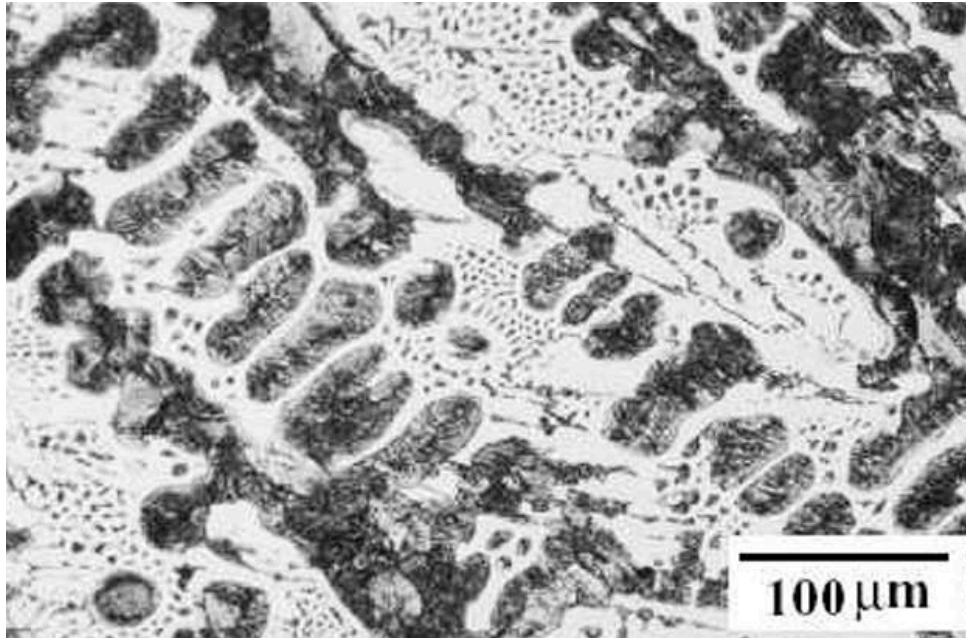


Figura 1.1: Microestructura típica de la fundición blanca, atacada con Nital 2%

- Fundición gris: En este tipo de fundición el carbono se encuentra en alto grado o en su totalidad formando grafito. Se presenta en la Figura 1.2 una captura de una microestructura típica de fundición vermicular, sin ataque:

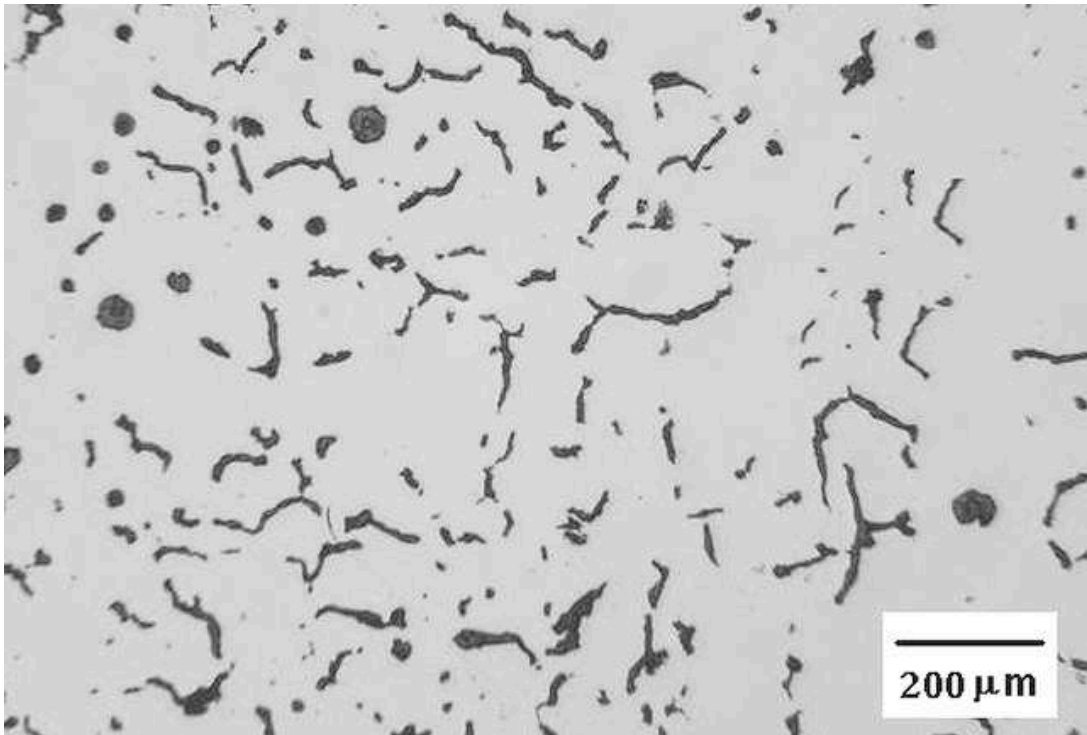


Figura 1.2: Microestructura típica de la fundición vermicular (gris) sin ataque

A su vez, la fundición gris se clasifica en tres grupos en función a la forma que tiene el grafito (Figura 1.3):

- Fundición laminar: En este caso, el grafito se presenta en forma de láminas;
- Fundición nodular: En este caso, el grafito se presenta en forma de nódulos o esferas;
- Fundición vermicular: En este caso, el grafito se presenta en forma de “gusanos”, siendo una forma intermedia entre el grafito nodular y el vermicular.

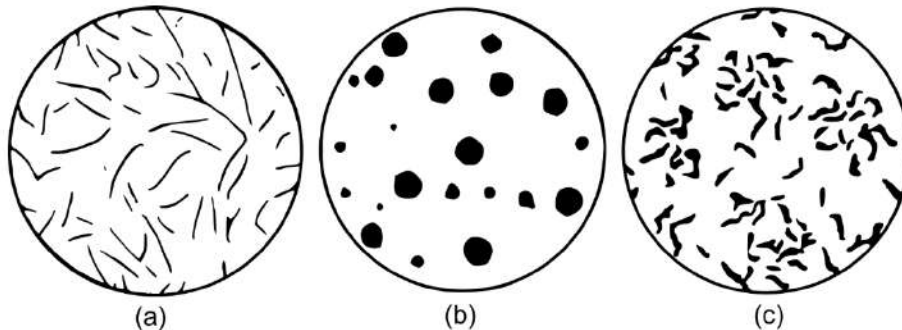


Figura 1.3: Representación esquemática de los diferentes tipos de fundición gris a) laminar, b) nodular y c) vermicular.

En el caso de las fundiciones nodulares se obtiene una mayor continuidad en la matriz metálica debido a la morfología aproximadamente esférica (esferoidal) del grafito, lo que da lugar a una resistencia a la tracción y tenacidad mayores que las de la fundición gris ordinaria.

La composición química de las fundiciones nodulares se destaca por su contenido más reducido de *S* y *P*, y la presencia de *Mg* en comparación con una fundición laminar. La adición de *Mg*, al igual que la de *Ce*, se emplea para producir grafito esférico. Sin embargo, el *Mg* es más conveniente y económico que el *Ce*. El *Mg* necesario para modificar la morfología del grafito de laminar a esférico (tratamiento de nodularización) puede ser agregado de varias formas, que incluyen aleaciones de *Ni-Mg*, *Ni-Si-Mg*, *Fe-Si-Mg* o *Mg* de coque. Los métodos de agregado incluyen la incorporación del *Mg* en la cuchara de colada, la técnica de la cuchara recubierta, técnicas en molde y otras. Los agregados son hechos en la medida justa antes de colar, en una cantidad suficiente para producir un contenido de *Mg* residual entre 0,03 y 0,05 %. La fundición obtenida debe ser inoculada simultáneamente, o posteriormente, al agregado de *Mg* (post inoculación). El *Mg* es desoxidante y desulfurante. Consecuentemente, sólo se modificará la morfología del grafito cuando los contenidos de *O* y *S* sean bajos. Luego del tratamiento con *Mg*, a medida que transcurre el tiempo de mantenimiento del metal en la cuchara, disminuye el contenido de *Mg* en la fundición, lo que puede producir que la estructura del grafito resultante luego de la solidificación cambie de nodular a vermicular, y finalmente a laminar. Este fenómeno de decaimiento es conocido con el nombre de *fading*.

Cuando el *Mg* residual en la fundición de hierro está por encima de 0,04 %, la estructura del grafito será de forma nodular. Con *Mg* residual menor que 0,015 % el grafito laminar será la principal forma presente. Por lo tanto, el contenido de *Mg* residual debe exceder en algo el umbral mínimo para obtener una fundición nodular de calidad. Cada colada de fundición de hierro con grafito esférico tiene como meta producir un material con una distribución fina y uniforme de nódulos de forma esférica, ya que esto promueve buenas propiedades mecánicas. La distribución de grafito se mide como el número de nódulos por unidad de área en la microestructura. La inoculación es usualmente empleada como medio para aumentar el conteo de nódulos por unidad de área.

Una segunda clasificación de las fundiciones de hierro con grafito se basa en la fase preponderante en su matriz metálica. El diagrama de la Figura 1.4 muestra que la austenita (γ) no es estable a temperatura ambiente, sino que por debajo de los 800 °C esta fase experimentará diversas transformaciones dependiendo de las condiciones de enfriamiento. Así, un enfriamiento lento podrá conducir a la transformación $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Grafito}$, de acuerdo al equilibrio estable. En cambio, enfriamientos más rápidos podrán llevar a la transformación en estado sólido $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Cementita}$, conocida como transformación perlítica, correspondiente al equilibrio metaestable. Otros ciclos de enfriamiento podrán generar microestructuras no contempladas en el equilibrio estable o metastable, como la bainita y la martensita. De esta manera, dependiendo de la velocidad de enfriamiento y de la presencia de diversos elementos de aleación es posible obtener distintas matrices metálicas a temperatura ambiente.

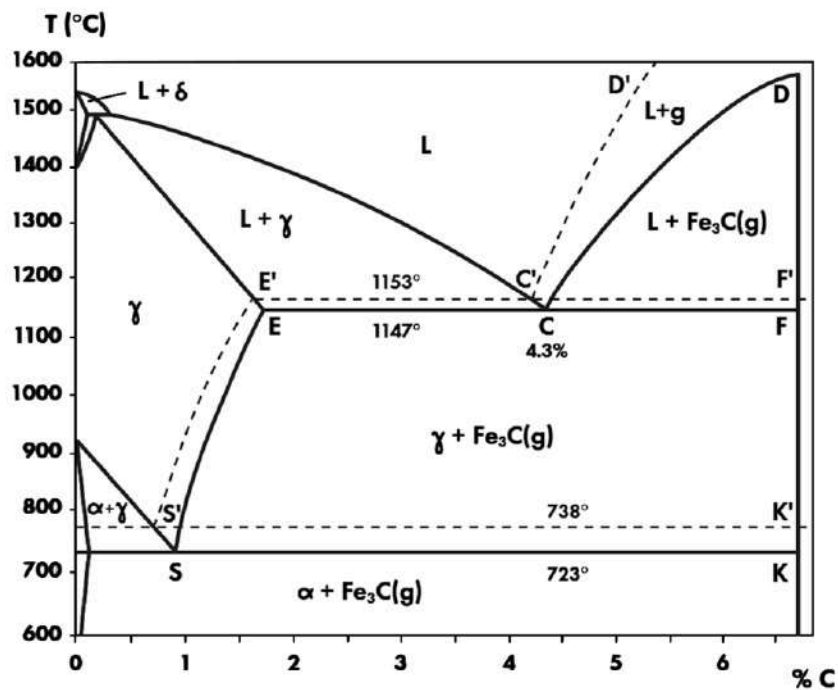


Figura 1.4: Diagrama de equilibrio Fe-C estable (línea punteada) y metaestable (línea llena)

Algunas de las principales matrices metálicas son:

- Matriz ferrítica: La ferrita (hierro α) es una solución sólida de carbono en hierro en la cual se pueden disolver cantidades apreciables de *Si* y algo de *Mn*, *Cu* y *Ni*. Es relativamente blanda, dúctil, de baja resistencia mecánica y con pobre resistencia al desgaste, buena tenacidad a la fractura, relativamente buena conductividad térmica y buena maquinabilidad. Una matriz ferrítica puede ser obtenida *as cast* (directamente de la colada sin necesidad de algún tratamiento térmico) pero a menudo es el resultado de un tratamiento térmico de recocido.

- Matriz perlítica: La perlita es una mezcla mecánica de ferrita y cementita, que se forma a partir de la transformación de la austenita por debajo de la temperatura eutectoide. Una matriz perlítica presenta mayor resistencia, pero menor ductilidad y maquinabilidad que una matriz ferrítica. El contenido de C en un acero perlítico no aleado es de 0,8 %. En las fundiciones de hierro con grafito la concentración de C en la austenita antes de su transformación por enfriamiento es variable, ya que el carbono estará parcialmente disuelto en austenita y parcialmente formando grafito. El contenido de Si, siempre presente en las fundiciones con grafito, y la temperatura inicial de la austenita afectan su contenido de C, pudiendo llegar a ser tan bajo como 0,5% en fundiciones de alto contenido de Si.
- Matriz ferrítico-perlítica: Esta estructura presenta propiedades mecánicas intermedias entre los dos tipos de matrices descritos anteriormente. Es la que se obtiene típicamente en condiciones as cast. La ferrita nuclea y crece en la interfase austenita grafito, ya que el grafito actúa como sumidero del carbono presente en la austenita. Por otro lado, en las regiones más alejadas de los precipitados de grafito la austenita se transforma en perlita. Para el caso de las fundiciones nodulares, una matriz ferrítico-perlítica da lugar a las denominadas microestructuras “ojo de buey”.
- Matriz ausferrítica: Se obtiene a partir de un tratamiento térmico de austemperizado. A diferencia de lo que ocurre en el austemperizado de aceros, en las fundiciones de hierro con grafito durante el austemperizado la austenita se transforma, en una primera etapa, en una mezcla de ferrita acicular y austenita metaestable de alto carbono, a la cual se la suele denominar ausferrita. En una segunda etapa la austenita se puede descomponer en ferrita + carburos, aunque esta transformación no es deseada porque perjudica las propiedades mecánicas del material. La matriz ausferrítica confiere a la fundición excelente resistencia mecánica, muy buena tenacidad y alta resistencia al desgaste.

Durante el proceso de colada se efectúan diferentes tratamientos sobre el metal líquido. Mientras se pasa del crisol del horno a la cuchara de colada, se agrega nodulizante para asegurar que el grafito disperso sea esferoidal; posteriormente se añade inoculante en cuchara. Esto se emplea para generar más centros de nucleación y fomentar la aparición de carbono libre. Además, se utiliza para ajustar el contenido de silicio y llegar a la composición deseada.

1.1.2. Fundamentos de la solidificación de aleaciones metálicas

La solidificación de cualquier aleación metálica comienza con la nucleación de la fase sólida, la cual generalmente sólo ocurre en condiciones de subenfriamiento del metal líquido. La nucleación ocurre durante un tiempo y escala que dificultan su observación directa.

En un proceso de colada convencional, el líquido típicamente solidifica en contacto con un molde sólido, y además contiene una variedad de inclusiones y escoria. De esta manera el

costo de establecer una interfase sobre estos elementos usualmente resulta más bajo que el costo de establecerla completamente sobre el líquido.

Una vez que se ha producido la nucleación, se deben agregar más átomos al cristal para que el crecimiento pueda continuar. Durante este proceso, la interfase sólido/líquido adquiere una estructura específica a escala atómica, cuya naturaleza dependerá de las diferencias en la estructura y en la unión entre las fases líquida y sólida. Cuando el gradiente de temperatura debido al flujo de calor es mayor que el gradiente de la temperatura de *liquidus* en la interfase sólido/líquido, esta última será estable y el frente de solidificación resultará plano. Por otro lado, se puede demostrar que la interfase sólido/líquido será inestable siempre que la pendiente de la curva del punto de fusión en la interfase (temperatura de liquidus) sea mayor que la pendiente de la distribución de temperatura real. Esto último se debe al fenómeno usualmente conocido con el nombre de subenfriamiento constitucional.

Para un subenfriamiento constitucional pequeño, las inestabilidades solo crecerán en la dirección de solidificación, y esto dará lugar a una interfase celular. La transición de un frente de solidificación plano a uno celular ocurrirá para un gradiente de temperatura menor que $G_{p/c}$ (Figura 1.5).

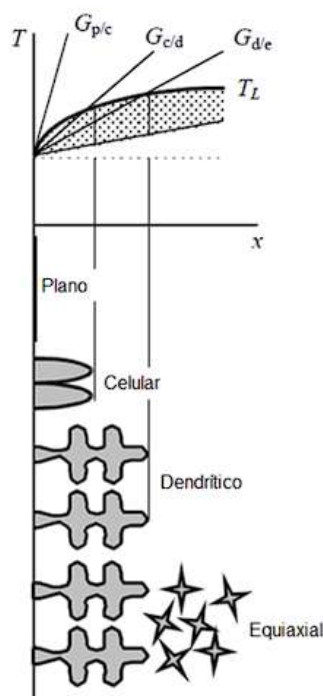


Figura 1.5: Correlación entre el gradiente de temperatura en la interfase y la morfología de la interfase

Sin embargo, a medida que aumenta el subenfriamiento constitucional debido a un gradiente de temperatura más bajo, aumenta el espacio entre las células, y el subenfriamiento

constitucional también puede ocurrir en la dirección perpendicular a la dirección de crecimiento. De esta manera, se desarrollarán inestabilidades en los lados de las células, lo que dará como resultado la formación de dendritas. La transición de un frente de solidificación celular a uno dendrítico ocurre en la Figura 1.5 a un gradiente de temperatura $G_{p/c}$. Tanto el crecimiento celular como el dendrítico que ocurre desde la pared en la dirección opuesta al flujo de calor pueden describirse como un crecimiento columnar.

Habitualmente, cuando un metal líquido es colado dentro de un molde de geometría simple, se habla de la producción de un “lingote”. La estructura de solidificación o “macroestructura” de los lingotes se define por la forma y la distribución de los granos de sólido que se forman. Generalmente, se pueden distinguir tres zonas:

- Zona *chill*: Caracterizada por tener una gran cantidad de granos refinados ubicados en las paredes del molde,
- Zona columnar: Caracterizada por tener granos alargados orientados en la dirección del gradiente de temperatura, y
- Zona equiaxial: Caracterizada por tener granos que crecen de manera uniforme.

Estas zonas se presentan en la Figura 1.6.

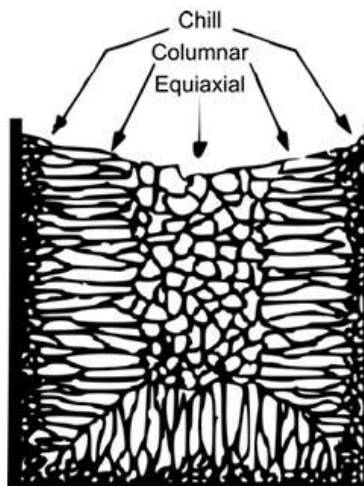


Figura 1.6: Regiones que se forman en una aleación solidificada en un molde.

En la intercara molde/metal, la velocidad de enfriamiento es más alta debido a la temperatura inicial relativamente baja del molde. Adicionalmente, la superficie del molde puede representar un sitio propicio para la nucleación heterogénea. En consecuencia, en la superficie del molde nuclean muchos granos pequeños que tienen orientaciones aleatorias, lo que da lugar a la formación de una zona equiaxial externa (zona *chill* en la Figura 1.6). Luego, al continuar la extracción de calor a través del molde, los granos de esta zona equiaxial superficial tenderán a crecer paralelos y opuestos al flujo de calor, con morfología dendrítica y brazos

alineados en la dirección opuesta al flujo de calor. Sin embargo, no todos los granos estarán orientados cristalinamente en una dirección favorable para su crecimiento. Así algunos granos mejor orientados crecerán más rápidamente y de forma preponderante, lo que lleva a la formación de una zona columnar de mayor tamaño de grano que la zona *chill*. Durante el crecimiento de la zona columnar se pueden distinguir tres regiones. Estas son el líquido, la zona pastosa (compuesta por líquido + sólido) y la región sólida. La zona pastosa es la región donde se determinan todas las características microestructurales, es decir, la forma, el tamaño y la distribución de las zonas segregadas, de los precipitados y de los defectos de contracción.

1.1.3. Tecnologías de la fundición

1.1.3.1. Moldes, modelos y cajas

Una de las etapas importantes en una fundición es la fabricación del molde y de los hoyos, una vez definido el modelo, la caja de hoyos y el material de moldeo. Para fabricar este molde se dispondrán desde simples cajas, aparejos y pisones manuales, hasta equipos de moldear sofisticados, tales como *turnovers* o sopladoras de hoyos. Dentro de las tecnologías o formas para fabricar los moldes, se hace foco principalmente en el moldeo en banco, ya que es el utilizado para la realización de este trabajo final. El moldeo en banco se emplea para colar piezas pequeñas, en mesas de trabajo con la altura conveniente para el moldeador ya que el moldeo será manual. Si bien las piezas son pequeñas, si el modelo es de buena calidad, por ejemplo, de acero con aristas reforzadas en AISI D2 (*Special K*) y emplacado, se pueden moldear grandes partidas.

Definido el sistema de moldeo, se procede a colocar el modelo en la caja de moldeo (Figura 1.7). Las cajas de moldeo son los marcos donde quedan contenidas las cavidades de moldeo. Las cajas ordinarias son bastidores de paredes verticales, con detalles sobre sus laterales para atrapar mecánicamente a las arenas, al menos durante las operaciones de moldeo y desmoldeo. Las hay de tamaños muy variados y dado que no son de bajo costo, en caso de trabajar con altas producciones, se debe establecer un buen diseño en las operaciones de moldeo. Si bien los marcos suelen ser ferrosos, en caso de necesitar disminuir los pesos se pueden optar por marcos de aluminio; a menudo se opta por marcos de madera, reforzados con perfiles metálicos, pero no son recomendables debido a que los lógicos derrames que se producen durante el ataque a los moldes tienden a degradarlos rápidamente. En cajas de mayor tamaño, los marcos cuentan con goznes perpendiculares a las paredes. Estos se utilizan para poder mover las cajas con sistemas auxiliares de elevación y traslado.



Figura 1.7: Distintos tipos de cajas de moldeo

Un modelo es una pieza de madera, plástica, metálica o de algún material compuesto, que permite moldear, generalmente en arenas de moldeo, cavidades que posteriormente serán coladas con algún material en estado líquido, que luego de un determinado tiempo enfríe y solidifique. Por lo tanto, los modelos son similares a las piezas a obtener, y generan en los moldes todas las superficies inversas a las suyas. No es necesario que los modelos tengan todas las cavidades necesarias, ya que los venteos o la cavidad para las coquillas pueden realizarse manualmente después del curado del molde. Lo que sí es importante es que las cavidades que se realizan con el modelo queden efectivamente fieles a la forma original. Se muestra en la Figura 1.8 un ejemplo de modelo (sin la pieza) hecho con impresora 3D, en PLA, donde se muestran las partes más importantes a plasmar en el molde. La pieza se ubica en la parte superior del ataque hacia la pieza.

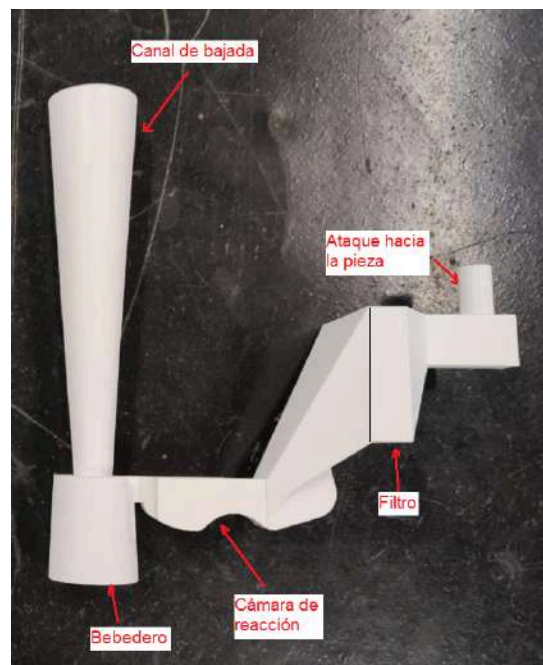


Figura 1.8: Modelo utilizado para la conformación de moldes con la descripción de sus partes

El canal de bajada es el canal por el cual el metal líquido ingresa al molde. Este canal se conecta con el exterior mediante un basín, el cual hace ingresar al metal mediante desborde. Con esto se controla el caudal con el que ingresa el metal, evitando así un flujo turbulento el cual puede degradar las paredes del molde. Este metal cae en la base del bebedero donde, nuevamente mediante desborde, dirige el metal fundido a la cámara de reacción. La cámara de reacción es el volumen el cual va a contener el inoculante. A diferencia de lo que se busca por regla general dentro de un molde, es importante que en la zona de la cámara el fluido tenga turbulencia para que pueda disolver el inoculante y evitar cualquier tipo de inclusión no deseada en la pieza.

En el caso de que se arrastren impurezas, inoculante no disuelto o cualquier otro elemento no deseado hacia la pieza, estos pasarán por un filtro de cerámica para que a la pieza solo ingrese metal líquido libre de impurezas de tamaño pequeño. Los filtros utilizados en este trabajo final son los filtros de agujeros redondos, de 60x60 mm como el de la Figura 1.9.



Figura 1.9: Filtro de agujeros redondos

Por último, se tiene un ataque que hace ingresar al metal filtrado a la pieza. Si bien este ataque no parece tener demasiada complejidad, para piezas de mayor tamaño o coladas de múltiples piezas es necesario diseñar y dimensionar múltiples ataques de forma de asegurar un llenado completo y no turbulento de las piezas y reducir el tiempo de mecanizado posterior al llenado del molde.

La arena por sí misma no puede contener el metal líquido, por lo que, en general, se mezcla esta arena con resina (llamada *Parte A*). De esta forma, los granos de arena se encuentran recubiertos con resina y cuando esta fragua, crea uniones muy fuertes entre los granos, que permite contener el metal líquido. La reacción de la resina no puede ocurrir si no se mezcla con un catalizador (llamado *Parte C*). Si bien la reacción puede demorar decenas de horas, este tiempo se reduce agregando a la mezcla un acelerador (llamado *Parte B*). En la Planta Piloto del Área Metalurgia del INTEMA (AMI) se usa una resina con las proporciones de Parte B y Parte C que se muestran en la Tabla 1.1.

Porcentajes de ligante / arena				
Arena	1 kg	5 kg	10 kg	15 kg
Resina	10 gr	50 gr	100 gr	150 gr
Catalizador (Parte C)	2 gr	10 gr	20 gr	30 gr
Acelerador (Parte B)	0,4 gr	2 gr	4 gr	6 gr

1°) Mezclar arenas con resinas por 2 minutos.
 2°) Luego agregar el catalizador y el acelerador (si es necesario) y mezclar por un minuto más.
 3°) Moldear a la brevedad.
 4°) Desmoldear en no más de 60' para evitar que la mezcla atrape al modelo y esperar 2 o 3 horas hasta que endurezca el molde.

Tabla 1.1: Proporciones de las partes A, B y C en función a la cantidad de arena.

1.1.3.2. Inoculantes y métodos de inoculación

Se entiende por inoculación a la adición a la colada de productos basados principalmente en *Fe-Si* o silicato de calcio, con el fin de incrementar el potencial de nucleación de grafito en la fundición de hierro. También es usada para evitar la formación de carburo metaestable en secciones delgadas. La inoculación es uno de los procesos más importantes y ampliamente utilizados en la producción de fundiciones de hierro con grafito. La capacidad de una fundición para solidificar de acuerdo al diagrama *Fe-C* estable aumenta al inocular ya que esto provee centros de nucleación para el grafito. El *FeSi* es frecuentemente usado para esto; sin embargo, ni el *Fe* ni el *Si* son inoculantes. Estos elementos actúan como portadores de otros elementos tales como el *Ca*, *Ba*, *Al*, *Sr*, *B* y *Zr* los cuales están presentes en concentraciones relativamente bajas en la fundición y pueden llegar a actuar como centros de nucleación para el grafito. Los inoculantes fortalecen la tendencia a la solidificación gris, afectando la forma del grafito y, posiblemente, incrementando el número de colonias eutécticas. Una inoculación correcta del líquido con un potencial de grafitización adecuado hace posible evitar las estructuras no deseadas.

La inoculación puede realizarse de diversas formas, entre ellas se encuentran:

- Inoculación en cuchara;
- Inoculación “*in stream*”;
- Inoculación en molde.

Particularmente, la inoculación en molde o “*in mould*” consiste en agregar el inoculante dentro del molde para obtener un determinado carbono equivalente (%CE) sin necesidad de cambiar la composición química de toda la mezcla. Para calcular el %CE se recurre a la ecuación 1.1:

$$\%CE = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3} \quad (1.1)$$

Este efecto se produce únicamente cuando se utiliza FeSi como inoculante. Sin embargo, uno de los problemas asociados con este tipo de inoculación es que, al llegar a la cámara de reacción, el metal experimenta un descenso de temperatura que reduce su capacidad para fundir y disolver el inoculante. Por ello, resulta crucial estudiar estrategias para optimizar este proceso y garantizar un alto grado de incorporación del inoculante.

1.1.4. Técnicas de revelado de la estructura de solidificación

1.1.4.1. *Direct Austempering After Solidification (DAAS)*

La técnica *DAAS* permite obtener una estructura ausferrítica a temperatura ambiente a partir de la austenita de solidificación. En la Figura 1.10 se observa el ciclo térmico de la técnica *DAAS* y se lo compara con el de un austemperizado normal.

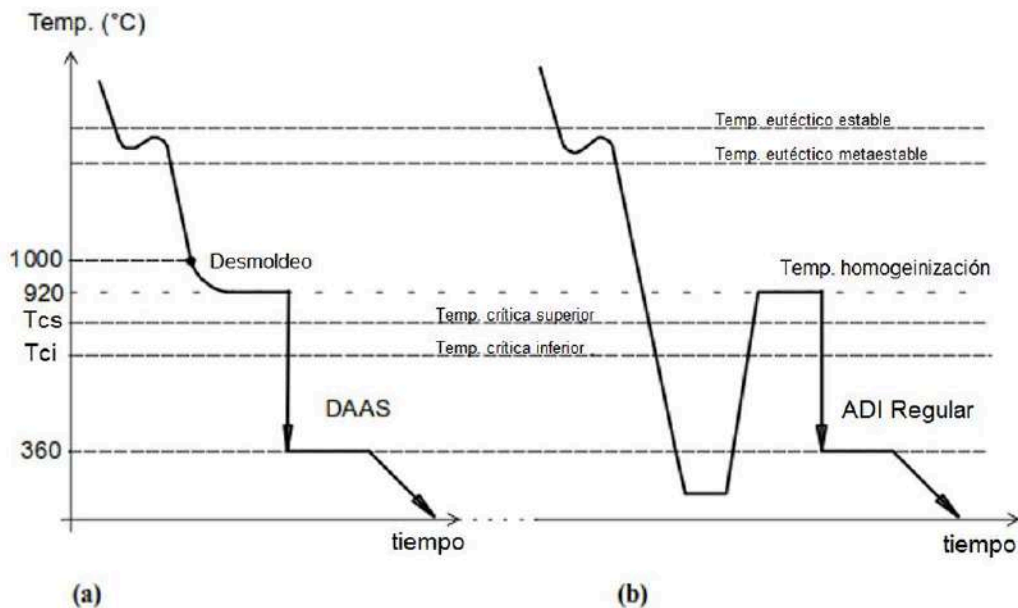


Figura 1.10: (a) Ciclo térmico de la técnica DAAS. (b) Ciclo térmico de un austemperizado normal

Durante el DAAS la pieza de fundición de hierro con grafito es extraída del molde aproximadamente a 1000 °C y es introducida en un horno para homogeneizar su temperatura alrededor de los 920 °C durante 30 minutos. Posteriormente se lleva a cabo un austemperizado en un baño de sales a 360 °C durante unos 90 minutos.

Como resultado de la aplicación de la técnica DAAS se obtiene una microestructura con una matriz conformada por agujas de ferrita y austenita retenida, en la cual esta última mantiene la orientación cristalina definida durante la solidificación. El empleo de una alta temperatura de austemperizado (360 °C) permite maximizar el porcentaje de austenita retenida en las muestras.

La aplicación de esta técnica es particularmente compleja, ya que hay un gran número de factores experimentales que pueden producir que el revelado de la macroestructura no se realice correctamente. En primer lugar, el hecho de desmoldear la pieza en caliente implica trabajar con una pieza a elevada temperatura que presenta un riesgo para los operarios involucrados. En segundo lugar, como el proceso requiere de un alto grado de precisión tanto en la temperatura como en el tiempo de desmoldeo para que sea realizado correctamente, cualquier error en las simulaciones computacionales, en la programación de los hornos, coladas, composición química y demás resultaría en una falla del proceso. Por último, en caso de fallar el proceso y no revelar la macroestructura de solidificación, la pieza debe ser descartada, ya que no se puede volver a realizar el tratamiento. Esto se debe a que la austenita que se obtendría de realizar un austemperizado posterior al DAAS mal realizado se encuentra recristalizada y no guarda relación alguna con la austenita original obtenida durante la solidificación.

Una vez que la técnica es aplicada correctamente, luego de efectuar el corte y pulido de las muestras, es posible revelar la estructura de los granos de austenita primaria al efectuar el ataque químico con un reactivo convencional. La Figura 1.11 muestra una macroestructura de solidificación obtenida luego de aplicar la técnica DAAS y empleando Picral (5 %) como agente para atacar la superficie pulida.

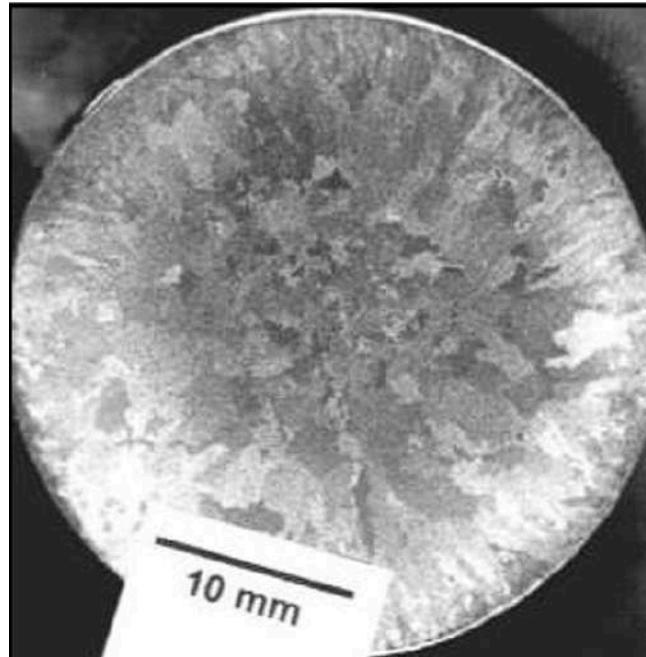


Figura 1.11: Macrografía luego de DAAS y Picral (5%)

1.2. Análisis térmico

Los principales métodos para controlar una colada de fundición de hierro son el análisis químico, el análisis de la macro/micro-estructura, y el análisis térmico, del cual se hablará en esta sección.

1.2.1. Principios del análisis térmico

El análisis térmico es un proceso que permite determinar de manera directa las temperaturas a la que ocurren las transformaciones de fase en un material. Esta determinación se realiza a partir de observar la variación de calor con respecto a la tasa de cambio de la temperatura de una determinada muestra. Un ejemplo de análisis térmico es el estudio que se realiza sobre las curvas de enfriamiento obtenidas en moldes de prueba, que son curvas en las que su forma final se ve afectada por dos factores principales:

- Transferencia de calor desde el molde hacia los alrededores.
- Transformaciones de fase que ocurren en la muestra.

Las curvas de enfriamiento pueden ser relevadas empleando pequeños moldes en los que se realiza el colado del metal líquido, en general de uso único, que disponen de una termocupla en su interior. Estos moldes son denominados “copas”.

La información obtenida del análisis de las curvas de enfriamiento puede ser usada no solo para el control del procesamiento del metal fundido, sino también para la comprensión cuantitativa del fenómeno de solidificación.

Debido a la relación directa entre la temperatura *liquidus* (T_L) y la composición (%C), se ha utilizado el análisis térmico para relevar diagramas de fase, como se muestra en la Figura 1.12. Sin embargo, la curva de enfriamiento experimental será levemente diferente a la curva de enfriamiento teórica, debido a que experimentalmente habrá un subenfriamiento con respecto a la temperatura de equilibrio. Además, el equilibrio termodinámico de la temperatura de *liquidus* será en muchos casos mayor a la temperatura de no-equilibrio medido con la termocupla.

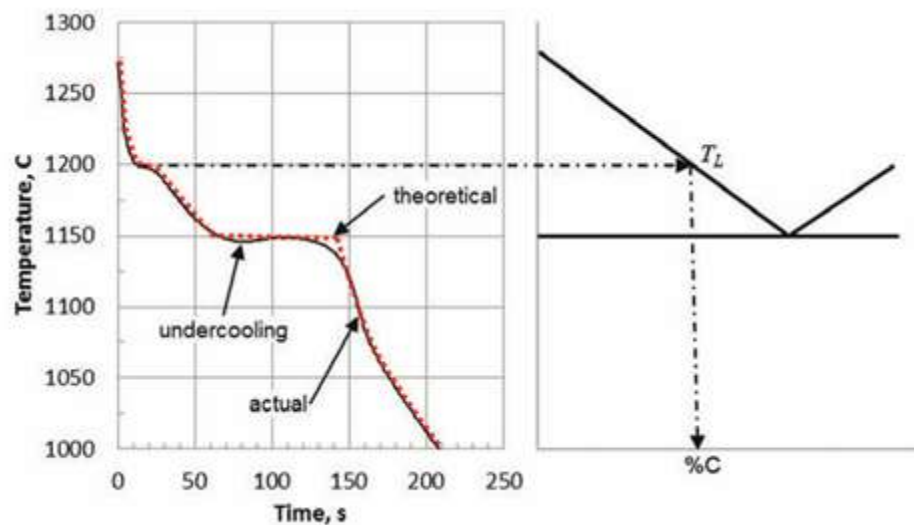


Figura 1.12: Curva de enfriamiento teórica y experimental para una aleación hipoeutéctica

La curva de enfriamiento obtenida durante la solidificación es una respuesta directa a los cambios de temperatura en la termocupla, que se ven afectados por el calor latente de solidificación y el calor disipado por la copa. Los cambios que el metal sufre durante la solidificación se ven reflejados en la forma de la curva de enfriamiento.

Uno de los primeros objetivos del análisis térmico aplicado a las fundiciones de hierro fue predecir la nodularidad de las fundiciones esferoidales. Esta línea de investigación se enfocó en la forma, tanto de la curva de enfriamiento como de la primera y segunda derivada. De esta manera, se pudo correlacionar varios datos de temperatura con elementos de microestructura, lo que luego permitió predecir la morfología de grafito vermicular. Además, con el cálculo derivativo se pudo estudiar la tasa de variación de la curva de enfriamiento junto con

el inicio y final de transformaciones (Figura 1.13). Si bien está claro el significado físico de la primera y segunda derivada, no ocurre lo mismo con derivadas de mayor orden.

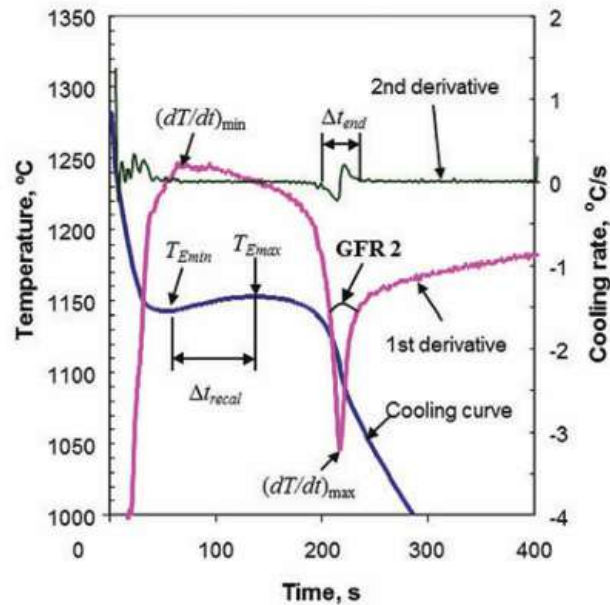


Figura 1.13: Curva de enfriamiento típica, su primera y segunda derivada, y los puntos característicos

En la Figura 1.13 es posible observar:

- La curva de enfriamiento, en azul;
- La primera derivada, en rosa;
- La segunda derivada, en negro.

En la Figura 1.14, se puede observar la denominada “curva cero”, que se obtiene al extrapolar la primera derivada de la curva de enfriamiento sin considerar transformaciones de fase.

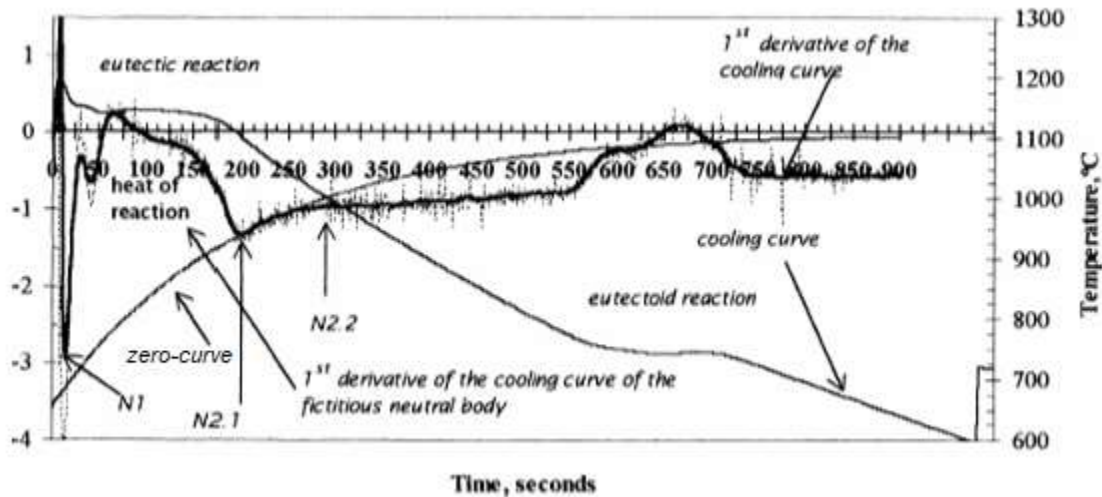


Figura 1.14: Curva cero a partir de extrapolar 50 puntos de la primera derivada

Analizando la definición de la curva cero, se puede comprender que cualquier diferencia que experimente la curva de enfriamiento de un material bajo análisis respecto de la curva cero, significa que se está desarrollando en su seno una transformación de fase, y ésta es precisamente la información necesaria para llevar adelante los análisis. El calor latente involucrado durante el proceso de solidificación se puede calcular multiplicando el área encerrada entre las dos curvas anteriormente mencionadas, durante el periodo de solidificación, por el calor específico. A modo de ejemplo la Figura 1.15 muestra la curva de enfriamiento de una fundición gris hipoeutéctica (con carbono equivalente de 3,9%), su primera derivada y la curva cero. El área rayada entre las curvas es proporcional al calor latente de solidificación. Se puede observar que el área indicada como A1 corresponde a la solidificación de austenita pro-eutéctica y el área A2 a la solidificación del eutéctico.

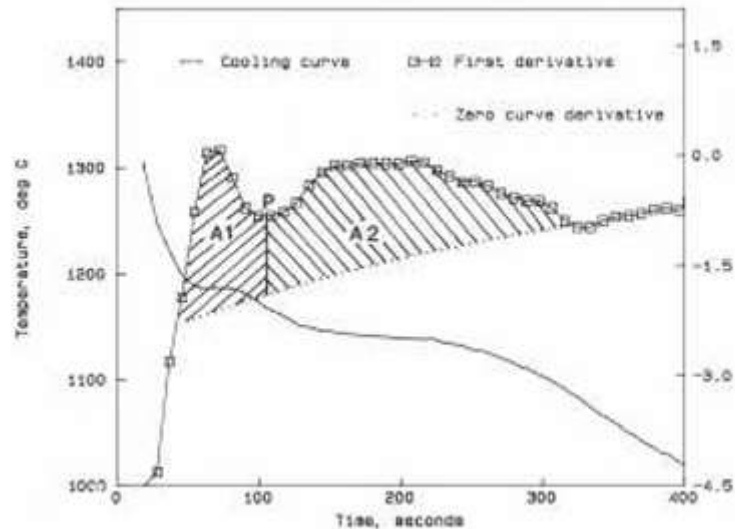


Figura 1.15: Curva de enfriamiento, primera derivada y curva de cero, graficadas para una fundición gris hipoeutéctica con %CE=3,9%. Calor latente = 247 KJ/Kg

Particularmente, en este proyecto final se busca utilizar el análisis térmico para validar el tiempo de desmoldeo en caliente obtenido a partir de las simulaciones. Esto se realiza con la intersección de la curva cero y la primera derivada de la curva de enfriamiento. Estas dos curvas se intersectan en dos puntos. Estos puntos corresponden a un intervalo de tiempo luego del cual el metal está totalmente solidificado. En esta situación es posible realizar el desmoldeo en caliente.

La adición de varios inoculantes al hierro afecta en gran medida la temperatura eutéctica y esto puede asimismo ser detectado por medio del análisis térmico. Por ejemplo, como se muestra en la Figura 1.16, la adición de 0,002% de Bi baja la $T_{E\ min}$ por 5°C e incrementa la $T_{E\ máx}$ en 1,7 °C.

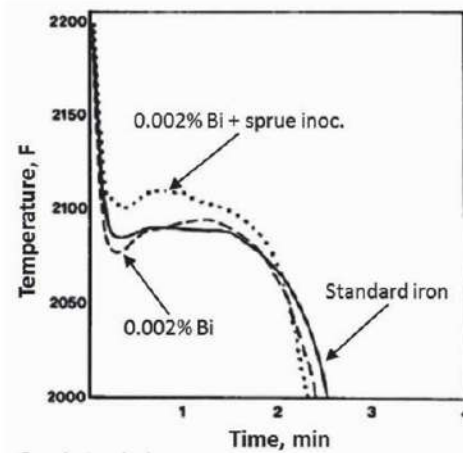


Figura 1.16: Efecto de la inoculación de Bi en fundición esferoidal

1.2.2. Instrumental para realizar el análisis térmico

Para realizar estas mediciones y relevar las curvas de enfriamiento, se utilizan copas de arena de moldeo las cuales cuentan con una termocupla tipo K cubierta en cuarzo. Estas copas pueden o no tener en el fondo un piso de telurio, lo que permite generar fundición blanca. Para este proyecto final, este efecto no es deseado ya que las muestras coladas son de fundición gris y la curva de enfriamiento necesaria para el análisis térmico no tendría validez si fuese de fundición blanca. En general, este tipo de curvas se utilizan cuando quiere determinarse por análisis térmico el contenido de C y de Si. Se muestra en la Figura 1.17 (a) un dibujo esquemático de la copa junto con una curva de enfriamiento típica; y en la Figura 1.17 (b) una copa real.

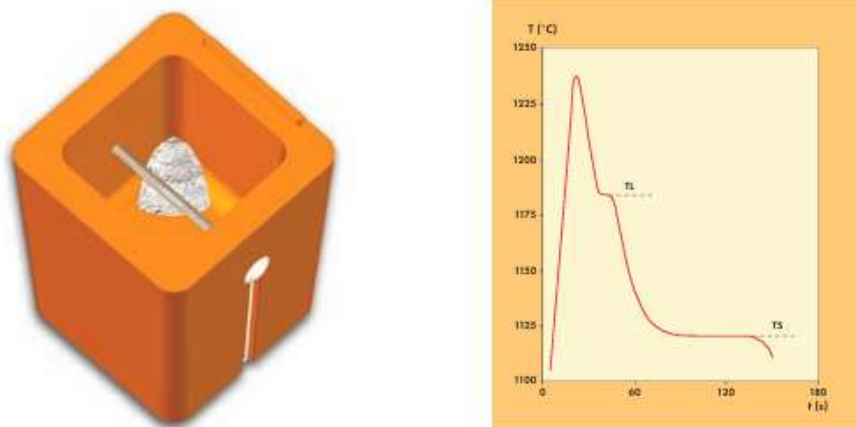


Figura 1.17 (a): Esquemático de la copa y curva de enfriamiento típica

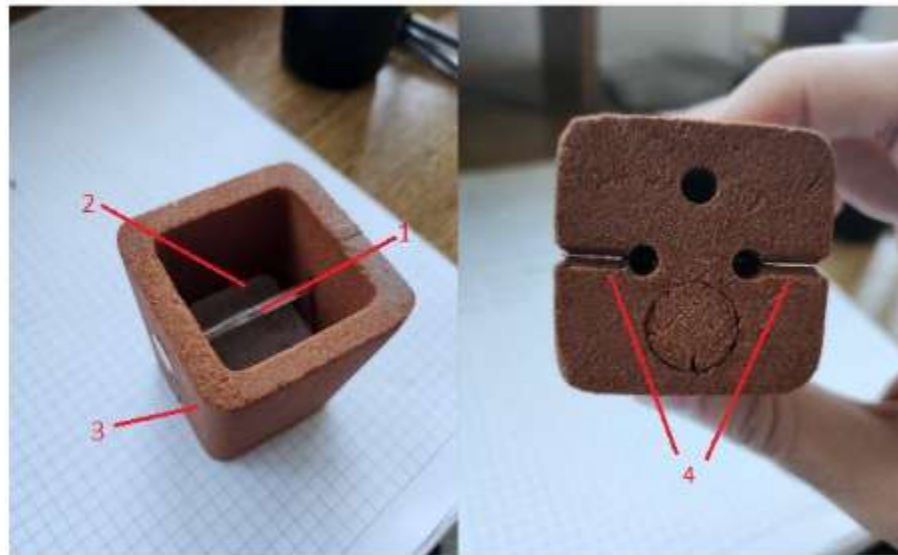


Figura 1.17 (b): Copa de análisis térmico real

Las anotaciones de la Figura 1.17 (b) se corresponden con:

1. Unión metálica recubierta en cuarzo.
2. Fondo de telurio.
3. Copa formada con arena base sílice.
4. Alambres de la termocupla.

Con respecto a los instrumentos de medición se utilizará una placa adquisidora de datos. La placa es un modelo *Personal DAQ 56* (Figura 1.18). La placa cuenta con 10 canales analógicos y 16 canales digitales. Esta placa toma los datos de la copa y los traduce en una computadora mediante un *software* incluido junto con la placa. Este software registra hasta 25 datos por segundo y permite relevar las curvas de enfriamiento necesarias para validar las simulaciones computacionales.



Figura 1.18: Placa adquisidora de datos

Para conectar la copa a la placa se recurre a una base. La copa cuenta con tres bornes ubicados de forma tal que no sea posible posicionar la copa con la polaridad de los alambres de manera incorrecta y evita que se produzcan caídas de tensión o *fems* parásitas (Figura 1.19 a, b y c).

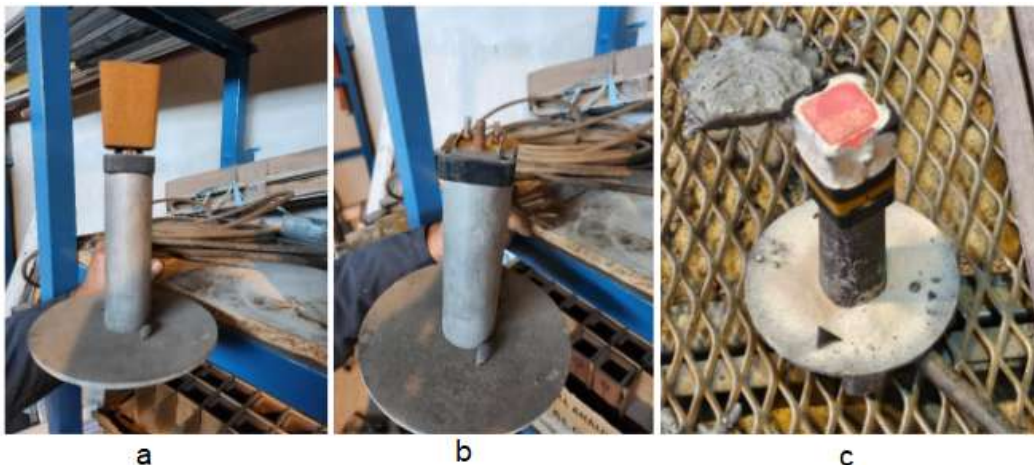


Figura 1.19: (a): Base de la copa con la copa incluida. (b) Base de copa sin la copa. (c) Base con cables compensados y copa registrando el enfriamiento del metal.

Para el análisis térmico es necesario registrar los datos de temperatura a medida que ocurre la solidificación. Para esto se utilizan termocuplas, específicamente del tipo K. Una termocupla (Figura 1.20) consiste en un par de conductores de diferentes metales o aleaciones. Uno de los extremos, la junta de medición, está colocada en el lugar donde se ha de medir la temperatura (T o T_1). Los dos conductores salen del área de medición y terminan en el otro extremo, la futura de referencia, que se mantiene a temperatura constante (T_R o T_2). Si se

presenta un gradiente de temperatura en dos conductores eléctricos unidos, el flujo de calor creará un movimiento de electrones y con ello se genera una fuerza electromotriz (*fem*) en dicha región.

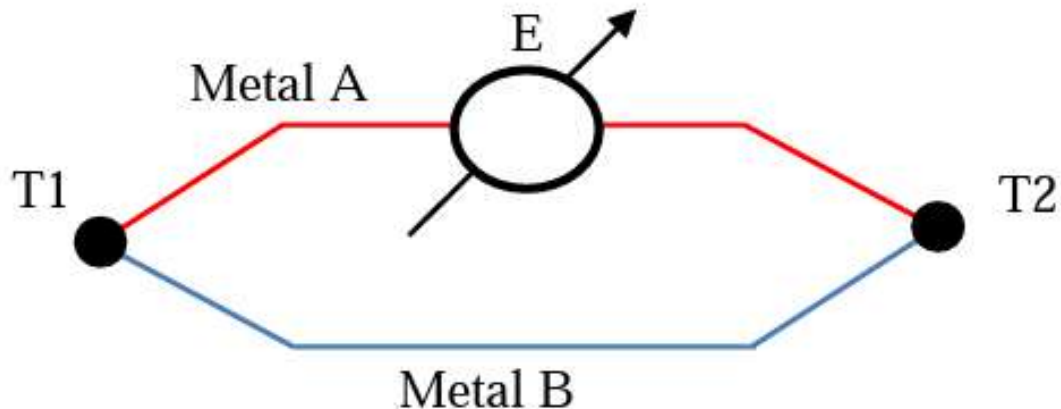


Figura 1.20: Esquema de una termocupla

Es de fundamental importancia la prolongación de los alambres termopares hasta la junta de referencia, que puede estar lejos de la junta de medición y no siempre afectada por altas temperaturas, como en el caso de los alambres de termocupla. Para ello se utilizan los cables compensados. El propósito de estos cables es únicamente el de trasladar la junta de referencia hasta un lugar adecuado (de temperatura estable o conocida) y luego compensar el error. Los cables compensados reproducen las mismas curvas de respuesta y de tolerancia $mV/^{\circ}C$ que las termocuplas entre 0 y 200 $^{\circ}C$. Se los utiliza sólo por razones económicas ya que su composición química difiere de las aleaciones de termocupla, buscando entonces que los materiales sustitutivos sean más económicos que éstos. Es fundamental conectar estos de forma correcta, ya que si estuviesen mal conectados la polaridad sería inversa y se registrarían temperaturas fuera del rango admisible. Si bien los cables compensados están normalizados mediante un código de colores, puede ocurrir que el cable esté sin aislante o esté mal colocado. Es por eso que se aprovecha la propiedad magnética del Chromel (y de su correspondiente para el cable compensado) para identificar solamente con un imán los bornes a conectar, para el caso de las termocuplas tipo K.

Hay termocuplas normalizadas que tienen designaciones con letras elaboradas por el Instruments Society of América (*ISA*). El U.S. National Bureau of Standard (*NBS*) por su parte, ha preparado tablas de correlación temperatura-*fem* para estas termocuplas, las que han sido publicadas por el American National Standards Institute (*ANSI*) y el American Society for Testing and Materials (*ASTM*). Estas termocuplas se enumeran en la Tabla 1.2:

Tipo	Denominación	Composición y símbolo	Rango de temperatura
B	Platino - Rodio 30% vs Platino - Rodio 6%	PtRh 30% - PtRh 6%	0°C a 1500°C (1800°C)
R	Platino - Rodio 13% vs Platino	PtRh 13% - Pt	0°C a 1400°C (1700°C)
S	Platino - Rodio 10% vs Platino	PtRh 10% - Pt	0°C a 1300°C (1600°C)
J	Hierro vs Constatán	Fe - CuNi	-200°C a 700°C (900°C)
K	Níquel - Cromo vs Níquel (Chromel vs Alumel)	CrNi - Ni	0°C a 100°C (1300°C)
T	Cobre vs Constatán	Cu - CuNi	-200°C a 700°C (900°C)
E	Níquel - Cromo vs Constatán	NiCr - CuNi	-200°C a 600°C (800°C)

(1) Los valores entre paréntesis son los admitidos en intervalos cortos (no permanentes)

Tabla 1.2: Tipos de termocuplas, denominación, composición y rangos de temperatura.

La termocupla tipo K es conocida también como la termocupla Chromel-Alumel (marcas registradas de Hoskins Manufacturing Co., EE.UU.). El Chromel es una aleación de aproximadamente el 90% de *Ni* y 10% de *Cr*, mientras que el Alumel es la aleación de 95% de *Ni*, más *Al*, *Si* y *Mn*, razón por la que la norma IEC la especifica como *NiCr-Ni*. La termocupla tipo K es la termocupla que más se utiliza en la industria, debido a su capacidad de resistir mayores temperaturas que la termocupla tipo J. Puntualmente, la termocupla tipo K se puede distinguir por los colores del recubrimiento que se le asignan a los conductores. Se le asigna el color amarillo al Chromel y el rojo al Alumel. En adhesión a esto, el Chromel es un material magnético mientras que el Alumel no, por lo que en caso de no tener recubrimiento, es posible conectar de forma correcta los terminales de la termocupla al cable compensado y evitar errores en la lectura de la temperatura.

Las termocuplas tipo K pueden utilizarse en forma continua en atmósferas oxidantes e inertes hasta 1260 °C y constituyen el tipo más satisfactorio de termocupla para uso en atmósferas reductoras o sulfurosas o el vacío.

Conclusiones:

En base a la bibliografía analizada en el presente trabajo, se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se pudo recolectar bibliografía actualizada sobre los principios y tecnologías de fundición, la técnica *DAAS* y el análisis térmico para el estudio de la solidificación de las fundiciones de hierro con grafito.
2. No fue posible encontrar, dentro de la bibliografía utilizada, un desarrollo actual que relacione la inoculación, tipos de inoculante y los métodos de inoculación con el refinamiento de la macroestructura de solidificación.
3. Las vacancias detectadas en la bibliografía brindan la posibilidad de efectuar un desarrollo más profundo sobre el efecto de los inoculantes en la estructura de solidificación de las fundiciones de hierro con grafito empleando la técnica de revelado *DAAS*.

Este proyecto final de grado se desarrolla con el objetivo de posibilitar el análisis del efecto de los inoculantes sobre la macroestructura de solidificación mediante la técnica *DAAS*.

Bibliografía empleada en este capítulo:

- [1] López, M (2020). Análisis de la estructura de solidificación de fundiciones de hierro con grafito laminar y vermicular. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata.
- [2] Cachela J y Tornese B (2011). Desarrollo de una metodología para relacionar la macroestructura de solidificación con las microcavidades de contracción en Fundición Nodular. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata.
- [3] Cátedra de Tecnología de la Fundición (2022). Apunte de Cátedra: Unidad 6: Moldes y noyos. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata.
- [4] Hareus. *Thermal Analysis of Cast Iron*. Heraeus Electro-Nite International N.V.
- [5] Cátedra de Mediciones Eléctricas II (2022). Apunte de Cátedra: Medición Eléctrica de Magnitudes no Eléctricas. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata.
- [6] Caldera M, Massone J, Boeri R y Sikora J (2007). Análisis térmico de fundiciones de hierro: Revisión y discusión. Universidad Nacional de Mar del Plata, CONICET.
- [7] Stefanescu, D (2015). *Thermal Analysis—Theory and Applications in Metalcasting*. The Ohio State University, Columbus, OH, USA. The University of Alabama, Tuscaloosa, AL, USA.

Capítulo 2: Diseño de sistemas de alimentación

Introducción:

En este capítulo se muestra el proceso de diseño de los sistemas de alimentación evaluados para la inoculación *in-mould*. Se muestran los diferentes sistemas diseñados, las condiciones de simulación, los criterios tomados para elegir el sistema, los resultados obtenidos en la simulación y la selección final del sistema más adecuado.

Objetivos:

En este capítulo se plantean los siguientes objetivos:

- Conocer, interpretar y aprender a utilizar el simulador de llenado de moldes y solidificación MAGMASoft®.
- Plantear y definir los criterios para el diseño de los sistemas de alimentación. Como punto principal, es necesario que el sistema incorpore inoculante en la pieza. Para eso, es fundamental diseñar una cámara de reacción y que el fluido que circula por dicha cámara esté en régimen turbulento. De esa manera se garantiza que el inoculante intercambiará calor con el metal y se disolverá, logrando así una incorporación eficiente en la pieza y evitando que haya inclusiones en la pieza de inoculante no disuelto. Por lo tanto, en el simulador es necesario verificar dos cosas:
 - Que la cámara, con el tamaño adecuado para contener el contenido de inoculante deseado, muestre un flujo turbulento, y
 - Que se incorpore a la pieza el inoculante una vez disuelto.
- Asegurar que el sistema diseñado permita realizar el desmoldeo en caliente para aplicar la técnica DAAS.
- A partir de las simulaciones, poder definir al menos un diseño final para realizar una colada experimental.

Metodología:

Para llevar a cabo los objetivos planteados, se comienza con el sistema de alimentación que se utilizó en el proyecto “*Estudio del efecto de inoculantes en la macro y micro estructura de piezas de fundición nodular*” [1]. A partir de este sistema se diseñaron una serie de sistemas diferentes. Los parámetros seleccionados para la simulación son:

- 500.000 elementos
- Cast Alloy: GJS-400.

- Temperatura inicial: 1400°C.
- Melt treatment:
 - Inoculation Method: Good
 - Treatment Yield: 100%
 - Graphite Precipitation: 7.
- Pouring: 10.0s
- Stop Solidification and Cooling process: Solid State.
- Filter: MAGMA/Foam20ppi_medium.
 - Reticulated ceramic foam filter.
 - Thickness: 21 mm.
- Sand Mold: MAGMA/Silica_dry.

2.1. Primer diseño de los sistemas de alimentación

Para poder interpretar de qué forma el inoculante se incorpora en la pieza y qué tan eficiente es esta incorporación, es necesario diseñar sistemas de alimentación con un nivel determinado de turbulencias. Esto permite que el inoculante se disuelva y se obtenga en la pieza una composición química diferente a la del metal tratado antes del llenado.

2.1.1. Definición de los primeros sistemas

Sistema Base: En la Fig. 2.1 se presenta el primer sistema y en la Figura 2.2 una ampliación sobre la cámara de reacción. Sobre este modelo es que se realizan los diseños con las subsecuentes modificaciones. Se observa en la Figura 2.3 que, para este sistema, en la zona baja de la cámara de inoculación la velocidad es alta por lo que facilitaría la incorporación del inoculante en la pieza. Las capturas de la simulación muestran el recorrido del metal líquido luego de 5 segundos, para un tiempo de llenado de 10 segundos.

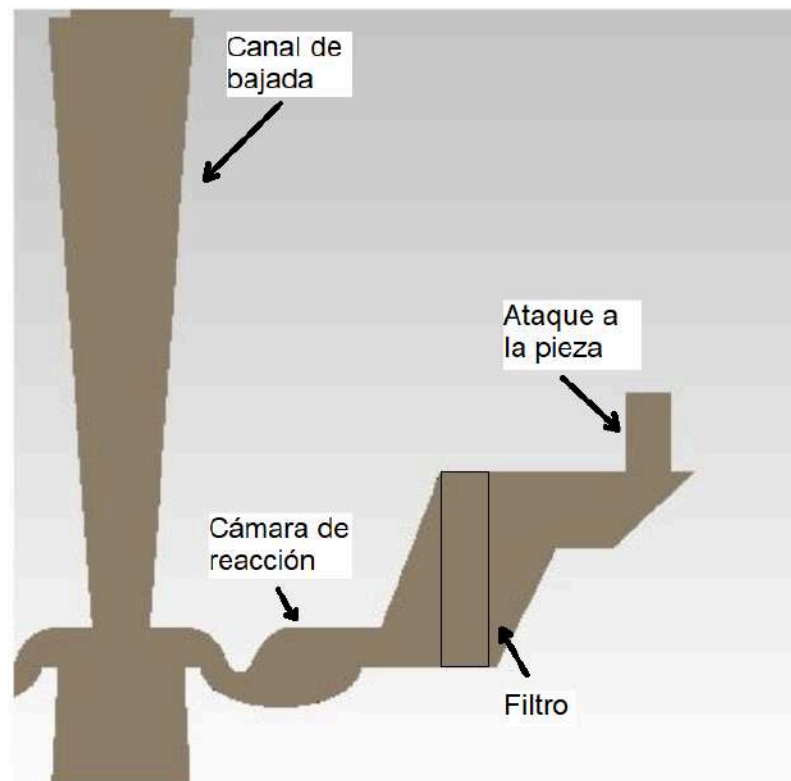


Figura 2.1: Diseño del Sistema Base.

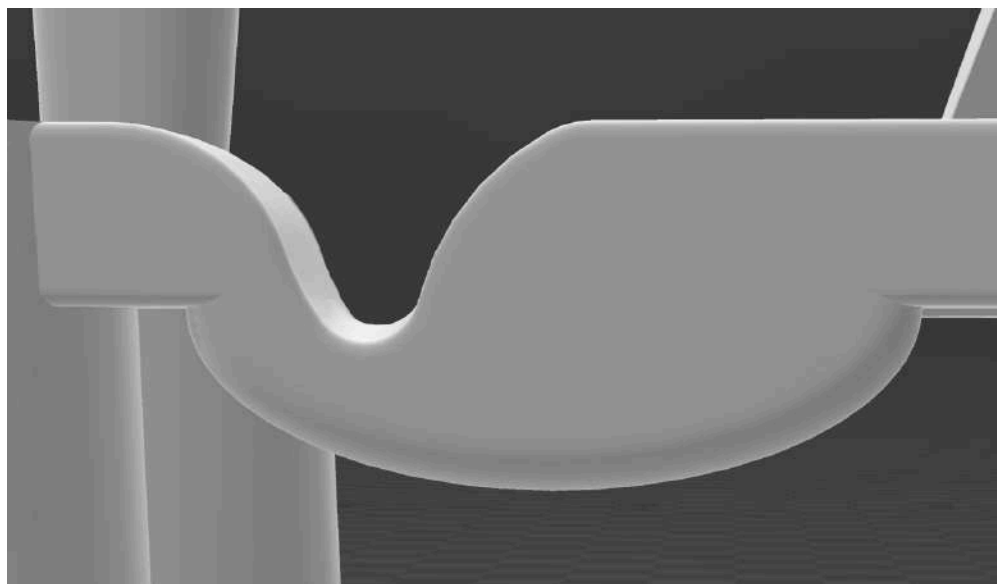


Figura 2.2: Cámara de reacción del Sistema Base

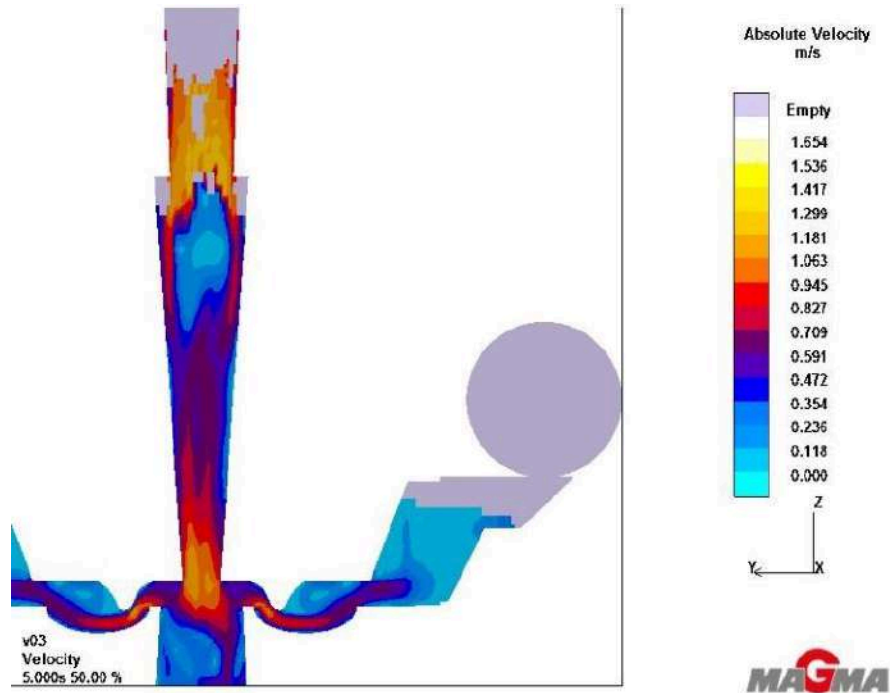


Figura 2.3: Llenado del sistema de alimentación (Sistema Base).

Sistema 1: A partir del sistema base se decide recortar una porción de la cámara de inoculación con el fin de ver cómo se comporta el fluido frente a variaciones en la geometría de esta cámara. De esta forma, se puede analizar de qué forma modificar la cámara y lograr una incorporación del inoculante más eficiente. En la Figura 2.4 se presenta el perfil del “runner” y en la Figura 2.5 se presenta la comparación entre la cámara de reacción del Sistema Base y del Sistema 1. Además, en la Figura 2.6 se observa que en este diseño aparecen zonas con muy baja velocidad de fluido o “volúmenes muertos” en los cuales es posible que se deposite el inoculante. Esto no es favorable ya que el propósito de las variaciones en el sistema de alimentación es justamente garantizar que el inoculante se disuelva en el líquido y se incorpore a la pieza. Las simulaciones se realizaron con las mismas condiciones que en la simulación del Sistema Base.

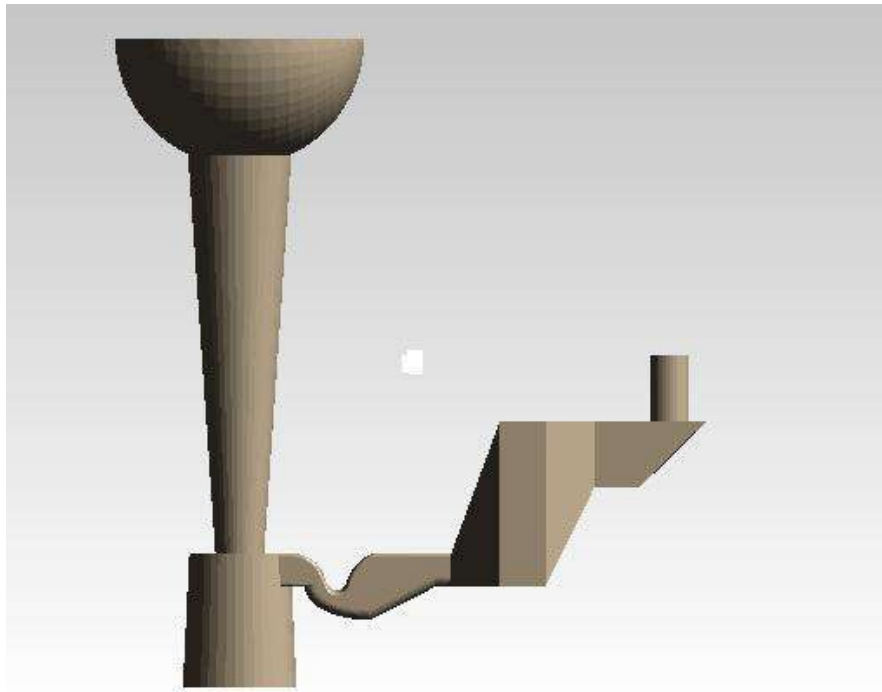


Figura 2.4: Diseño del Sistema 1.

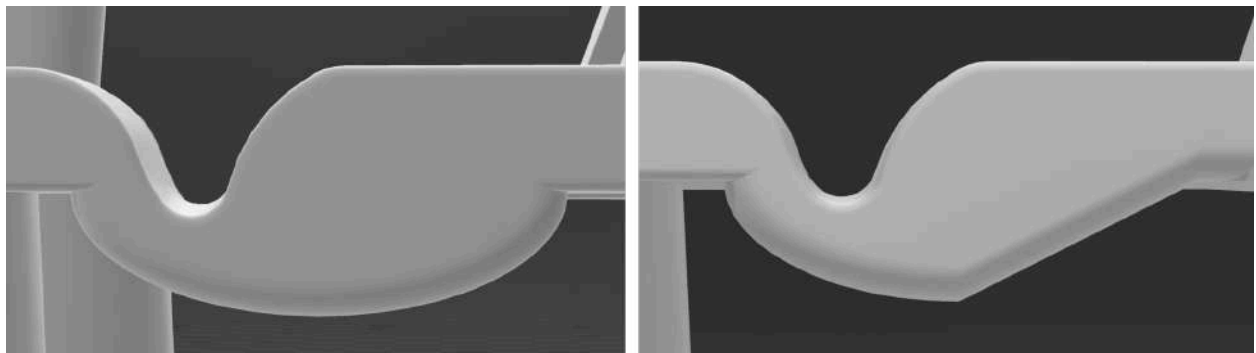


Figura 2.5: Comparación de cámaras del Sistema Base (izquierda) y del Sistema 1 (derecha).

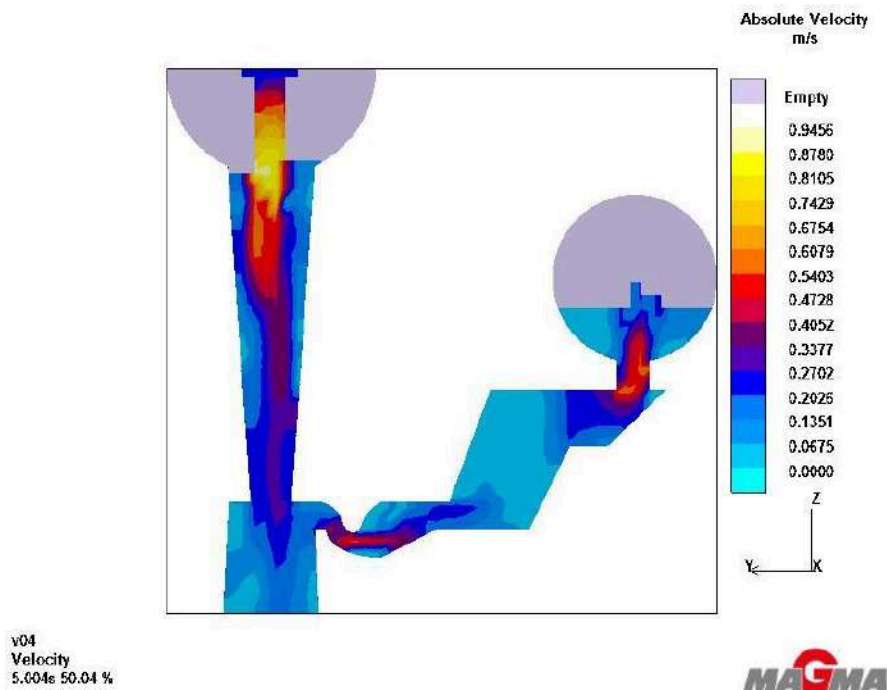


Figura 2.6: Llenado del sistema de alimentación (Sistema 1).

Sistema 2: Se efectuó un recorte de la cámara de inoculación de forma horizontal en vez de diagonal, lo cual produjo una velocidad muy elevada en la cámara. Los volúmenes muertos, si bien son más grandes, están por encima de la zona de alta velocidad, por lo que el inoculante al caer por gravedad puede reincorporarse al flujo de metal líquido. El modelo se presenta en la Figura 2.7. El mayor conflicto que surge en este modelo es que el cuello que aparece luego del sistema de bajada es muy estrecho, lo que puede producir problemas a la hora de realizar el llenado del molde. Una solución a esto es modificar el diámetro del cuello para que sea factible su colada (Figura 2.8). La captura de la simulación muestra esto en la Figura 2.9. Esta imagen se obtiene a los 5 segundos de comenzar el llenado del molde.

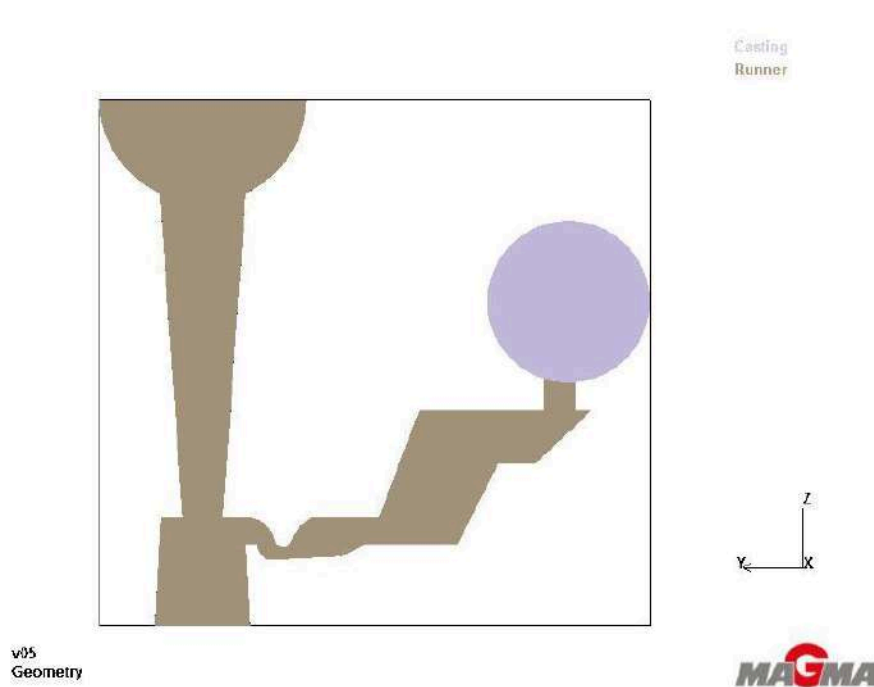


Figura 2.7: Diseño del Sistema 2.

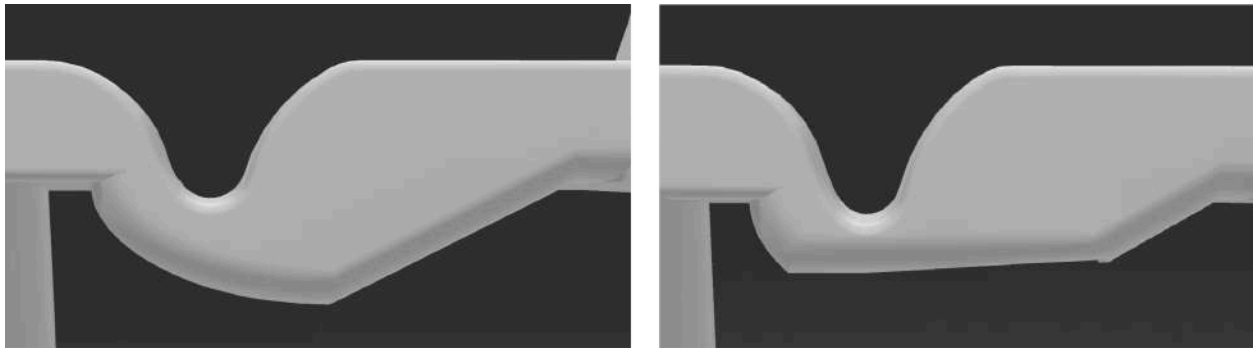


Figura 2.8: Comparación de cámaras del Sistema 1 (izquierda) y del Sistema 2 (derecha).

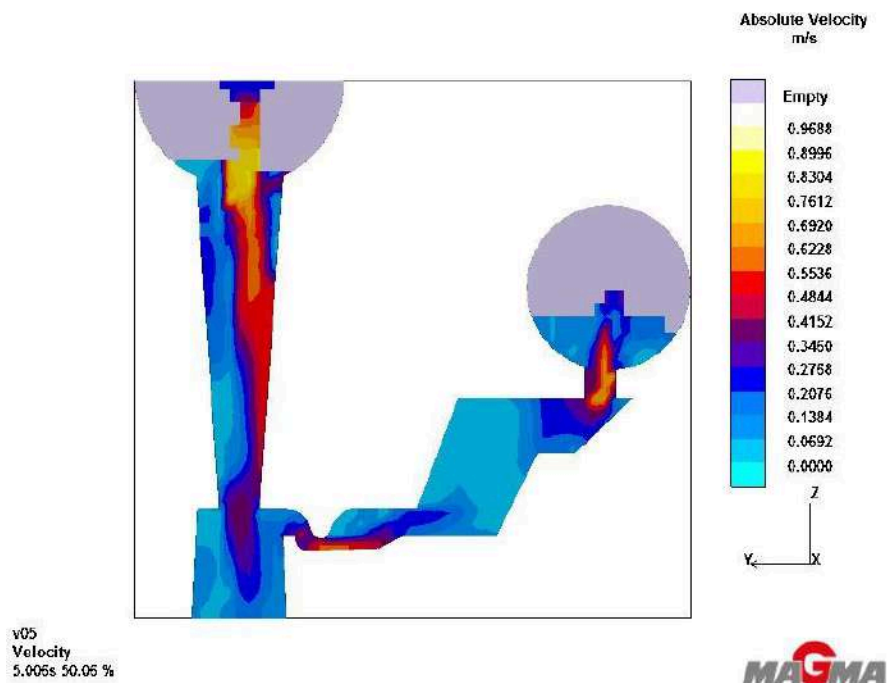


Figura 2.9: Llenado del sistema de alimentación (Sistema 2).

Sistema 3: Este sistema cubre la desventaja del Sistema 2, agrandando la sección de la entrada. Se mantienen velocidades altas en la cámara de inoculación. El modelo se presenta en la Figura 2.10 y en la Figura 2.11 se muestra una ampliación que compara ambas cámaras. La captura de la simulación se muestra en la Figura 2.12. Esta imagen se obtiene a los 5 segundos de comenzar el llenado del molde.

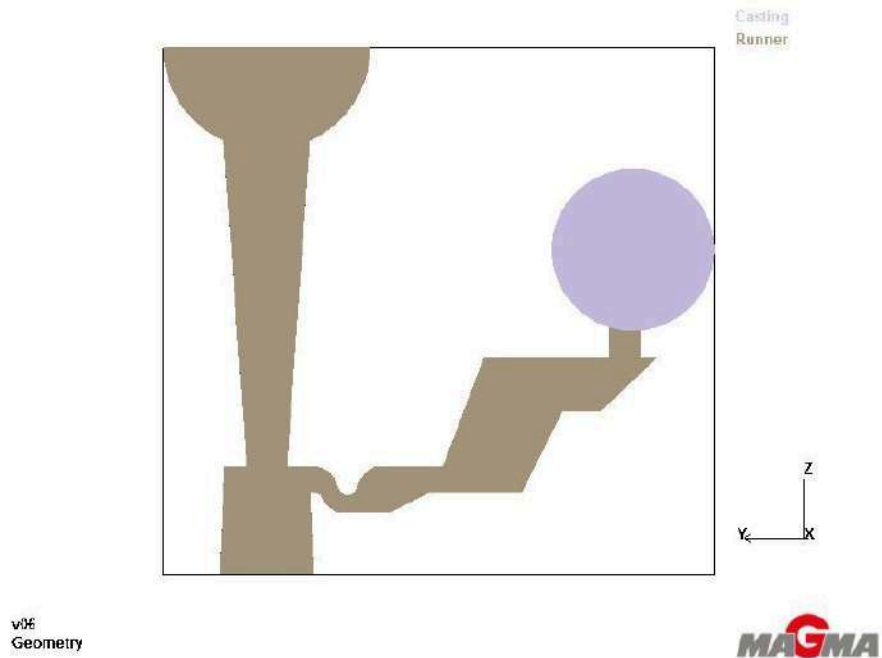


Figura 2.10: Diseño del Sistema 3.

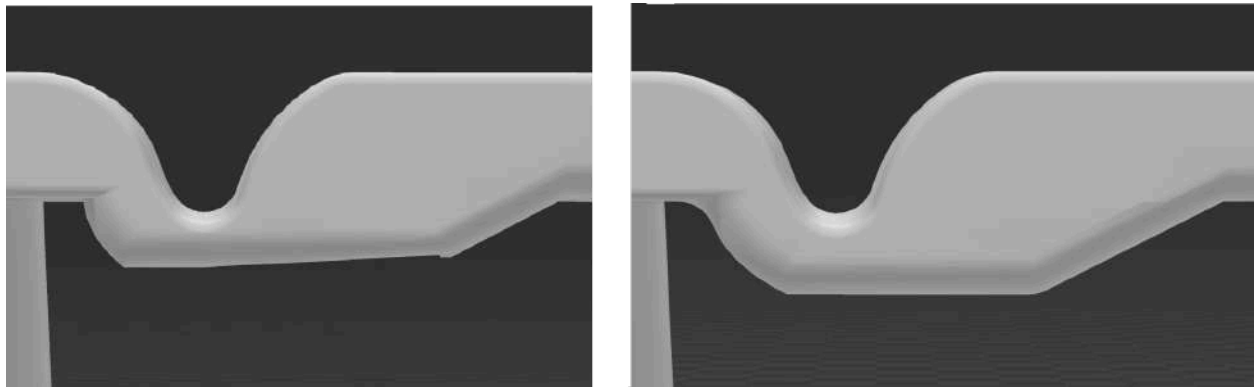


Figura 2.11: Comparación de cámaras del Sistema 2 (izquierda) y del Sistema 3 (derecha).

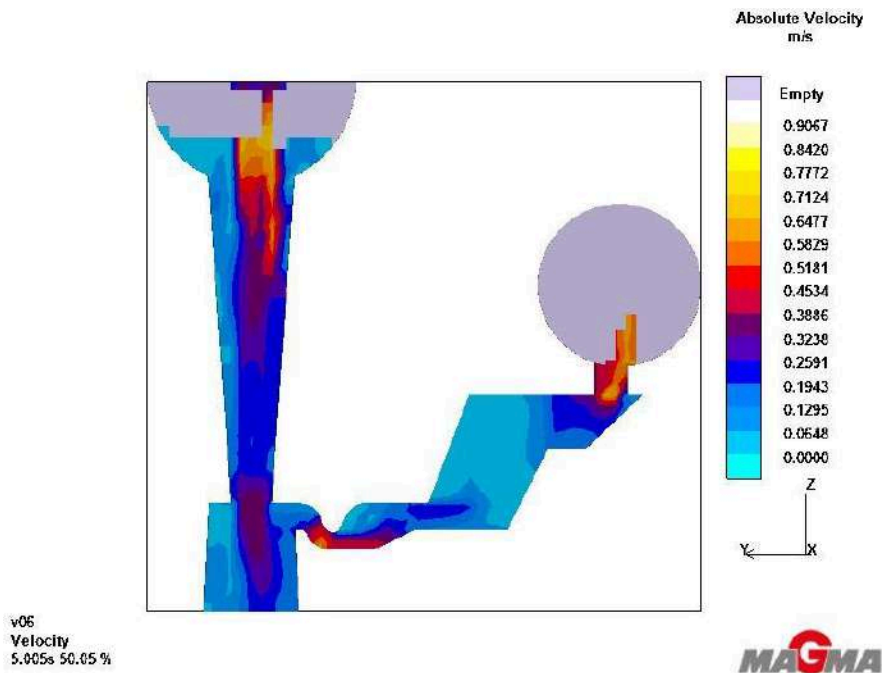


Figura 2.12: Llenado del sistema de alimentación (Sistema 3).

Sistema 4: En esta versión se decide cambiar la disposición del sistema, optando por líneas rectas en vez de curvas. Esto con el fin de obtener una caída de metal líquido a alta velocidad y un arrastre del inoculante hacia la pieza. El perfil del sistema se muestra en la Figura 2.13. Esta configuración reduce en gran medida los volúmenes muertos desde la entrada a la cámara de inoculación hasta el filtro. La comparación entre las dos cámaras se muestra en la Figura 2.14. La captura de la simulación indicando esto se presenta en la Figura 2.15. Esta imagen se obtiene a los 5 segundos de comenzar el llenado del molde.

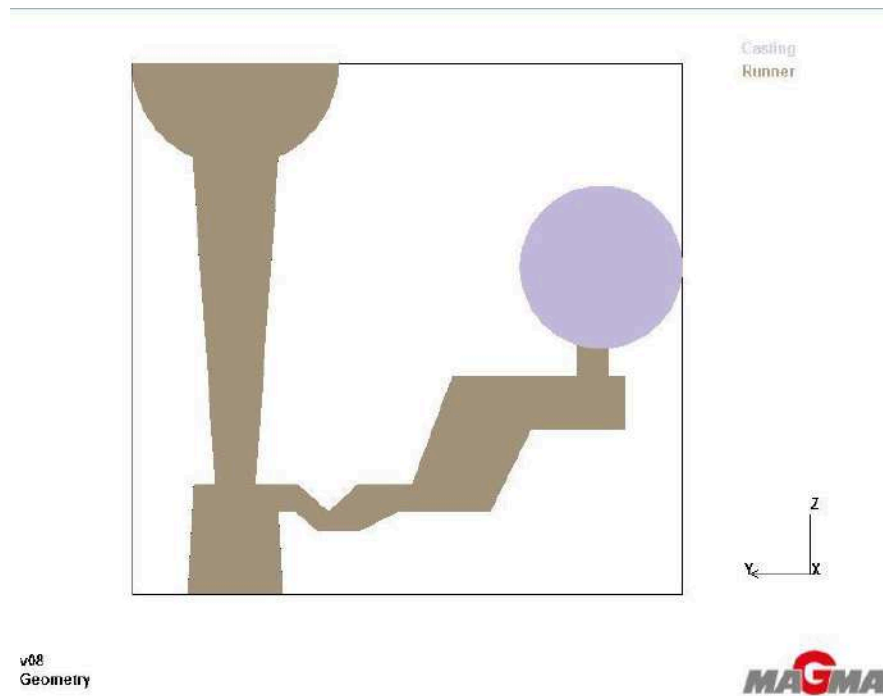


Figura 2.13: Diseño del Sistema 4.

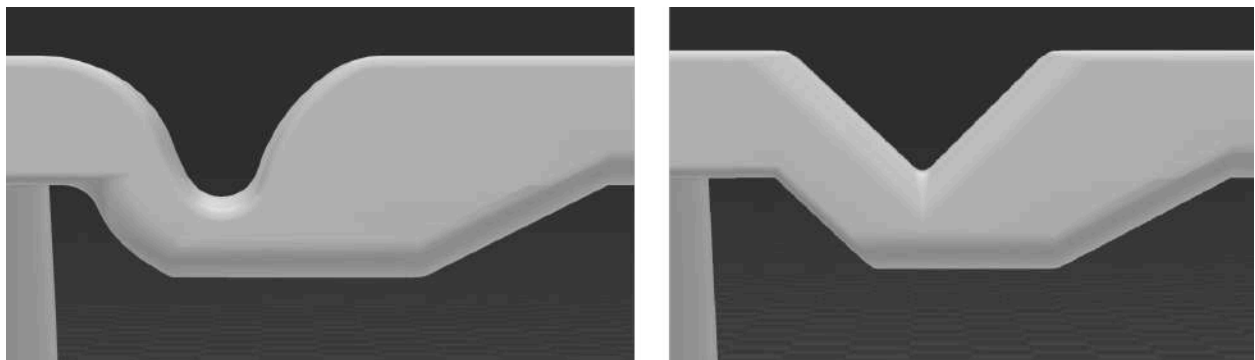


Figura 2.14: Comparación de cámaras del Sistema 3 (izquierda) y del Sistema 4 (derecha).

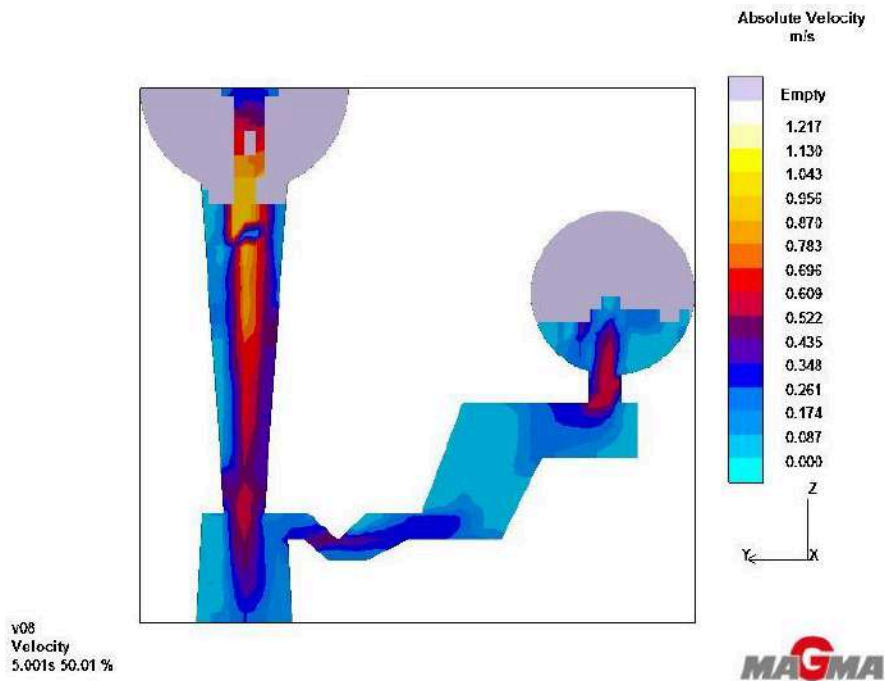


Figura 2.15: Llenado del sistema de alimentación (Sistema 4).

Sistema 5: Esta versión busca analizar el comportamiento del metal con el sistema de ingreso a la cámara más grande. Se presenta el perfil del sistema en la Figura 2.16. Se esperaba que de esta forma aumente la velocidad y se genere turbulencia en la cámara, lo que reduciría el tiempo de llenado de la pieza y por lo tanto la caída de temperatura. Se logran velocidades mayores a la de los demás canales, con el inconveniente de que el cuello de la cámara es delgado. Esto puede producir dificultades a la hora de colar o moldear. Por eso se decide incrementar la sección de este sistema para facilitar el moldeo. Esta comparación se ve en la Figura 2.17. La captura de la simulación se muestra en la Figura 2.18. Esta imagen se obtiene a los 5 segundos de comenzar el llenado del molde.

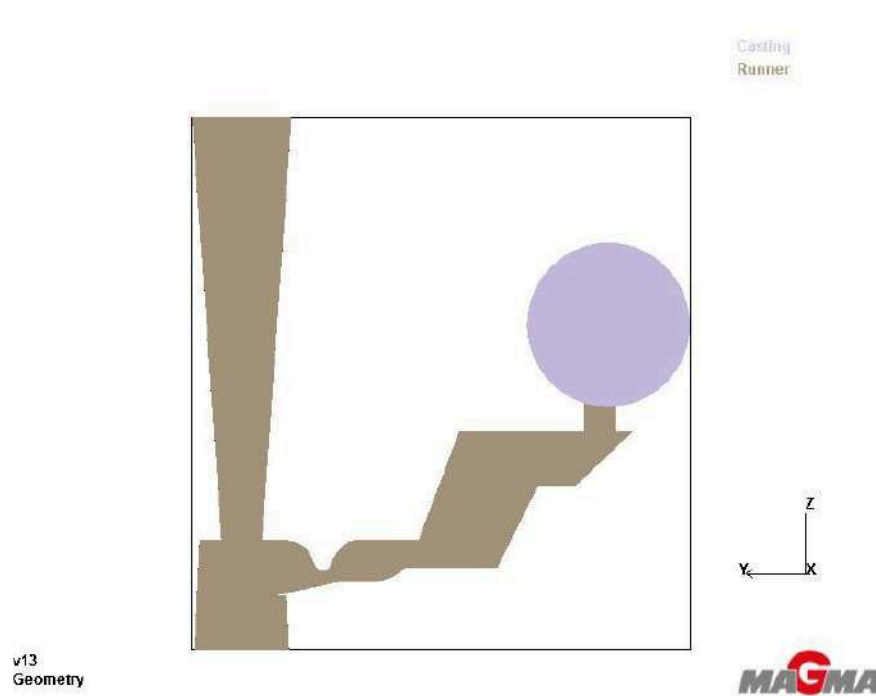


Figura 2.16: Diseño del Sistema 5.

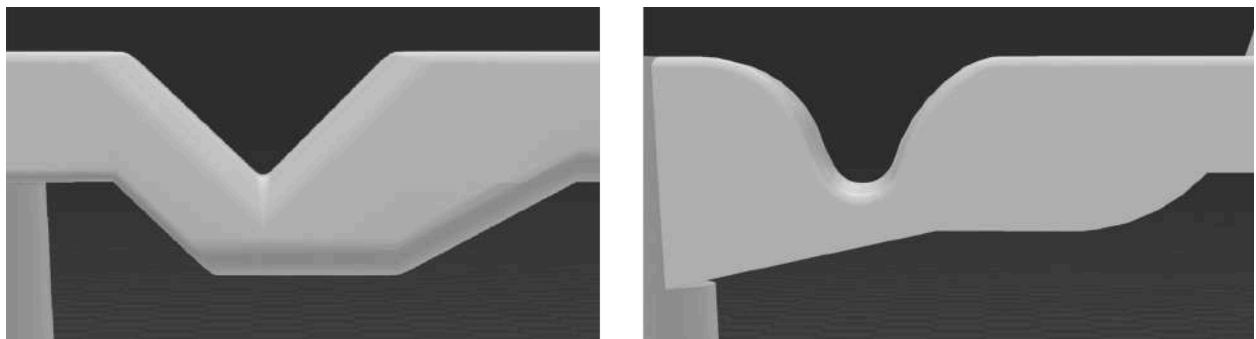


Figura 2.17: Comparación de cámaras del Sistema 4 (izquierda) y del Sistema 5 (derecha).

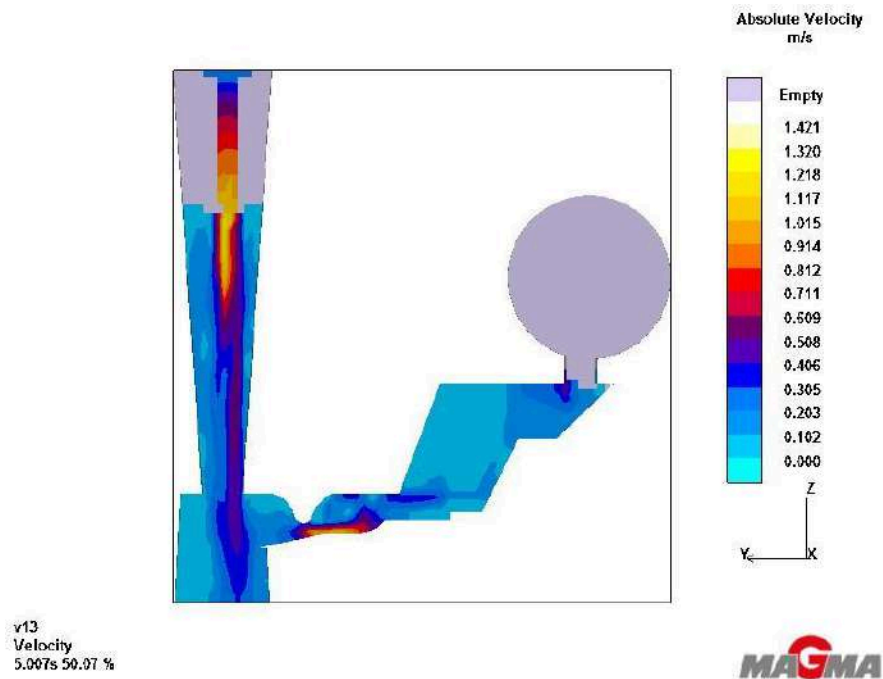


Figura 2.18: Llenado del sistema de alimentación (Sistema 5).

Sistema 6: En este sistema se incrementa la sección mencionada en el Sistema 5 para evitar problemas de pared delgada a la hora de colarlo. El perfil del sistema se presenta en la Figura 2.19 y la comparación entre las cámaras en la Figura 2.20. No se reduce significativamente la velocidad en la cámara por lo que se considera que la incorporación de inoculante no se vería afectada. La captura de la simulación indicando esto se muestra en la Figura 2.21. Esta imagen se obtiene a los 5 segundos de comenzar el llenado del molde.

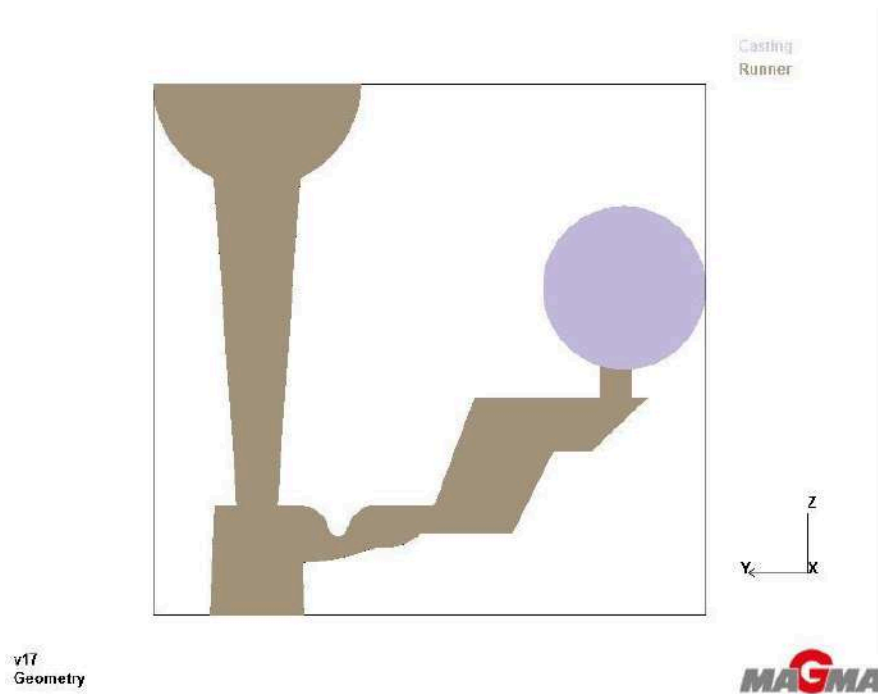


Figura 2.19: Diseño del Sistema 6.

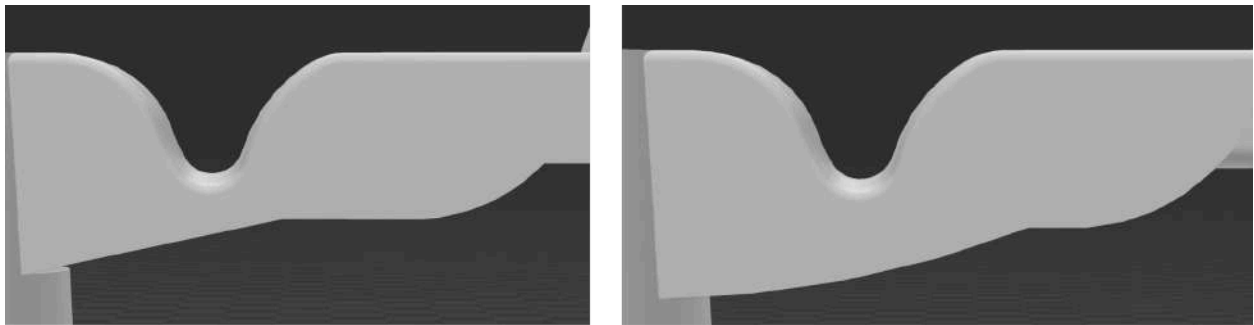


Figura 2.20: Comparación de cámaras del Sistema 5 (izquierda) y del Sistema 6 (derecha).

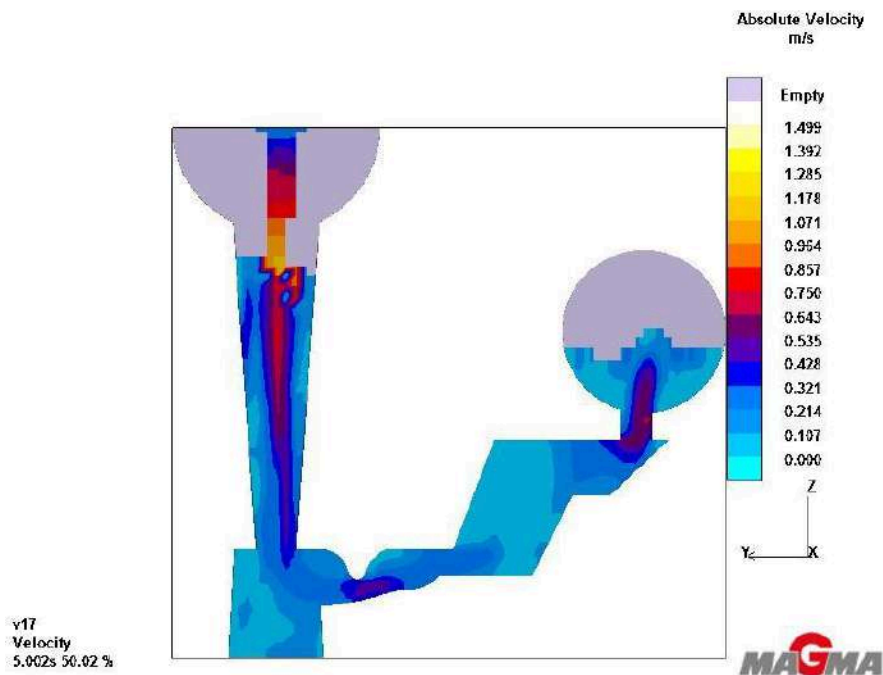


Figura 2.21 :Llenado del sistema de alimentación (Sistema 6).

A partir de las simulaciones realizadas de los distintos diseños, es posible definir que los sistemas que presentan la mayor velocidad en la cámara de reacción son los Sistemas 3 y 6. Sin embargo, esto no es suficiente para definir con qué sistemas se realizarán las coladas experimentales. Para eso, es necesario analizar el flujo del fluido dentro de la cámara.

2.1.2. Simulación del flujo de fluido en las cámaras de inoculación

En el análisis anterior se determinaron cuáles son los canales que presentan una mayor velocidad en la cámara. Si bien este parámetro es útil, no es posible determinar de esta manera si el flujo será lo suficientemente turbulento. Para poder analizar esto, se realiza el seguimiento de varios elementos dentro del sistema de alimentación. Para esto se emplea la función *tracer* dentro del simulador MAGMASoft®. La función *tracer* permite seguir una determinada cantidad de elementos dentro del sistema. Lo que se busca es determinar de forma práctica si en la cámara hay turbulencias, lo que aseguraría que el metal transporta inoculante hacia la pieza, y si así lo hace, cuánto de este inoculante se incorpora. En las figuras 2.22 , 2.23, 2.24, 2.25, 2.26 y 2.27 se presentan las capturas de los sistemas con los *tracers*.

Todas las partículas se generaron en la base del bebedero para analizar el movimiento del fluido una vez que ingresa en la cámara. Todos los canales fueron simulados bajo los mismos parámetros.

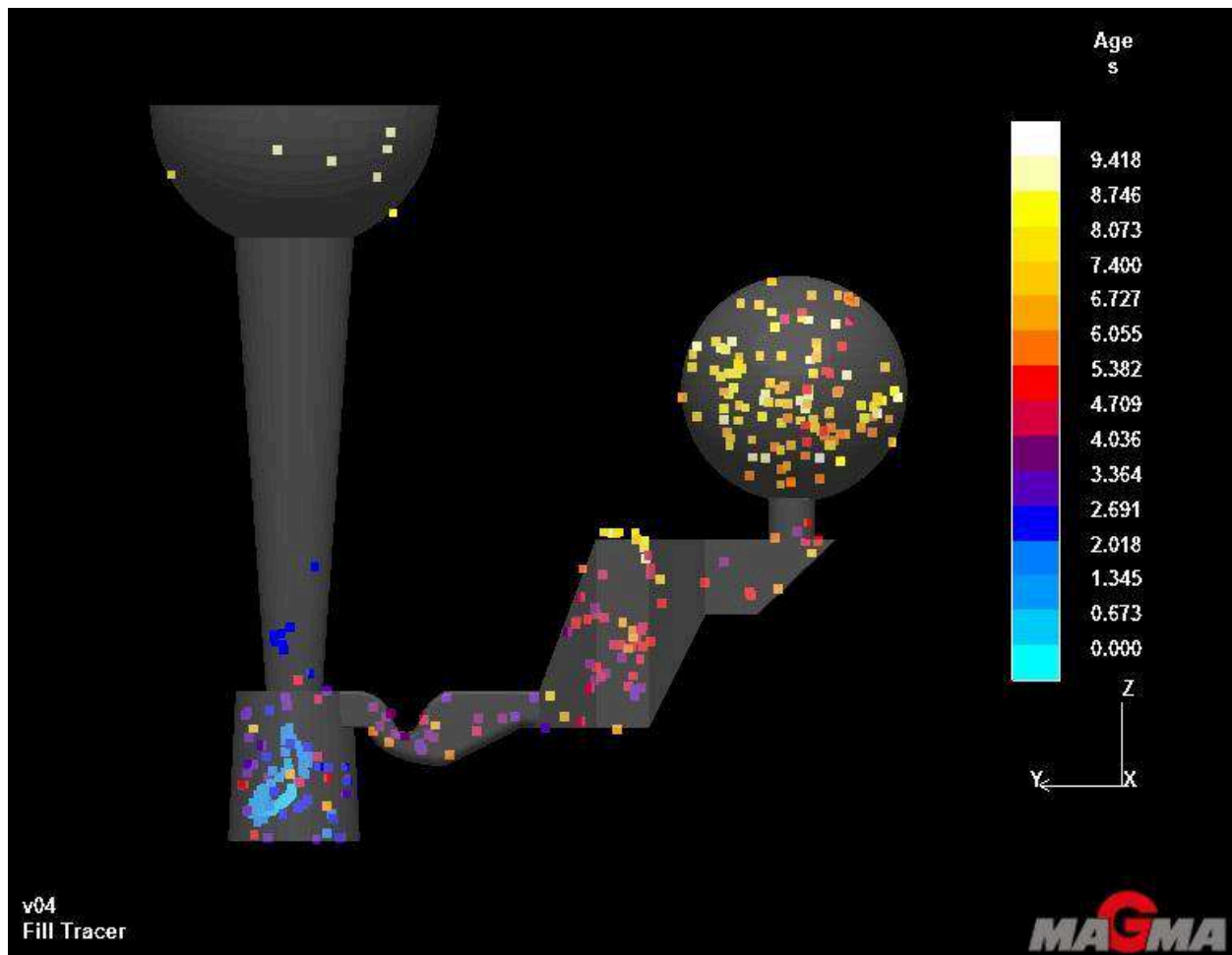


Figura 2.22: Distribución de los tracers en el Sistema 1.

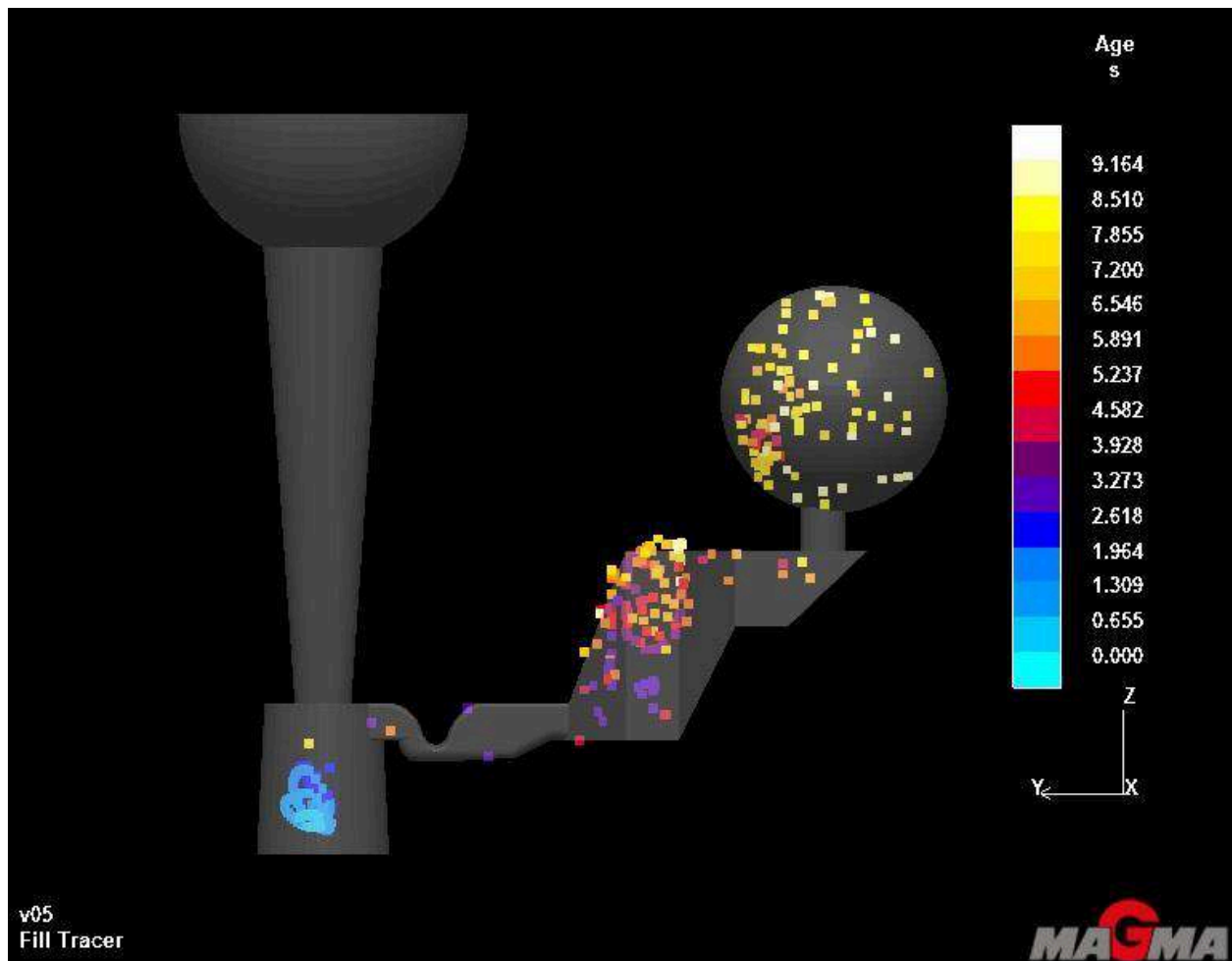


Figura 2.23: Distribución de los tracers en el Sistema 2.

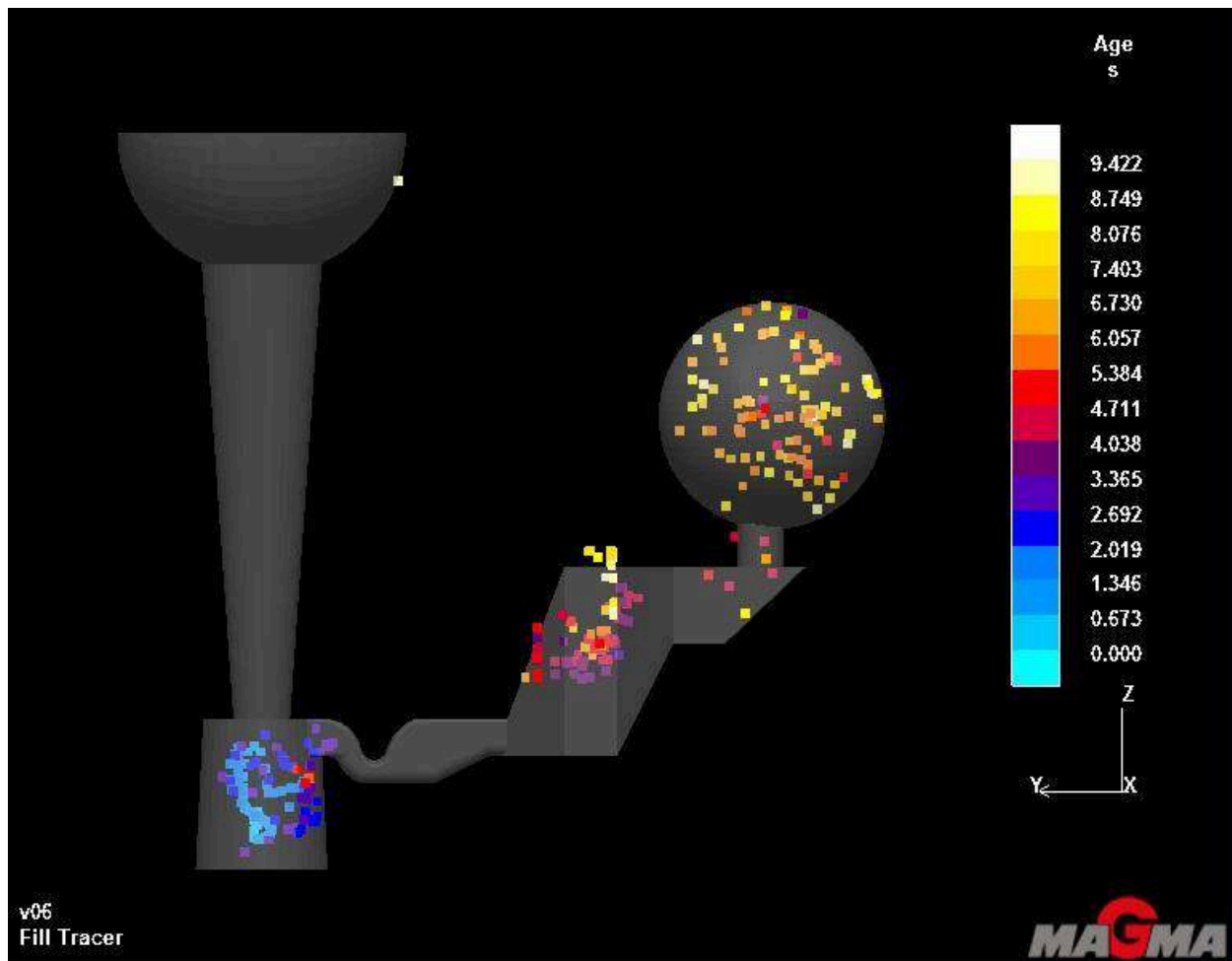


Figura 2.24: Distribución de los tracers en el Sistema 3.

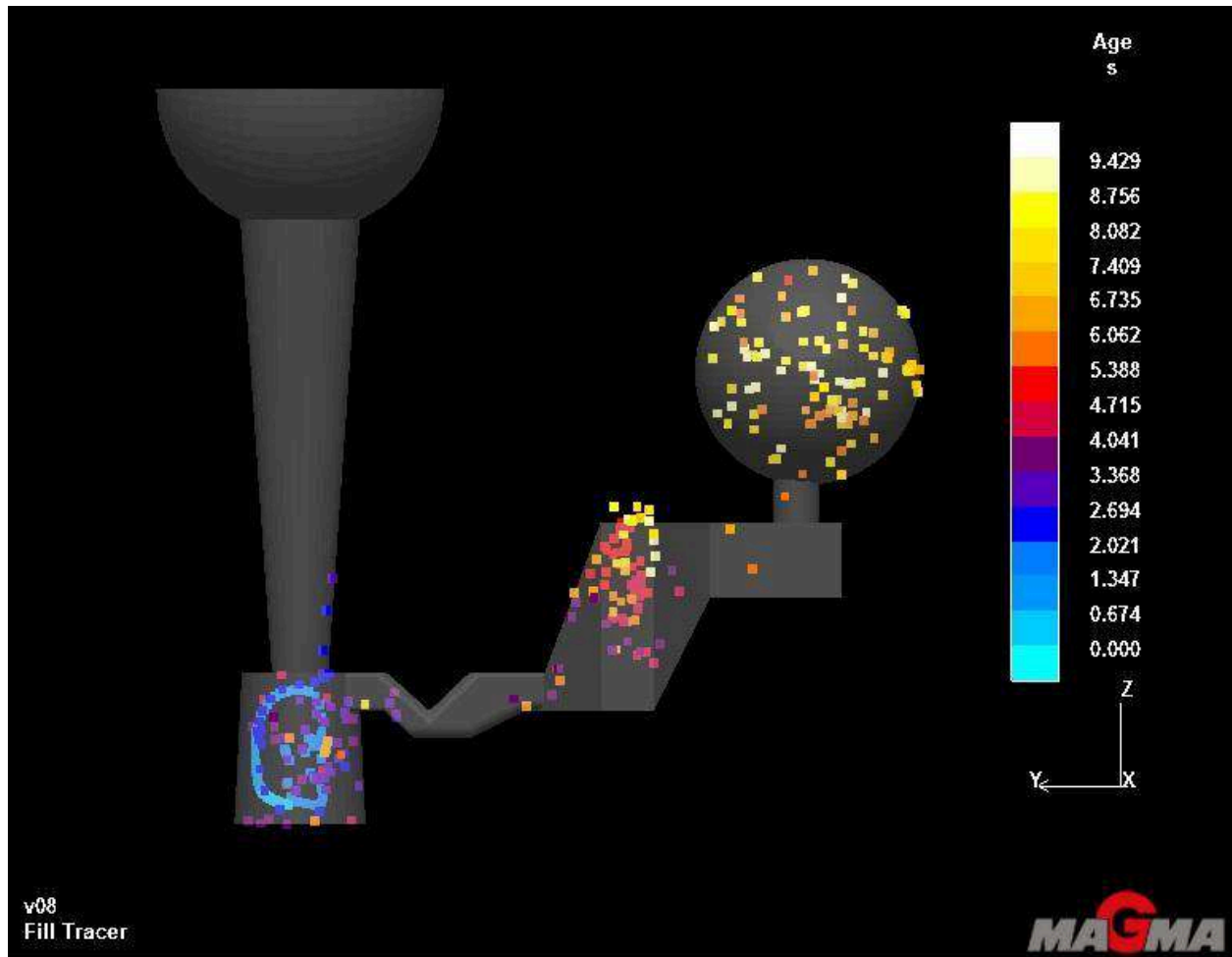


Figura 2.25: Distribución de los tracers en el Sistema 4.

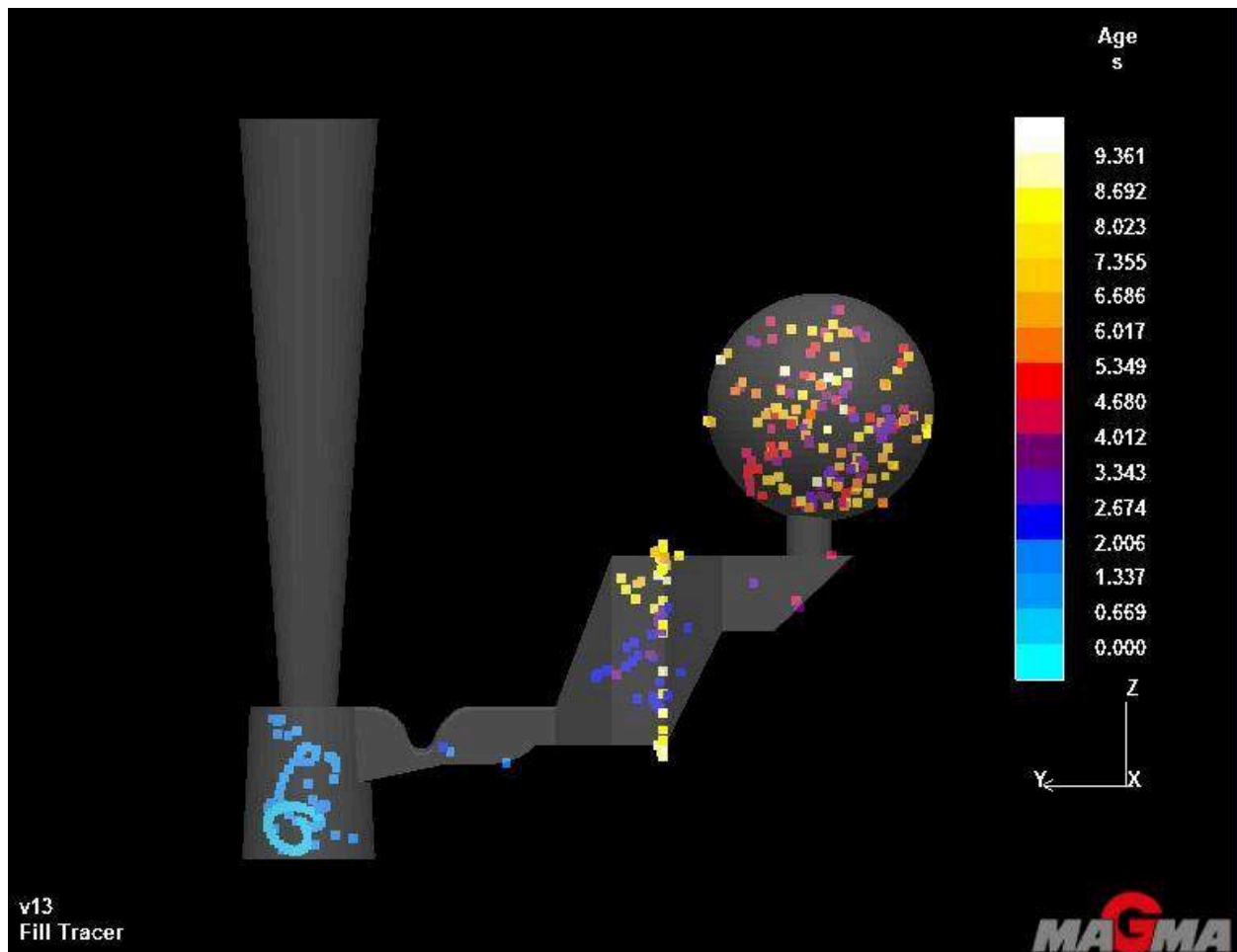


Figura 2.26: Distribución de los tracers en el Sistema 5.

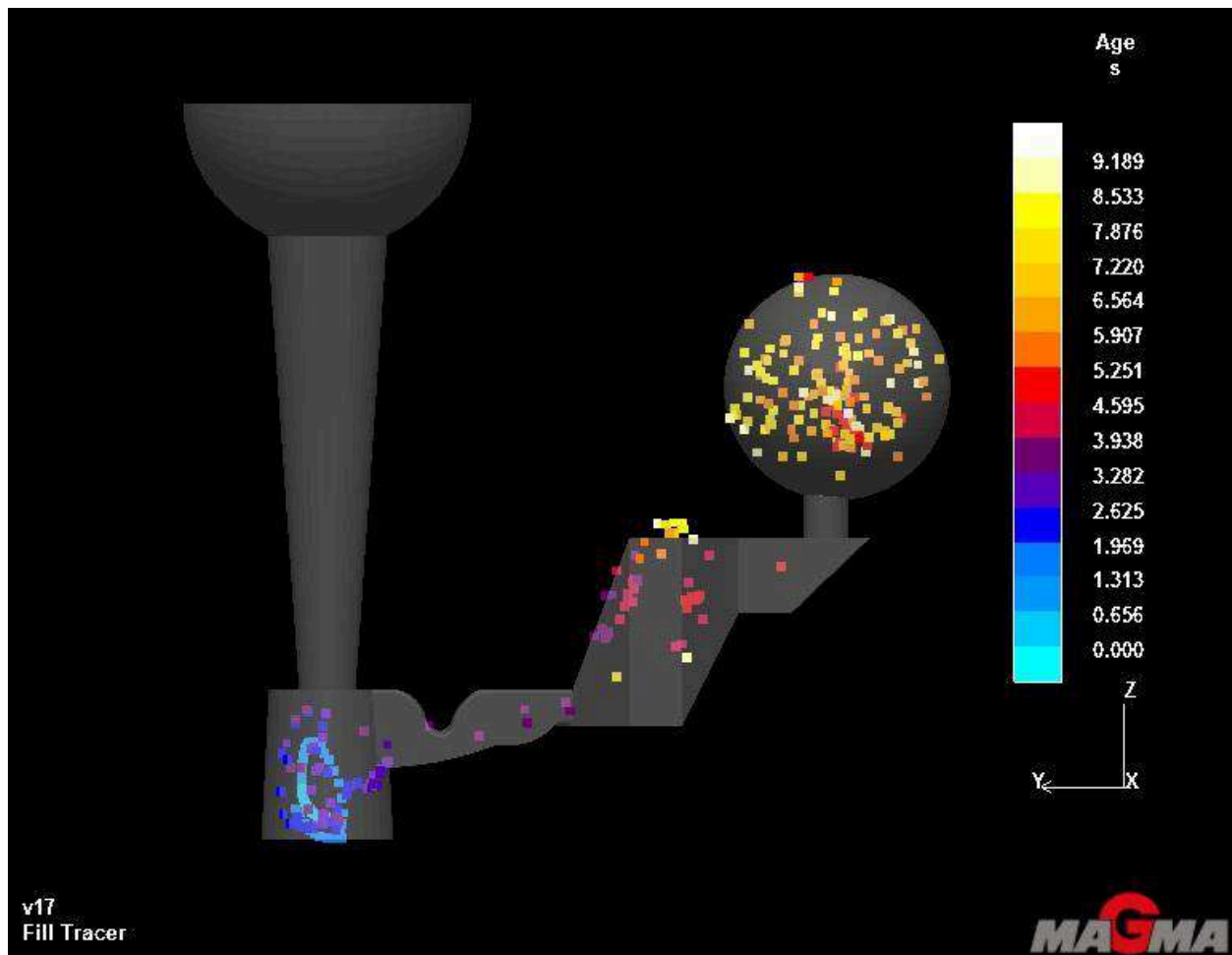


Figura 2.27: Distribución de los tracers en el Sistema 6.

A partir de estas imágenes se observa que las configuraciones que hacen llegar más cantidad de partículas a la pieza son las del Sistema 3 y el Sistema 6. El Sistema 1 deja una gran cantidad de partículas fuera de la pieza, por lo que no sería óptimo para su implementación. Lo mismo ocurre con el Sistema 2 y 4, en los que no se termina de incorporar inoculante a la pieza, ya que mucho queda suspendido en el filtro. El Sistema 5 es la versión anterior al Sistema 6, la cual se modificó para que sea más sencillo de moldear.

Los modelos anteriores se llevaron a cabo empleando un tiempo de llenado de 10 segundos a modo conservativo, ya que si se puede asegurar un llenado turbulento con ese tiempo de llenado, entonces en la práctica debería obtenerse un flujo en condiciones de aún mayor turbulencia a las de la simulación. Sin embargo, para el volumen de pieza que se tiene, utilizar un tiempo de llenado de 10 segundos es muy difícil de implementar durante la colada experimental, por lo que en esta sección se propone reducir el tiempo de llenado llevándolo a un valor más realista.

Por otro lado, no se observa el nivel de turbulencia deseado en ninguno de los 6 sistemas analizados. Inicialmente, esto se asoció a que una alta velocidad en la cámara garantizaría que el inoculante se disuelve antes de llegar a la pieza. Sin embargo, el inoculante podría depositarse en la parte inferior o no incorporarse correctamente en la pieza. Por lo tanto, los resultados obtenidos no permiten asegurar que, efectivamente, el inoculante se incorpora en los niveles deseados.

Se deben rediseñar los sistemas para asegurar el flujo turbulento en la cámara de reacción y modificar en la simulación aquellos parámetros que estaban desactualizados. Los nuevos parámetros de simulación se presentan a continuación:

- 100.000 elementos
- Cast Alloy: GJS-400.
- Temperatura inicial: 1400°C.
- Melt treatment:
 - Inoculation Method: Good
 - Treatment Yield: 100%
 - Graphite Precipitation: 7.
- Pouring: 4.0s
- Stop Solidification and Cooling process: Solid State.
- Filter: MAGMA/FC-156-13.
- Sand Mold: MAGMA/Silica_dry.

Por último, se decide también modificar la pieza a colar. Inicialmente se utilizó una esfera ya que era la que estaba en los diseños anteriores, dado que es la geometría que mayor tendencia a la formación de defectos de contracción presenta. El hecho de colar una esfera presenta un problema y es que una vez extraída del molde, es muy difícil de mecanizar ya que el mecanismo de sujeción es muy complejo. Se requiere que la pieza a colar sea fácil de desmoldear y de sujetar para realizar un mecanizado posterior. Es por eso, que en vez de trabajar con una esfera se opta por un cilindro con una base rectangular.

2.2. Segundo diseño y verificación de los sistemas

Dado a que no se obtuvieron los resultados deseados con ninguno de los diseños anteriores, se decide partir de una idea nueva. En todos los casos anteriores se analizaron sistemas simétricos. El concepto aplicado en este nuevo diseño se basa en que si la entrada y la salida de la cámara estuvieran en planos diferentes como se observa en la Figura 2.28, podría generarse el nivel de turbulencia deseado para lograr una disolución más eficiente del inoculante.

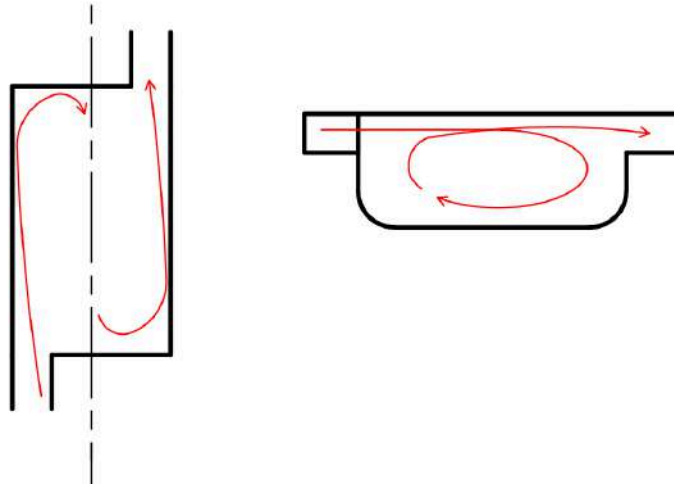


Figura 2.28: Esquemático del movimiento del fluido para cámaras con entrada y salida en diferentes planos.

A continuación, se presentan los sistemas diseñados a partir de esta idea:

Sistema B (o sistema bajo): La idea en este sistema es que el flujo tenga que hacer un recorrido más largo en la cámara. Mayor tiempo de permanencia en la cámara implica una mayor cantidad de tiempo en contacto con el inoculante y mayor posibilidad de que sea transportado a la pieza. En las simulaciones de este diseño se presenta el perfil de velocidades en la sección media de la cámara, con y sin vectores indicadores de la dirección del fluido; y los *tracers*. Agregar los vectores permite ver dónde ocurriría la turbulencia. Se muestra en la Figura 2.29 una vista en 3D del sistema B, en la Figura 2.30 una vista de la base del sistema para apreciar cómo es el nuevo recorrido del metal líquido, en la Figura 2.31 el perfil de velocidades del sistema, en la Figura 2.32 el perfil de velocidades del sistema con los vectores, y en la Figura 2.33 la distribución de los *tracers*.

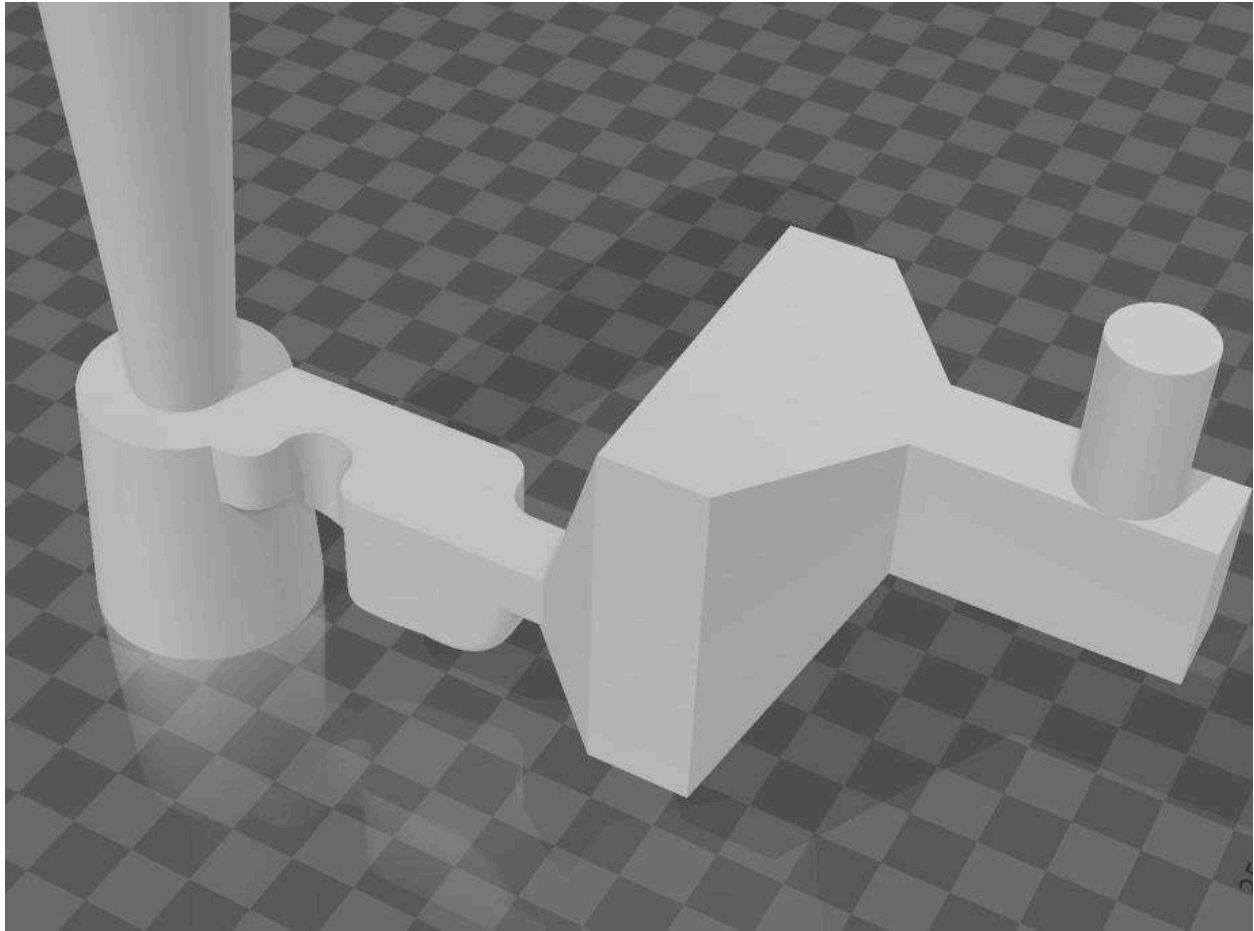


Figura 2.29: Vista en 3D del Sistema B.

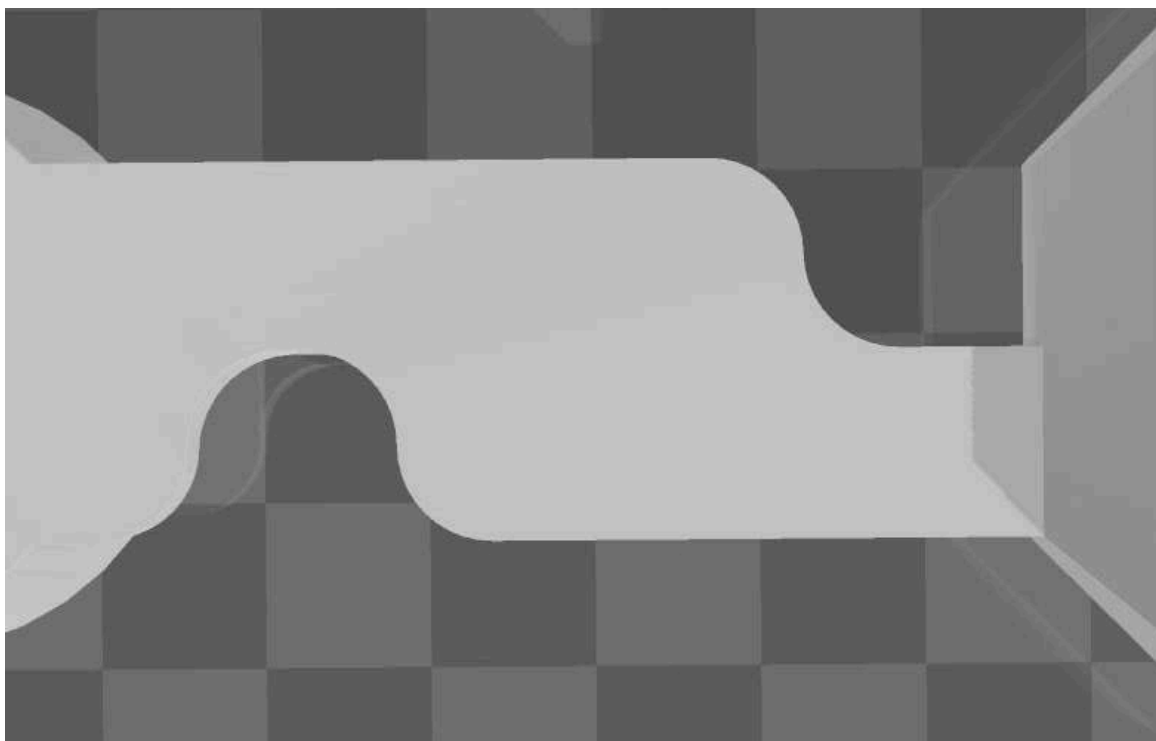


Figura 2.30: Vista de la base del Sistema B.

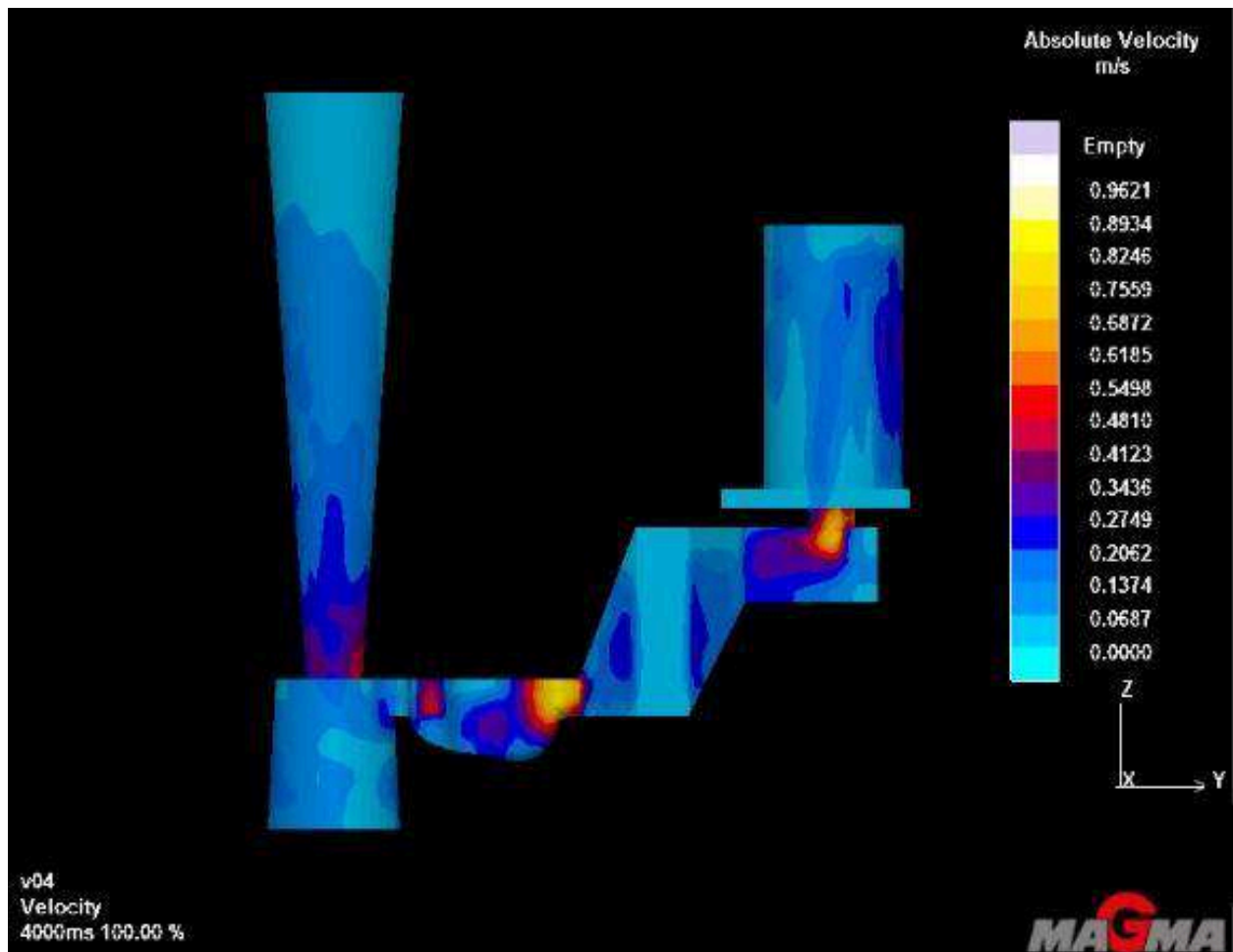


Figura 2.31: Perfil de velocidades del Sistema B (sin vectores).

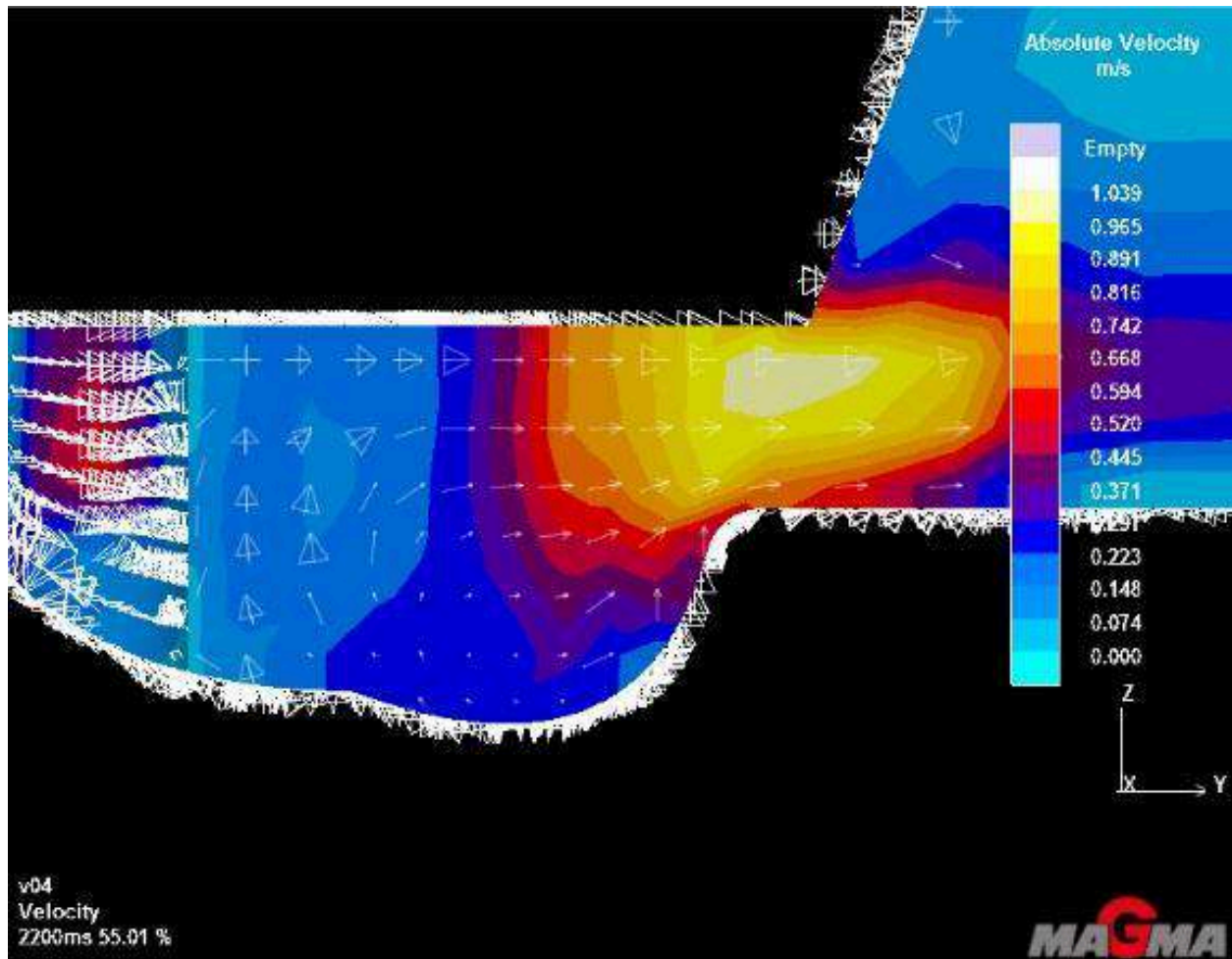


Figura 2.32: Perfil de velocidades del Sistema B (con vectores).

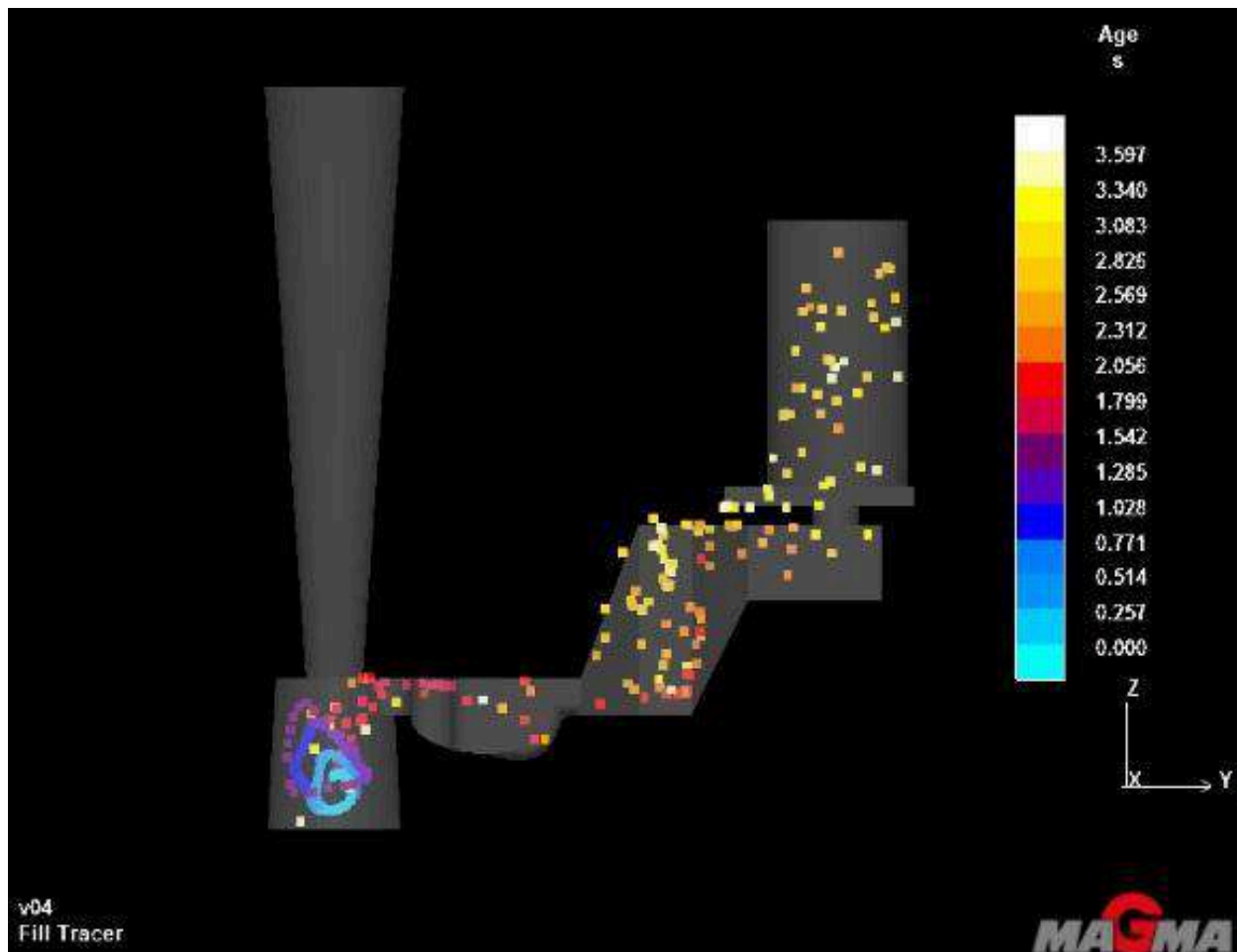


Figura 2.33: Distribución de los tracers del Sistema B.

En la Figura 2.32 se aprecian vectores en la zona donde se incorporará el inoculante por lo que se espera que este se disuelva antes de llegar a la pieza. En la Figura 2.33 se aprecia que las partículas permanecen en la cámara de reacción unos segundos antes de llegar a la pieza. Esto implica que el intercambio de calor será más eficiente y una mayor cantidad de inoculante puede disolverse. Sin embargo, en la Figura 2.31 se ve que hay aún volúmenes muertos, por lo que el sistema se puede seguir mejorando.

Sistema A (o sistema alto): En este sistema se realiza una modificación con respecto al Sistema B. En primer lugar, se extrae una porción de la cámara y se alarga el canal horizontal. De esta forma se logra que el fluido tenga que cambiar de dirección, lo que permite un mayor tiempo de contacto entre el metal y el inoculante, lo que en teoría aumenta el rendimiento. Además, se eleva el filtro para obligar al líquido a recircular por el canal horizontal. En las simulaciones de este diseño se presenta el perfil de velocidades en la sección media,

con y sin vectores; y los *tracers*. Se muestra en la Figura 2.34 una vista en 3D del sistema A, en la Figura 2.35 una vista de la base del sistema para apreciar cómo es el nuevo recorrido del flujo, en la Figura 2.36 el perfil de velocidades del sistema, en la Figura 2.37 el perfil de velocidades del sistema con los vectores, y en la Figura 2.38 la distribución de los *tracers*.

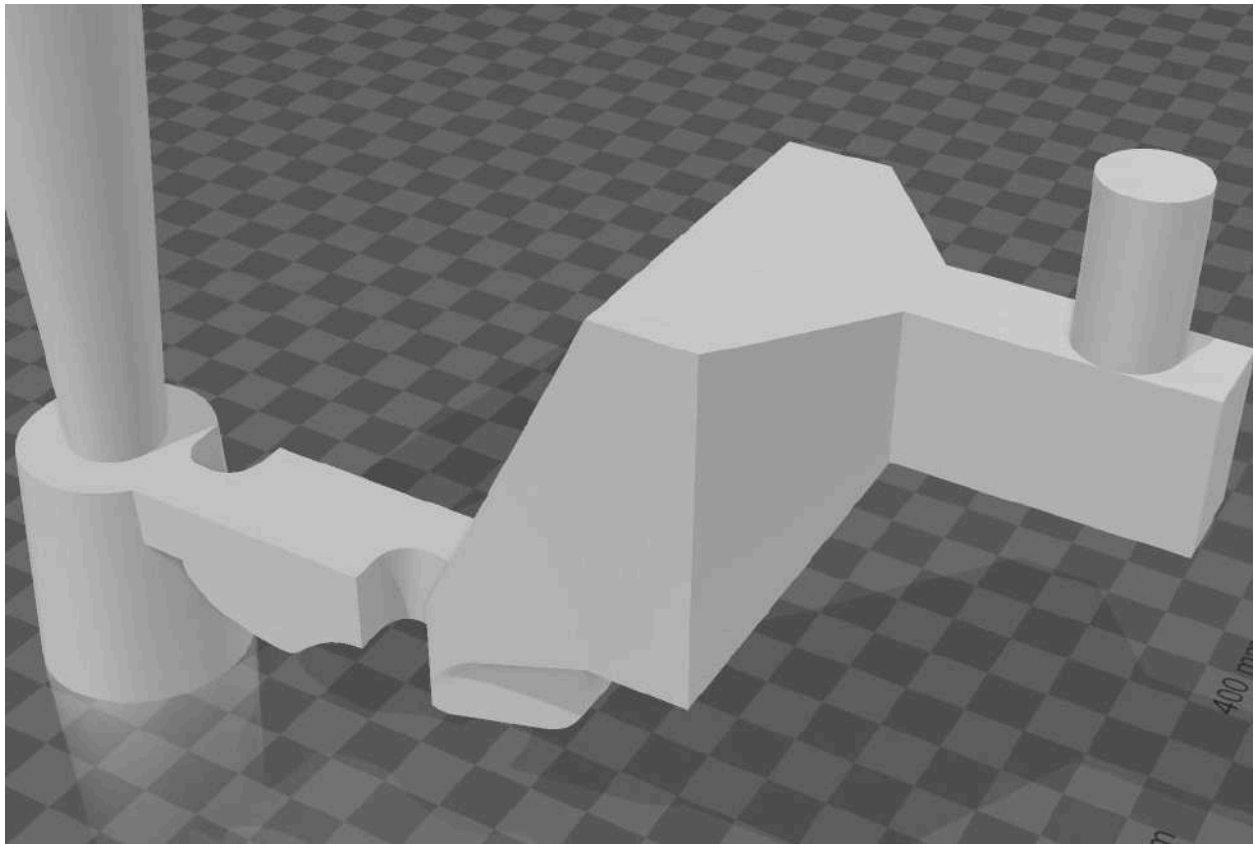


Figura 2.34: Vista en 3D del Sistema A.

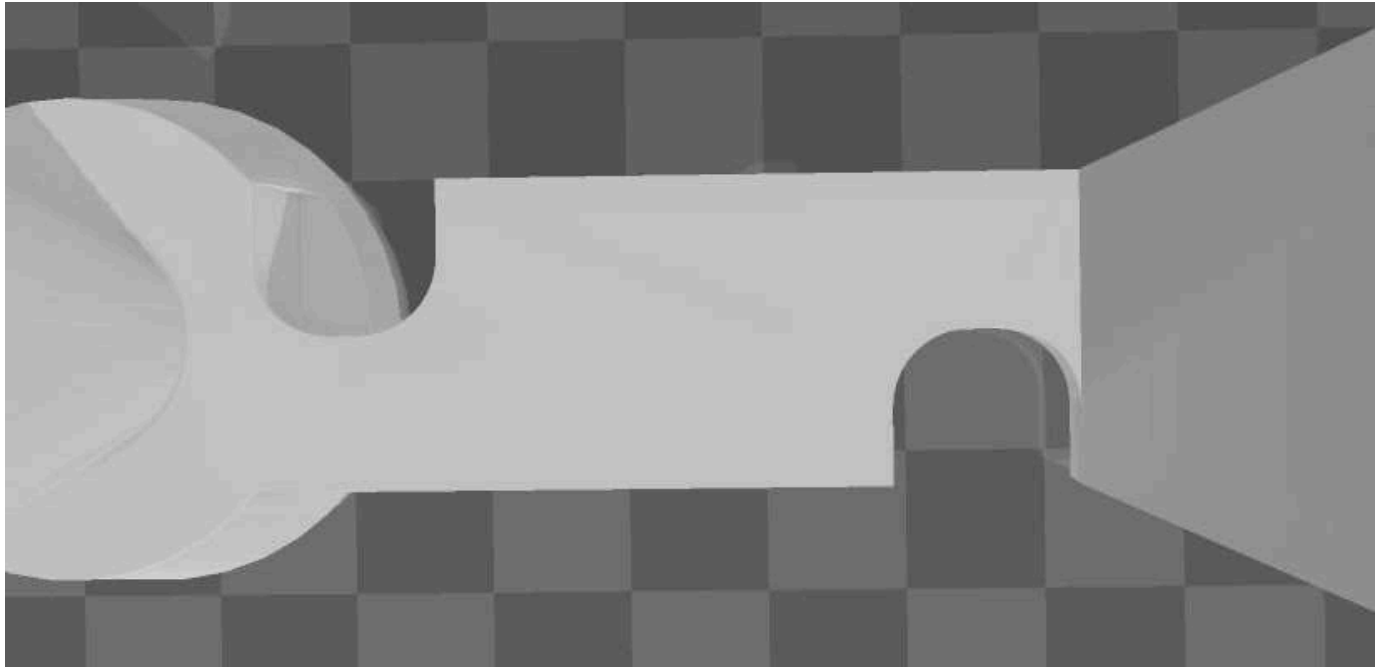


Figura 2.35: Vista de la base del Sistema A.

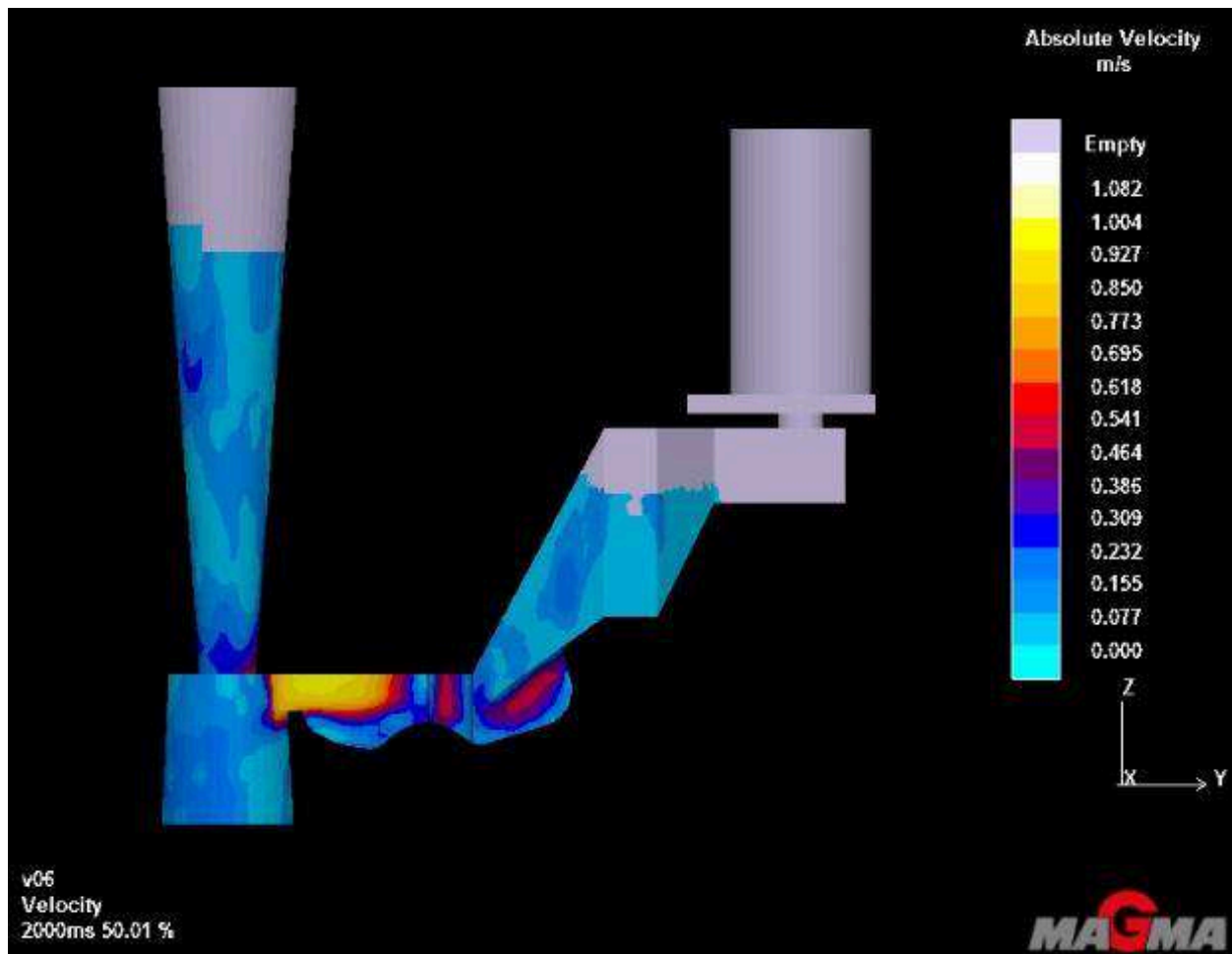


Figura 2.36: Perfil de velocidades del Sistema A (sin vectores).

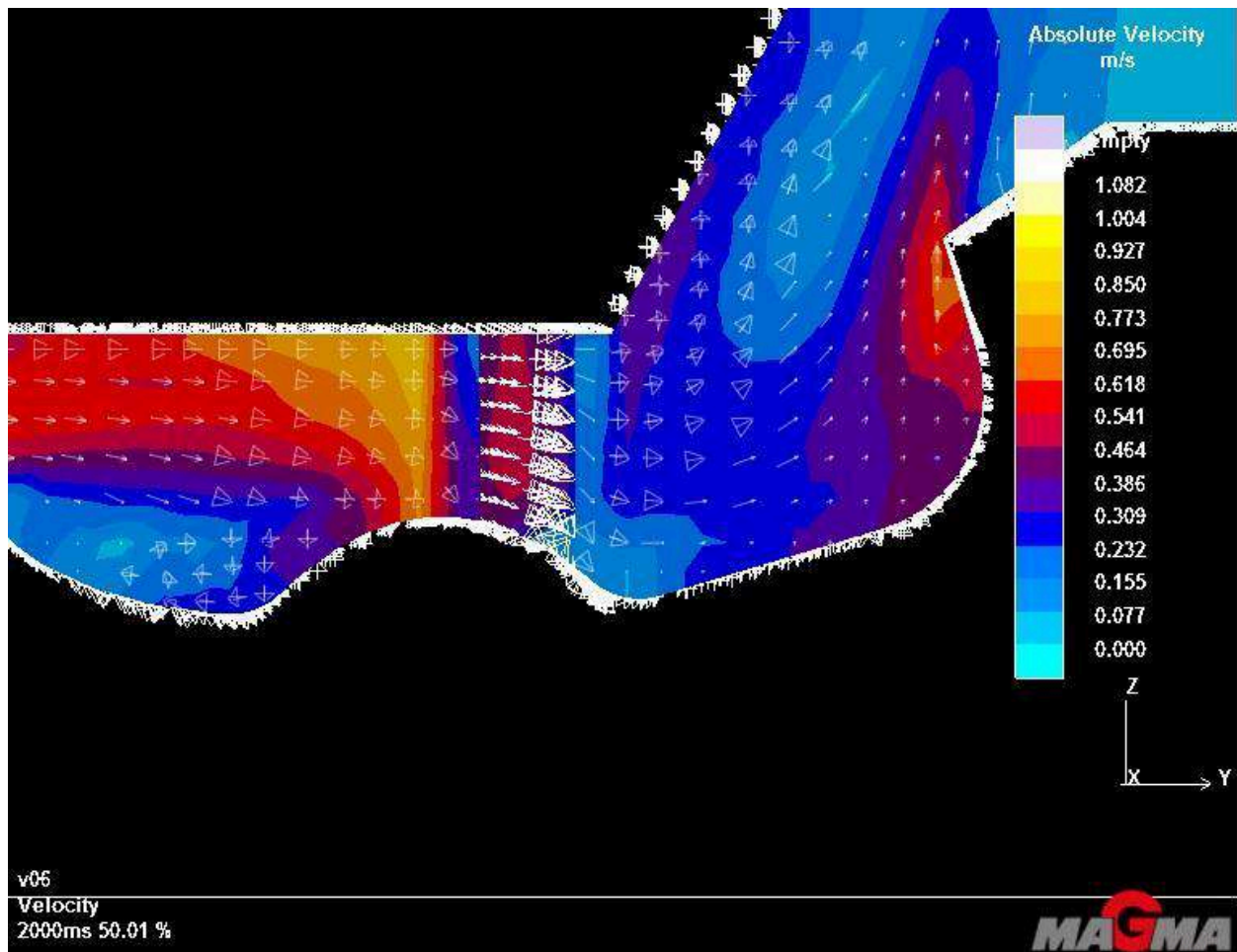


Figura 2.37: Perfil de velocidades del Sistema A (con vectores).

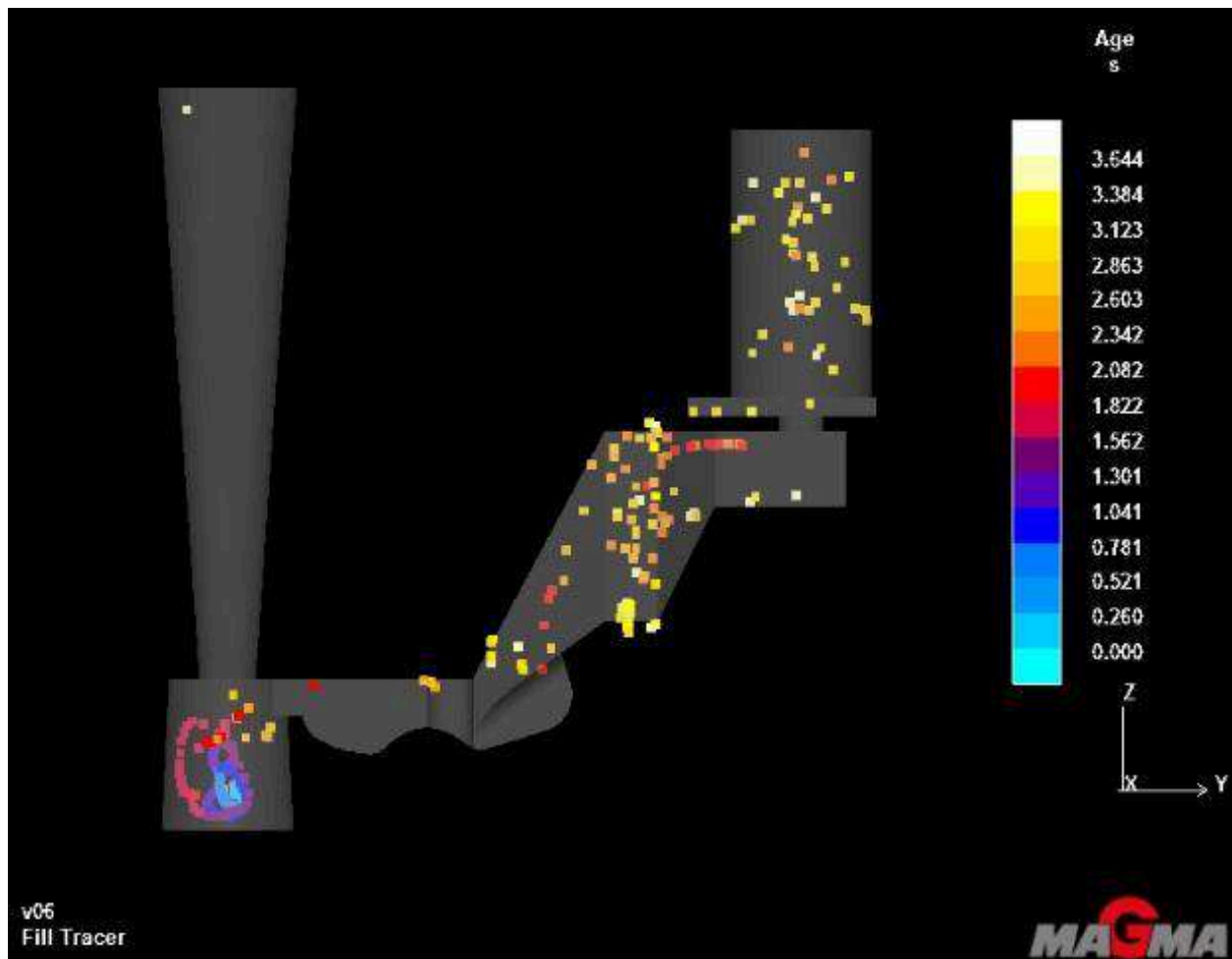


Figura 2.38: Distribución de los tracers del Sistema A.

Con estas modificaciones se aprecia en la figura 2.36 un incremento de la velocidad del metal líquido en el ingreso y en la salida de la cámara de reacción. Se observa también en la figura 2.37 que hay una recirculación del fluido no solo en la cámara de reacción, sino también en la cámara que se genera antes del filtro.

Si bien el Sistema A parece ser más eficiente que el Sistema B, se utilizarán ambos sistemas para efectuar una colada experimental, y así analizar si el inoculante se incorpora o no en la pieza y cuál lo hace con una mayor eficiencia.

Conclusiones:

Fue posible diseñar y evaluar con el simulador de llenado de moldes y solidificación MAGMASoft® una serie de sistemas de alimentación que permiten incorporar inoculante *in-mould* en una pieza colada. Se seleccionaron dos de estos sistemas para una futura colada experimental, a partir de plantear diferentes criterios.

Bibliografía empleada en este capítulo

- [1] M. López, G. Rivera, J. Massone and R. Boeri, “Estudio del efecto de inoculantes en la macro y microestructura de piezas de fundición nodular”, SAM-CONAMET 2016, Córdoba, Argentina, 2016.

Capítulo 3: Preparación para la colada y selección del sistema más eficiente

Introducción:

En este capítulo se describen los procedimientos realizados para seleccionar el sistema más eficiente de forma experimental en base a los sistemas diseñados y presentados en el Capítulo 2.

Objetivos:

Los objetivos de este capítulo son:

- Definir el sistema más eficiente para realizar inoculación *in mould*.
- Obtener muestras para, luego del desbaste metalográfico y pulido, poder caracterizar la microestructura.

Metodología:

Para cumplir los objetivos planteados se hace uso de la planta piloto de la AMI tanto para el armado y llenado de moldes como para la posterior obtención de muestras por corte, rectificado y desbaste. Además, para el pulido metalográfico y revelado de la micro y macroestructura se hace uso del laboratorio de microscopía de la AMI.

3.1. Preparativos previos a la colada

3.1.1. Armado de los moldes

Como se mencionó en el Capítulo 1, uno de los procesos más importantes para la obtención de piezas coladas es el conformado del molde. Este molde se fabricará a partir de arena de río ligada con resina, y el volumen negativo por donde ingresará el metal líquido se realiza a partir de un modelo impreso con tecnología 3D en PLA. Dentro del molde, además de los filtros que evitan que se incorporen impurezas a la pieza, pueden incorporarse diversos elementos, como *chills* (elemento que se le agrega al molde para generar fundición blanca y poder medir composición química por vía espectrométrica), termocuplas (que permiten registrar

la variación de temperatura y relevar curvas de enfriamiento) o inoculante el cual se ubica en la cámara de reacción específicamente diseñada.

Para el armado de los moldes se realiza el siguiente el procedimiento:

- a) En primer lugar, se ubicó un marco de metal que contendrá el modelo y servirá de retención de la arena que se utilizará para el molde (Figura 3.1).

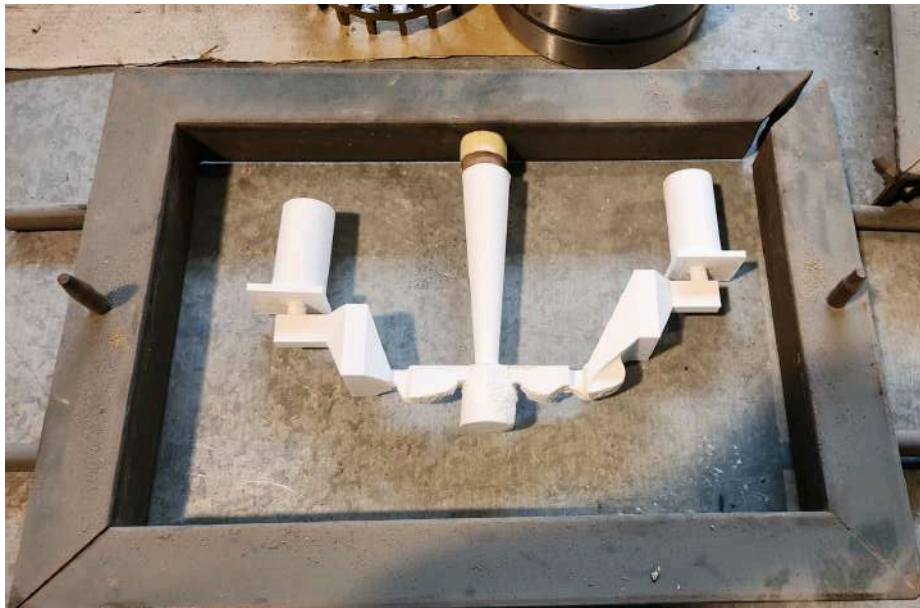


Figura 3.1: Modelo dentro del marco

- b) Se preparó la arena para el moldeo mediante un proceso que incluyó tamizado, pesado y mezclado en un molino junto con resina, catalizador y acelerante. Este procedimiento asegura que los granos de arena queden recubiertos por la resina, generando una unión sólida al catalizar. Esta unión proporciona a la arena la resistencia necesaria para conservar la geometría del molde, así como la refractariedad suficiente para contener el metal líquido y facilitar su solidificación. (Figuras 3.2 y 3.3).

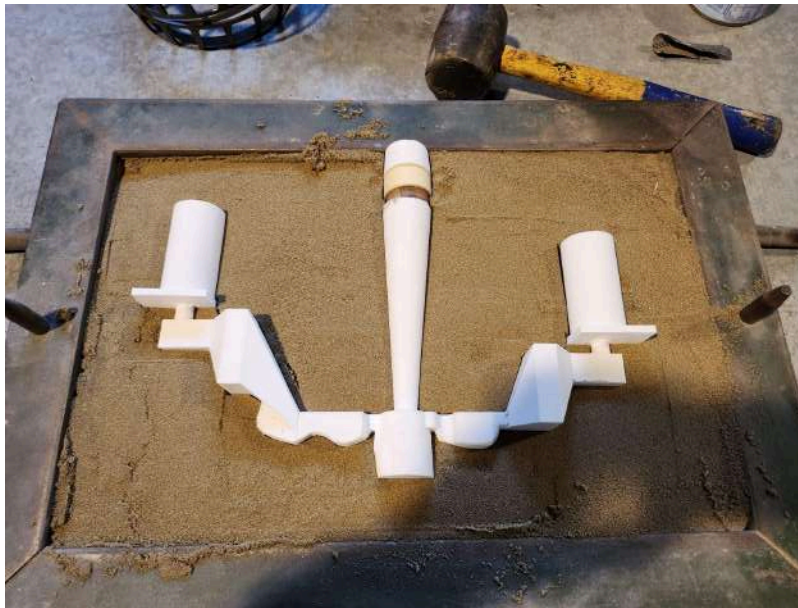


Figura 3.2: Primera mitad del molde de arena con resina húmeda



Figura 3.3: Primera mitad del molde seco con talco industrial

- c) Se vertió la arena en el marco y se posicionó el modelo para realizar el volumen negativo que se llenará de metal líquido. Se dejó reposar y se posicionó el segundo marco arriba. Aquí se pondrá una nueva carga de arena con resina para que tome la resistencia adecuada. Es importante verificar que el modelo pueda sacarse del molde de forma sencilla y sin deteriorarlo (Figura 3.4).



Figura 3.4: Molde completo abierto

- d) Una vez endurecidos los moldes, se separaron las mitades para agregar las termocuplas, las coquillas, los filtros y el inoculante (Figuras 3.5 y 3.6).

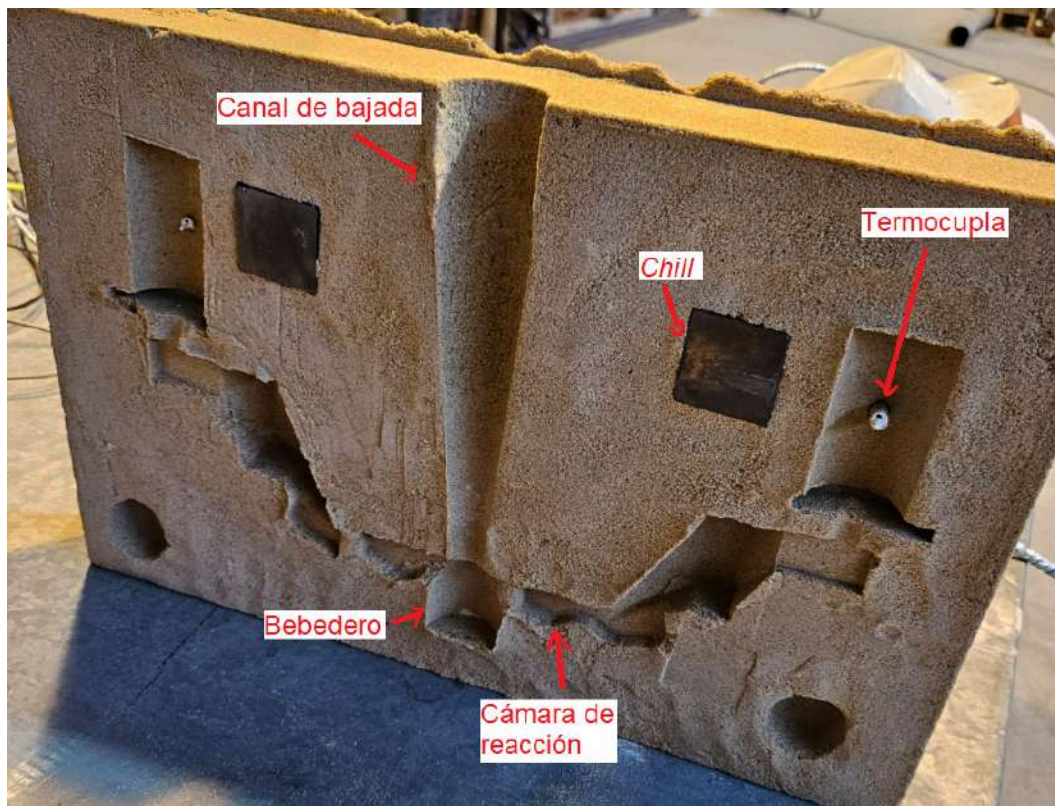


Figura 3.5: Molde instrumentado. Mitad con termocuplas

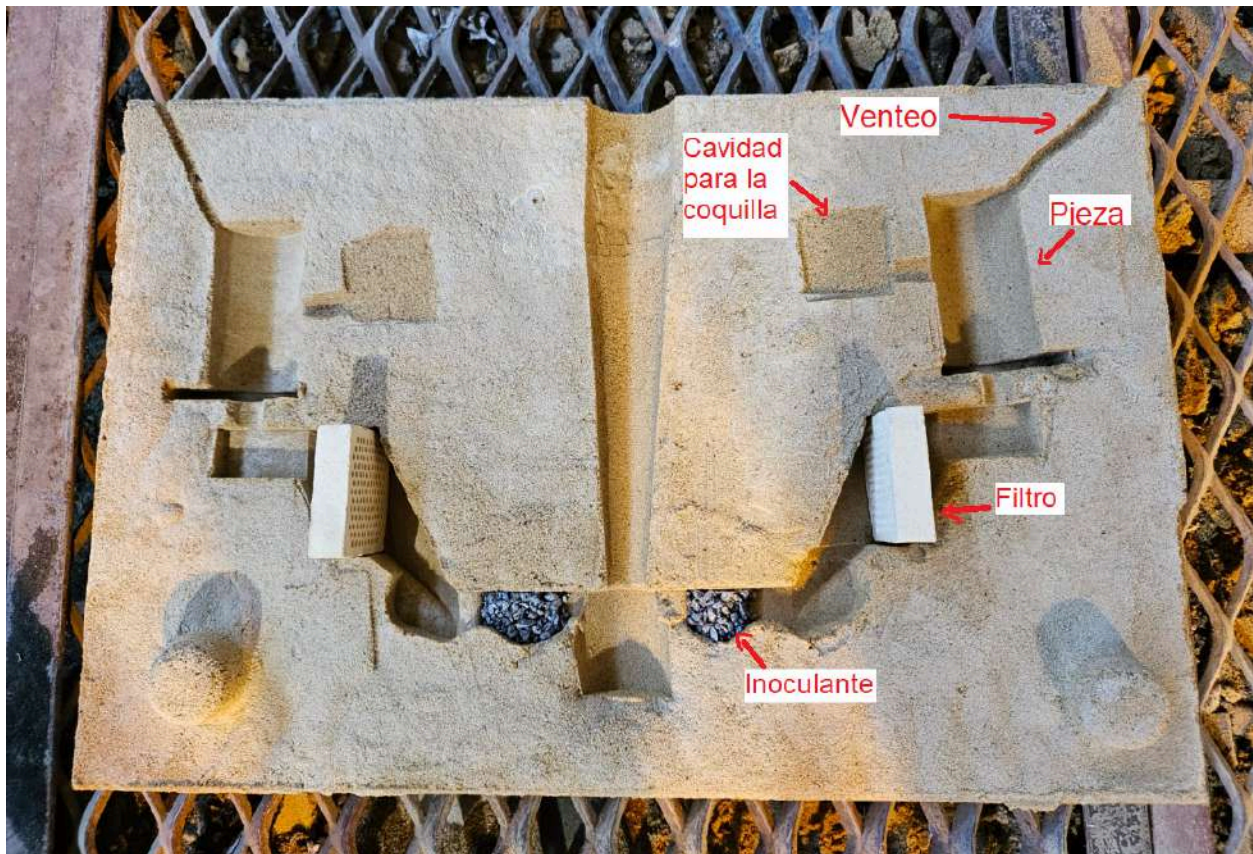


Figura 3.6: Molde instrumentado, mitad sin termocuplas

- e) Una vez que el molde está listo, se agregó una mezcla de silicato de sodio y talco industrial para pegar las mitades. El molde además se pegó con bentonita para evitar que se fugue el metal por cualquier filtración de la línea de unión. Por último, se agregó un basín para poder ingresar el metal fundido.
- f) Para analizar la composición química de la pieza colada, se utilizó una coquilla de fundición blanca para realizar un análisis espectrométrico. Como se trabaja con fundición gris, se requiere blanquear la coquilla dentro del molde. Para esto se utilizó el *chill*.

3.1.2. Preparación del horno y cancha de colada

Antes de colar, es necesario preparar los distintos componentes que estarán presentes en la cancha de colada, como moldes, copas, pinzas y equipos de medición; organizar de qué forma se llevará a cabo la colada, los tratamientos térmicos y quién realizará cada tarea; y por último se carga el horno con los materiales necesarios para la colada.

Puntualmente en esta colada no se realizan desmoldeos en caliente o tratamientos térmicos. Por lo tanto, no se requiere una preparación rigurosa más allá de las medidas de seguridad estándar para cualquier colada.

3.2. Procedimiento para realizar la colada

3.2.1. Preparación del metal líquido

En función de la composición química deseada se procedió a cargar el horno con cantidades determinadas de grafito, chatarra de acero, *FeSi*, *Cu*, *Ni*, *FeMn* y *FeMo*, según lo especificado en la hoja de carga. Esta hoja permite calcular la carga a partir de la composición química buscada.

A partir de la composición química definida, se pesan los distintos materiales de carga y se va progresivamente cargando el horno, según la secuencia ya establecida. Cuando se tiene toda la carga en estado líquido se efectúa una “Prueba en Marcha”, la cual consiste en llenar una coquilla de metal base (metal sin tratar) para determinar su composición química a partir de un análisis químico espectrométrico. Si existe alguna diferencia en la composición de metal base con respecto al establecido en la hoja de carga se procede a su corrección y posterior toma de muestra para verificar el correcto ajuste. Se realizan dos pruebas de composición química, una para el metal base y otra para el metal tratado. Obtenida la composición química deseada en el metal base, se procede a realizar la colada.

3.3. Llenado de los moldes

3.3.1. Sistema único

Durante la primera colada se utilizaron los diseños de los Sistemas A y B del Capítulo 2 para confeccionar los moldes. Dentro del mismo molde se disponen los dos sistemas para poder comparar el rendimiento de la cámara para la misma cantidad de inoculante agregado en cada una. A este sistema conformado por los Sistemas A y B se lo nombra Sistema único. Se diseñan dos moldes con el Sistema único. En un primer molde, se agregan 5 gramos de inoculante mientras que en el otro se agregan 7 gramos. Luego del llenado de los moldes, se obtienen un total de cuatro cilindros y cuatro cámaras. Se nombran a las piezas y a las cámaras como:

- A5: Pieza o cámara perteneciente al Sistema A con 5 gramos de inoculante.
- A7: Pieza o cámara perteneciente al Sistema A con 7 gramos de inoculante.
- B5: Pieza o cámara perteneciente al Sistema B con 5 gramos de inoculante.
- B7: Pieza o cámara perteneciente al Sistema B con 7 gramos de inoculante.

El inoculante utilizado es Fe-Si 75. Su composición química se presenta en la Tabla 3.1 y en este caso se utiliza el molido fino.

Material name	Size [mm]	Composition, as percentages by mass					Packaging	Pallet
		Si1)	Al	C	P	S		
FeSi75 (fines)	Min.	2	75	—	—	—	1 mt big bags	one way pallet
	Max.	10	—	1,5	0,1	0,05		
FeSi75 (bulk)	Min.	10	75	—	—	—	1 mt big bags	euro pallet
	Max.	50	—	1,5	0,1	0,03		

The above data are based on real data from the metalshub platform. These characteristics are the most common ones in metalshub transactions. We will update the data regularly. [12,2020]

Tabla 3.1 : Composición química del FeSi75

3.4. Resultados de la colada

A continuación se presentan las piezas obtenidas luego del llenado de los moldes. La Figura 3.7 corresponde a las piezas A5 y B5 (a), y las piezas A7 y B7 (b). En ambas figuras, se indica con una línea roja la posición en que se realizaron los cortes en las cámaras para el análisis de rendimiento. Por otro lado, para caracterizar la microestructura de las piezas, se realiza un corte como el indicado con la línea azul.

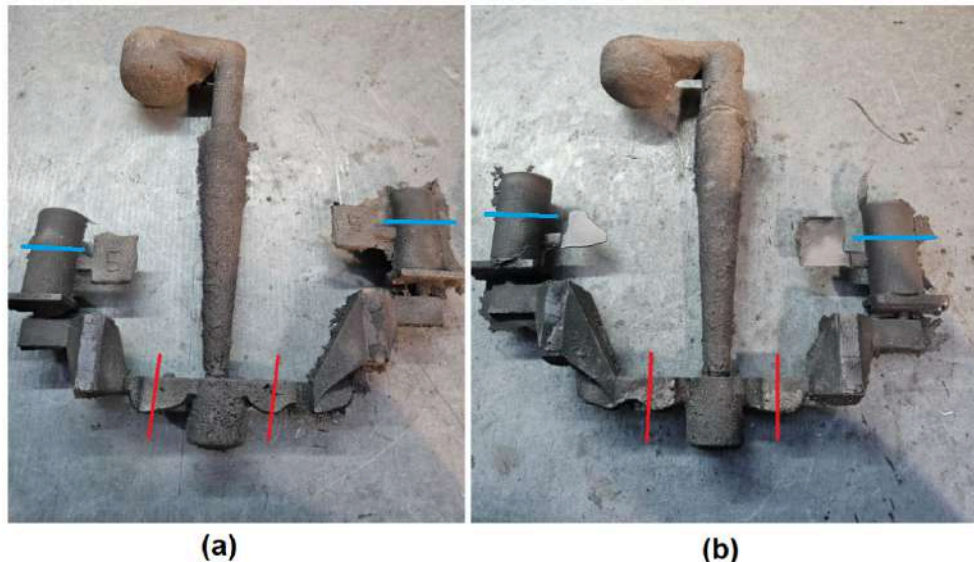


Figura 3.7: (a) Sistemas B (izquierda) y A (derecha) con 5 gramos de inoculante cada uno por cámara. (b) Sistemas A (izquierda) y B (derecha) con 7 gramos de inoculante cada uno por cámara.

3.4.1. Rendimiento de las cámaras

Para determinar el rendimiento de la cámara, se pueden emplear dos métodos.

- El primero consiste en comparar el porcentaje de silicio de la coquilla dentro del molde y el porcentaje de silicio obtenido en la prueba en marcha antes de realizar el llenado del

molde. Ambas composiciones se obtienen a partir del análisis químico espectrométrico. Conocido el porcentaje de silicio que incorporaría una inoculación con un rendimiento del 100% (a partir de relacionar el peso de la muestra y la cantidad de inoculante agregada en la cámara) y el porcentaje de silicio antes y después de la inoculación, se calcula el rendimiento de la cámara de silicio.

- El segundo método consiste en analizar la muestra de manera macroscópica (a ojo desnudo o con una lupa) para observar si hay inoculante no disuelto o estancado en la cámara de reacción.

3.4.2. Análisis espectrométrico

Para la caracterización de los sistemas, se considera la composición química de la coquilla ya que habiendo agregado $FeSi$ en las cámaras de reacción, el contenido de Si de las piezas y por lo tanto de las coquillas debería ser más alto que el medido en el metal base, pudiéndose evaluar la eficiencia de cada coquilla a partir del porcentaje de aumento en el contenido de Si .

Antes de realizar el análisis espectrométrico se pulieron las coquillas obtenidas dentro del molde para verificar que estén totalmente "blanqueadas". Esto se realiza ya que, para que se pueda obtener la composición química, la coquilla no debe tener presencia de grafito. Se presenta en la Figura 3.8 una coquilla pulida. En la Figura 3.9 se presenta una microscopía de la coquilla con un aumento de 10X.



Figura 3.8: Coquilla pulida a espejo

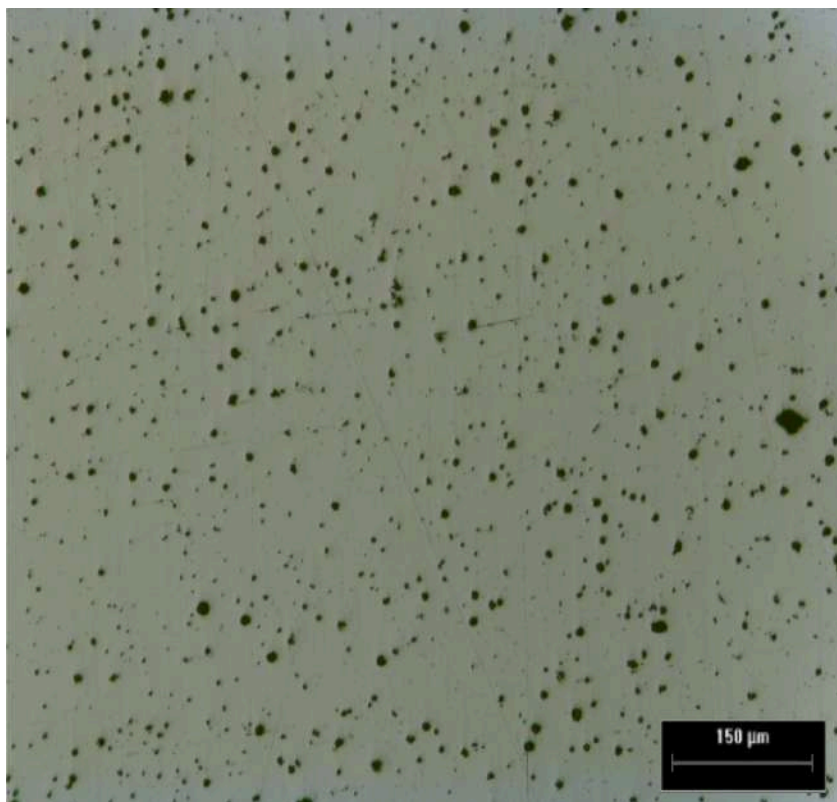


Figura 3.9: Micrografía de la coquilla pulida

En la Figura 3.9 se observa una gran cantidad de nódulos sobre la superficie, por lo que la coquilla no está blanqueada y el análisis espectrométrico daría resultados erróneos. De hecho, los datos de C y Si obtenidos del espectrómetro dan como resultado un rendimiento mayor al 100%, debido a la presencia de grafito. Esta misma observación se realizó para las demás coquillas mostrando en todos los casos la presencia de nódulos de grafito. Por lo tanto, las coquillas obtenidas no son aptas para realizar el análisis químico y es necesario buscar otra forma de evaluar la eficiencia de las cámaras de reacción diseñadas.

3.4.3. Conteo nodular

Dado que el conteo nodular se ve influenciado por la inoculación, la alternativa para evaluar la eficiencia de las cámaras de reacción es medir los correspondientes conteos nodulares.

Sobre los cilindros, se tomó un solo campo en el centro y se realizaron tres conteos. A partir del promedio del conteo nodular, se obtuvieron $273 \frac{\text{nódulos}}{\text{mm}^2}$ en la pieza A5 (Figura 3.10), $271 \frac{\text{nódulos}}{\text{mm}^2}$ en la pieza A7 (Figura 3.11), $325 \frac{\text{nódulos}}{\text{mm}^2}$ en la pieza B5 (Figura 3.12) y $298 \frac{\text{nódulos}}{\text{mm}^2}$ en la pieza B7 (Figura 3.13). Estas mediciones dieron una dispersión de $20 \frac{\text{nódulos}}{\text{mm}^2}$.

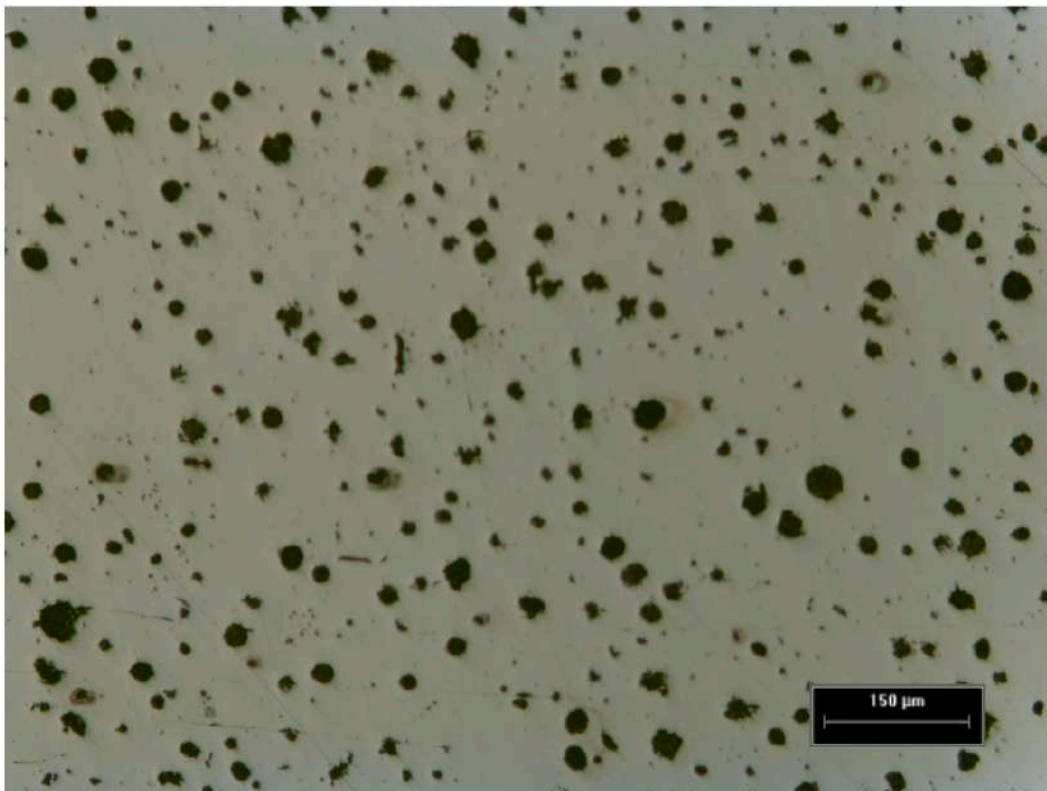


Figura 3.10: Micrografía de la pieza A5 con objetivo de 10X (100 aumentos).

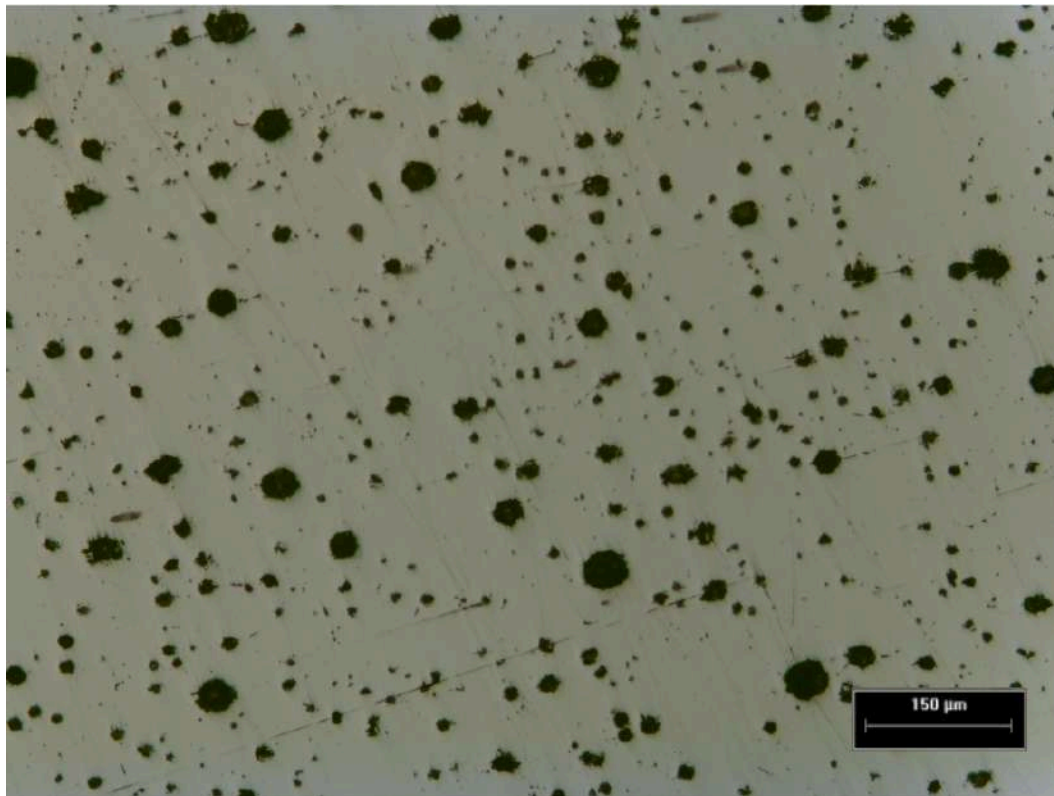


Figura 3.11: Micrografía de la pieza A7 con objetivo de 10X (100 aumentos).

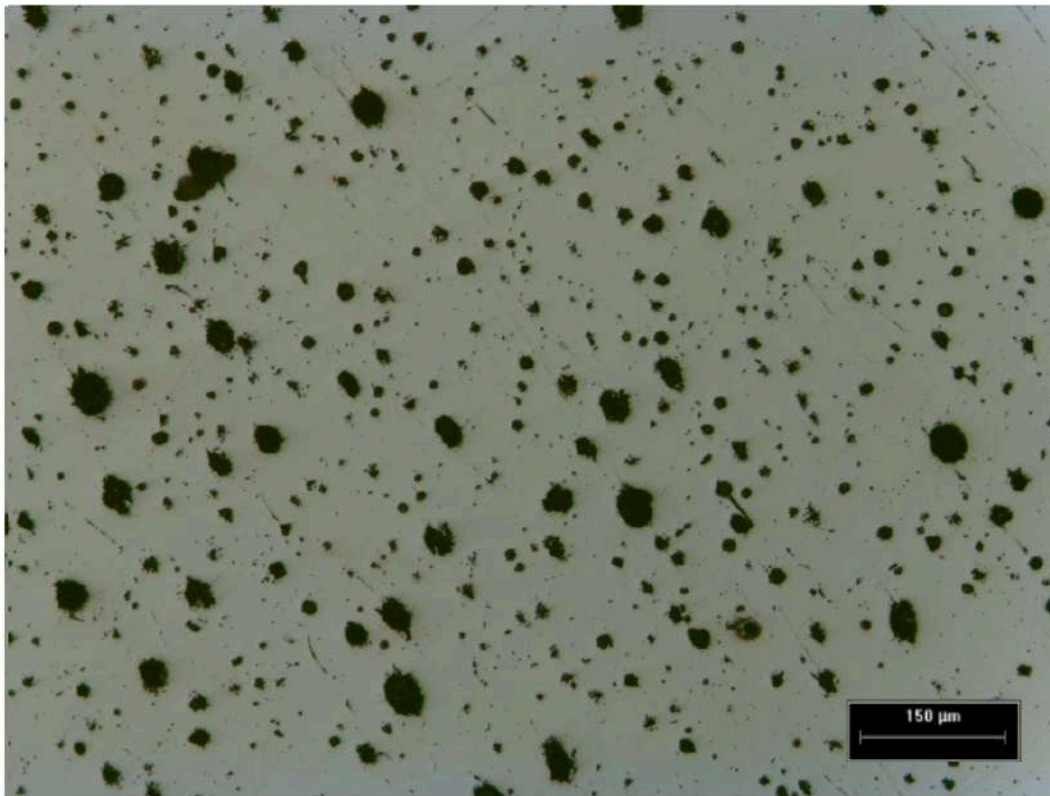


Figura 3.12: Micrografía de la pieza B5 con objetivo de 10X (100 aumentos).

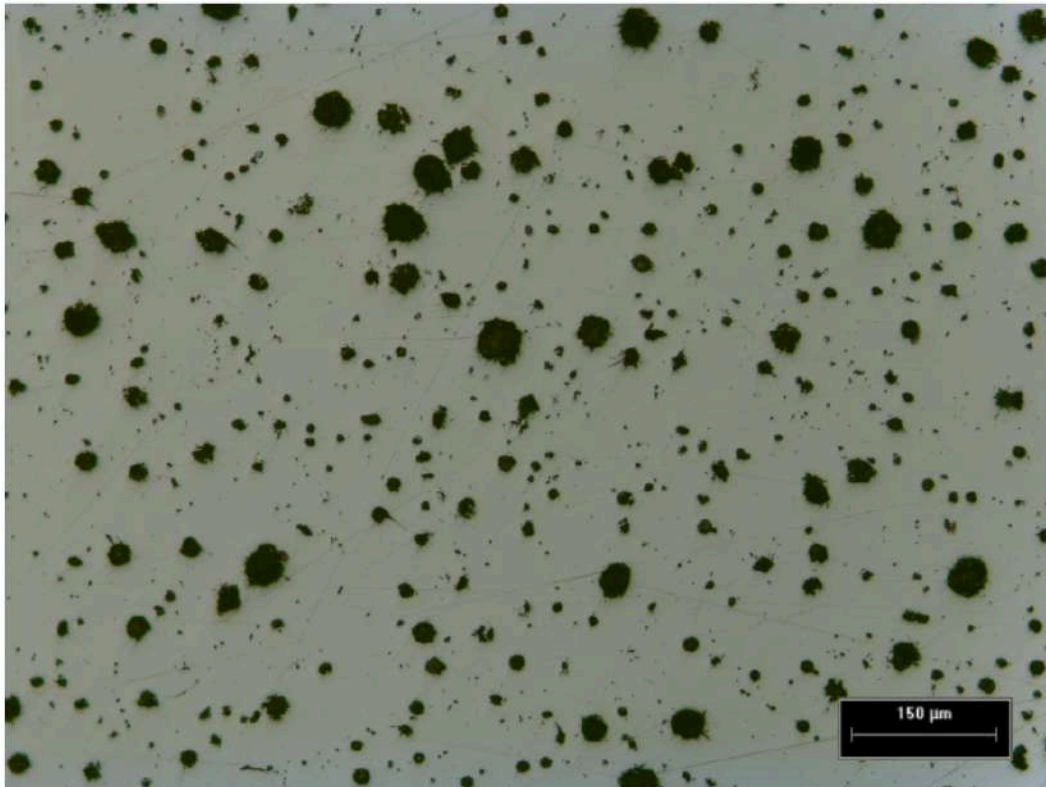


Figura 3.13: Micrografía de la pieza B7 con objetivo de 10X (100 aumentos).

Esta información se resume en el gráfico de barras de la Figura 3.14.

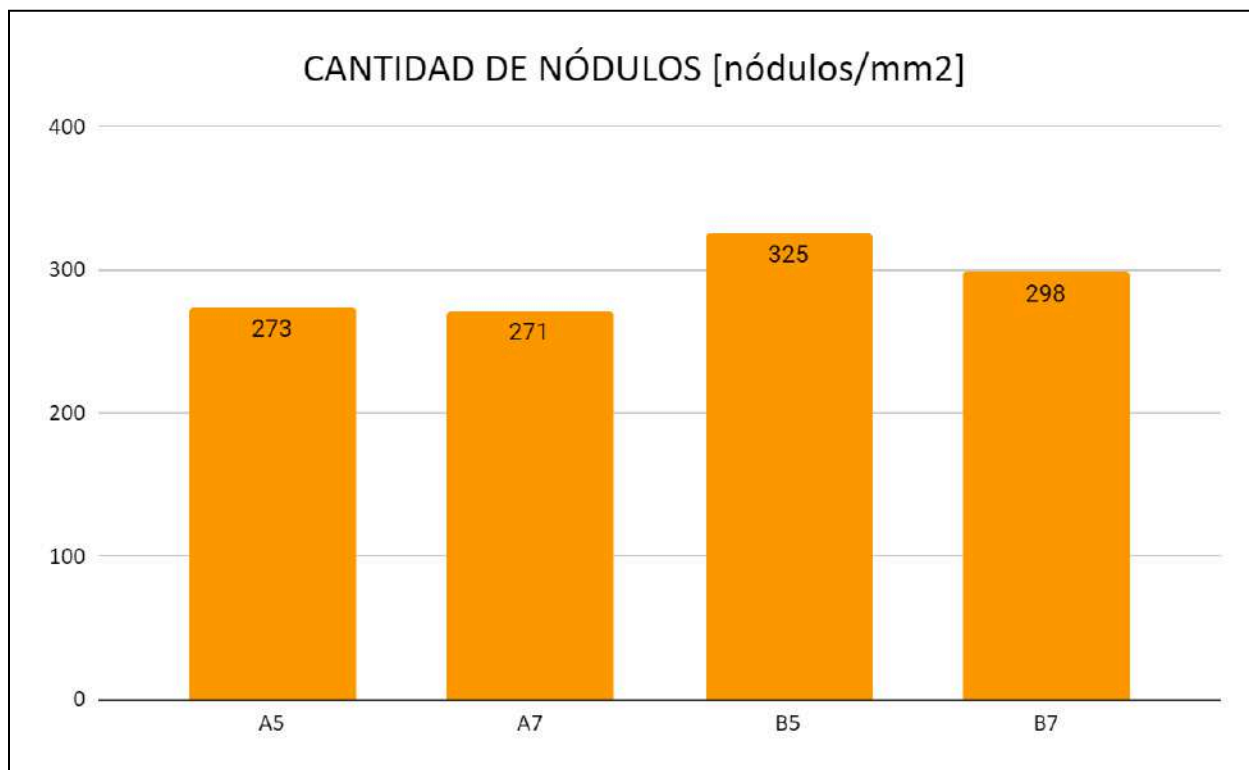


Figura 3.14: Comparación entre los conteos nodulares

Si bien en la Figura 3.14 se observa que el sistema B presenta un conteo nodular ligeramente mayor, la diferencia no es lo suficientemente significativa como para definir qué sistema es el más eficiente de manera concluyente. Por lo tanto, la selección del sistema más eficiente, al no poder realizarse de forma analítica, se realiza mediante la comparación de las cámaras de reacción.

A continuación se analizan las superficies pulidas de las cámaras de reacción, para observar si existe inoculante sin disolver. Se presentan las superficies de las cámaras B5, B7, A5 y A7 con ampliaciones sobre las zonas donde se observa inoculante no disuelto en las Figuras 3.15, 3.16, 3.17 y 3.18 respectivamente.

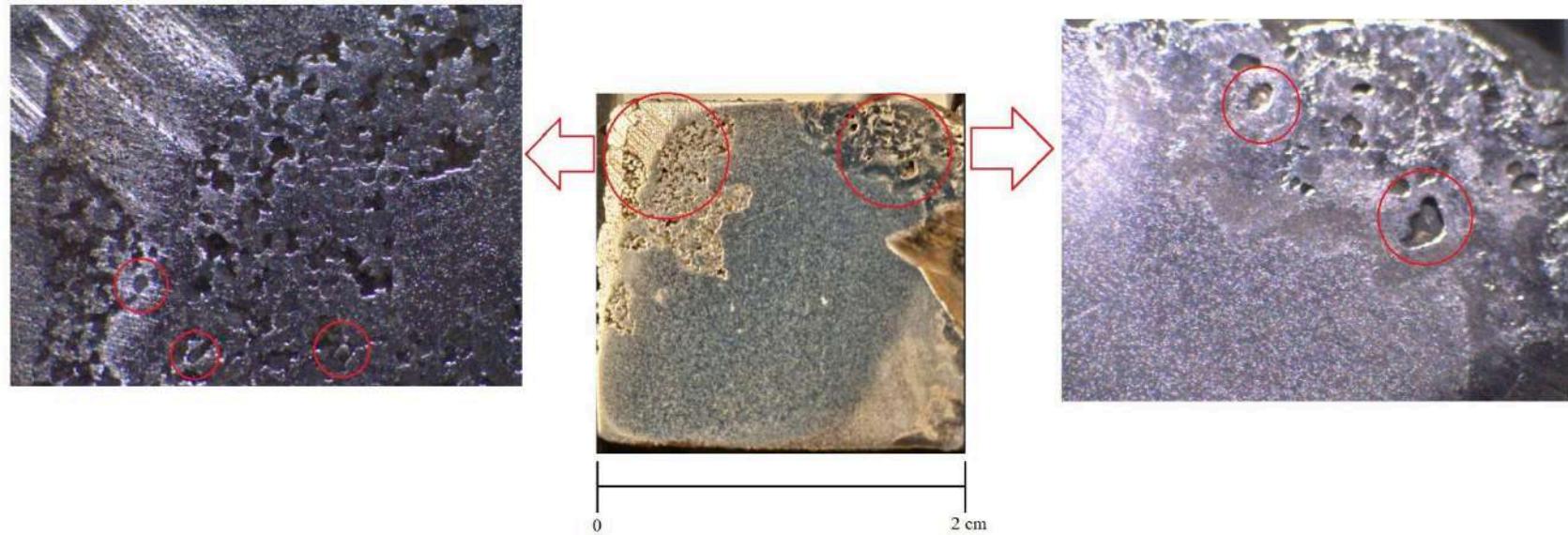


Figura 3.15: Macroscopía de la cámara de reacción B5. En el centro la cámara B5; a la izquierda y a la derecha los acercamientos a las zonas donde se observa inoculante no disuelto, marcado en rojo

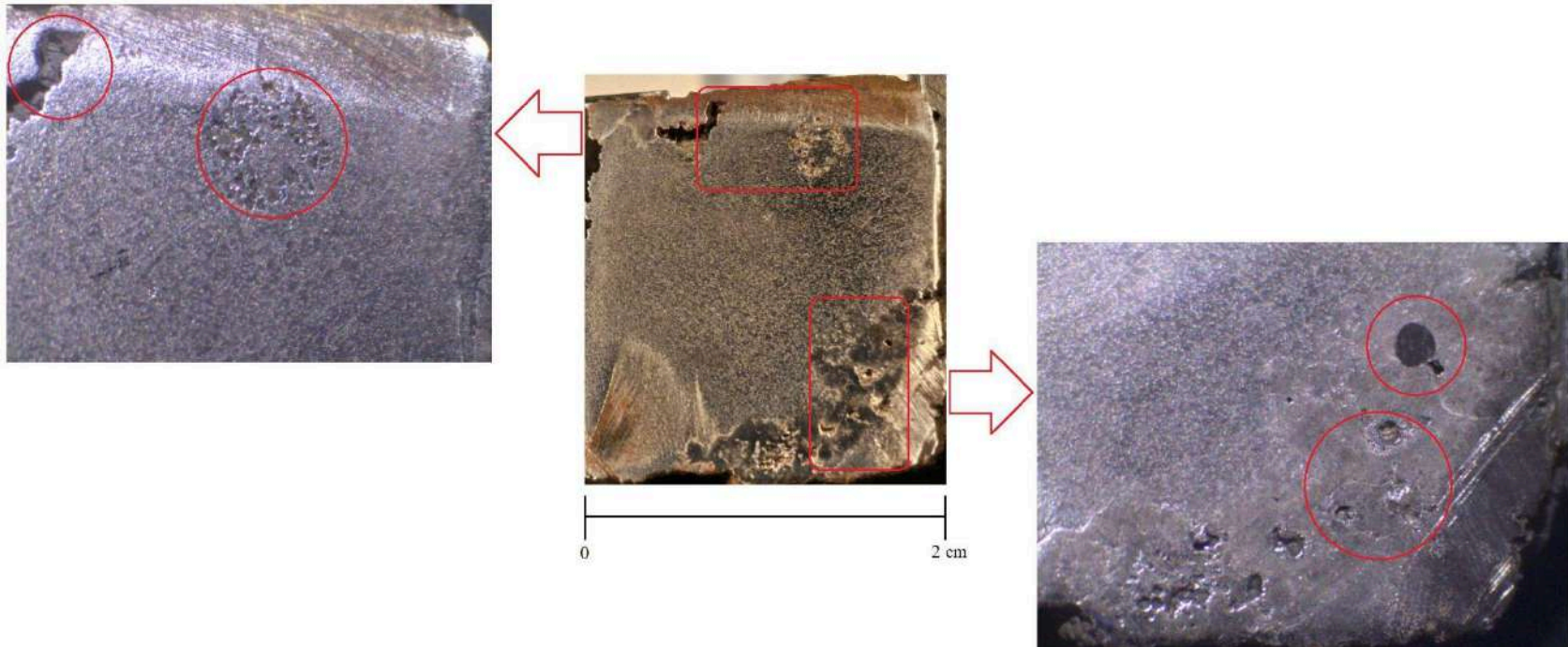


Figura 3.16: Macroscopía de la cámara de reacción B7. En el centro la cámara B7; a la izquierda y a la derecha los acercamientos a las zonas donde se observa inoculante no disuelto, marcado en rojo

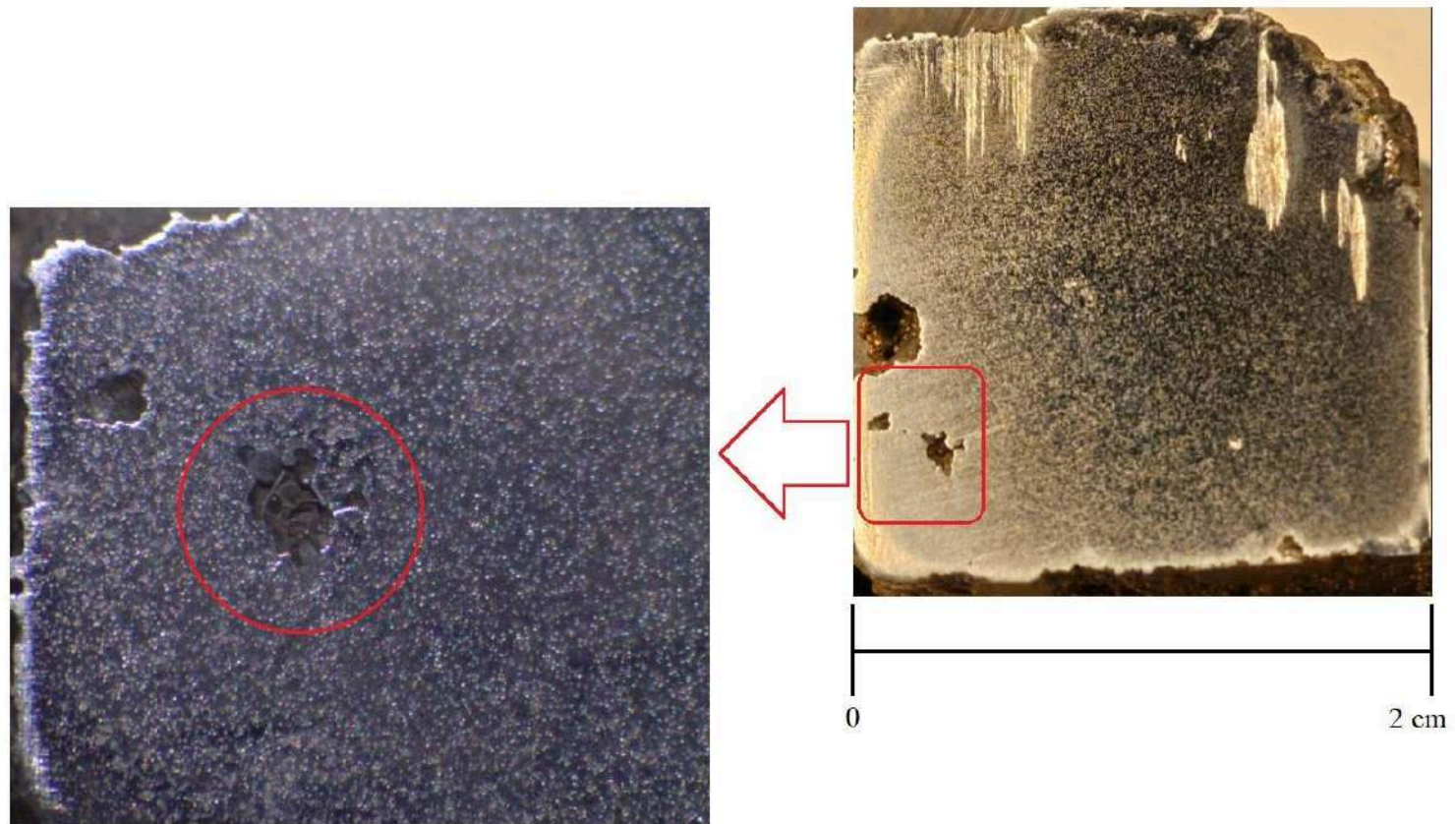


Figura 3.17: Macroscopía de la cámara de reacción A5. A la derecha la cámara A5; a la izquierda se muestra la zona con inoculante no disuelto, marcado en rojo

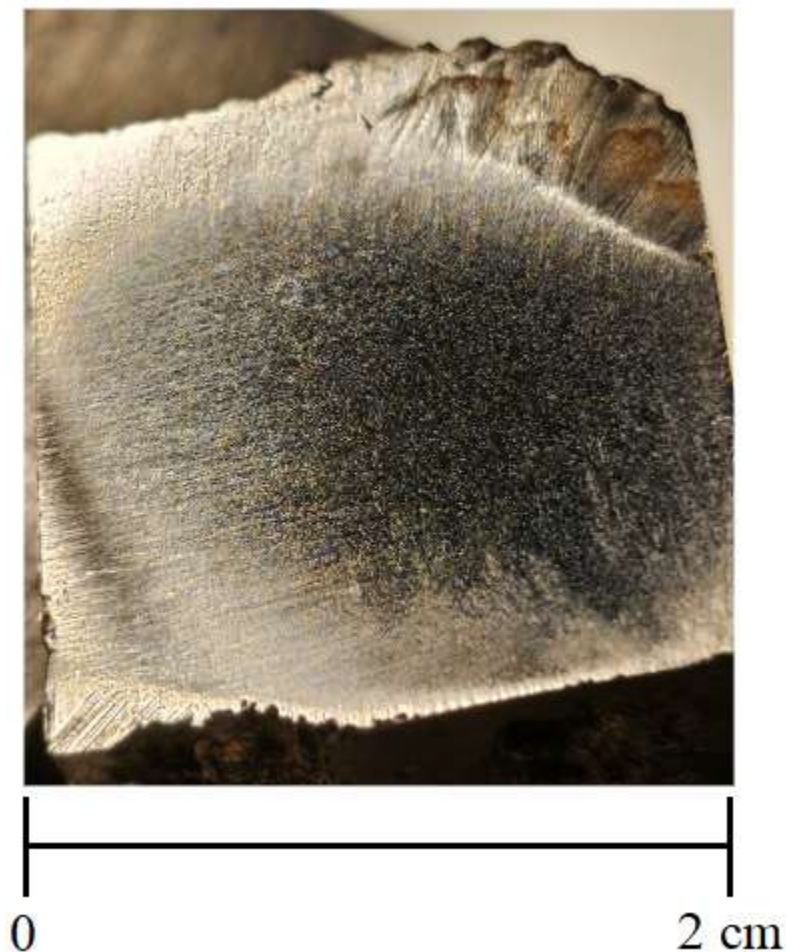


Figura 3.18: Macroscopía de la cámara de reacción A7

Se aprecia que en los sistemas B5 y B7 hay una gran cantidad de inoculante no disuelto presente en las cavidades propias de las contracciones del metal o rechupes (Figura 3.15 y 3.16). En cambio, los sistemas A5 y A7 presentan menos cantidad de inoculante sin disolver. En el sistema A5 se observa, en la superficie pulida, una sola piedra de inoculante no disuelto retenido en la matriz metálica (Figura 3.17), mientras que el sistema A7 (Figura 3.18) no presenta muestras de inoculante no disuelto, en la superficie analizada. Esto implica que en la sección analizada y para los contenidos de inoculante utilizados el sistema B tendría más dificultad para disolver el inoculante, por lo que tanto el proceso de inoculación como el diseño de la cámara serían menos eficientes.

Conclusiones

Con los datos obtenidos en los diferentes ensayos y evaluaciones, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Si bien se observa un conteo nodular levemente superior en las piezas correspondientes al sistema B, lo cual puede deberse parcialmente a la incorporación de inoculante a la pieza, esta diferencia no es determinante para la selección del sistema más eficiente.
- A partir de las observaciones macroscópicas efectuadas en cortes de las cámaras de reacción, se puede observar que el sistema que presenta la mejor incorporación de inoculante a la pieza es el sistema A.

De esta forma se define que el Sistema A es el más eficiente y, por lo tanto, se lo empleará para realizar las siguientes pruebas experimentales. Se adjunta un croquis con las dimensiones de la cámara de reacción diseñada según el Sistema A (Figura 3.19). El mallado del sistema se presenta en la Figura 3.20 y una ampliación sobre el mallado de la cámara en la Figura 3.21:

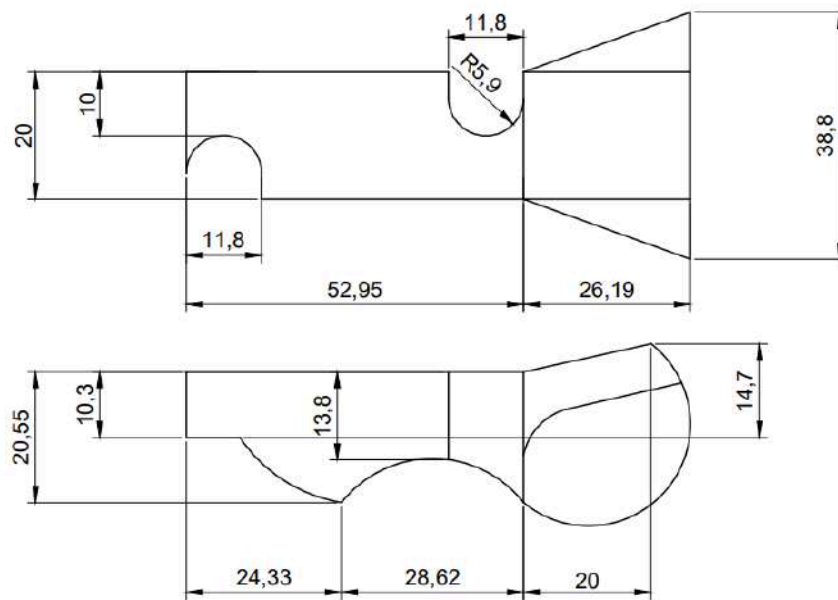


Figura 3.19: Esquemático con dimensiones de la cámara de reacción del Sistema A

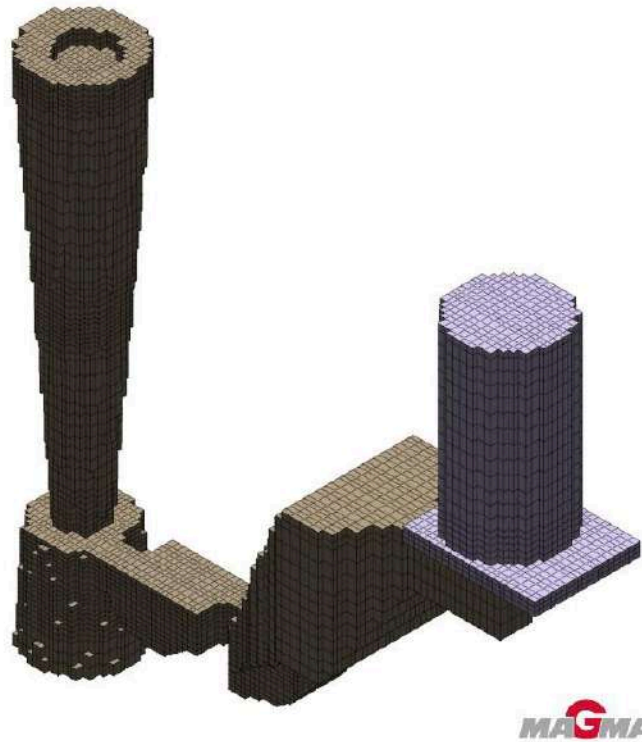


Figura 3.20: Mallado del Sistema A

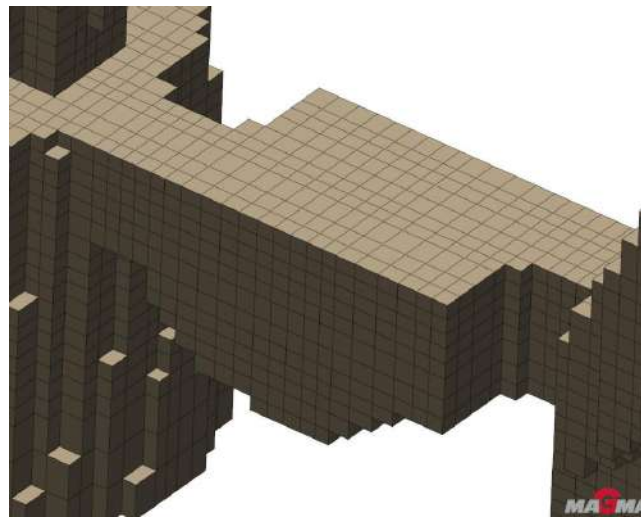


Figura 3.21: Mallado de la cámara de reacción del Sistema A

Bibliografía empleada en este capítulo

[1] [Ferrosilicon \(FeSi75\)](#).

[2] Cátedra de Tecnología de la Fundición (2022). Apunte de Cátedra: Unidad 6: Moldes y noyos. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata.

Capítulo 4: Armado del molde instrumentado y desmoldeo en caliente

Introducción:

A partir de la evaluación de los distintos sistemas de alimentación y cámaras de reacción ya reportada en el Capítulo 3, se presentan en este capítulo los resultados de la utilización del Sistema A, en una colada en la que se procedió al llenado y su posterior desmoldeo en caliente con el fin de verificar si es posible revelar la estructura de solidificación. Se describen los procedimientos realizados para efectuar la técnica DAAS, obtener las curvas de enfriamiento y muestras para examen metalográfico. Además, se describen las observaciones microestructurales realizadas para analizar la eficiencia de la cámara de inoculación para dos cantidades diferentes de inoculante incorporado.

Objetivos:

Los objetivos de este capítulo son:

- Definir el intervalo de tiempo adecuado para realizar el desmoldeo en caliente, a partir de la simulación realizada en MAGMASoft®, del cual se cuenta con licencia de uso académico.
- Aplicar la técnica DAAS sobre el metal colado y verificar si es posible revelar la estructura de solidificación.
- Realizar la observación microestructural de las piezas coladas para encontrar una relación entre la microestructura y la cantidad de inoculante.
- Obtener las curvas de enfriamiento mediante un molde instrumentado y una copa de análisis térmico.

Metodología:

Los moldes, la fusión y colada se realizan en la planta piloto de la AMI. La técnica de revelado de la estructura de solidificación (DAAS) se realiza con hornos tipo mufla y horno de sales fundidas. La caracterización microestructural se realiza en el laboratorio de microscopía de la AMI.

4.1. Preparación de la colada para realizar el desmoldeo en caliente

4.1.1. Obtención del tiempo de desmoldeo

En los moldes utilizados para aplicar la técnica DAAS y revelar la estructura de solidificación, se les incorporaron 4 y 6 gramos de inoculante en cada una de las cámaras del Sistema A. El tener dos moldes permite que, si al desmoldear uno se observa que la temperatura de apertura no fuese la correcta (debido a un error en la simulación todavía no validada) y por ejemplo tuviera zonas pastosas o a muy baja temperatura, sería posible corregir el tiempo de desmoldeo con el segundo molde. En paralelo, se llena un molde instrumentado junto con la copa de análisis térmico para obtener y relevar las curvas de enfriamiento.

Para definir el tiempo de desmoldeo se utilizan las simulaciones realizadas en MAGMASoft®. El criterio tomado para definir la ventana de tiempo consiste en considerar el tiempo mínimo para el desmoldeo como el instante en el cual se genera una cáscara sólida en la pieza, y el tiempo máximo para el desmoldeo como el instante para el cual la parte exterior de la pieza alcance los 950°C. Con este criterio, es posible asegurar que en el momento del desmoldeo la pieza está sólida y que la temperatura de la misma está por encima de la transformación eutectoide, la cual es necesario evitar para poder revelar correctamente la estructura de solidificación, tal como fue explicado en la sección 1.1.4. del Marco Teórico. Las capturas del *software* junto con los tiempos mínimo y máximo obtenidos se presentan en las Figuras 4.1 y 4.2.

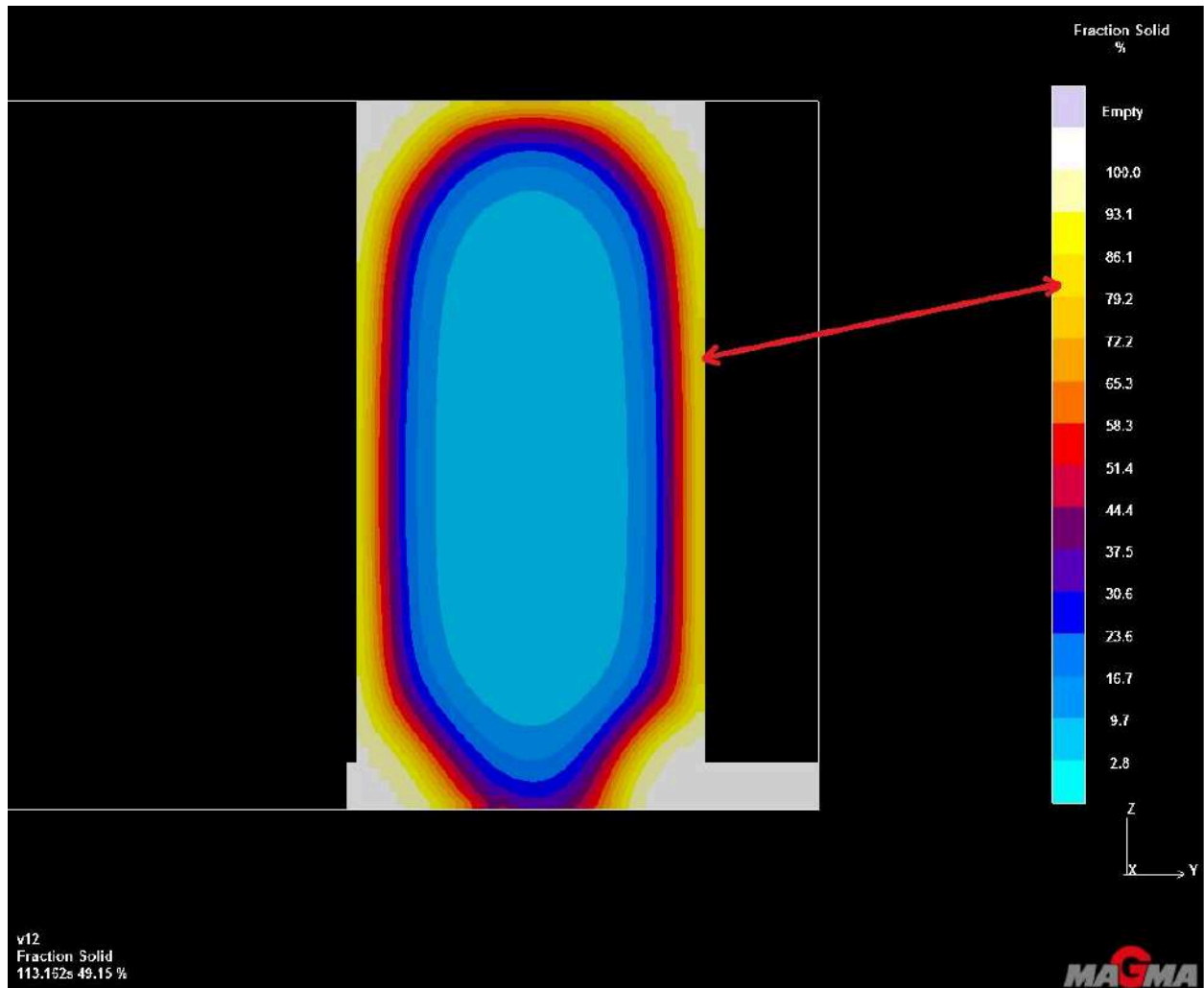


Figura 4.1: Tiempo para el cual la pieza forma una cáscara sólida (114 segundos)

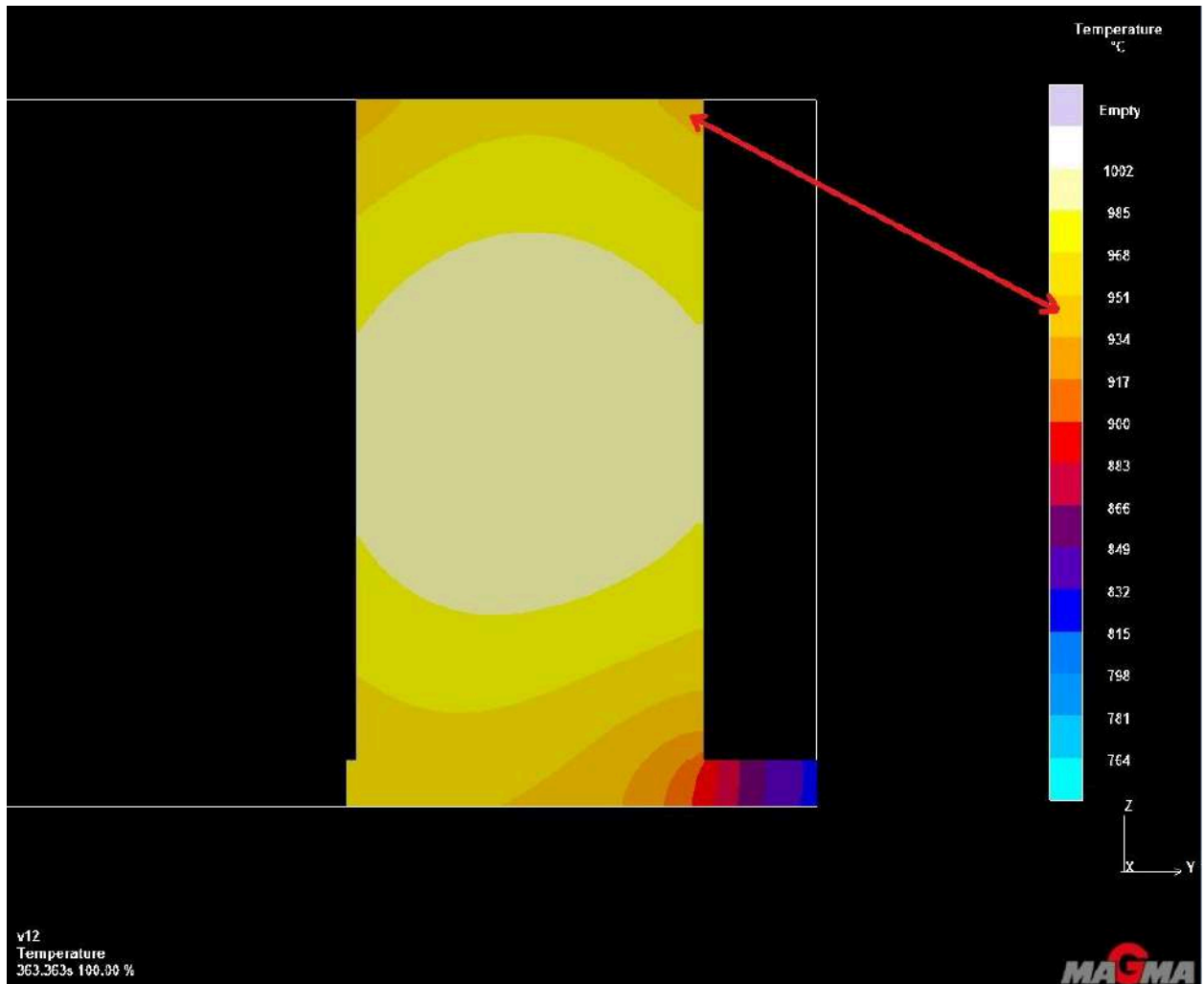


Figura 4.2: Tiempo para el cual la parte externa de la pieza está a 950°C (363 segundos)

En base a los tiempos registrados en la simulación, el tiempo de desmoldeo en caliente está entre los 114 y 363 segundos, una vez llenado el molde. Esto da una ventana de tiempo de 249 segundos, aproximadamente 4 minutos. Por lo tanto, se decide que el tiempo de desmoldeo será de 2 minutos (120 segundos) una vez que se llene el molde.

4.1.2. Organización de la cancha de colada

Para llevar adelante esta colada, se realizan los mismos pasos que en las secciones 3.1 y 3.2. En este caso se preparan tres moldes (de los cuales uno está instrumentado) y un bloque “Y”. El bloque “Y” se utiliza para poder tener un registro de la composición química del metal colado y a partir de este se pueden obtener probetas para ensayos mecánicos. A los dos moldes restantes (sin instrumentar) se les aplicará la técnica de desmoldeo en caliente. La

disposición de la cancha de colada se presenta en la Figura 4.3 y la zona donde se registran los datos del molde instrumentado se muestra en la Figura 4.4.



Figura 4.3: Disposición de moldes para colar y placa adquisidora de datos

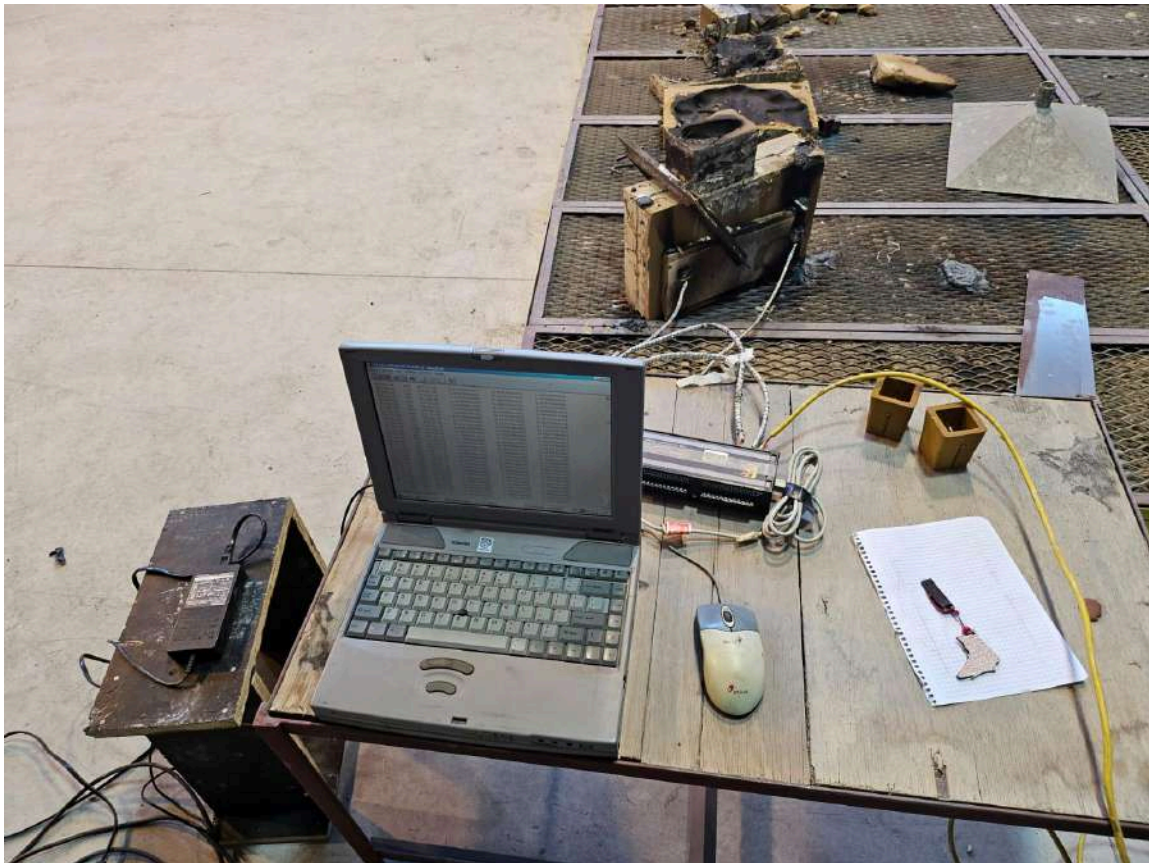


Figura 4.4: Sistema para el registro de datos

4.1.3. Designación de roles

Para obtener los resultados deseados sin comprometer la seguridad de ningún operario es necesario definir los roles de cada uno. Los roles necesarios para realizar la colada son:

- Responsable del horno: Es quién carga el horno con material para fundir y maneja el motor que rota el crisol para proceder a su vaciado.
- Responsables de la cuchara: Son quienes manejan la cuchara con metal líquido hacia los moldes para colar.
- Responsable del tratamiento del metal: Es quién agrega el nodulizante e inoculante a la cuchara para lograr el material y la composición química deseados antes del llenado de los moldes.
- Responsable del espectrómetro: Es quién se ocupa de obtener la composición química de las coquillas de las diferentes pruebas en marcha.
- Responsables del registro del tiempo: Es quien registra el tiempo que pasa entre el llenado del molde y el tiempo crítico para el desmoldeo en caliente.

- Responsables de la apertura del molde: Son quienes abren el molde para llevarlo a la mufla y realizar el tratamiento de DAAS. En este caso se necesita que haya una segunda persona para que en caso de que la pieza se rompa, esta pueda recuperarse rápidamente y llevarse a la mufla (Figuras 4.5 y 4.6).



Figura 4.5: Desmoldeo en caliente



Figura 4.6: Transporte de pieza desmoldeada en caliente hacia la mufla

Como se puede observar, este tipo de coladas requiere de una gran cantidad de operarios para obtener resultados satisfactorios.

4.2. Resultados de la primera colada con desmoldeo en caliente

Las mediciones efectuadas con las termocupas dentro del molde fueron erróneas. Una de las termocupas registró valores bajos de temperatura con respecto a la temperatura real. Esto se debe, posiblemente, a que el diámetro del filamento de la termocupla era muy grueso y debido a la inercia térmica de la misma termocupla se registraron valores bajos de temperatura. La otra termocupla sufrió un cortocircuito durante el llenado del molde (Figura 4.7) ya que uno de los venteos del molde se desbordó y cayó metal fundido sobre el conector de la termocupla (Figura 4.8), que es donde se conectan las termocuplas con los cables compensados. Esto produjo que las mediciones de la termocupla fueran incorrectas.



Figura 4.7: Conector de la termocupla con metal fundido



Figura 4.8: Molde con desborde de metal líquido

Debido a esta complicación y previendo que algo así fuese a pasar, es que adicionalmente se empleó una copa para análisis térmico para el registro de temperaturas (Figura 4.9). La copa posee una termocupla de tipo K en la parte central cubierta por un pequeño tubo de cuarzo y se posiciona sobre una base, la cual se conecta a la placa adquisidora de datos mediante cables compensados. Esta copa también fue llenada con metal líquido durante la colada y el registro de datos en la misma fue correcto.



Figura 4.9: Copa para análisis térmico después de la colada

Con los datos de la simulación y los relevados durante el llenado de la copa de análisis térmico será posible validar los resultados.

4.2.1. Análisis de las piezas obtenidas

Durante el llenado de los moldes se extrajeron una serie de coquillas del metal base que permitieron analizar la composición química. La última coquilla reveló que el metal colado resultó hipereutéctico, lo que significa que el valor de %CE era superior a 4,3%. La composición química de la coquilla obtenida en la prueba final se presenta en la Tabla 4.1.

COLADA 240503								
C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Mg	CE
3,69%	0,29%	0,019%	0,021%	3,49%	1,10%	0,36%	0,045%	4,86%

Tabla 4.1: Composición química del metal tratado para la colada 240503

Se presentan en esta sección las piezas obtenidas luego de la colada y los diferentes estudios que se realizaron sobre ellas. Las piezas se nombran como “4”, “6”, “4G”, y “6G”. Este

nombre hace referencia a la cantidad de inoculante que se agregó en cada cámara, siendo 4 gramos para las piezas “4” y “4G” y 6 gramos para las piezas “6” y “6G”. La letra “G” al final del nombre de la pieza es para diferenciar un molde de otro. Las piezas “G” pertenecen al segundo molde llenado. Se utiliza el Sistema A para el conformado de todos los moldes, por lo que todas las piezas obtenidas del molde tendrán la misma forma. Se presenta en la Figura 4.10 el sistema obtenido para el molde instrumentado.



Figura 4.10: Sistema obtenido del molde instrumentado

En primer lugar se analizan las piezas “4” y “6”. Se realiza un corte longitudinal de las piezas para poder observar la estructura de solidificación. Para llegar a apreciar esta estructura es necesario realizar un pulido a espejo de las piezas, para luego atacarlas con Nital 2%. Se presentan en la Figura 4.11 la traza por dónde se realizó el corte (a) y sobre qué zona se realiza el análisis (b).

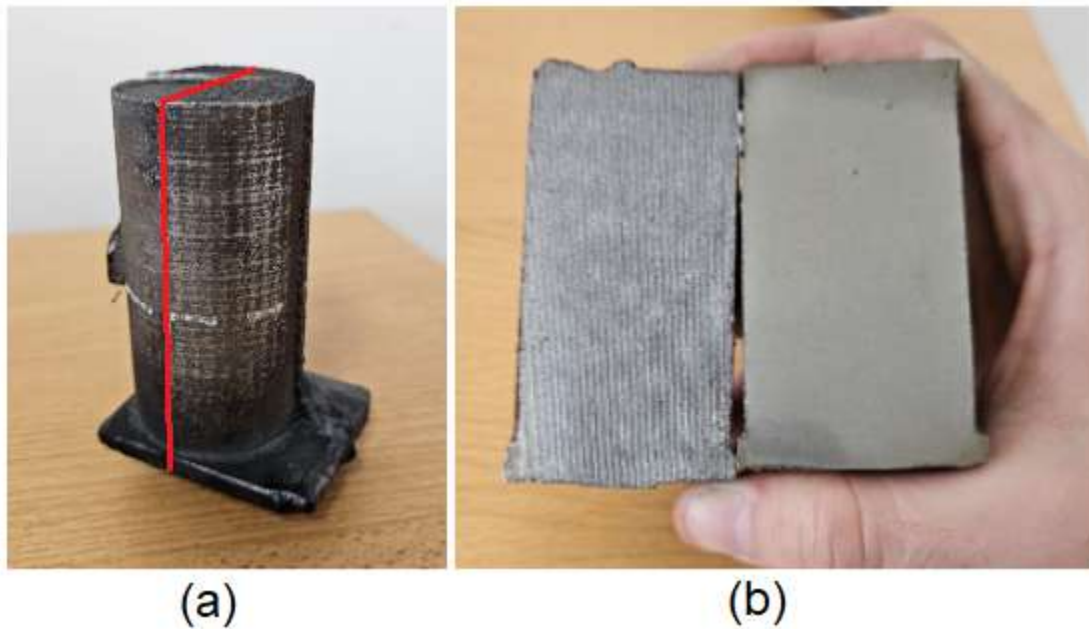


Figura 4.11: (a) Línea por donde se cortará la pieza. (b) Comparación de la pieza después del rectificado y la pieza después de realizar el pulido metalográfico

En la Figura 4.12 se presentan las macroestructuras de la Pieza 4 a la izquierda y de la Pieza 6 a la derecha. Ambas piezas fueron rectificadas, se les realizó un desbaste metalográfico y un pulido a espejo.



Figura 4.12: Pieza "4" (izquierda) y "6" (derecha) después del rectificado, desbaste y pulido metalográfico.

Las dos piezas presentan a simple vista grafito en suspensión. Este fenómeno conocido como flotación de grafito es típico en aleaciones hipereutéticas.

4.2.1.1. Análisis microscópico

La Figura 4.13 muestra la microestructura, sin atacar, de la pieza 4, mientras que la Figura 4.14 muestra la microestructura de la pieza 6. El campo de estas micrografías se ubica en el centro de las piezas, donde se realizaron tres determinaciones de conteo nodular en cada caso.

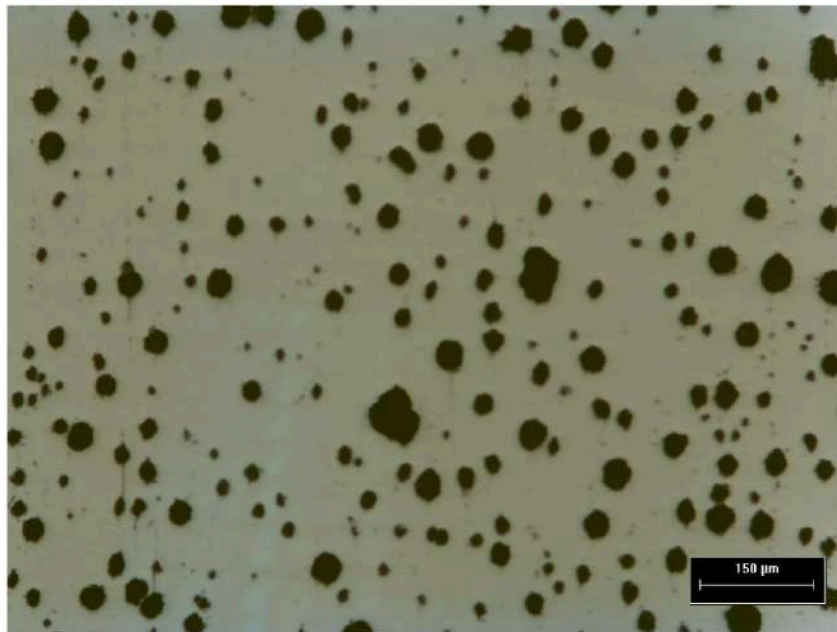


Figura 4.13: Centro de la Pieza 4 con objetivo de 10X (100 aumentos).

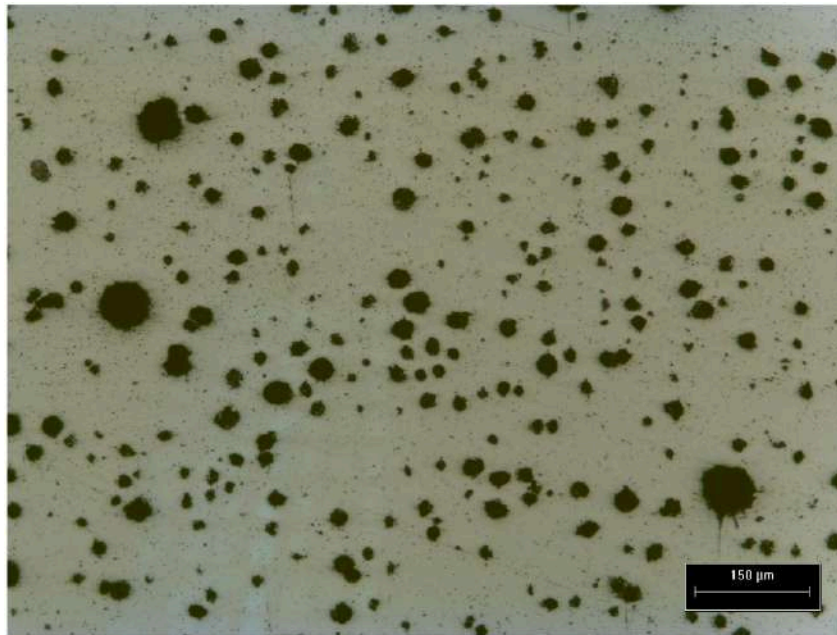


Figura 4.14: Centro de la Pieza 6 con objetivo de 10X (100 aumentos).

Se presenta en la Figura 4.15 un gráfico comparativo del conteo nodular entre las piezas 4 y 6.

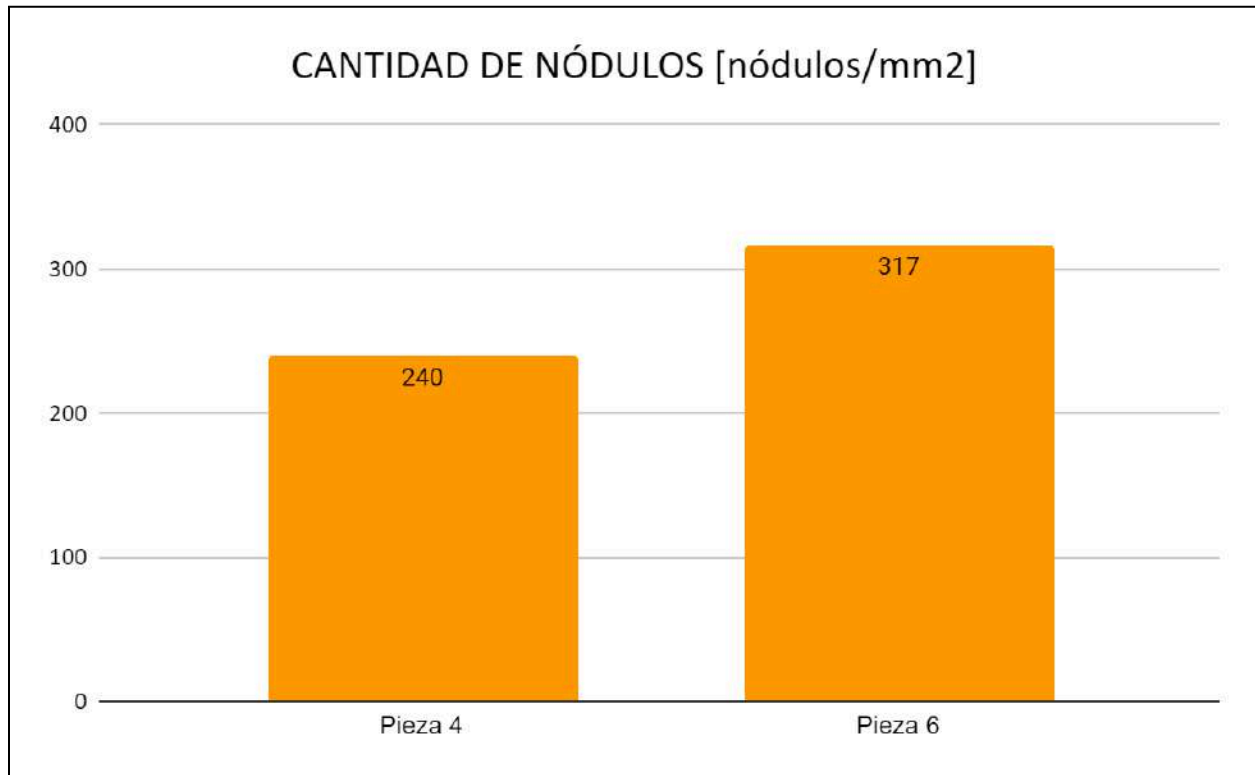


Figura 4.15: Comparación entre los conteos nodulares

Se aprecia que en la Pieza 6 hay un mayor conteo nodular en comparación con la Pieza 4. Esto se debe al conocido efecto que tiene la inoculación con $FeSi$ sobre el conteo nodular. De esta manera, el resultado obtenido nos permite corroborar que la cámara de reacción efectivamente incorpora inoculante en la pieza.

4.2.1.2. Análisis macroscópico

Se muestran en las Figuras 4.16 y 4.17 las piezas 4 y 6 donde se pueden apreciar los granos austeníticos luego de realizar el revelado por ataque químico, una vez efectuado el desmoldeo en caliente. Se observa que los granos conforman una estructura extremadamente fina, típica de las aleaciones hipereutécticas.



Figura 4.16: Macroestructura de la Pieza 4 luego del ataque con Nital 2%



Figura 4.17: Macroestructura de la Pieza 6 luego del ataque con Nital 2%

Al realizar el ataque con Nital 2% es posible ver los granos, lo que asegura que el procedimiento seguido para aplicar la técnica DAAS fue satisfactorio y el tiempo de desmoldeo obtenido mediante la simulación es correcto.

Como el tiempo utilizado para el desmoldeo fue correcto ya que se pudo observar la macroestructura de solidificación, no resulta necesario analizar el sistema con las piezas "4G" y "6G".

Se observa en todas las piezas analizadas en esta colada una estructura de solidificación compuesta mayoritariamente por una gran cantidad de granos muy chicos. Esto coincide con lo planteado por Boeri y Sikora en su trabajo "*Solidification macrostructure of spheroidal graphite cast iron*" donde indican que los granos de muestras hipereutécticas presentan una estructura de grano ligeramente más refinada que las eutécticas y las hipoeutécticas. Si bien se observa que la estructura está refinada, no es posible concluir que se deba únicamente a la inoculación, ya que el bebedero también presenta una estructura similar.

Si bien fue posible realizar la técnica DAAS, el hecho de haber obtenido piezas con composición hipereutéctica dificulta la obtención de conclusiones, debido a que el grafito en suspensión enmascara los granos. Por lo tanto, se decide realizar una segunda colada con desmoldeo en caliente.

4.3. Resultados de la segunda colada con desmoldeo en caliente

La composición química del metal tratado con el que se llenó los nuevos moldes se muestra en la Tabla 4.2:

COLADA 240524								
C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Mg	CE
3,44%	0,25%	0,021%	0,021%	2,59%	1,07%	0,62%	0,049%	4,31%

Tabla 4.2: Composición química de la colada 240524

La composición obtenida es eutéctica, ya que el carbono equivalente está en el orden del 4,30%.

4.3.1. Análisis de las piezas obtenidas

4.3.1.1. Análisis microscópico

Las nuevas piezas obtenidas se nombraron:

- “0” a la pieza sin inoculante en la cámara,
- “2” a la pieza con dos gramos de inoculante en la cámara,
- “4* ” a la pieza con cuatro gramos de inoculante en la cámara, y
- “6* ” a la pieza con seis gramos de inoculante en la cámara.

El asterisco en las piezas 4* y 6* es para diferenciarlas de las piezas 4 y 6 obtenidas en la sección 4.1.4. .

En las Figuras 4.18 y 4.19 se muestran las micrografías de las piezas “0” y “6*” con un lente de 10X para ambos casos. Esto se hace de esta manera para mostrar la gran variación con respecto a la nodularidad entre una pieza inoculada y una sin inocular. Ambas capturas fueron tomadas en el centro de la pieza. La comparación entre los conteos nodulares de las piezas 0, 2, 4* y 6* se muestran en la Figura 4.20. Nuevamente se puede ver que la inoculación *in-mould* funciona correctamente, ya que el conteo nodular se incrementa con la cantidad de inoculante presente en la cámara de inoculación.

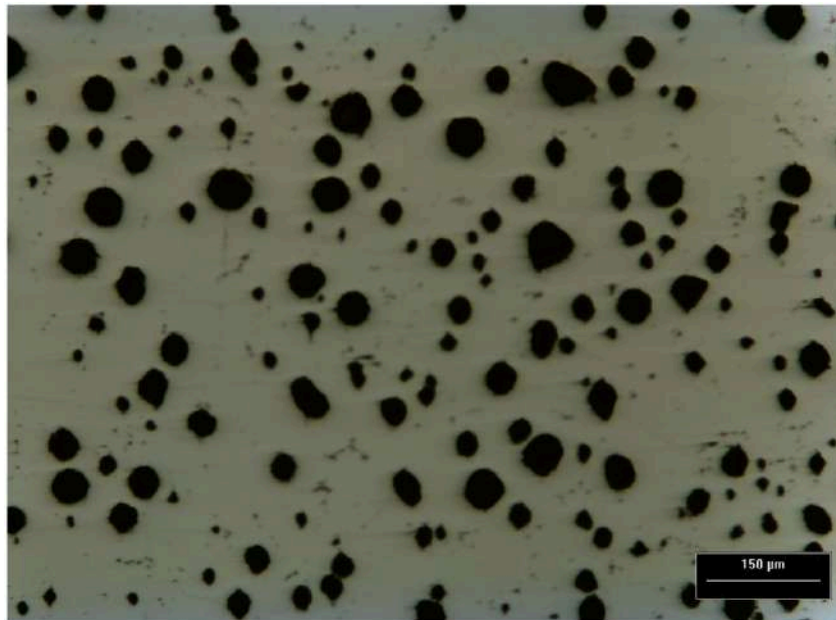


Figura 4.18: Conteo nodular Pieza 0, centro con objetivo de 10X (100 aumentos).

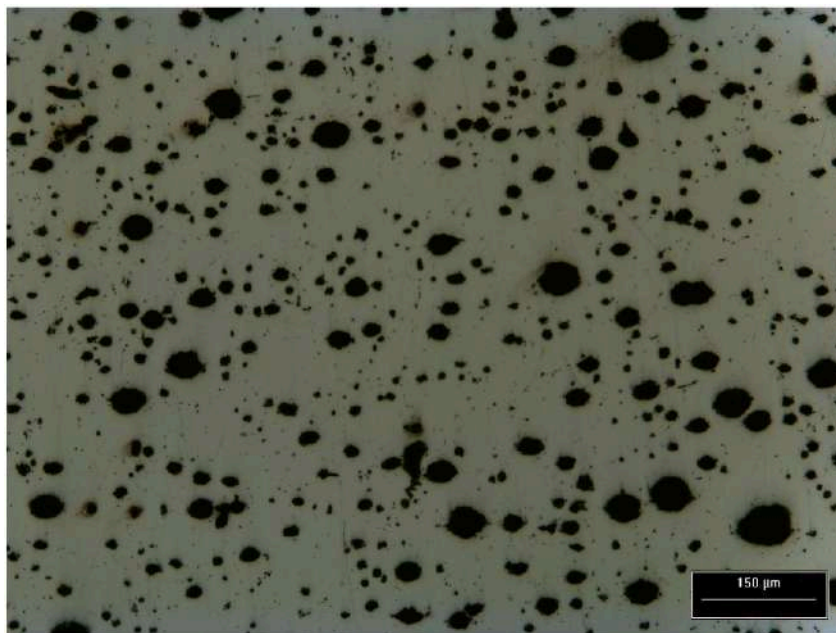


Figura 4.19: Conteo nodular Pieza 6, centro con objetivo de 10X (100 aumentos).*

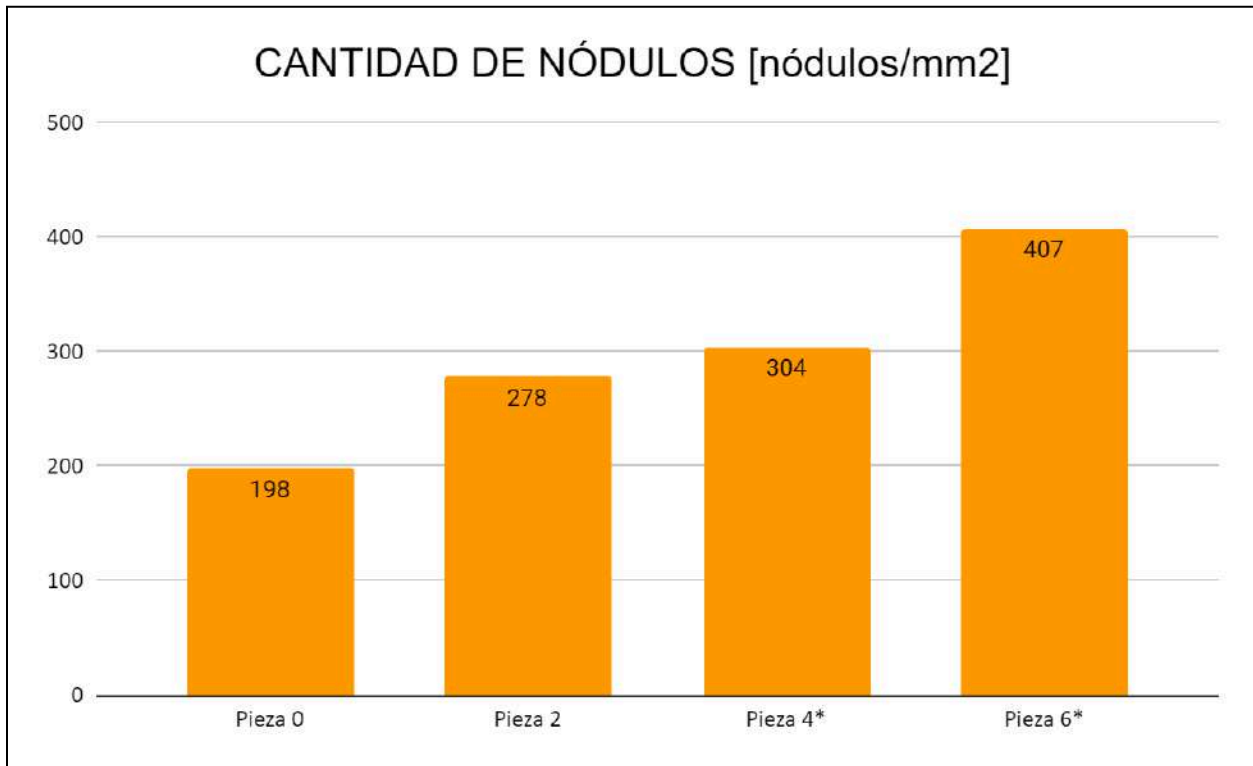


Figura 4.20: Comparación entre los conteos nodulares

4.3.1.2. Análisis macroscópico

Uno de los problemas que se tiene al querer reportar la forma o distribución de los granos de austenita luego de realizar el desmoldeo en caliente consiste en poder obtener una fotografía en la cual la luz incida de tal manera sobre la pieza que permita a la lente de la cámara capturar la mayor cantidad de granos posible. En las piezas hipoeutéticas o eutéticas, al haber mayor presencia de granos equiaxiales y columnares de gran tamaño, es más difícil obtener buenas imágenes. En cambio, en muestras hipereutéticas, al haber más granos más pequeños es más fácil lograr que se reflejen mayor cantidad de granos. Para poder plasmar en una imagen la forma y distribución de los granos, se llevaron las piezas a un set de iluminación en el laboratorio de microscopía de la AMI donde se fueron moviendo las piezas para observar con distintos ángulos de incidencia la forma que adoptan los granos. Luego, se marcó con una microfibra el borde de los mismos. A continuación, se realiza una comparación entre las piezas antes y después de realizar el contorno en los grupos de Figuras 4.21, 4.22, 4.23 y 4.24.



Figura 4.21: Forma y distribución de los granos de la pieza 0. A la izquierda la pieza sin contornear y a la derecha la pieza contorneada.



Figura 4.22: Forma y distribución de los granos de la pieza 2. A la izquierda la pieza sin contornear y a la derecha la pieza contorneada.



Figura 4.23: Forma y distribución de los granos de la pieza 4*. A la izquierda la pieza sin contornear y a la derecha la pieza contorneada.



Figura 4.24: Forma y distribución de los granos de la pieza 6*. A la izquierda la pieza sin contornear y a la derecha la pieza contorneada.

Al comparar las macroestructuras, lo primero que se observa es que los granos son más grandes en comparación con los granos vistos anteriormente, para las piezas *hiper-eutécticas* (figuras 4.16 y 4.17). Esto coincide nuevamente con los que describieron Boeri y Sikora. Por otro lado, se observa que los granos columnares tienden a disminuir hasta desaparecer como se observa en la pieza 4* que tiene muy pocos granos alargados o en la pieza 6* que no tiene zona columnar. En paralelo, aumenta la zona chill y los granos propios de la zona equiaxial tienden a refinarse. Esta comparación se aprecia mejor en la Figura 4.25 donde se tienen las cuatro piezas, ubicadas de forma creciente (según el inoculante agregado) de izquierda a derecha.



Figura 4.25: Comparación de las piezas atacadas. De izquierda a derecha son Pieza 0, Pieza 2, Pieza 4* y Pieza 6*.

4.4. Validación de resultados

Los resultados obtenidos en las simulaciones fueron satisfactorios ya que permitieron realizar el desmoldeo en caliente y revelar la estructura de solidificación. Si bien lo óptimo hubiese sido obtener las curvas de enfriamiento de las piezas mediante el uso de un molde instrumentado para poder validar la simulación a partir de la comparación de variables como el conteo nodular o la microestructura *as cast*, esto no fue posible debido a los inconvenientes comentados en la sección 4.1.4. Por lo tanto, se presenta en la Figura 4.26 la curva de enfriamiento obtenida en la copa, en color azul, junto con la curva de la primera derivada en color naranja y el trazado de la curva cero en color negro. Esta curva es la correspondiente a la colada 1.

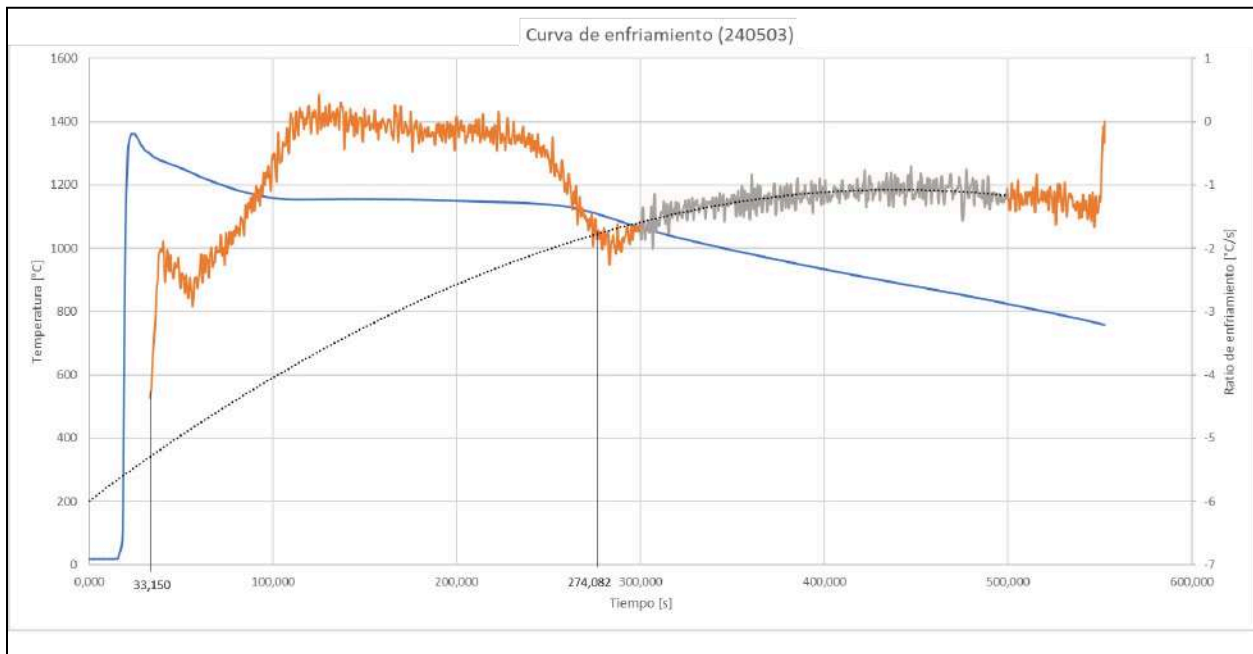


Figura 4.26: Curva de enfriamiento, primera derivada y curva cero de la copa, correspondientes a la Colada 1.

Como se detalló en el apartado 1.2., la curva cero es la curva que trazaría la primera derivada de la curva de enfriamiento si no hubiera cambio de fase, es decir, si el metal fundido llegase en estado líquido a temperatura ambiente. Donde se intercepta la curva cero con la primera derivada, se pueden establecer los puntos que corresponden al inicio y fin de solidificación. En la Figura 4.26 se muestra que el inicio y fin de la solidificación ocurre aproximadamente entre los 33 y 274 segundos una vez que se llenó la copa respectivamente. Esto da un tiempo de solidificación de 240 segundos aproximadamente. De esta forma, se puede comparar el inicio y fin de solidificación del MAGMASoft® con el obtenido en las curvas de enfriamiento.

Para verificar este resultado se procedió a simular la solidificación del metal en la copa de prueba. El tiempo de solidificación obtenido mediante simulación, usando los mismos parámetros que fueron utilizados en las simulaciones de los moldes, es de 280 segundos, lo que presenta un error de 40 segundos con respecto a los resultados obtenidos de forma experimental. Este error se puede atribuir principalmente a que la arena utilizada en la simulación corresponde a la arena utilizada para el armado de los moldes, la cual es distinta a la arena de la copa. Otro de los parámetros a considerar es la ubicación de la termocupla dentro de la copa de análisis térmico. Al revisar diferentes copas provistas por el mismo fabricante, en varios casos se observa que la unión (junta caliente) no está perfectamente centrada en el molde, por lo que, con respecto a la medición realizada puede haber variaciones ya que la termocupla estaría en una zona que solidifica antes que el centro.

En base a trabajos anteriores, en caso de que los resultados de la simulación no coincidan con los valores experimentales, los primeros parámetros a modificar en la simulación son la temperatura de llenado y el tipo de arena que se utiliza para el molde. En este caso,

como el llenado se realiza mediante copas que ya vienen premoldeadas, el tipo de arena no está claramente definido como sí lo está la temperatura de llenado, que fue obtenida mediante pirómetro digital y la termocupla interna de la copa. Para poder trabajar sobre las propiedades de la arena, se suele modificar el parámetro Lambda (λ), el cual expresa la conductividad térmica de la arena en función de la temperatura. Este parámetro modifica la extracción calórica de la cavidad del molde y por eso afecta directamente al tiempo de solidificación. La curva del parámetro λ para la arena del molde, utilizada en la primera simulación, se muestra en la Figura 4.27.

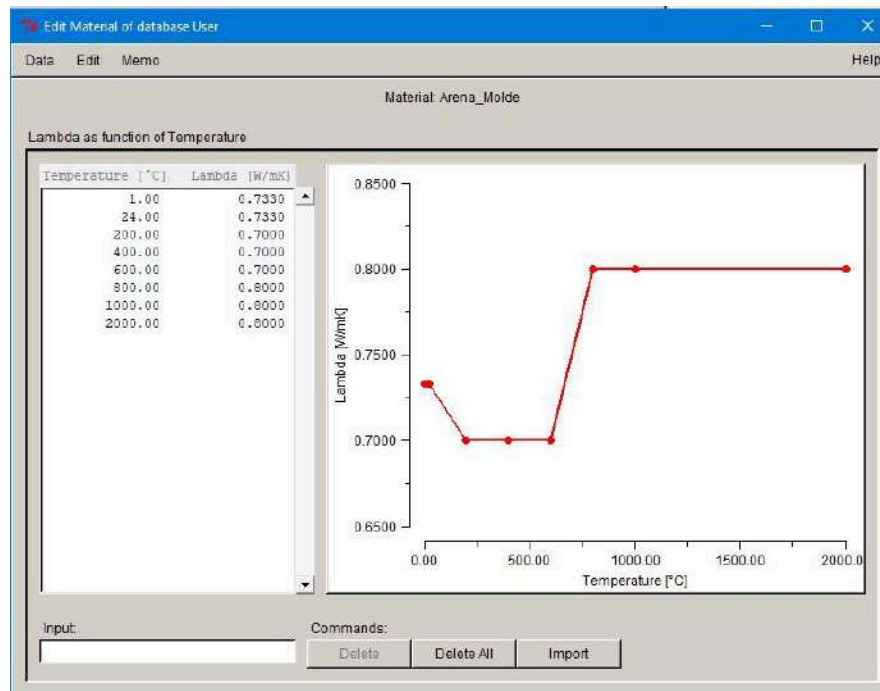


Figura 4.27: Curva del parámetro Lambda de la arena de molde

En la colada 2, de igual manera, se analizó la curva de enfriamiento de una copa de análisis térmico. La curva de enfriamiento, la primera derivada y la curva cero de la copa utilizada en la segunda colada se muestran en la Figura 4.28.

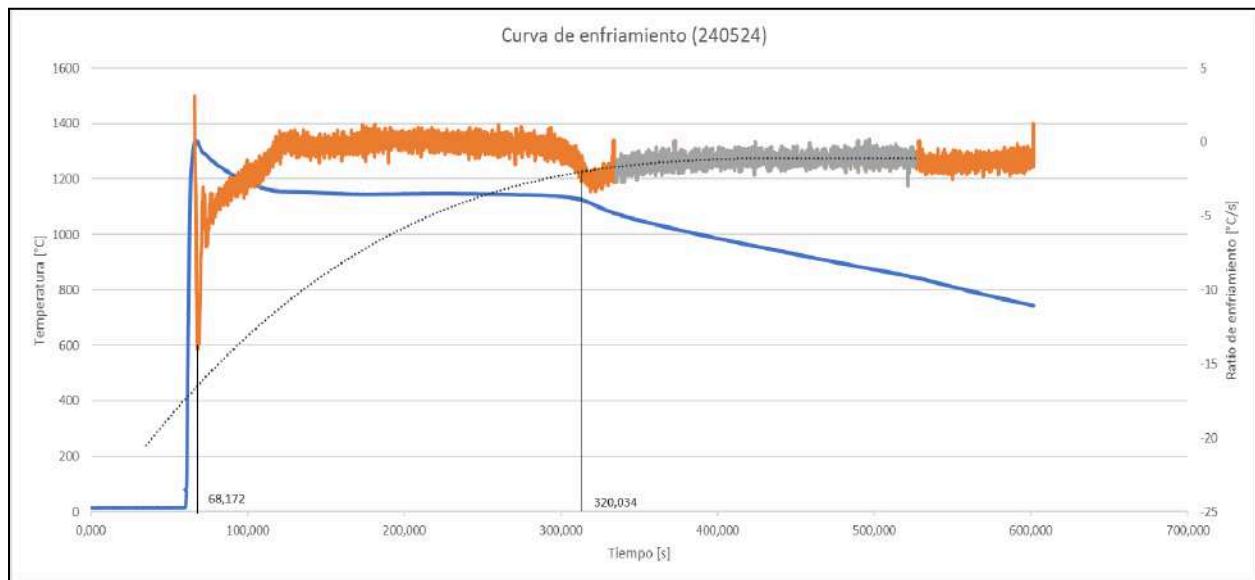


Figura 4.28: Curva de enfriamiento, primera derivada y curva cero de la copa

El tiempo de solidificación obtenido de forma experimental es de 252 segundos, por lo que sigue existiendo una diferencia con respecto al tiempo de solidificación obtenido mediante la simulación para este caso, el cual es de 279 segundos. La diferencia observada puede ser nuevamente atribuida a la conductividad térmica de la arena empleada en la simulación, la cual no es igual a la arena de la copa.

Conclusiones:

Fue posible realizar el desmoldeo en caliente a partir de los tiempos obtenidos mediante la simulación en MAGMASoft®. Fue posible obtener las curvas de enfriamiento de dos copas de análisis térmico, a las cuales se les realizó la primera derivada y se representaron en paralelo con la curva cero. En función a la cantidad de inoculante, se observa un incremento en el conteo nodular en todos los casos analizados, lo cual corrobora el correcto funcionamiento de la cámara de inoculación. Por otro lado, fue posible revelar correctamente las macroestructuras de solidificación por medio de la aplicación de la técnica DAAS. En las macroestructuras reveladas, se observó que al incrementar la cantidad de inoculante en la cámara de reacción se redujo la zona columnar y se refinó levemente la zona equiaxial.

Bibliografía empleada en este capítulo

- [1] Boeri R y Sikora J (2001). Solidification macrostructure of spheroidal graphite cast iron. *Int. J. Cast Metals Res.*, 2001, 13, 307-313.
- [2] Cachela J y Tornese B (2011). Desarrollo de una metodología para relacionar la macroestructura de solidificación con las microcavidades de contracción en Fundición Nodular. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata.

Conclusiones generales

La primera conclusión que se extrae de este proyecto final de grado es que fue posible diseñar un sistema de alimentación con una cámara de reacción para inoculación *“in mould”*. El diseño y selección del sistema más eficiente fue exitoso, ya que la cámara de reacción permitió incorporar inoculante a la probeta. Esto se demostró a partir de agregar en diferentes cámaras de reacción distintas cantidades de inoculante y observar dentro de cada una si había o no inoculante no disuelto. A partir de esto se seleccionó el sistema más eficiente e incorporando inoculante a la cámara se observó cómo varía la microestructura de solidificación entre piezas. Se pudo observar que, a medida que se incrementa la cantidad de inoculante $FeSi75$ en la cámara de reacción, se produce un aumento del conteo nodular, lo cual corrobora que la cámara funciona correctamente.

En segundo lugar, fue posible observar la estructura de solidificación ya que el diseño del molde realizado permitió realizar correctamente la técnica *DAAS*. Los tiempos de desmoldeo se obtuvieron a partir de simulaciones que fueron validadas posteriormente. Esta validación consistió en analizar la diferencia entre el tiempo de solidificación experimental y el tiempo de solidificación simulado en una copa de análisis térmico.

En tercer lugar, se pudieron comparar las morfologías de los granos de solidificación observados en las piezas. Se observaron claramente las tres zonas que se presentan durante la solidificación de un lingote y con una microfibrá se delimitaron los contornos de los granos para poder observarlos sin necesidad de contar con un set de iluminación y poder reportarlos fácilmente. En las piezas coladas se observó que al incorporar más inoculante en la pieza hay una tendencia a disminuir el tamaño de los granos equiaxiales, una disminución en la cantidad de granos columnares y un crecimiento de la zona *chill*. Esta modificación de la estructura de solidificación probablemente tenga consecuencias sobre las propiedades mecánicas y esto deberá ser evaluado en trabajos futuros.

Trabajos futuros

En base a las conclusiones obtenidas, será posible continuar con esta línea de investigación utilizando diferentes inoculantes más allá del $FeSi75$. En primera instancia se buscará trabajar con inoculantes que no modifiquen el carbono equivalente. También será posible realizar ensayos mecánicos para evaluar la influencia de la modificación de la estructura de solidificación sobre las propiedades mecánicas.

Anexo I

Parte de este proyecto final se presentó en el XXII Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales de la SAM-CONAMET con el título “Macroestructura de Solidificación en Fundiciones de Hierro con Inoculación ‘*in mould*’ “.

Resumen del trabajo:

“Uno de los temas en desarrollo en la actualidad, en el campo de las fundiciones de hierro, es lograr el refinamiento de la austenita esperando un mejoramiento de las propiedades mecánicas en estructuras “*as cast*” (1). La Div. Metalurgia de INTEMA (DMI) desarrolló un procedimiento que permite revelar la macroestructura de solidificación en Fundiciones de Hierro y por lo tanto el tamaño de grano austenítico (2). El objetivo de este trabajo es diseñar un molde que permita realizar inoculación dentro del molde (“*in mold*”) y desmoldeo en caliente, para poder evaluar la eficiencia de distintas condiciones de inoculación sobre la macro y micro estructura de solidificación de las fundiciones de hierro con grafito esferoidal. Para esto se utilizó modelado computacional del llenado y solidificación del metal líquido en el molde, con el software comercial MagmaSoft® . El inoculante utilizado fue Fe-Si 75 (25% Fe y 75% Si) en distintas proporciones y con diferentes diseños de cámara de reacción. Se realizaron coladas de pruebas en la Planta Piloto de la DMI, evaluando las mejores condiciones de inoculación y la factibilidad de aplicar la técnica de desmoldeo en caliente. De los diseños probados fue posible seleccionar uno que presenta el mayor rendimiento en la incorporación del inoculante y permite el desmoldeo en caliente, pudiéndose revelar y caracterizar la macro y micro estructura de las piezas obtenidas.

REFERENCIAS

1. Domeij, B., Diószegi, A. A Review of Dendritic Austenite in Cast Irons. Inter Metalcast (2024). <https://doi.org/10.1007/s40962-023-01239-8>.
2. Marcos G. López, Juan M. Massone and Roberto E. Boeri, “Columnar-to-equiaxed transition in cast irons: an experimental and numerical analysis” American Foundry Society, <https://doi.org/10.1007/s40962-024-01297-6>. 2024.