



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL SOBRE LA INFLUENCIA DEL TAMAÑO, FORMA Y COMPOSICIÓN EN MAZAROTAS CON CAMISAS EXOTÉRMICAS APLICADAS A LA FUNDICIÓN DE HIERRO DÚCTIL

TRABAJO DE TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGISTER
EN MATERIALES

VÍCTOR ANDRÉS CARPIO LÓPEZ
victor.carpio@epn.edu.ec

DIRECTOR: OSCAR EFRAÍN SOTOMAYOR GALVEZ, M.Sc.
oscar.sotomayor@epn.edu.ec

Quito, Julio de 2024

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **Víctor Andrés Carpio López**, bajo mi supervisión.

Oscar Efraín Sotomayor Gálvez, M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **Víctor Andrés Carpio López**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Víctor Andrés Carpio López

CI: 1721825667

DEDICATORIA

A Michell, mi compañera de vida, por el amor incondicional brindado durante los momentos más difíciles en esta etapa de mi vida.

A mi familia, amigos y todos quienes pusieron su granito de arena para que hoy, esto sea una realidad.

A la vida misma, por este desarrollo de personaje tan salvaje que me ha dado, a veces héroe y otras de villano, pero siempre protagonista.

Y, finalmente, a mi yo futuro, para recordarme que jamás hay que dejar de soñar. Mientras estos sueños sean más grandes que tus miedos o tus excusas, con las acciones correctas y trabajo duro, el éxito no será una casualidad.

Andrés

AGRADECIMIENTO

A la Ing. Michell Molina, Rumbé®, ViLab I+D+i® y CaLMoB EC®, por el apoyo y ayuda desinteresada a fin de que este trabajo sea culminado con rotundo éxito.

Al Ing. Oscar Sotomayor, MSc., por su destacada guía, motivación, apoyo y dedicación durante esta etapa de formación académica y profesional.

A la Escuela Politécnica Nacional por los fondos recibidos mediante el Proyecto de Investigación PIS-20-03, la empresa Fundireciclar S.A. por la donación de insumos, materiales y uso de sus instalaciones, al Laboratorio de Fundición de la EPN y particularmente al Ing. Mauricio Moreno por su colaboración y ayuda incondicional en todo momento; y, finalmente, de manera muy especial a los docentes del Departamento de Materiales por los amplios conocimientos impartidos, aportando de esta manera a mi desarrollo personal y profesional.

Andrés.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
Pregunta de Investigación.....	1
Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Mazarotas con camisas exotérmicas	3
1.1.1. Composición química de la camisa	4
1.1.2. Forma y tamaño	5
1.2. Métodos numéricos aplicados a procesos de fundición.....	6
1.2.1. Base teórica	7
1.2.2. Propiedades de los materiales.....	10
2. ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	11
2.1. Materiales	11
2.1.1. Composición de la camisa exotérmica	13
2.1.2. Composición del hierro nodular	17
2.2. Métodos	21
2.2.1. Fabricación de prototipos.....	21
2.2.2. Ejecución de pruebas piloto.....	30
2.2.3. Ejecución de pruebas definitivas	32
3. ESTUDIO NUMÉRICO-COMPUTACIONAL	35
3.1. Modelación numérica-computacional de los sistemas propuestos	35
3.2. Refinamiento y calibración de modelos numéricos-computacionales.....	40
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
4.1. Resultados de la parte experimental	42
4.2. Resultados parte numérico-computacional	47
4.3. Comparación de modelos numéricos vs. experimentales	51
4.3.1. Propuesta de nomogramas de diseño para mazarotas con camisas exotérmicas ...	55
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	60
5.1. Conclusiones	60

5.2. Recomendaciones	61
Bibliografía.....	63
ANEXOS.....	68
Anexo 1. Código – Banco de 12 Termopares con placa Arduino Mega	68
Anexo 2. Simulaciones	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Propiedades físicas y mecánicas del hierro dúctil ASTM A 536 Grado 80-55-06.	10
Tabla 1.2. Parámetros termoquímicos de la reacción termítica.....	10
Tabla 2.1. Proporciones del compuesto exotérmico termítico.	14
Tabla 2.2. Composición promedio del hierro nodular usado en la fundición.	19
Tabla 2.3. Valores de coeficientes de contracción volumétrica del metal.	22
Tabla 2.4. Parámetros de diseño para las mazarotas.	24
Tabla 4.1. Análisis comparativos de porosidad, microporosidad y Niyama.....	48
Tabla 4.2. Análisis comparativos de porosidad experimental.	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema de diferentes formas y tamaños de camisas exotérmicas. Los elementos de color rojizo corresponden a elementos de adaptación (cuello) que permiten la correcta conexión con el sistema alimentación hacia la pieza [55].	6
Figura 2.1. Materiales empleados en la fabricación de las camisas exotérmicas. Los compuestos A, B y C corresponden a los componentes de la resina furánica.	12
Figura 2.2. Análisis XRD y refinamiento Rietveld del Fe ₂ O ₃ (izquierda) y Al (derecha).....	13
Figura 2.3. Diagrama cúbico del DOE para los valores medios ajustados de la respuesta.	14
Figura 2.4. Gráfica normal de efectos estandarizados.	15
Figura 2.5. Diagrama de efectos principales para la temperatura.	15
Figura 2.6. Diagrama de efectos principales para la temperatura.	16
Figura 2.7. Diagrama de interacción de los compuestos químicos para la temperatura.	17
Figura 2.8. Formas del grafito [24].	18
Figura 2.9. Resultados del análisis metalográfico de conteo de nódulos. (De arriba hacia abajo) Resultado del conteo de nódulos para el área estudiada, distribución del tamaño de nódulo, distribución de la forma del nódulo, y nodularidad del grafito.	20
Figura 2.10. Esquema de ubicación de la mazarota con respecto a la pieza para definición del coeficiente de seguridad k.	22
Figura 2.11. Diagrama comparativo de problemas en mazarotas empleadas en la fundición de hierro dúctil con base en la composición de carbono y silicio de la mezcla, y el diámetro de la mazarota adoptado [21].	25
Figura 2.12. Esquema para diferenciación entre una mazarota caliente y una fría [21].	25
Figura 2.13. Influencia del espesor de pared en el conteo de nódulos. a) Para rangos de espesor de pared de 0 a 50 mm, y b) Para rangos de espesor de pared de 50 a 200 mm [21].	26
Figura 2.14. Determinación del tiempo de contracción para fundiciones de hierro dúctil y gris [6].	28
Figura 2.15. Esquema de diseño y producción del prototipo de camisa con forma esférica y programación del banco de termopares iniciales. a) Diseño CAD del prototipo, b) Fabricación de la caja de noyos mediante manufactura aditiva, c) Prototipo de camisa con forma esférica realizado en arena y d) Banco de termopares inicial con computador mostrando resultados.	29
Figura 2.16. Esquema de realización de pruebas piloto. a) Obtención del compuesto exotérmico previo a la elaboración de la camisa, b) Fabricación de la camisa	

exotérmica mediante moldeo en la caja de noyos, c) Pruebas de activación y evaluación de la temperatura producida en la camisa, y d) Comparativa entre una camisa exotérmica no activada (izquierda) con respecto a una camisa luego de su activación (derecha).....	32
Figura 2.17. Construcción, programación y prueba del banco de termopares de 12 canales. a) Construcción y programación del nuevo banco de termopares, y b) Pruebas de funcionamiento y calibración del banco de termopares.	33
Figura 2.18. Esquema de procedimiento para la ejecución de pruebas definitivas. a) Elaboración de moldes para la fabricación de las camisas exotérmicas, b) Fabricación de las camisas exotérmicas, c) Moldeo de la caja y colocación de la camisa y termopares para registro de temperaturas, y d) Fundición de las piezas y registro de temperaturas.	34
Figura 3.1. Esquema de diferentes formas y tamaños de camisas exotérmicas, y dimensiones del molde y pieza tipo a estudiar. a) Forma Cilíndrica, b) Forma esférica, c) Forma ovalada y d) Dimensiones del molde, pieza y ubicación de puntos a estudiar.	35
Figura 3.2. a) Mallado y discretización del sistema, b) Mapa de tiempo de solidificación, c) Mapa de generación de porosidades y rechupes, y d) Mapa de la evolución de la temperatura con respecto al tiempo en los puntos especificados.....	37
Figura 3.3. Esquema del entorno gráfico del programa -importación de la geometría-.	38
Figura 3.4. Esquema del entorno gráfico del programa -asignación de materiales y propiedades-.	39
Figura 3.5. Esquema del entorno gráfico del programa -elección de condiciones iniciales-.	39
Figura 3.6. Esquema del entorno gráfico del programa -ejecución del proceso de simulación-.	40
Figura 3.7. Análisis de convergencia en MEF para el sistema propuesto, gráfica para la mazarota de forma cilíndrica (izquierda) y gráfica para la mazarota de forma esférica (derecha).	41
Figura 3.8. Esquema de ejecución de las pruebas finales y registro de lecturas de temperatura.....	41
Figura 4.1. Esquema del registro de temperaturas durante el proceso de fundición. a) Ubicación de los moldes durante el colado y b) Pieza en proceso de solidificación en la que se usó una mazarota con camisa exotérmica de forma esférica, adicionalmente se aprecia el termopar en contacto con la mazarota.	43
Figura 4.2. Análisis termográficos comparativos de mazarotas con camisa (izquierda) y sin camisa (derecha) para diferentes intervalos de tiempo. a) 10 minutos después	

	de fundir, b) 20 minutos después de fundir y c) 30 minutos después de fundir. Las temperaturas mostradas para este caso se muestran en °C.	45
Figura 4.3.	Vista de la sección transversal de la distribución de poros en las mazarotas experimentales y simuladas (esquina superior derecha) y del volumen total de contracción (esquina inferior derecha). a) Mazarota cilíndrica sin camisa, b) Mazarota esférica sin camisa, c) Mazarota cilíndrica con camisa y d) Mazarota esférica con camisa.	47
Figura 4.4.	Resultados de las simulaciones de la influencia del tamaño y forma para las mazarotas (sombreado) y piezas (punteado) estudiadas. a) Temperatura inicial de solidificación para mazarotas convencionales, b) Temperatura inicial de solidificación para mazarotas con camisa exotérmica, c) Temperatura final de solidificación para mazarotas convencionales, d) Temperatura final de solidificación para mazarotas con camisa exotérmica, e) Tiempo final de solidificación para mazarotas convencionales y f) Tiempo final de solidificación para mazarotas con camisa exotérmica.	49
Figura 4.5.	Análisis termográficos comparativos de mazarotas con camisa (izquierda) y sin camisa (Derecha) para diferentes intervalos de tiempo. a) 10 minutos después de fundir, b) 20 minutos después de fundir y c) 30 minutos después de fundir. Las temperaturas mostradas para este caso se muestran en °C.	51
Figura 4.6.	Análisis comparativo entre resultados experimentales y simulaciones para mazarotas de forma cilíndrica y esférica. a) Mazarota cilíndrica con camisa exotérmica, b) Mazarota cilíndrica sin camisa exotérmica, c) Mazarota esférica con camisa exotérmica y d) Mazarota esférica sin camisa exotérmica.	54
Figura 4.7.	Nomograma de diseño para mazarotas de forma cilíndrica con camisa exotérmica.	58
Figura 4.8.	Nomograma de diseño para mazarotas de forma esférica con camisa exotérmica.	59

RESUMEN

El uso de camisas exotérmicas permite reducir el volumen de las mazarotas necesarias en la fundición de aleaciones ferrosas, así como la cantidad de metal utilizada y los costes implicados. En este trabajo se fundieron placas planas de hierro nodular y se analizó el efecto de la forma y tamaño de las mazarotas. Para ello, se consideraron mazarotas con dos configuraciones (con y sin camisas exotérmicas), tres formas (cilíndrica, esférica, ovalada) y dos tamaños relativos (100 % de volumen y 60 % de volumen). Se definió también la mezcla termítica cuya reacción permitió obtener la temperatura más alta. Se realizaron pruebas experimentales y simulaciones computacionales, indicando que las camisas de forma esférica resultan en una menor porosidad en las piezas. También se encontró en esta investigación que el uso de mazarotas con camisas exotérmicas permite reducir hasta el 60 % del volumen base utilizado, satisfaciendo así los requerimientos de alimentación y reducción de los defectos en la pieza.

Palabras clave: Mazarotas, Camisas Exotérmicas, Hierro Nodular, Simulación.

ABSTRACT

Using exothermic sleeves allows to reduce the volume of the risers required in the casting of ferrous alloys, as well as the amount of metal used, and the costs involved. In this work, flat plates of nodular iron were casted, and the effects of the shape and size of the risers was analyzed. For this purpose, risers with two configurations (with and without exothermic sleeves), three shapes (cylindrical, spherical, oval), and two relative sizes (100 % volume and 60 % volume) were considered. The mixture that would experience a thermite reaction with the highest temperature was defined. Experimental tests and computational simulations were performed, indicating that the spherical sleeves result in the lowest porosity in the risers and the pieces. It was also found that the risers with exothermic sleeves and 60 % of the base volume used satisfy the feeding requirements and reduce the defects in the piece.

Keywords: Risers, Exothermic Sleeves, Nodular Iron, Simulation.

INTRODUCCIÓN

En fundición y metalurgia, las mazarotas son depósitos de metal fundido colocados en sitios estratégicos del molde que evitan la generación de defectos como rechupes, aportando así una reserva de metal fundido adicional durante el proceso de solidificación de una pieza [8, 60]. Uno de estos tipos de mazarota, es la de tipo exotérmico que debido al calor que genera, permite prolongar el tiempo de solidificación, incrementando así la eficiencia en el llenado de la pieza y minimizando el tamaño de la mazarota como destaca Miki [36]. Es así como, el uso de mazarotas con camisas exotérmicas de base termítica, su correcto dimensionamiento, forma y ubicación, facilitan la fabricación de partes complejas y de secciones transversales delgadas sin aumentar excesivamente los costos de manufactura de los moldes furánicos o fenólicos [49].

En lo relacionado al tamaño y forma de las mazarotas con camisas exotérmicas, existen limitados estudios como los desarrollados por Yücel *et. al.* [61] donde se evalúa la influencia de estos factores en el incremento del tiempo que el metal se mantiene por sobre la temperatura de líquido, y la investigación desarrollada por Hardin *et. al.* [21] donde se estudia la influencia del tipo de mazarota con camisa exotérmica en el proceso de fundición; por tal motivo, el trabajo propuesto investigará el uso de estos componentes en procesos de fundición de hierro dúctil.

Se plantea en primera instancia, estudiar el compuesto exotérmico con el que es fabricada una mazarota con camisa exotérmica y su comportamiento térmico durante un proceso de fundición real. Para el estudio del tamaño y forma, se utilizarán métodos numéricos mediante el empleo de paquetes computacionales de simulación como Inspire Cast® [15] y modelos físico-experimentales que permitirán obtener parámetros a usarse durante el estudio computacional. Cabe destacar que tanto en la etapa de campaña experimental como en la de simulaciones se aplicaron diseños de experimentos factoriales completos [18] que permitieron comprender de mejor manera como el cambio en las variables incidió en los experimentos realizados.

Pregunta de Investigación

¿Cómo afecta la variación de tamaño y forma al rendimiento de las mazarotas exotérmicas?

Objetivo general

Determinar numérica y experimentalmente la influencia del tamaño, forma y composición en mazarotas con camisas exotérmicas en el rendimiento del sistema de alimentación aplicado a la fundición de hierro dúctil.

Objetivos específicos

- Determinar la mezcla exotérmica adecuada para la fabricación de mazarotas con camisas exotérmicas que alcancen la mayor temperatura posible al momento de su activación.
- Simular computacionalmente el llenado y solidificación en moldes de fundición de piezas que emplean mazarotas con camisas exotérmicas de diferente tamaño y forma.
- Sintetizar la información de las simulaciones numéricas en gráficas que permitan al usuario final el dimensionamiento adecuado de mazarotas con camisas exotérmicas.

1. MARCO TEÓRICO

Las técnicas de fundición permiten la fabricación de piezas complejas y grandes de forma relativamente competitiva. Un reto que enfrentan los fabricantes es asegurar la calidad de las partes fabricadas ya que durante el proceso de solidificación pueden generarse defectos como rechupes y porosidades [6, 12]. Para minimizar la presencia de porosidades en la parte final a fabricar, los fundidores utilizan desgasificantes, fundentes y minimizan la solubilidad de aire en la colada controlando la temperatura de colado. Adicionalmente, para reducir la presencia de rechupes, se modifican los diseños de la parte a fundir y los sistemas de alimentación tratando de evitar que las secciones gruesas estén junto a las secciones delgadas. Si con ninguna de estas modificaciones se pueden eliminar los rechupes entonces se procede al uso de mazarotas [50].

1.1. Mazarotas con camisas exotérmicas

Las mazarotas con camisas exotérmicas en la fundición de hierro ofrecen una manera de mantener elevada la temperatura en la mazarota durante la solidificación [59]. Estos dispositivos están contruidos con una camisa exterior que rodea la mazarota con material reactivo exotérmico [61]. El uso correcto del sistema permite mejorar el rendimiento del sistema de alimentación durante el proceso de fabricación de partes por fundición.

La reacción química exotérmica tiene lugar en los alrededores de la mazarota cuando se activa la camisa exotérmica, produciendo calor. Este calor se transfiere al metal, lo que ayuda a mantener una temperatura relativamente alta durante el proceso de solidificación del hierro fundido. Esto es especialmente importante para garantizar la calidad y las propiedades mecánicas del metal y pieza resultante [59].

Algunas de las ventajas de las mazarotas con camisas exotérmicas en la fundición de hierro son [2-3, 6, 22]:

- Reducción de volumen del sistema de alimentación: Debido a que las camisas exotérmicas aportan calor a las mazarotas extendiendo así su tiempo de solidificación, se requiere un menor volumen de material metálico [2-3].
- Reducción de costos: Al reducirse la cantidad de material metálico utilizado y a su vez el tamaño del molde, se reduce la cantidad de arena, resinas y cualquier otro elemento usado [6].

- Mejor distribución de temperatura: Las mazarotas con camisas exotérmicas permiten una mejor distribución de la temperatura del molde durante la fundición de hierro, lo que ayuda a evitar problemas como la formación de defectos, la segregación y el enfriamiento desigual [6].
- Reducción de defectos: El calentamiento proporcionado por las mazarotas con camisas exotérmicas contribuye a reducir la formación de defectos en el hierro fundido, como porosidad, fisuras y contracciones [22].
- Eficiencia energética: La reacción química exotérmica utilizada en las mazarotas con camisas exotérmicas en la fundición de hierro libera una cantidad significativa de calor en relación con la cantidad de material reactivo utilizado, lo que resulta en un uso eficiente de la energía [22].

Aplicaciones de las mazarotas con camisas exotérmicas en la fundición de hierro:

Las mazarotas con camisas exotérmicas se utilizan en diversas aplicaciones en la fundición de hierro, incluyendo [2-3, 6]:

- Fundición de piezas grandes: En la fundición de piezas grandes de hierro, como bloques de motor o componentes estructurales, las mazarotas con camisas exotérmicas ayudan a garantizar una solidificación adecuada y uniforme, evitando defectos y asegurando la integridad estructural [2-3].
- Fundición de piezas complejas: En la fundición de piezas con geometrías complejas, como turbinas o componentes de maquinaria, las mazarotas con camisas exotérmicas contribuyen a mantener una temperatura uniforme en toda la pieza, evitando la formación de defectos y asegurando una calidad consistente [6].

1.1.1. Composición química de la camisa

La composición química de una camisa exotérmica puede variar dependiendo del fabricante y del propósito específico de la camisa [6]. Sin embargo, a continuación, se mencionan algunos componentes comunes que se encuentran en la composición de las camisas exotérmicas [59]:

- Aluminio en polvo: El aluminio en polvo es un componente clave en muchas camisas exotérmicas. Es un agente reductor que reacciona con los óxidos presentes en la mezcla para liberar calor durante la reacción exotérmica.
- Óxidos metálicos: Los óxidos metálicos, como el óxido de hierro (Fe_2O_3), el óxido de cobre (CuO) o el óxido de magnesio (MgO), se utilizan como agentes oxidantes

en la reacción exotérmica. Estos óxidos reaccionan con el aluminio para liberar calor y generar nuevos compuestos metálicos [36].

- Otros polvos metálicos: Además del aluminio, se pueden utilizar otros polvos metálicos en la composición de las mazarotas exotérmicas, como polvo de cobre, polvo de hierro, polvo de zinc, etc. Estos polvos metálicos pueden contribuir a la reacción exotérmica y mejorar las propiedades de la camisa [37].
- Aglomerantes: Para mantener los componentes en forma de polvo unidos y proporcionar la estructura de la camisa, se utilizan aglomerantes. Estos pueden incluir resinas, arcillas, celulosas u otros materiales que permiten la formación de una masa compacta y cohesiva [29].

Es importante tener en cuenta que la composición exacta de una camisa exotérmica puede variar según el fabricante y el diseño del producto [36]. Además, las camisas exotérmicas pueden contener aditivos adicionales para ajustar las propiedades de la reacción, como retardantes de la reacción o agentes de flujo.

1.1.2. Forma y tamaño

Las camisas exotérmicas vienen en una variedad de formas y tamaños para adaptarse a diferentes aplicaciones y necesidades [6, 8, 50]. A continuación, se describen algunas formas y tamaños comunes de las camisas exotérmicas:

- Forma cilíndrica: Las camisas exotérmicas cilíndricas son una de las formas más comunes. Tienen un diámetro constante a lo largo de su longitud y se utilizan para envolver tuberías, cables o conexiones de soldadura. La principal ventaja es su facilidad de fabricación [6, 8].
- Forma rectangular o cuadrada: Estas camisas exotérmicas tienen una sección transversal rectangular o cuadrada. Son adecuados para aplicaciones donde se requiere una cobertura más amplia o para adaptarse a formas específicas de equipos o estructuras [50].
- Forma de mediacaña: Las camisas exotérmicas de mediacaña tienen una forma semicircular y se utilizan comúnmente para cubrir uniones o soldaduras en forma de T, donde se necesita una cobertura en ángulo [59, 61].
- Tamaños estándar: Las camisas exotérmicas están disponibles en una variedad de tamaños estándar para adaptarse a diferentes diámetros de tuberías o cables. Los tamaños pueden variar desde unas pocas pulgadas hasta varios pies de longitud, dependiendo de la aplicación específica (Ver Figura 1.1).

Es importante tener en cuenta que las camisas exotérmicas suelen ser flexibles y adaptables para facilitar su instalación en diferentes situaciones. Algunas camisas también pueden ser cortadas o unidas para ajustarse a longitudes específicas o para adaptarse a requisitos particulares.



Figura 1.1. Esquema de diferentes formas y tamaños de camisas exotérmicas. *Los elementos de color rojizo corresponden a elementos de adaptación (cuello) que permiten la correcta conexión con el sistema alimentación hacia la pieza [55].*

1.2. Métodos numéricos aplicados a procesos de fundición

Los métodos numéricos desempeñan un papel fundamental en la simulación y optimización de los procesos de fundición. Estas técnicas computacionales permiten modelar y predecir el comportamiento de los fluidos, la transferencia de calor, las reacciones químicas y otros fenómenos relevantes en la fundición [19, 44, 59]. A continuación, se presentan algunos métodos numéricos comúnmente utilizados en los procesos de fundición:

- Método de Elementos Finitos (MEF): El MEF es uno de los métodos numéricos más ampliamente utilizados en la simulación de procesos de fundición. Este método divide el dominio de estudio en elementos más pequeños, permitiendo la solución de las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento del sistema. Se utiliza para analizar el flujo de metal fundido, la transferencia de calor, la solidificación y otros aspectos clave de la fundición [9, 15, 25].

- Método de Volúmenes Finitos (MVF): El MVF se utiliza para resolver ecuaciones de conservación, como las ecuaciones de Navier-Stokes para el flujo de fluidos. Este método discretiza el dominio en volúmenes de control, calculando las cantidades conservadas dentro de cada volumen y las interacciones entre ellos. Se aplica para simular el flujo de metal líquido, el transporte de calor y la transferencia de masa en la fundición [12].
- Método de Diferencias Finitas (MDF): El MDF discretiza las ecuaciones diferenciales en diferencias finitas, dividiendo el dominio en una malla discreta. Este método es utilizado para resolver ecuaciones de transferencia de calor y otros fenómenos relacionados con la fundición [38].
- Método de Lattice Boltzmann (MLB): El MLB es un método numérico basado en la mecánica estadística que se utiliza para simular el flujo de fluidos complejos, como el metal líquido en la fundición. Se basa en la discretización del espacio de velocidades y la evolución de funciones de distribución que representan la distribución de partículas en cada celda [51].
- Método de Volumen de Fluido (MVF): El MVF es un método utilizado para simular la interfaz entre diferentes fases (por ejemplo, líquido-gas o líquido-sólido) en la fundición. Se basa en la representación de la interfaz mediante funciones de nivel y la solución de ecuaciones de conservación en todo el dominio [33].

Estos son solo algunos ejemplos de métodos numéricos utilizados en la simulación de procesos de fundición. Cada método tiene sus ventajas y limitaciones, y la elección depende de la complejidad del problema y los recursos disponibles. La aplicación de estos métodos numéricos permite el análisis y la optimización de los procesos de fundición, mejorando la eficiencia y la calidad de los productos finales.

1.2.1. Base teórica

El Método de Elementos Finitos (MEF) es una técnica numérica ampliamente utilizada en la simulación y análisis de procesos de fundición. El MEF se basa en la discretización del dominio de estudio en elementos más pequeños, como triángulos o tetraedros en geometrías 2D y 3D, respectivamente. Cada elemento se define por un conjunto de nodos y se aproximan los valores intermedios mediante una función matemática conocida como función de forma [4-5, 12, 15].

El MEF en la fundición se utiliza para modelar y resolver una variedad de fenómenos, incluyendo:

- **Transferencia de calor:** La transferencia de calor es un aspecto crítico en los procesos de fundición. El MEF permite modelar la conducción de calor en sólidos, la convección del metal fundido y la radiación térmica. Esto permite predecir las temperaturas y los perfiles térmicos en el molde, la pieza de fundición y los sistemas de enfriamiento [9, 25].
- **Flujo de fluidos:** El MEF también se aplica para simular el flujo de metal líquido durante el proceso de llenado del molde. Permite calcular el perfil de velocidad, la presión y la distribución de presión en el sistema. Esto es especialmente útil para predecir y evitar defectos relacionados con el llenado, como porosidad y discontinuidades [20, 39].
- **Solidificación:** La solidificación es otro fenómeno clave en la fundición. El MEF puede modelar la solidificación del metal fundido mediante la resolución de las ecuaciones de transferencia de calor y la formulación de criterios de solidificación. Esto permite analizar la formación de estructuras de solidificación, la contracción y los efectos de las condiciones de enfriamiento en la microestructura y las propiedades mecánicas del material [5, 20, 39].
- **Mecánica estructural:** El MEF se utiliza para estudiar el comportamiento mecánico de las piezas fundidas y los moldes. Permite analizar las deformaciones, las tensiones y las interacciones entre los diferentes componentes estructurales. Esto es esencial para predecir y evitar problemas como grietas, distorsiones y fallos estructurales [46].

En los métodos de elementos finitos (MEF) aplicados a la fundición, se formulan y resuelven diversas ecuaciones que describen los fenómenos físicos involucrados en el proceso. A continuación, se mencionan algunas de las ecuaciones comunes utilizadas en la simulación de fundición con métodos numéricos [9, 15, 25]:

- **Ecuaciones de transferencia de calor:** Estas ecuaciones describen la transferencia de calor en el dominio de estudio, considerando la conducción, convección y radiación térmica [9]. La ecuación de conducción de calor se expresa como:

$$\nabla \cdot (k\nabla T) + Q = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.1)$$

Donde T es la temperatura, k es la conductividad térmica, Q es la fuente o sumidero de calor, ρ es la densidad, c_p es la capacidad calorífica y t es el tiempo. Esta

ecuación se resuelve para obtener el campo de temperatura en el dominio de fundición.

- Ecuaciones de flujo de fluidos: Para modelar el flujo de metal líquido en la fundición, se utilizan las ecuaciones de conservación de masa (ecuación 1.2) y momento (ecuación 1.3), conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes [20, 25].

$$\nabla \cdot \rho \vec{v} = 0 \quad (1.2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (1.3)$$

Donde \mathbf{v} es la velocidad del fluido, p es la presión, ρ es la densidad, μ es la viscosidad, \vec{g} es la aceleración debido a la gravedad y t es el tiempo. Estas ecuaciones se resuelven para obtener el perfil de velocidad y presión en el dominio de fundición durante el proceso de llenado.

- Ecuaciones de solidificación: La solidificación del metal líquido se modela mediante ecuaciones que describen la transferencia de calor y la cinética de solidificación. Estas ecuaciones incluyen la ecuación de conservación de energía (ecuación 1.4) y una ecuación que relaciona la velocidad de enfriamiento con la fracción sólida en crecimiento (ecuaciones 1.5-1.6) [5]. Además, se pueden incorporar modelos de nucleación y crecimiento de granos para simular la formación de microestructuras [39].

$$\rho c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) T \right] = k \nabla^2 T \quad (1.4)$$

$$\rho = \{\gamma \rho_2 + (1 - \gamma) \rho_1\} \quad (1.5)$$

$$T = \{\gamma T_1 + (1 - \gamma) T_2\} \quad (1.6)$$

Donde γ es la fracción de volumen para dos o más fases de fluido inmiscible, ρ es la densidad y T es la temperatura.

Estas ecuaciones se combinan con las condiciones de contorno y los valores iniciales adecuados para el problema de fundición específico. Luego, se discretiza el dominio en elementos finitos y se resuelven las ecuaciones mediante técnicas numéricas, como el método de Galerkin o el método de los residuos ponderados [32].

Es importante tener en cuenta que las ecuaciones y su formulación pueden variar según los fenómenos físicos que se consideren en el modelo de fundición, así como la complejidad y la precisión requerida en la simulación. Además, la incorporación de fenómenos como la contracción, el transporte de especies químicas, la reacción metal-molde, entre otros, puede requerir la formulación de ecuaciones adicionales [6].

1.2.2. Propiedades de los materiales

Tanto desde el punto de vista teórico como experimental, es necesario conocer las propiedades de los materiales con la finalidad de ejecutar simulaciones lo más cercanas a la realidad. Es así como, en lo referente al caso del hierro nodular o dúctil ASTM A 536 Grado 80-55-06 [3] que se empleó en el presente proyecto, en el Metals Handbook ASM [2] y otras investigaciones [17] se detallan algunas de sus propiedades físicas y mecánicas (Ver Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Propiedades físicas y mecánicas del hierro dúctil ASTM A 536 Grado 80-55-06.

Propiedad	Valor
Resistencia última a tensión (MPa)	551.6
Esfuerzo de fluencia (MPa)	379.2
Elongación (%)	6
Dureza	>190
Densidad (g/cm ³)	7.1
Conductividad Térmica (W/m·K)	36*
Calor específico (J/kg·K)	461
Coefficiente de Expansión Térmica (ε/C)×10 ⁻⁶ promedio entre 20-100 °C	11.5
Temperatura de Fusión	1148.9

* Para grados Ferríticos, cambia con el incremento en perlita, reduce aprox. 20 %

De igual manera en lo que respecta al Fe₂O₃ y polvo de Al que serán empleados para producir la reacción térmica de la camisa exotérmica [19, 62], en la Tabla 1.2 se pueden apreciar sus parámetros termoquímicos.

Tabla 1.2. Parámetros termoquímicos de la reacción térmica.

Parámetro	Fe ₂ O ₃	2Al	Al ₂ O ₃	2Fe
Masa (g)	159.678	53.964	101.961	111.69
Densidad (g/cm ³)	5.242	2.700	-	-
Volumen (cm ³)	30.46	19.99	-	-
ΔHf (Kcal/mol) [KJ/mol]	-195.00 [-816.58]	-	-399.09 [-1671.23]	-
ΔGf (Kcal/mol)	-178.00	-	-376.80	-
ΔSf (cal/mol/°C)	21.50	-	12.186	-

2. ESTUDIO EXPERIMENTAL

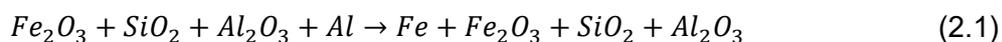
En este capítulo se describen los diferentes procesos llevados a cabo para realizar la parte experimental de la investigación, e igualmente se analizan los diferentes hallazgos en lo concerniente a métodos y materiales empleados.

2.1. Materiales

Como se mencionó en el anterior capítulo, la camisa exotérmica debe estar fabricada con compuestos que permitan generar una reacción que produzca un calor notablemente alto, hasta el punto en que sea capaz de mantener al metal fundido en estado líquido aun cuando haya iniciado ya el proceso de solidificación en la pieza [40].

Igualmente, en lo que respecta a información precisa sobre la composición de las camisas y sus propiedades esta es limitada y en su gran mayoría reservada por los fabricantes de estas [6]. No obstante, en investigaciones previas realizadas por investigadores como Wlodawer [60], Yücel *et. al.* [61], entre otros [30, 32-36, 40, 53], se muestran compuestos en común que son empleados en su fabricación y que sirven como base para elaborar la mezcla exotérmica.

Es así como se han identificado tres compuestos principales usados para generar la reacción exotérmica y que a su vez forman parte de la denominada reacción de Goldshmidt (ecuación 2.1), que son: el óxido de hierro III (Fe_2O_3) [48, 58], el polvo de aluminio (Al) [34] y arena silíceo (SiO_2) [28, 36]; todos estos, aglomerados o unidos mediante resinas de tipo furánicas.



La resina está conformada por tres partes, siendo A (Rapidur 3.0 Novus) y B (Rapidur 4.0 Novus) resinas y C (Rapidur C3 550) el catalizador, las proporciones en volumen de estas según información preliminar [49] son 55 % de A, 45 % de B y 0.01 % y esta mezcla corresponderá al 1 % de la cantidad total de arena empleada para el moldeo. Una imagen de los materiales mencionados y proporcionados para elaboración puede ser observada en la Figura 2.1.

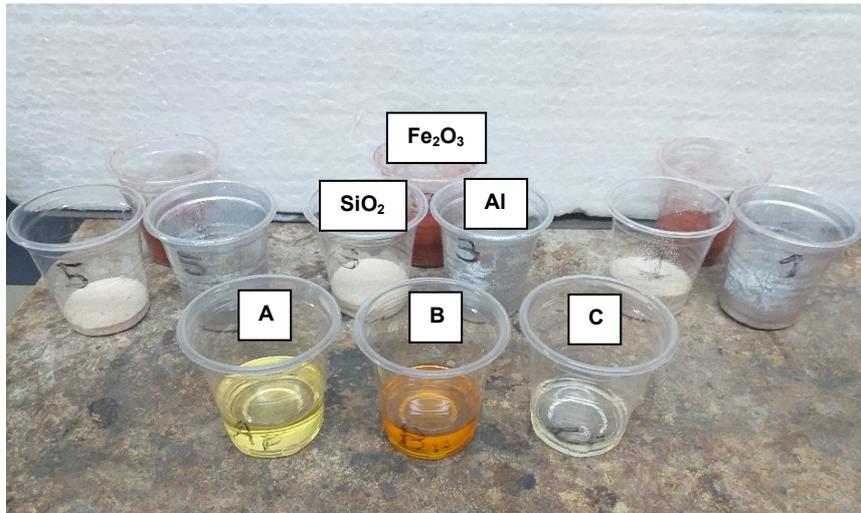


Figura 2.1. Materiales empleados en la fabricación de las camisas exotérmicas. Los compuestos A, B y C corresponden a los componentes de la resina furánica.

No obstante, como se evidenció al realizar las pruebas preliminares, la cantidad de aglomerante requerido a fin de lograr una mezcla homogénea, trabajable y moldeable es notablemente mayor cuando se la emplea en mezclas que contienen partículas mucho más finas que la arena silíceas. Esto se debe a que el área superficial sobre el que se deposita el aglomerante aumenta.

En lo que respecta al Fe_2O_3 y polvo de Al, estos fueron adquiridos de proveedores locales. Sin embargo, debido a la carencia de la información técnica suficiente por parte de los proveedores, que garanticen el grado de pureza de los productos adquiridos, se optó por realizar pruebas de difracción de rayos X (XRD, *por sus siglas en inglés*) con la finalidad de evidenciar cualquier posible contaminante o alteración presente en los compuestos. Esta prueba de XRD fue realizada en un equipo Malvern PANalytical AERIS con ánodo de Cu, radiación $K\alpha_1$ (λ) 1.540598, $K\alpha_2$ (λ) 1.544426, sin monocromador, perteneciente al Laboratorio y Planta Piloto de Cerámica de la Escuela Politécnica Nacional (EPN). El refinamiento Rietveld realizado al Fe_2O_3 , la indexación de los patrones de difracción de los compuestos, así como la esquematización de las estructuras cristalinas, fueron realizadas empleando los softwares FullProf, Vesta, QualX y COD Data Base. En la Figura 2.2 pueden apreciarse los resultados del análisis XRD.

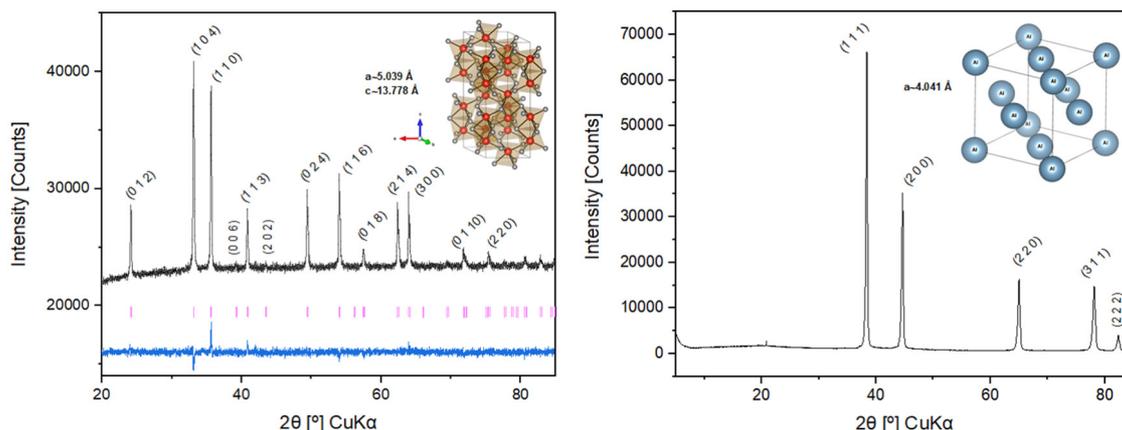


Figura 2.2. Análisis XRD y refinamiento Rietveld del Fe_2O_3 (izquierda) y Al (derecha)

Adicional a los materiales necesarios para la fabricación de las camisas exotérmicas, también se emplearon tablonés y madera para fabricar las diferentes cajas/moldes de fundición.

2.1.1. Composición de la camisa exotérmica

Con base en las investigaciones sobre este tema [34-36, 40, 53, 60-61] y las proporciones preliminares allí mencionadas, se propuso realizar un diseño factorial completo de experimentos (Full Factorial DOE, *por sus siglas en inglés*) [17] de tipo 2^k con 2 niveles y 3 factores, siendo los factores los elementos constituyentes principales de la reacción química de la mezcla (Fe_2O_3 , Al y SiO_2) y los niveles los valores máximos y mínimos de las posibles variaciones de las cantidades de cada uno de los factores en la mezcla.

Es importante indicar también que, se efectuaron dos réplicas o corridas del DOE con el fin de constatar la variabilidad en la respuesta, siendo esta última la temperatura máxima obtenida.

Para efectuar el DOE se empleó el software Minitab, el planteamiento del DOE y los valores de respuesta media obtenidos pueden observarse en la Figura 2.3. En la Tabla 2.1 pueden apreciarse las variaciones en las proporciones de mezcla para aquellas que presentaron la menor y mayor temperatura (opción 1 y opción 4, respectivamente). De igual manera, se puede observar la incidencia del activador en el tiempo de activación del compuesto, resultando ser mucho mayor en aquellos que no emplean el compuesto exotérmico.

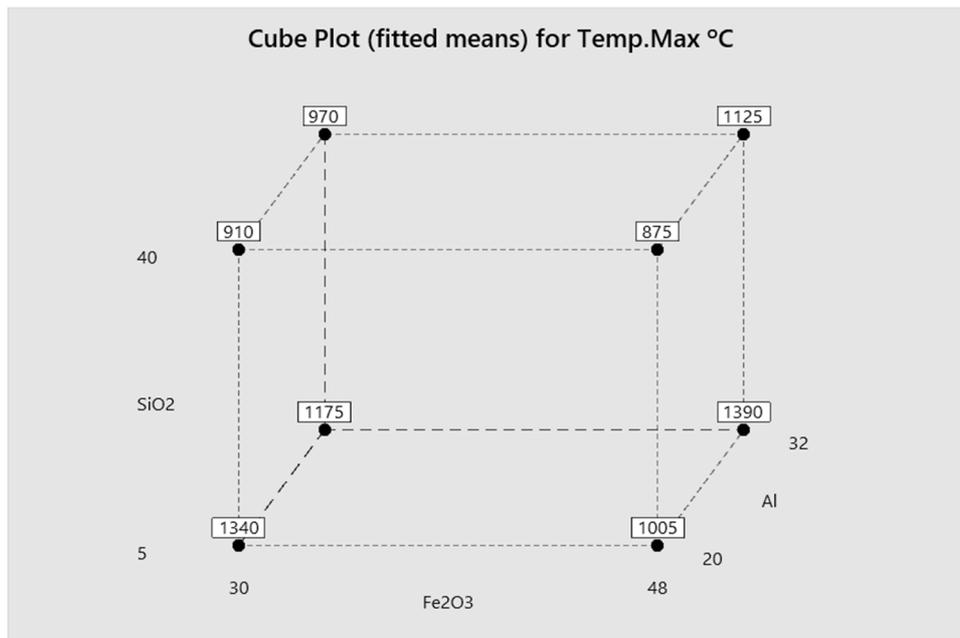


Figura 2.3. Diagrama cúbico del DOE para los valores medios ajustados de la respuesta.

Tabla 2.1. Proporciones del compuesto exotérmico termfítico.

% (Volumen)	Fe ₂ O ₃	Al	SiO ₂	Furan Resin	Activador (Mg u otro)	Temp. Max. (°C)	Tiempo al flash point (s)
Opción 1	30	20	40	10	-	910	856
Opción 2	30	20	35	10	5	960	120
Opción 3	48	32	10	10	-	1260	540
Opción 4	48	32	5	10	5	1390	44

Para la medición y registro de las temperaturas máximas alcanzadas con las diferentes opciones de mezcla, se empleó un banco de termopares (ver Figura 2.15d), los valores obtenidos, posteriormente fueron ingresados en Minitab para su respectivo tratamiento estadístico, y de esta manera se conoció la incidencia de cada uno de los compuestos químicos y cómo su variación afecta a la posibilidad de obtener la mayor temperatura posible.

Es así como, con base en la gráfica normal de efectos estandarizados (ver Figura 2.4) y el diagrama de Pareto de efectos estandarizados (ver Figura 2.5) que evalúan la respuesta obtenida con un factor de significancia $\alpha = 0.05$, se evidencia que el SiO₂, la interacción entre el Fe₂O₃ y Al, el Al, y la interacción conjunta del Fe₂O₃, SiO₂ y Al, tienen un efecto significativo en la respuesta.

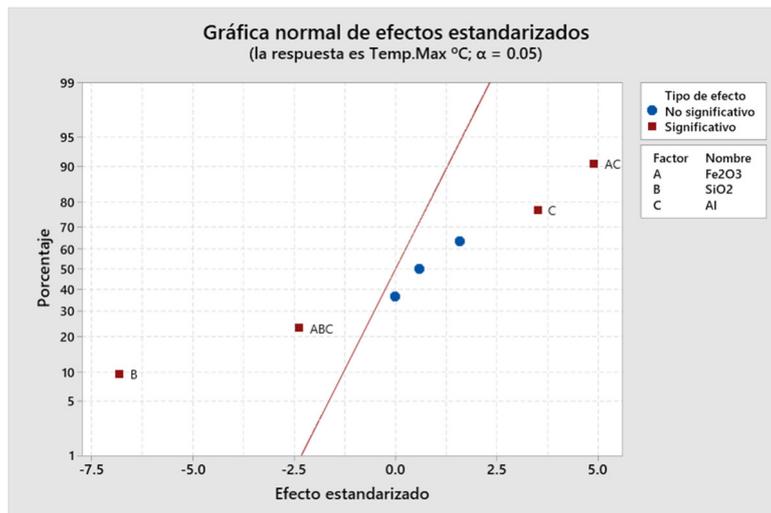


Figura 2.4. Gráfica normal de efectos estandarizados.

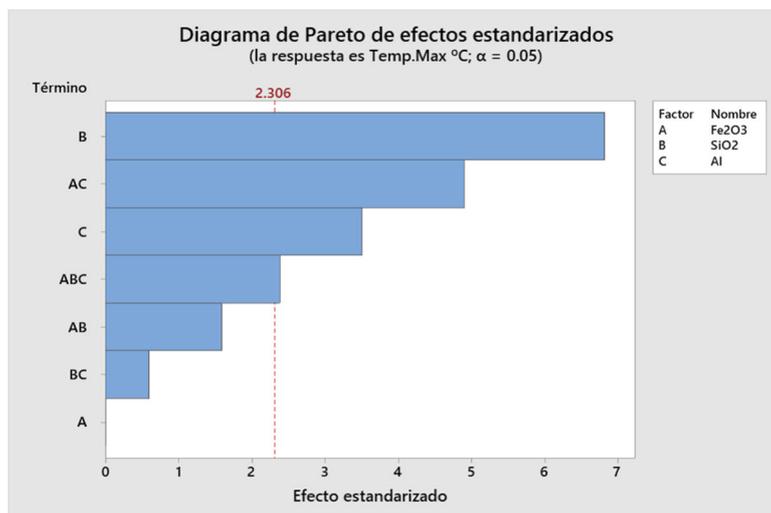


Figura 2.5. Diagrama de efectos principales para la temperatura.

Referente al análisis individual del diagrama de efectos principales de los compuestos (Figura 2.6), se pudo ver que la variación de las proporciones del Fe_2O_3 , para los rangos indicados, no presentó incidencia en la variación de la temperatura; pero, por otro lado, el incrementar la cantidad de arena silíceo dentro del compuesto, se redujo notablemente la temperatura máxima que se puede alcanzar. Sin embargo, se produjo el efecto contrario con el incremento en la cantidad de aluminio, que, al incrementar su cantidad dentro del compuesto, favoreció de manera notable al incremento en la temperatura máxima que se puede lograr en el compuesto exotérmico.

Otro punto importante para destacar está en la cantidad de resina empleada, que, como puede apreciarse en la Tabla 2.1, es aproximadamente el 10 % en volumen de toda la mezcla. Encontrándose este valor muy por encima del 1 % indicado para mezclas de arena. Este incremento es comprensible debido al cambio del tamaño de partícula, ya

que el Fe_2O_3 y polvo de Al, presentan tamaños de partícula inferiores al tamiz No. 325 ($45 \mu\text{m}$) incrementando de este modo el área de superficie específica con respecto a la arena silíceo que tiene tamaños de partícula mayores al tamiz No. 60 ($250 \mu\text{m}$) [48].

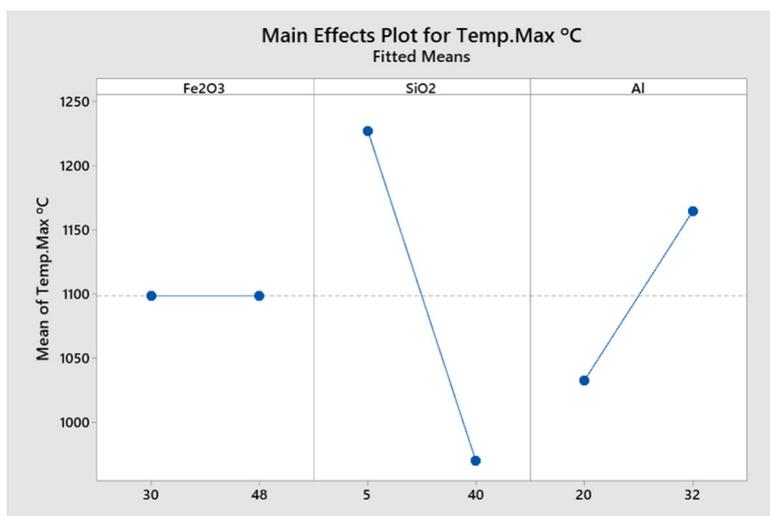


Figura 2.6. Diagrama de efectos principales para la temperatura.

En la Figura 2.7 se puede apreciar el diagrama de interacciones de las combinaciones de los compuestos y cómo esto influencia a la mezcla exotérmica; a diferencia de los elementos individuales, las combinaciones de estos afectan de manera notoria la temperatura que puede alcanzar la mezcla. Si se observa la interacción entre el Fe_2O_3 y el SiO_2 , para porcentajes bajos de SiO_2 presentes en la mezcla (5 %) al incrementar el Fe_2O_3 de 30 % a 48 % propicia una reducción en la temperatura máxima desde aproximadamente los $1250 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta los $1200 \text{ }^\circ\text{C}$; pero, si se incrementan los porcentajes de SiO_2 al 40 % e igualmente los de Fe_2O_3 de 30 % a 48 %, se puede notar que se produce un incremento en la temperatura. Aun así, para este último caso, se observó que el aumentar SiO_2 y Fe_2O_3 reduce de manera notoria la temperatura máxima obtenible, por consiguiente, se puede deducir que el incremento de SiO_2 en grandes cantidades desfavorece a la reacción exotérmica.

Ahora bien, si se evalúa la interacción entre el Fe_2O_3 y el Al que corresponde propiamente a la reacción termítica [19, 34-36], se puede evidenciar que al incrementar tanto el contenido de Fe_2O_3 como de Al en la mezcla, favorece notablemente al incremento de la temperatura, esto debido a que la composición de la camisa exotérmica tiende a presentar mayor cantidad de compuesto termítico en su composición. Finalmente, respecto a la interacción entre el SiO_2 y el Al se evidencia que el incremento proporcional de ambos desfavorece de manera notable a la temperatura final obtenida.

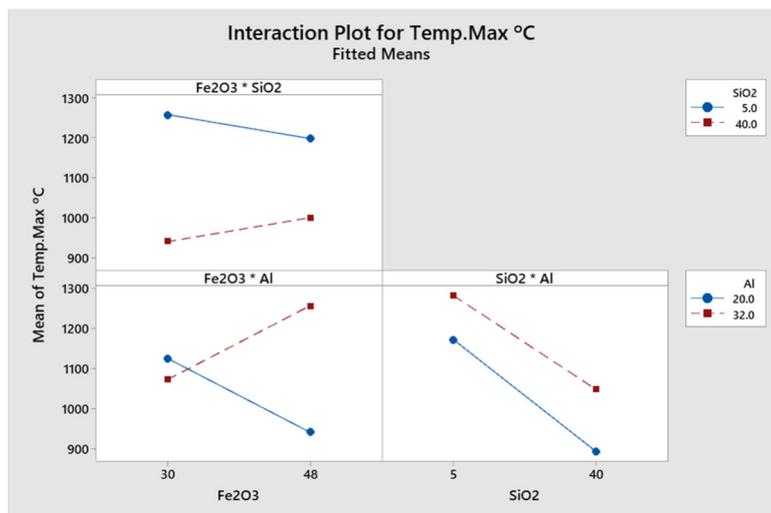


Figura 2.7. Diagrama de interacción de los compuestos químicos para la temperatura.

Una alternativa para corroborar lo estudiado mediante el diseño de experimentos puede ser el uso del software Outotec HSC Chemistry y su módulo de reacción de ecuaciones [45] al igual que los hizo Yücel et. al. [61], dicho software permite evaluar las diferentes interacciones, y analizar la influencia de las variaciones estequiométricas en el comportamiento termoquímico, consiguiendo de esta manera una mayor comprensión sobre la influencia de los diferentes compuestos en la mezcla térmica.

2.1.2. Composición del hierro nodular

Así como la composición de la camisa exotérmica es de vital importancia para favorecer a la retención de calor por más tiempo al interior de la mazarota, la composición del material que es fundido tiene un rol de igual importancia. En el hierro nodular, el grafito se encuentra segregado en forma esférica, y estos esferoides pueden variar de acuerdo con el tamaño, forma y distribución como destaca Henderieckx [24].

Para lograr esta nodulización se debe completar varias etapas en el proceso de producción del hierro nodular. En primer lugar, se debe tener una composición del hierro base cercana al punto eutéctico, es decir 4.3 % de carbono. Este control de composición se puede realizar con un espectrómetro de chispa o alternativamente usando un método de análisis térmico. Un proceso de afino será necesario para lograr esta composición [3, 27].

En la misma colada base se puede iniciar la nucleación con productos nucleantes como el SiC. La nodulización propiamente dicha se la debe realizar en otro recipiente con

elementos nodulizantes como el FeSiMg y posteriormente previo al colado final se realizará la inoculación con productos como el FeSi, dado que las características de los nódulos influyen de manera notable tanto las propiedades físicas como mecánicas, se han establecido una clasificación para el hierro (Figura 2.8) [3, 6, 27].

La forma del grafito y el tamaño se define durante el proceso de solidificación y solamente podría ser modificado de manera posterior con un tratamiento térmico lo cual es relativamente costoso, es así que se han establecido seis clases de hierro de acuerdo a la forma del grafito siendo: (I) forma de escama o laminar, con una relación longitud/ancho > 50 , (II) forma que aparece poco a poco (casi laminar), (III) forma vermicular y posee una relación longitud/ancho entre 2 y 10, (IV) forma de escamas del hierro maleable, (V) y (VI) son las formas nodulares con una relación longitud/ancho igual a 1 [6, 24, 27].

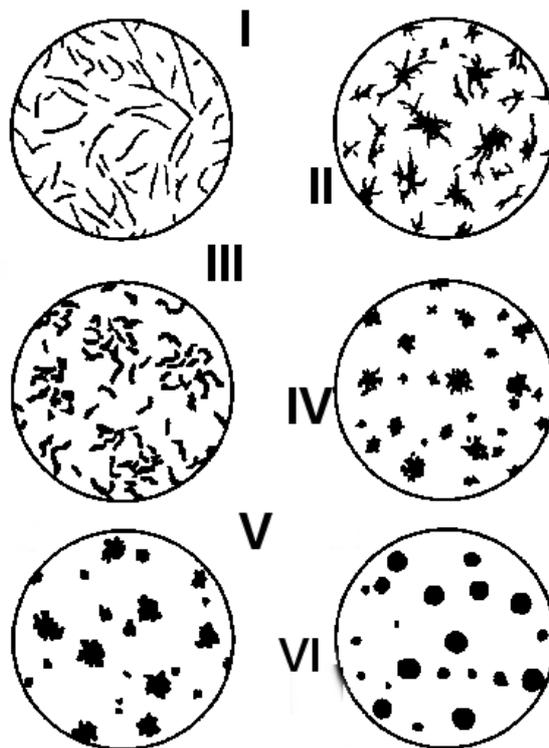


Figura 2.8. Formas del grafito [27].

Por tal motivo, se efectuó la caracterización de diez muestras de hierro de la planta de fundición donde serán realizadas las pruebas con la finalidad de conocer el grado de variación en las composiciones como se aprecia en la Tabla 2.2; y así, contar con valores que permitan el adecuado dimensionamiento de las mazarotas empleando uno de los criterios de diseño [21]. Estas pruebas fueron realizadas mediante pruebas de

Espectroscopía de chispa empleando un equipo Bruker Q2 ION del Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional.

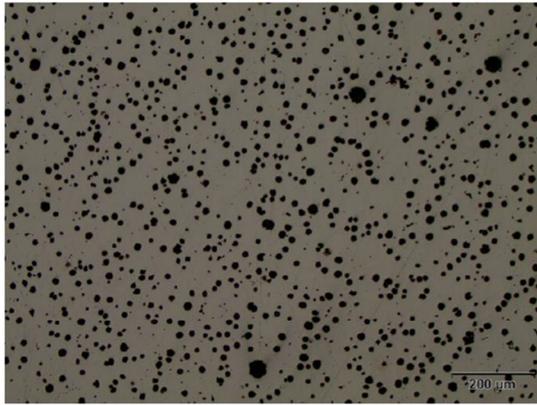
Tabla 2.2. Composición promedio del hierro nodular usado en la fundición.

%	C	Si	Mn	P	Cr	Ni	Cu	Al	Mg	Fe	Avg.
Avg. Comp.	3.418	2.358	0.702	0.036	0.093	0.014	0.299	0.015	0.044	92.998	99.977
Std.Dev.	0.140	0.090	0.010	0.003	0.002	0.002	0.012	0.001	0.003	0.161	0.007
Max.	3.558	2.448	0.712	0.039	0.096	0.016	0.311	0.017	0.047	93.159	99.984
Mín.	3.278	2.267	0.692	0.033	0.091	0.012	0.287	0.014	0.041	92.837	99.970

De la misma manera, con la colaboración del Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional, se ha realizado la caracterización referente a la nodulización del hierro empleado que se muestra en la Figura 2.9, para dicho efecto se ejecutaron análisis metalográficos a fin de determinar la forma y tamaño del grano, así como el factor de forma de los nódulos del hierro.

Es así como del mapeo de fases presentes en la fundición nodular analizada, se encontró que aproximadamente el 14.7 % corresponde a Ferrita y el 85.3 % corresponde a Perlita, por lo tanto, la matriz de fundición nodular es de tipo perlítica. En lo que respecta al tamaño este presenta una distribución acumulada en más de un 70 % para el tamaño clase 7, 25 % para el tamaño clase 6 y 5 % para el tamaño clase 5. Las clases de formas más representativas son la I (61 %), II (28 %) y III (11 %), que con base en lo previamente indicado en la Figura 2.5 corresponden a: (I) forma de escama o laminar, con una relación longitud/ancho > 50 , (II) forma que aparece poco a poco (casi laminar), (III) forma vermicular y posee una relación longitud/ancho entre 2 y 10.

En lo concerniente al conteo de nódulos, los análisis muestran un conteo de nódulos de 536 por mm^2 que conforme se evidenciará más adelante en la Figura 2.13, el conteo se encuentra entre la zona más común (color verde) y la zona por debajo de la flotación de grafito (color rojo).



Total Sample Area	1.29 mm ²
Unetched Sample Area	1.29 mm ²
Graphite Fraction	10.2 %
Graphite Size	7
Graphite Form	I(61%) II(28%) III(11%)
Nodularity by Area (ASTM E2567)	96.3 %
Nodularity by Count (ASTM E2567)	94.8 %
Particles per mm ²	609.275
Nodular particles per mm ²	536.131

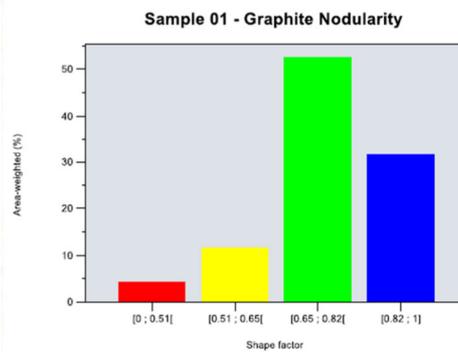
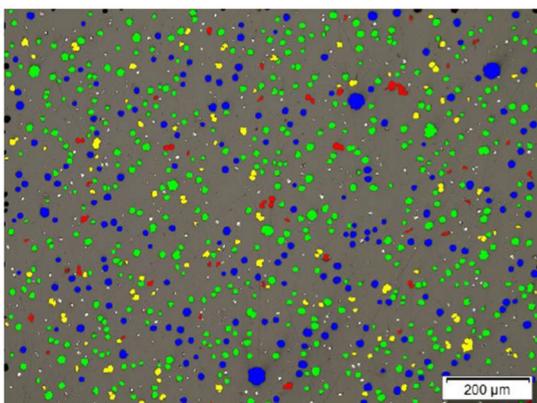
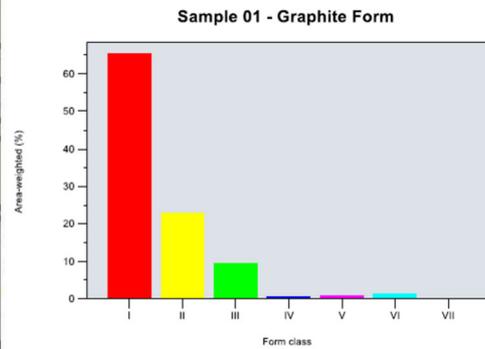
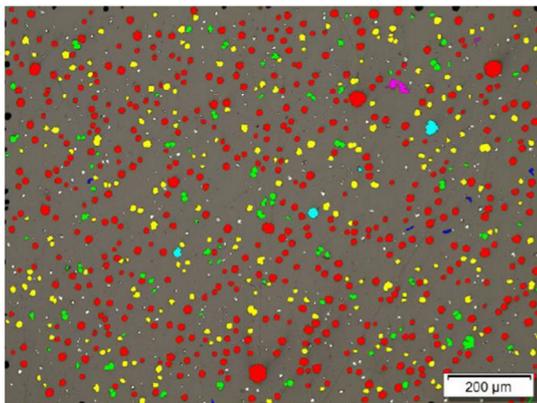
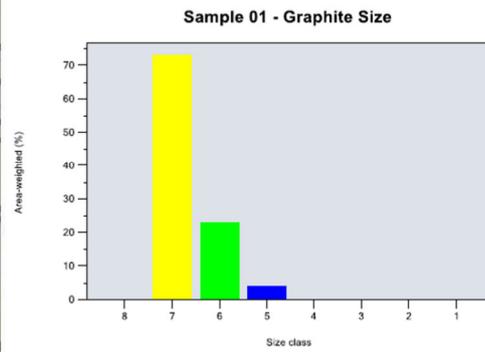
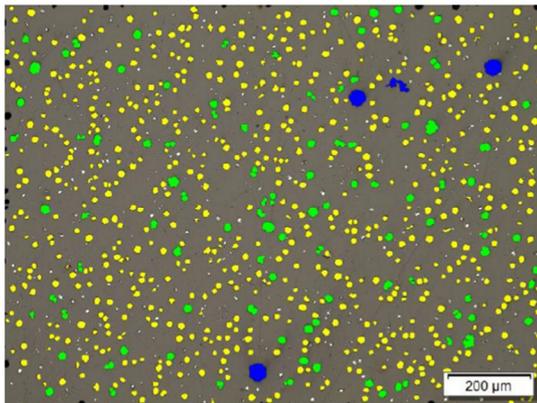


Figura 2.9. Resultados del análisis metalográfico de conteo de nódulos. (De arriba hacia abajo) Resultado del conteo de nódulos para el área estudiada, distribución del tamaño de nódulo, distribución de la forma del nódulo, y nodularidad del grafito.

2.2. Métodos

Con la finalidad de obtener datos comparables con investigaciones similares como las efectuadas por Ahmad [4] y Baviskar & Maurya [5] donde evalúan mediante análisis numérico y simulaciones la incidencia del uso de mazarotas en el proceso de fundición, o las investigaciones de Hardin *et. al.* [22], Purwadi *et. al.* [43], Williams [59] y Yücel *et. al.* [61] donde se investiga los efectos de la variación del tamaño y forma de las mazarotas en los procesos de fundición; se optó por proponer una etapa experimental y otra computacional para estudiar la influencia del tamaño, forma y composición en mazarotas con camisas exotérmicas aplicadas a la fundición de hierro dúctil.

En primer lugar, se abordó el proceso de dimensionamiento y fabricación de las mazarotas, para en lo posterior ejecutar pruebas piloto mediante las cuales se tomaron los correctivos necesarios a fin de que cuando se realicen las pruebas definitivas la propuesta investigativa cumpla con los objetivos propuestos. Cabe tener en cuenta que, la parte experimental de un proceso de fundición es costosa, por tal motivo gran parte de esta investigación se enfoca en ejecutar los estudios a nivel computacional [11, 14].

2.2.1. Fabricación de prototipos

En primera instancia, se procedió a realizar el dimensionamiento de las mazarotas con base en las dimensiones de la probeta/pieza de prueba y volumen de la mazarota estandarizada en la normativa IS 15865:2009 [7], la cual establece que, con el fin de estudiar el grado de eficiencia en la alimentación de la mazarota, se debe fundir una placa de 250 mm x 250 mm x 25 mm, a la cual se le colocará una mazarota con un volumen aproximado de 156.3 cm³. Cabe mencionar que el mismo método de estudio ha sido adoptado por Purwadi *et. al.* [43].

Aun cuando la normativa IS 15865:2009 [7] nos indica dimensiones específicas tanto para la pieza fundir, así como para la mazarota, se evaluaron dos criterios de dimensionamiento a fin de conocer las alternativas existentes para el diseño de mazarotas con camisas exotérmicas.

El primer criterio por analizar es el conocido como “Criterio de Volumen” [47], en el cual, mediante una relación directa entre la pieza a fundir, el coeficiente de contracción volumétrica del metal c (ver Tabla 2.3) y un coeficiente de seguridad k permite obtener el volumen de la mazarota. Respecto al coeficiente de seguridad, este depende de la

ubicación de la mazarota con respecto a la pieza y está comprendido entre $1 < k < 3$, siendo $k=1$ si la mazarota se encuentra ubicada sobre la pieza, $k=2$ si la mazarota no se encuentra sobre la pieza, pero su punto más alto se proyecta en un ángulo de hasta 45° aproximadamente (no muy separada), y $k=3$ si la mazarota no encuentra ubicada sobre la pieza y su punto más alto no se proyecta sobre la pieza, es decir su ángulo es superior a 45° (distante), esto puede apreciarse de mejor manera en el esquema mostrado en la Figura 2.10.

Tabla 2.3. Valores de coeficientes de contracción volumétrica del metal.

Metal o aleación	c
Fundición gris	3-5 %
Fundición blanca	6-7 %
Fundición nodular	4-5%
Aceros no aleados	5-7%
Aceros muy aleados	8-10 %
Bronces de Sn	5-7 %
Bronces de Al	4-5.5 %
Latones	6-7 %

Fuente: [40]

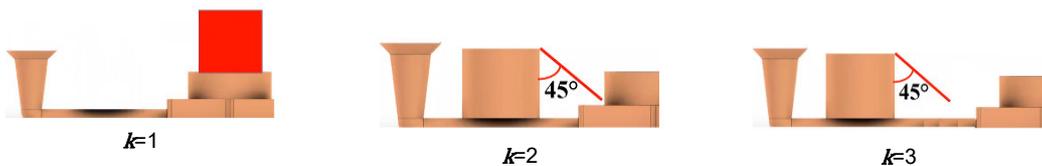


Figura 2.10. Esquema de ubicación de la mazarota con respecto a la pieza para definición del coeficiente de seguridad k .

Es así como considerando la fundición de una pieza tipo placa de dimensiones 270 mm x 270 mm x 27 mm, muy similar a la propuesta en la norma IS 15865:2009 [7], esta presenta un volumen V_{pieza} igual a 1968.3 cm³ y un módulo M_{pieza} igual a 1.13 cm. Adoptando para c un valor igual a 4 % correspondiente a la fundición nodular (Tabla 2.3), k un valor igual 2, y resolviendo la ecuación 2.2, se obtiene el valor necesario para determinar los parámetros de diseño de las mazarotas indicados en la Tabla 2.4, mismos que sirvieron para el dimensionamiento de las cajas de noyos con las que se fabricaron las camisas exotérmicas y las cajas para la fundición de las piezas finales.

$$V_{mazarota} = c \cdot k \cdot V_{pieza} \quad (2.2)$$

Respecto al valor de k adoptado, este fue elegido considerando que entre la mazarota y la pieza existe un canal de conexión o “cuello” por las geometrías que tienen las mazarotas, generando así cierta independencia entre la pieza y la mazarota, y por

consiguiente la no existencia de un acople directo que es lo indicado para adoptar un valor de k igual a 1.

En lo referente a este cuello, el dimensionamiento de este según destaca Brown [6], no es necesario al encontrarse sobre la pieza, pero para el caso de mazarotas laterales, su dimensionamiento dependerá del módulo del cuello M_{cuello} el cual viene dado por la relación indicada en la ecuación 2.3 [6], donde ST es el tiempo de solidificación que para la pieza es estimado por la “regla de Chvorinov” (ecuación 24) [13, 16].

$$M_{pieza}/M_{pieza} : M_{cuello}/M_{pieza} : M_{mazarota}/M_{pieza} \quad (2.3)$$

Donde:

$$M_{pieza}/M_{pieza} = 1.0$$

$$M_{cuello}/M_{pieza} = 1.1 \sqrt{\frac{ST}{100}}$$

$$M_{mazarota}/M_{pieza} = 1.2 \sqrt{\frac{ST}{100}}$$

Siendo:

$$ST = B \cdot \left(\frac{V_{pieza}}{A_{pieza}} \right)^n \quad (2.4)$$

Donde V_{pieza} es el volumen del fundido, A_{pieza} es el área de superficie del fundido, n es una constante (adimensional) que según DeGarmo *et. al.* [16] se encuentra entre 1.5 a 2.0, y B es la constante del molde en unidades de seg/m^2 que según Chvorinov [13] se encuentra determinada por la ecuación 2.5.

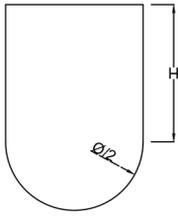
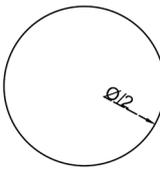
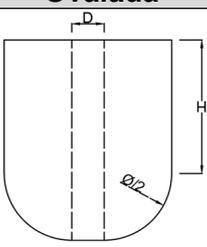
$$B = \left[\frac{\rho_m L}{(T_m - T_0)} \right] \left[\frac{\pi}{4k\rho c} \right] \left[1 + \left(\frac{c_m \Delta T_s}{L} \right) \right] \quad (2.5)$$

Donde T_m es la temperatura de fusión o solidificación del metal, T_0 la temperatura inicial del molde, ΔT_s el sobrecalentamiento determinado por la diferencia entre la temperatura de vertido y la temperatura de fusión, L el calor latente de fusión, k la conductividad térmica del molde, c el calor específico del molde, ρ_m la densidad del metal, ρ la densidad del molde, y c_m el calor específico del metal.

Es así como considerando un valor aproximado de ST igual a 80 % estimado en tiempo de contracción para un módulo M_{pieza} igual a 1.13 cm (ver Figura 2.14), una geometría cilíndrica para el cuello, siendo la altura H igual $3\Phi/2$, donde Φ es el diámetro, y el módulo del cuello M_{cuello} igual a $3\Phi/16$; resolviendo la ecuación 2.3 se obtiene que el

diámetro debería tener un valor de aproximadamente 5.9 cm. No obstante, considerando el uso de camisas exotérmicas en las mazarotas y que según Brown [6] no es necesario dimensionarlo, se decidió adoptar el valor de Φ igual a 2.0 cm.

Tabla 2.4. Parámetros de diseño para las mazarotas.

Parámetro	Cilíndrica	Esférica	Ovalada
Esquema gráfico			
Volumen (cm ³)	157.46	157.46	157.46
Área Superficial (cm ²)	155.46	141.02	146.94
Módulo (cm)	$M = \frac{4\phi}{21}$ 1.01	$M = \frac{\phi}{6}$ 1.12	$M = \frac{\phi(3\pi + 2)}{(15\pi + 4)}$ 1.07
Dimensiones de diseño (cm)	$\phi = 5.32$ $H = \phi = 5.32$	$\phi = 6.7$	$\phi = 4.8$ $H = \phi = 4.8$ $D = \phi/4$

Φ : diámetro, H: altura, D: longitud adicional

El segundo criterio por analizar es el propuesto por Henderieckx [23] que a su vez considera el empleo de nomogramas como los indicados por Brown [6] para dimensionar las mazarotas.

A diferencia del criterio de volumen, el criterio de Henderieckx [23] considera la composición del hierro nodular a fundir, estableciendo límites y parámetros óptimos que debe cumplirse con el objetivo de no presentar problemas como la contracción secundaria o la flotación del grafito en el metal de la mazarota. Por tal motivo, en la Figura 2.11 se indica los diámetros que puede tener la mazarota a fin de evitar estos problemas, siendo los diámetros de 100 mm e inferiores para porcentajes de contenido de C entre 3.5 % y 3.7 %, y porcentajes de contenido de Si entre 2.2 % y 2.8 % los más idóneos a fin de evitar los problemas antes mencionados.

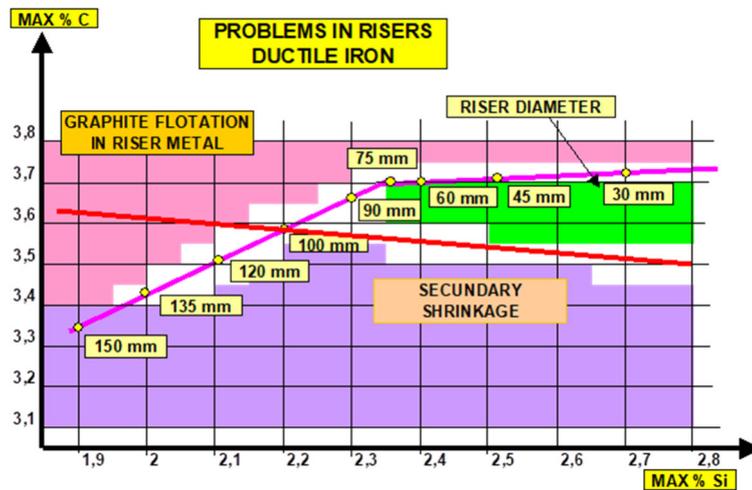


Figura 2.11. Diagrama comparativo de problemas en mazarotas empleadas en la fundición de hierro dúctil con base en la composición de carbono y silicio de la mezcla, y el diámetro de la mazarota adoptado [21].

Henderieckx [23] para este criterio analiza el factor de ubicación de la mazarota, siendo una “mazarota caliente” aquella que se encuentra en el trayecto del canal de entrada y “mazarota fría” aquella que no está localizada en dicho trayecto y por lo general se ubica en la parte de la pieza donde se prevé culminará el llenado. Un esquema de lo antes mencionado puede verse en la Figura 2.12

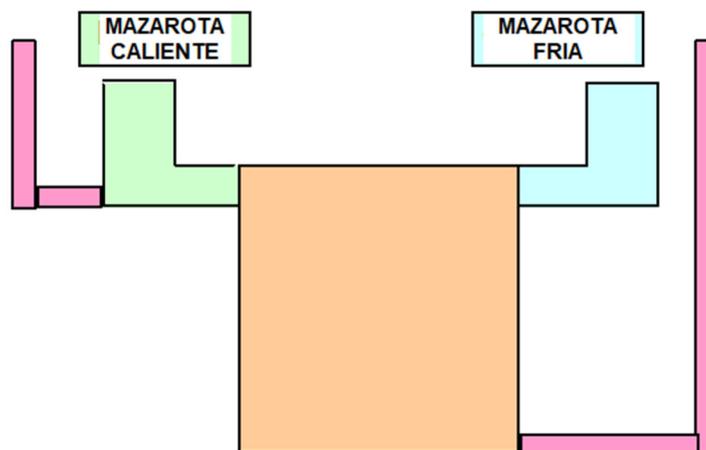
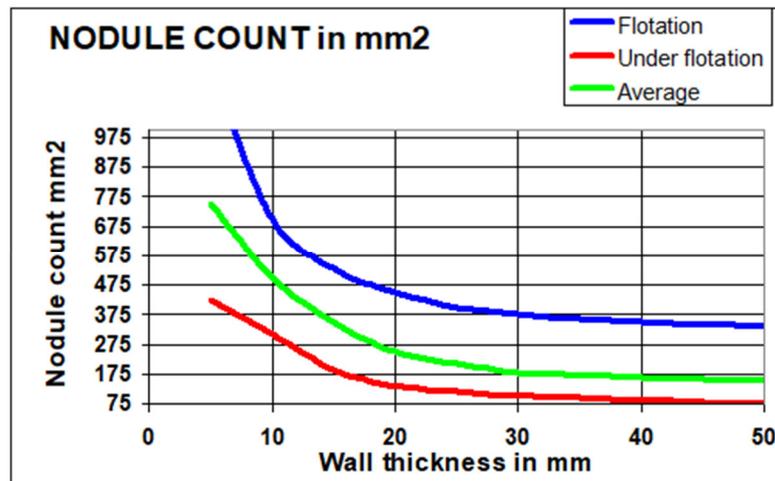


Figura 2.12. Esquema para diferenciación entre una mazarota caliente y una fría [21].

Otro punto importante por destacar, previo a indicar el proceso de dimensionamiento aplicando el segundo criterio, es la importancia del conteo de nódulos. Un incremento en el conteo de nódulos decrecerá la tendencia al crecimiento dendrítico, por tal motivo existe un mínimo conteo de nódulos a obtener con el fin de tener un buen comportamiento de la mazarota [23, 31]. En la Figura 2.13 muestran el conteo de

nódulos para la capa de flotación (color azul), la zona por debajo de la flotación del grafito (color rojo) y la zona más común (color verde). Si los nódulos son muy pequeños flotan y si son muy grandes se depositan al fondo, cabe indicar que el espesor de la pared se refiere a la longitud de la arista o diámetro de la sección transversal de la mazarota.

a)



b)

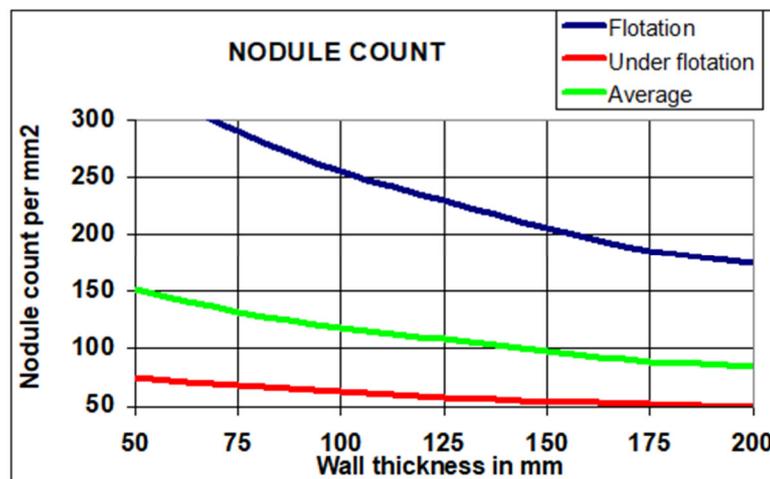


Figura 2.13. Influencia del espesor de pared en el conteo de nódulos. a) Para rangos de espesor de pared de 0 a 50 mm, y b) Para rangos de espesor de pared de 50 a 200 mm [21].

Para el cálculo y dimensionamiento de las mazarotas por medio de este segundo criterio, es necesario conocer el módulo de la pieza, la composición química del hierro nodular, y el nomograma indicado por Brown [6] (Figura 2.14). En lo referente a la composición química, con esta se determinará el carbón equivalente C_{eq} (ecuación 2.6), el grado de saturación Sc (ecuación 2.7) y el valor de $\%Si + \%P$. Es importante mencionar

que el C_{eq} de la composición del hierro nodular debe encontrarse cercano a 4.3 % [23]. Adicionalmente, para el proceso de fundición experimental, la temperatura de líquidos T_{liq} puede ser determinada mediante la ecuación 2.8.

$$C_{eq} = \%C + \frac{1}{3}(\%Si + \%P) \quad (2.6)$$

$$Sc = \frac{\%C}{\left[4.3 - \frac{1}{3}(\%Si + \%P)\right]} \quad (2.7)$$

$$T_{liq} = 1650^{\circ}\text{C} - 124.5(\%C) + 26.7(\%Si) + 2.45(\%P) \quad (2.8)$$

Con los valores de composición química mostrados previamente en la Tabla 2.2 y aplicados en las ecuaciones 2.6 a la 2.8, se tiene que el valor de C_{eq} es igual a 4.22 %, el Sc igual a 0.976, y T_{liq} igual a 1161.59 °C.

Estos valores son empleados en el nomograma de la Figura 2.11 (líneas rojas) para de esta manera determinar que el ST en tiempo de contracción tiene un valor aproximado de 65 % y la expansión esperada se estima en aproximadamente 0.5 %. De manera posterior, para determinar el módulo de la mazarota $M_{mazarota}$ se emplea la ecuación 2.3 de la cual el valor obtenido es igual a 1.09 cm, finalizando de este modo el cálculo por medio de este criterio.

Para obtener las dimensiones de las diferentes formas de mazarotas, este módulo debe ser reemplazado en los módulos indicados en la Tabla 2.4 y con esto se obtendrán las dimensiones tales como alturas y diámetros de cada una de estas. Algo importante a notar con respecto a las dimensiones obtenidas con este segundo criterio, se encuentra en los diámetros. Para el caso de la mazarota cilíndrica se obtuvo un Φ igual a 5.74 cm, mazarota esférica un Φ igual a 6.56 cm y mazarota ovalada un Φ igual a 4.89 cm, siendo muy similares a las obtenidos con el primer criterio.

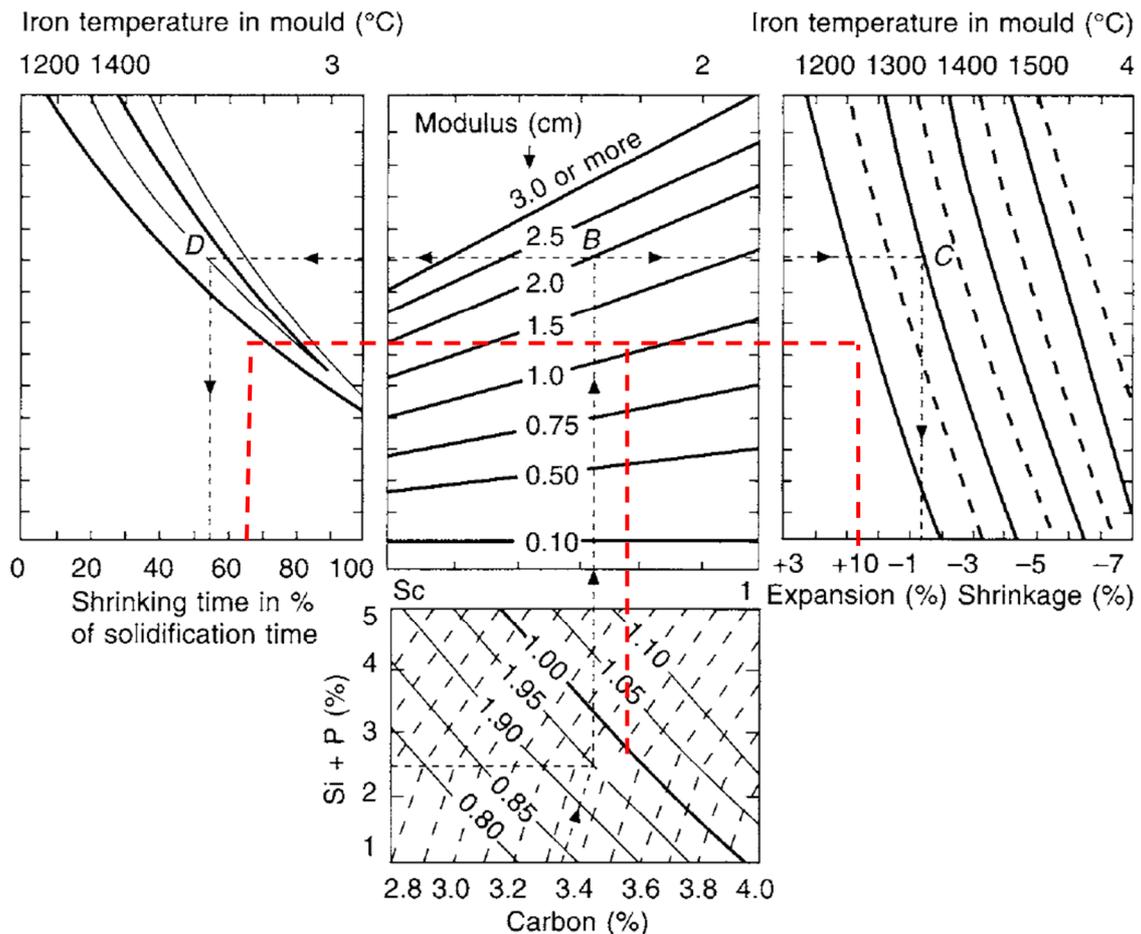


Figura 2.14. Determinación del tiempo de contracción para fundiciones de hierro dúctil y gris [6].

Es importante mencionar que estos diseños no contemplan la presencia de la camisa exotérmica y el análisis se lo realiza considerando una mazarota convencional. Henderieckx [23] en su investigación denota valores de corrección para el caso en que se emplean camisas exotérmicas. Respecto al espesor de las camisas exotérmicas, se ha decidido emplear 1 cm para todas las geometrías.

Una vez se han dimensionado las mazarotas, se diseñaron los prototipos de mazarotas y las cajas de noyos empleando programas de diseño e ingeniería asistida por computador (CAD y CAE, *por sus siglas en inglés*). Los moldes fueron fabricados empleando procesos de manufactura aditiva mediante extrusión de PLA (filamento de ácido poliláctico) conocido comúnmente como "impresión 3D". Para determinar errores en el diseño conceptual de los moldes, se fabricaron camisas de arena silíceo aglomerada con resina furánica, es así como se determinó que las cajas debían tener un recubrimiento en pintura con la finalidad de favorecer al desmolde de las piezas.

De igual manera se inició con la fabricación del banco de termopares, para lo cual se efectuó la adquisición inicialmente de una placa Arduino Uno, módulos de interfaz MAX6675 y termopares tipo K. La elección de este tipo de termopares se realizó considerando investigaciones similares [50], [52], en las que se emplean este termopar para estudiar temperaturas en fundiciones de acero. Cabe tener en cuenta que, al ser sometidos a tan altas temperaturas, su vida útil se reduce notablemente, motivo por el cual no son reutilizados en los experimentos y para cada nuevo estudio realizado se utilizó un nuevo termopar.

Un esquema gráfico del proceso llevado a cabo para el diseño de los moldes, su elaboración y fabricación del banco de termopares se observa en la Figura 2.15.

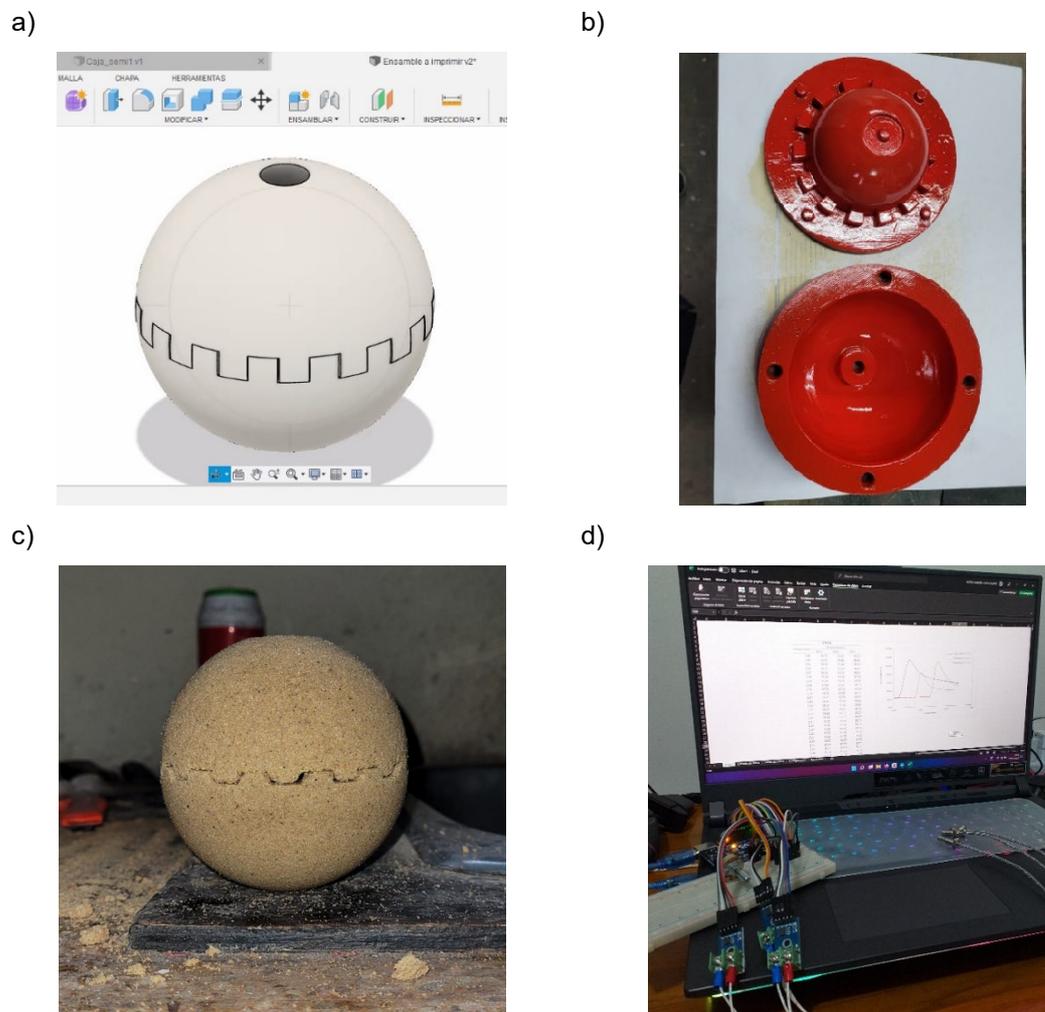


Figura 2.15. Esquema de diseño y producción del prototipo de camisa con forma esférica y programación del banco de termopares iniciales. a) Diseño CAD del prototipo, b) Fabricación de la caja de noyos mediante manufactura aditiva, c) Prototipo de camisa con forma esférica realizado en arena y d) Banco de termopares inicial con computador mostrando resultados.

2.2.2. Ejecución de pruebas piloto

Con el fin de estudiar la temperatura máxima que se puede lograr con el compuesto exotérmico, la factibilidad de fabricación de las diferentes geometrías de camisas y demás particularidades que pudiesen surgir durante la investigación, se efectuaron pruebas piloto. Dichas pruebas, fueron llevadas a cabo empleando la geometría cilíndrica cuyas dimensiones se muestran en la Tabla 2.4.

Sobre el proceso de fabricación del compuesto exotérmico, este siguió un orden establecido con el fin de obtener mezclas trabajables y moldeables. La determinación de las cantidades de cada uno de los compuestos fue realizada de manera volumétrica, empleando para ello recipientes plásticos graduados. Una vez que se dispuso de los compuestos medidos, el orden en que se añadieron a la mezcladora fue primero el Fe_2O_3 , luego el polvo de Al, posterior el SiO_2 y de manera final los compuestos de la resina.

Para realizar la mezcla se usó una mezcladora Hobart N50 la cual cuenta con tres posiciones de velocidad (baja, media y alta). Respecto al orden y tiempos de mezclado, con la mezcladora apagada se colocaron en el recipiente el Fe_2O_3 y el polvo de Al, luego se enciende en velocidad baja y se mezcla durante aproximadamente 40 segundos. Una vez se homogenizan los dos primeros compuestos, se detiene el proceso de mezcla y se procede a añadir la arena silíceo, para luego encender nuevamente la mezcladora en velocidad media y proceder a mezclar por 30 segundos más. Posterior a eso, se detuvo nuevamente la mezcladora y se añadió en conjunto el compuesto A y B de la resina, se vuelve a encender la mezcladora en velocidad media y se continua con el proceso de mezcla por unos 40 segundos; finalmente se detiene la mezcladora para rápidamente añadir el compuesto C y encender ésta a velocidad media por alrededor de 15 segundos luego de los cuales se sube a velocidad alta por alrededor de 15 segundos más. Este proceso, otorga una trabajabilidad en la mezcla por alrededor de unos 4 minutos, luego de los cuales empieza a polimerizar y por consiguiente las partículas no podrán unirse para conformar la camisa.

El proceso de llenado del molde se muestra en las Figura 2.16a y 2.16b, este llenado se lo realizó en capas, las cuales son compactadas mediante un pisón y mediante golpes sobre una superficie acolchada con la finalidad de preservar la integridad de las cajas de noyos, distribuir de mejor manera las partículas e ir llenando los vacíos que se generan por la inclusión de aire. Una vez se ha completado el llenado, se debe esperar

al menos 5 minutos hasta que la pieza haya fraguado para iniciar con el desmolde. Cabe mencionar que, aun cuando ha iniciado el proceso de fraguado del compuesto este sigue siendo frágil ante la aplicación de cargas, por tal motivo no es recomendable desmoldar hasta que la pieza se encuentre totalmente sólida.

Una vez se han obtenido las probetas para prueba, estas son llevadas a un área abierta para realizar el experimento. Las muestras deben ser colocadas sobre una superficie refractaria a fin de que no se afecten los materiales aledaños ni infraestructura (Figura 2.16c) y mediante el uso de un lanzallamas se procede a calentar las probetas hasta que se registra la activación de estas. El registro de las temperaturas máximas, así como las curvas de enfriamiento son realizadas con el empleo del banco de termopares a través de una conexión mediante interfaz COM, la cual permitió registrar en tiempo real los valores en una hoja de cálculo. Por otro lado, en la Figura 2.13d puede verse la comparación entre una camisa exotérmica no activada y una activada.



Figura 2.16. Esquema de realización de pruebas piloto. a) Obtención del compuesto exotérmico previo a la elaboración de la camisa, b) Fabricación de la camisa exotérmica mediante moldeo en la caja de noyos, c) Pruebas de activación y evaluación de la temperatura producida en la camisa, y d) Comparativa entre una camisa exotérmica no activada (izquierda) con respecto a una camisa luego de su activación (derecha).

2.2.3. Ejecución de pruebas definitivas

Una vez se definió la mejor alternativa de mezcla exotérmica, y a su vez se optimizó los diseños de las cajas (Figura 2.18a) para la elaboración de las camisas exotérmicas, se procedió con la ejecución de las pruebas definitivas.

Para la realización de las pruebas definitivas es necesario optimizar el banco de termopares inicialmente fabricado, por tal motivo se realizó la adquisición de una placa Arduino Mega y nuevos sensores MAX 31856 que en conjunto con los sensores MAX6675 permitieron obtener 12 canales de registro continuo. En la Figura 2.17a puede apreciarse los distintos insumos empleados para la fabricación del nuevo banco de

termopares al igual que los nuevos termopares tipo K con punta de 10 cm. En la Figura 2.17b puede verse la prueba del banco de termopares en un proceso de fundición de aluminio con la finalidad de evidenciar problemas en los diferentes termopares, sensores o código. Respecto al código empleado para la fabricación del banco, este puede verse en el Anexo 1.

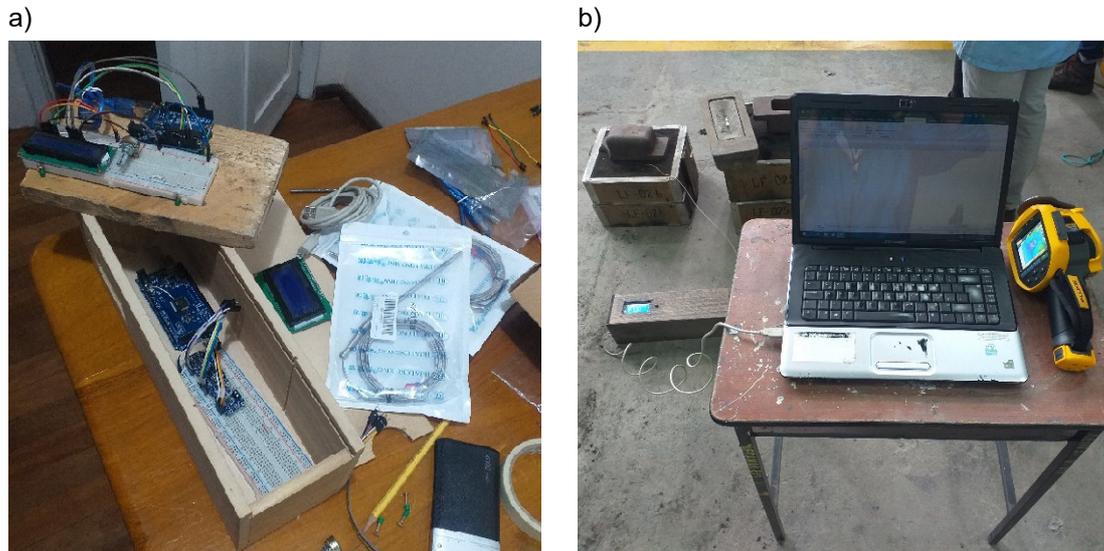


Figura 2.17. Construcción, programación y prueba del banco de termopares de 12 canales. a) Construcción y programación del nuevo banco de termopares, y b) Pruebas de funcionamiento y calibración del banco de termopares.

Una vez se corrigieron todos los problemas presentes en el nuevo banco de termopares, y se fabricaron las diferentes geometrías de camisas exotérmicas (Figura 2.18b), se procedió a la fabricación de los moldes definitivos para realizar las pruebas definitivas (Figura 2.18c).

La fabricación de estos moldes se la efectuó en las instalaciones de la empresa Fundireciclar, el proceso de moldeo consistió en el vaciado de la arena preparada con resina a través de una tolva sobre el molde. El molde de las diferentes piezas se encontraba compuesto de 3 cajas que juntas conformaban el molde de fundición. La colocación de los termopares se la realizó como se observa en la Figura 2.18c y se indica también en la Figura 3.1d; cabe mencionar que, para el termopar encargado de la medición y registro de la temperatura en el punto de contacto con la camisa y metal líquido, se le colocó una capa adicional de recubrimiento refractario en su base con la finalidad de prevenir la afectación del sensor por alguna filtración de hierro fundido que pudiese comprometer el canal.

En la Figura 2.18d se puede apreciar el momento en que se ejecuta la fundición de las diferentes piezas, la temperatura de vaciado fue de 1380 °C, y la composición del hierro nodular ocupado se encuentra conforme los valores indicados en la Tabla 2.2. La temperatura de vaciado indicada fue empleada igualmente en el estudio numérico-computacional. Es importante mencionar también que en el caso experimental se han estudiado únicamente los sistemas de mazarotas de geometría cilíndrica y esférica, con y sin camisa exotérmica, dando un total de cuatro moldes a fundir.

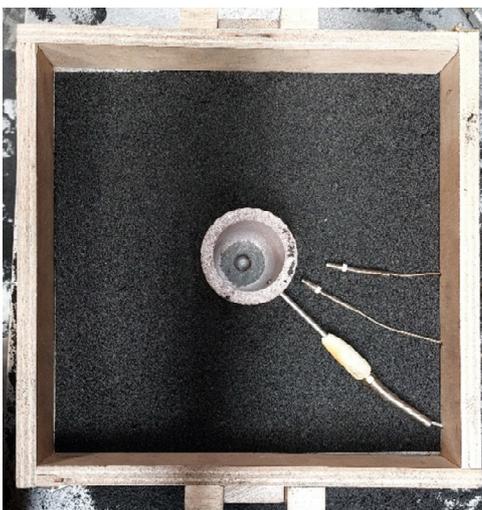
a)



b)



c)



d)



Figura 2.18. Esquema de procedimiento para la ejecución de pruebas definitivas. a) Elaboración de moldes para la fabricación de las camisas exotérmicas, b) Fabricación de las camisas exotérmicas, c) Moldeo de la caja y colocación de la camisa y termopares para registro de temperaturas, y d) Fundición de las piezas y registro de temperaturas.

3. ESTUDIO NUMÉRICO-COMPUTACIONAL

En este capítulo se aborda la descripción del proceso de simulación desde la discretización de los sistemas experimentales mediante la representación en un modelo numérico-computacional, hasta la calibración de los modelos desarrollados para el análisis.

3.1. Modelación numérica-computacional de los sistemas propuestos

Para el diseño de los sistemas pieza-mazarota y pieza-mazarota-camisa exotérmica, se empleó el software CAD Autodesk Inventor, realizándose la exportación de los archivos con extensión .CATProduct hacia el software Altair Inspire Cast [15], en el cual se efectuó el respectivo análisis numérico-computacional. En la Figura 3.1 se pueden apreciar los modelos realizados mediante el programa CAD así como las dimensiones del sistema y posición de los puntos de estudio para análisis de las temperaturas.

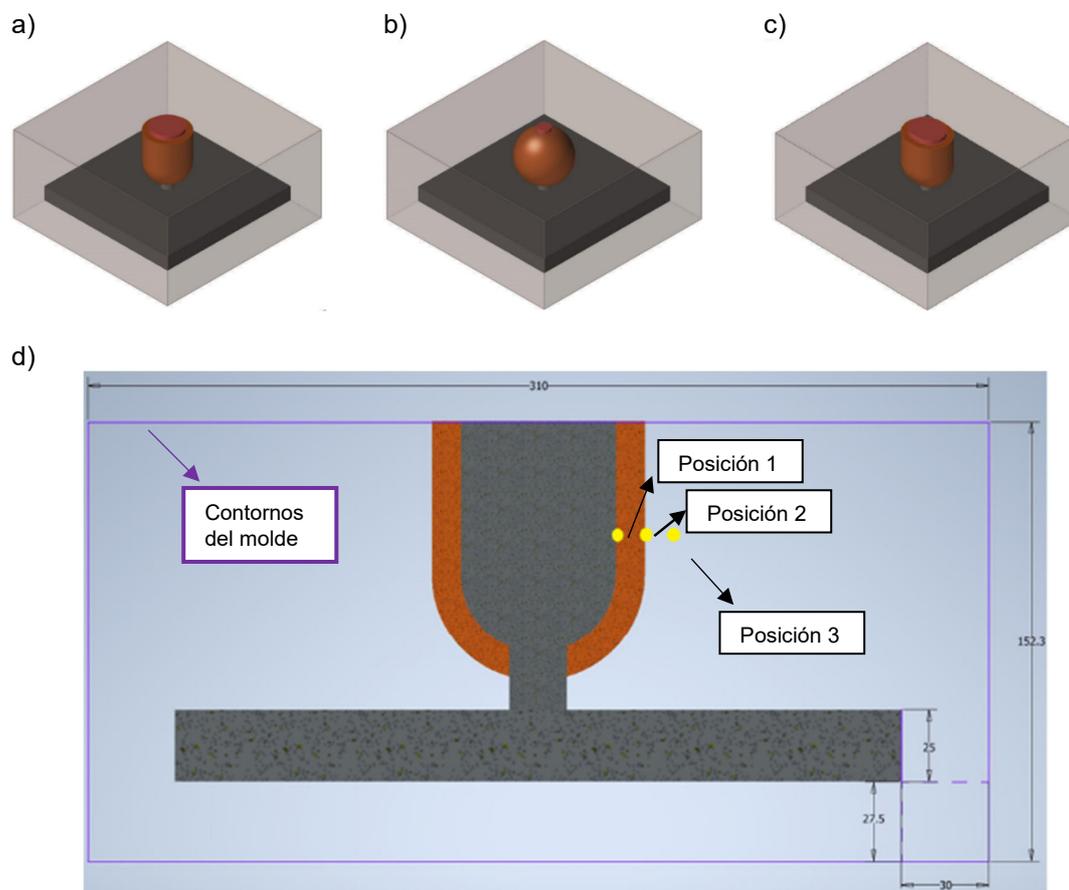
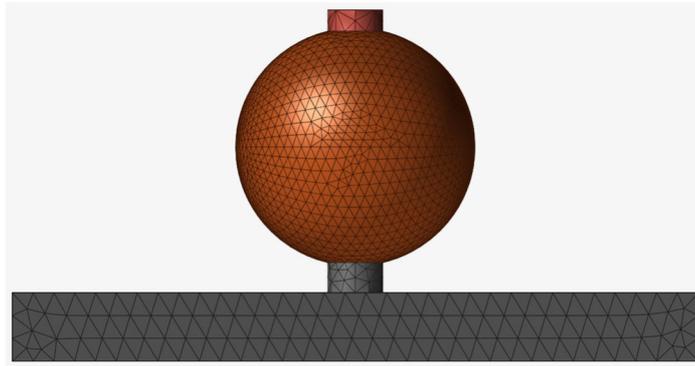


Figura 3.1. Esquema de diferentes formas y tamaños de camisas exotérmicas, y dimensiones del molde y pieza tipo a estudiar. a) Forma Cilíndrica, b) Forma esférica, c) Forma ovalada y d) Dimensiones del molde, pieza y ubicación de puntos a estudiar.

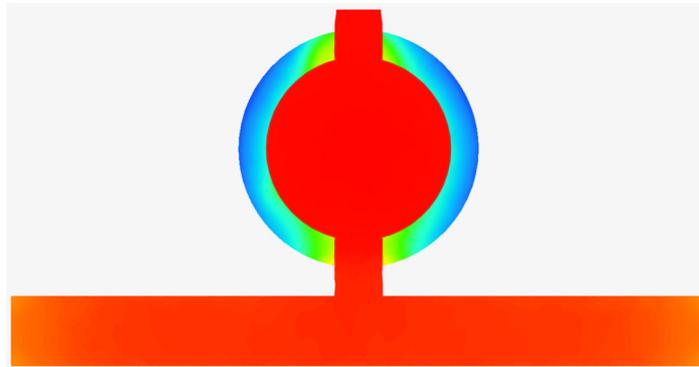
Para el presente proyecto de investigación el método que se empleó será el de Elementos Finitos (MEF) [15].

Respecto a las condiciones para discretización del sistema, las propiedades de los materiales fueron ya previamente mostradas en la Tabla 1.1 y Tabla 2.2, el espesor medio del mallado mostrado en la Figura 3.2a es de 1.5 cm, el tamaño de elemento 0.75 cm. En lo que respecta a los factores de mallado de la entrada, molde y mazarota los valores adoptados fueron 0.900, 2.583 y 1.000, respectivamente. El tiempo de llenado considerado fue de 5.5 segundos; estos parámetros fueron generales para todas las geometrías investigadas. En la Figura 3.2b se puede apreciar el estudio del proceso de solidificación y como varían las temperaturas con respecto al tiempo transcurrido, en este punto puede apreciarse que los colores cálidos representan las temperaturas altas y colores fríos las temperaturas bajas. En la Figura 3.2c se puede ver el resultado de la generación de porosidades y rechupes generados en la mazarota; y en la Figura 3.2d el estudio de evolución de la temperatura respecto al tiempo en los diferentes puntos señalados en la Figura 3.1d. El mismo tipo de análisis indicado en la Figura 3.2 fue ejecutado para las geometrías de mazarota cilíndrica y ovalada.

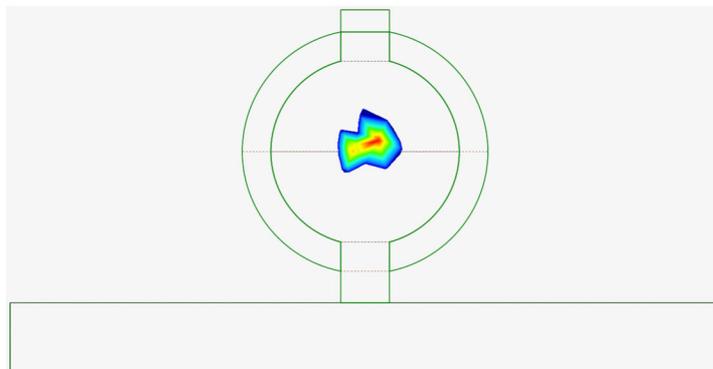
a)



b)



c)



d)

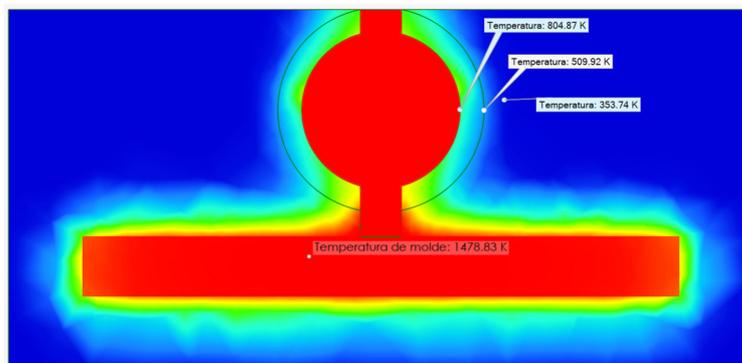


Figura 3.2. a) Mallado y discretización del sistema, b) Mapa de tiempo de solidificación, c) Mapa de generación de porosidades y rechupes, y d) Mapa de la evolución de la temperatura con respecto al tiempo en los puntos especificados.

Referente al procedimiento desarrollado para efectuar el análisis numérico-computacional a continuación se mostrará el procedimiento seguido en el software Altair Inspire Cast para el ingreso de datos y generación de condiciones iniciales:

- En la Figura 3.3 se puede apreciar el entorno gráfico del programa, para efectuar la importación de la geometría se realiza mediante *Archivo/Importar/(seleccionar ubicación del archivo)/Aceptar*.

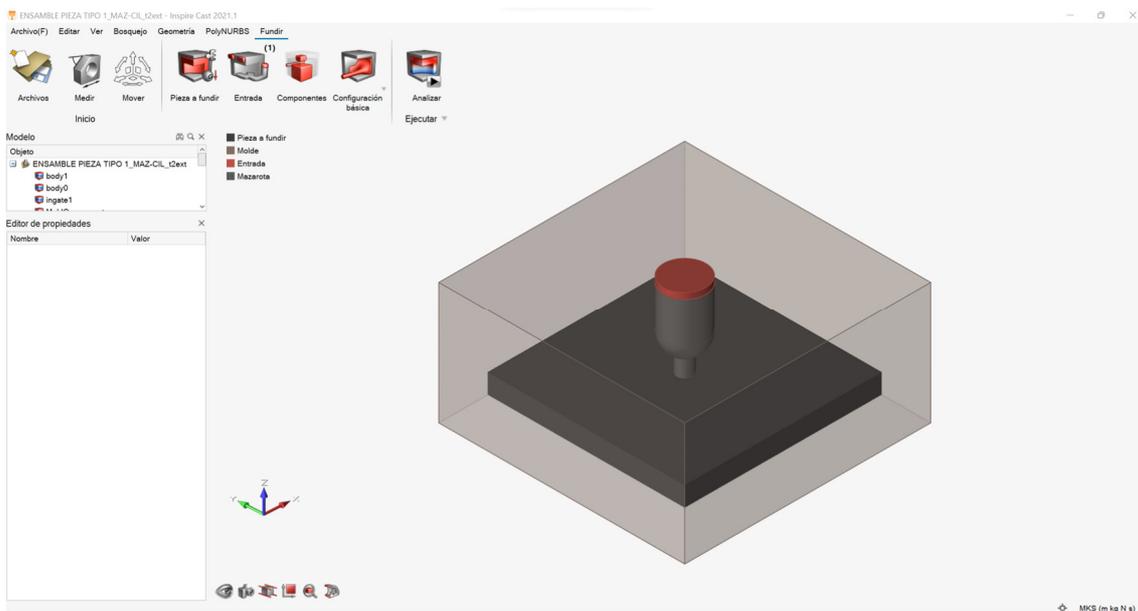


Figura 3.3. Esquema del entorno gráfico del programa -importación de la geometría-

- En la Figura 3.4, puede verse el proceso de asignación de las propiedades de los materiales, en este caso de las propiedades del molde. Para llevar a cabo esto, en la pestaña *Fundir* se despliegan los íconos observados en la parte inferior (*Pieza a fundir*, *Entrada*, *Componentes*, *Configuración básica*, y *Analizar*), una vez asignados los componentes que corresponden a cada uno se puede desplegar la ventana de *Materiales* y en esta ajustar las propiedades de cada uno de estos. Entre las propiedades que pueden ser ajustadas en función del tiempo se tienen: densidad, conductividad térmica, coeficiente de transferencia de calor con el ambiente y el calor específico.

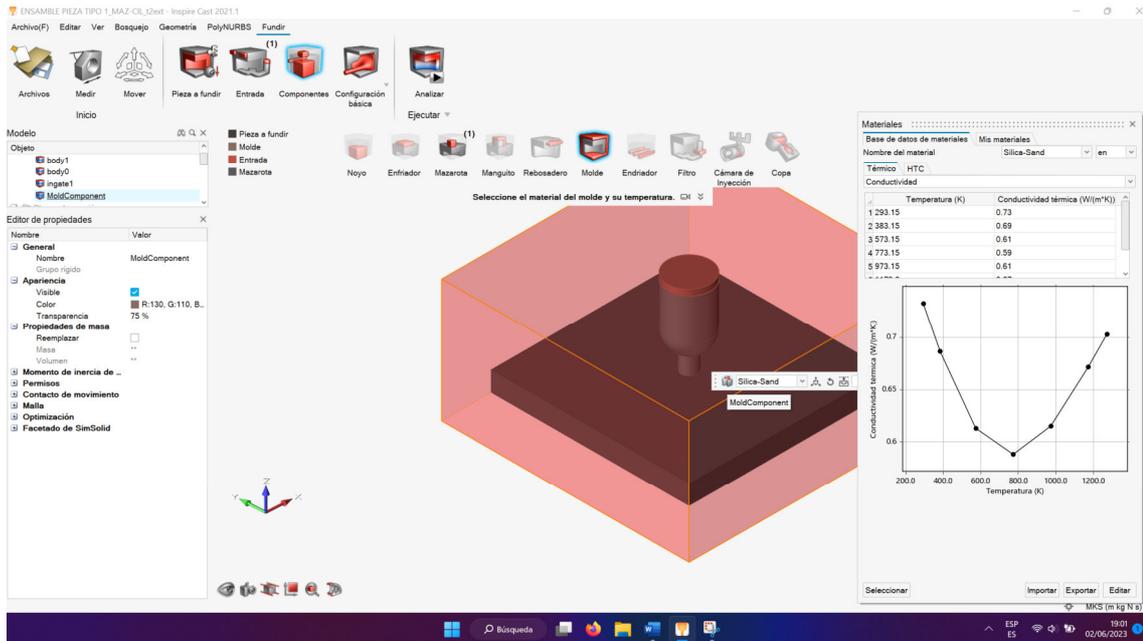


Figura 3.4. Esquema del entorno gráfico del programa -asignación de materiales y propiedades-.

- En la Figura 3.5, una vez se han efectuado la asignación de materiales y sus propiedades, se procede a establecer los parámetros de mallado y condiciones iniciales. Esto se lo realiza en la pestaña *Fundir/Analizar*, donde se despliega una nueva ventana que permite escoger las etapas a analizar, es decir llenado, solidificación o ambas; e igualmente, en la pestaña *avanzado* se establecen ya los factores de mallado de los componentes.

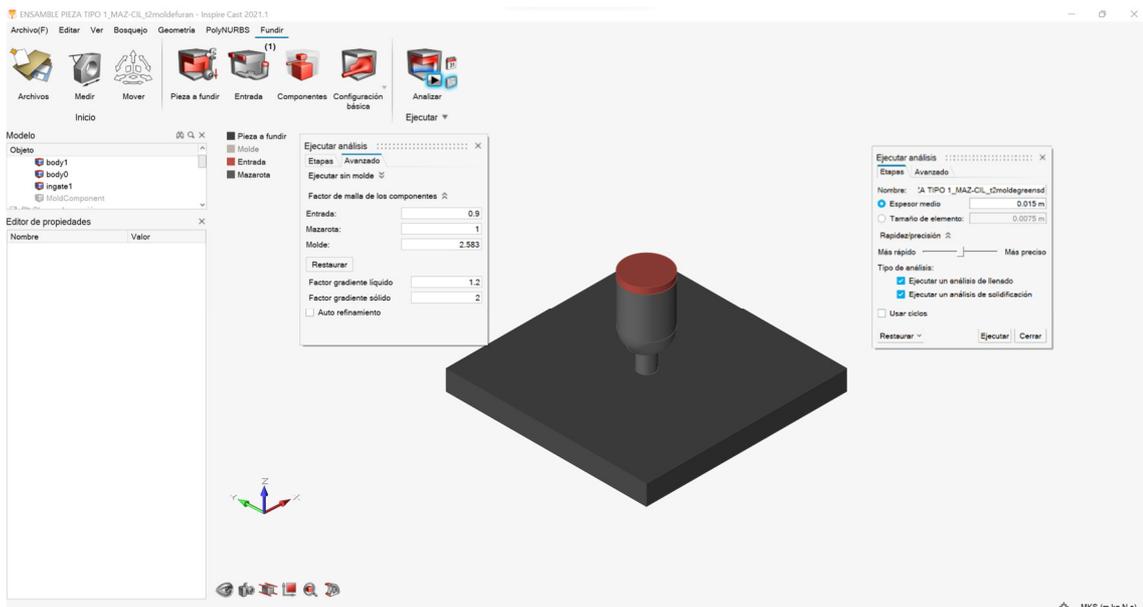


Figura 3.5. Esquema del entorno gráfico del programa -elección de condiciones iniciales-

- Finalmente, una vez se han realizado los pasos anteriores se puede ejecutar el análisis haciendo clic en el botón de *ejecutar* de la venta de *Ejecutar análisis*. El tiempo que este análisis demore dependerá del grosor de la malla, la complejidad de la geometría y las distintas configuraciones de componentes que presente el sistema (Figura 3.6).

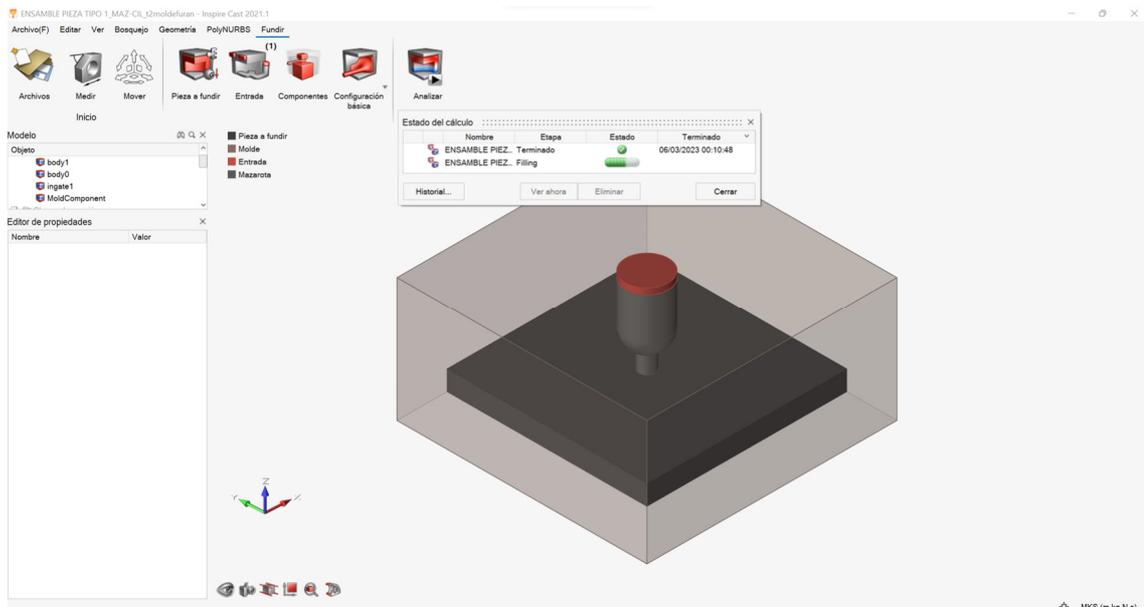


Figura 3.6. Esquema del entorno gráfico del programa -ejecución del proceso de simulación-

Respecto a la presentación de resultados, un esquema de estos se mostró previamente en la Figura 3.2, y en el apartado de “Simulaciones” en Anexos podrán apreciarse en mayor detalle para los diferentes casos los resultados obtenidos mediante el análisis numérico-computacional llevado a cabo. Adicionalmente, se debe indicar que, en el capítulo de análisis de resultados se discutirán a mayor detalle los diferentes hallazgos y resultados generalizados para el resto de las geometrías investigadas.

3.2. Refinamiento y calibración de modelos numéricos-computacionales

Con el objetivo de mejorar precisión de los resultados obtenidos mediante las simulaciones con base en el tiempo de simulación y la temperatura obtenida en los diferentes puntos de estudio, se realizó un análisis de convergencia para establecer el espesor de malla y tamaño de elemento adecuado. Las gráficas de estos análisis tanto para la mazarota cilíndrica como esférica se muestran en la Figura 3.7.

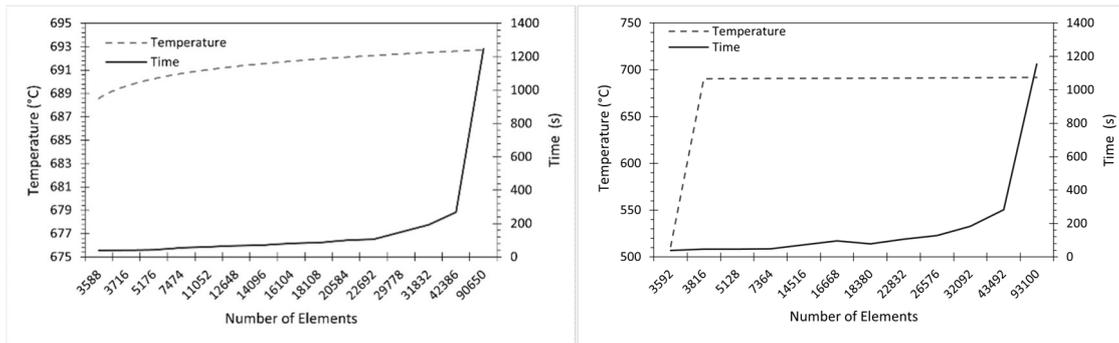


Figura 3.7. Análisis de convergencia en MEF para el sistema propuesto, gráfica para la mazarota de forma cilíndrica (izquierda) y gráfica para la mazarota de forma esférica (derecha).

Los resultados muestran que un espesor de malla de 1.5 cm, al que además le corresponde a un número de elementos de 42386 para el caso de la mazarota cilíndrica y 43492 para la mazarota esférica, muestran los mejores resultados considerando el tiempo empleado para resolver el problema; adicionalmente, se encontró que el error aproximado es de 0.11 %

Una vez se han realizado los experimentos en las diferentes geometrías propuestas, los datos obtenidos se emplearon para corregir, diferentes parámetros térmicos de los materiales, como son los coeficientes de transferencia de calor de la pieza, molde y camisa exotérmica, temperatura de activación de la camisa exotérmica y tiempo de vaciado. Las pruebas experimentales fueron llevadas a cabo como se indica en la Figura 3.8, donde se puede observar la distribución de las cajas, el esquema de cableado hacia el banco de termopares, y el registro de datos en tiempo real que se está efectuando en el computador.



Figura 3.8. Esquema de ejecución de las pruebas finales y registro de lecturas de temperatura.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se discuten los resultados obtenidos tanto en la parte experimental como numérica-computacional y su comparativa en conjunto.

4.1. Resultados de la parte experimental

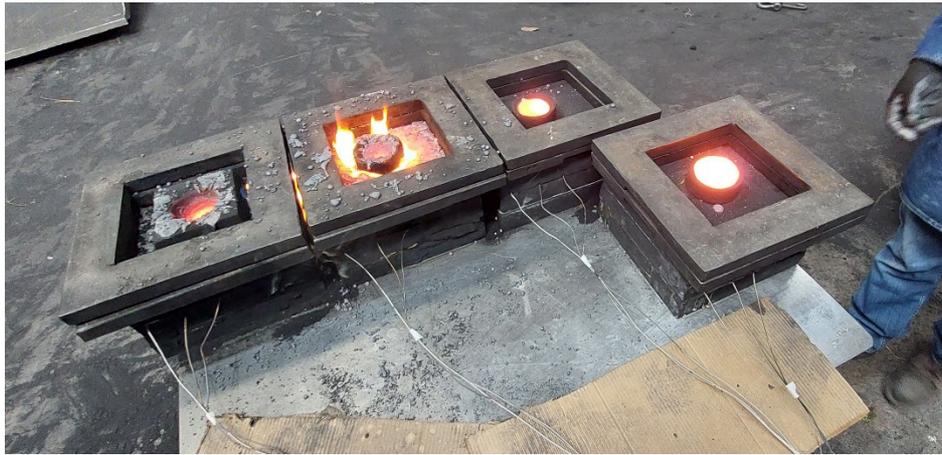
A diferencia de las investigaciones realizadas por Purwadi *et. al.* [43], Williams [59] y Yücel *et. al.* [61], en el presente proyecto se experimentó la fundición de hierro nodular con diferentes formas de mazarotas comparando el efecto de inclusión de la camisa exotérmica en estas. Para ello, se realizó el registro de temperaturas en distintos puntos como se había indicado en el esquema de la Figura 2.14c. Mediante los 12 canales de termopares se registraron más de 43200 datos los cuales fueron procesados de manera posterior a fin de obtener las respectivas curvas de enfriamiento que se pueden observar en la Figura 4.5.

Durante el proceso de vaciado del hierro nodular fundido en los moldes, se pudo observar para el caso de los moldes que presentaban la camisa exotérmica (Figura 4.1a, *primer y segundo molde de izquierda a derecha*) que al momento de realizar el vaciado se generó una reacción exotérmica instantánea por un tiempo de 3 s aproximadamente. Esta reacción pudo deberse a la interacción entre el hierro fundido con el activador exotérmico presente en las camisas (Nitrato de Potasio [KNO₃] + Aluminio [Al] + Dextrina[CH₂O]) [29], que, sumado a la forma del cuello de conexión entre la mazarota y pieza, así como los gases producto de la reacción del activador (Dióxido de Carbono [CO_{2(g)}] y Vapor de Agua [H₂O_(g)]) propiciaban aquel comportamiento durante la etapa de llenado [59, 61].

Una vez el activador completaba su reacción el proceso de vaciado proseguía sin mayor inconveniente. El comportamiento antes mencionado no se presentó en el caso de los moldes que no presentaban camisa exotérmica (Figura 4.1a , *tercer y cuarto molde de izquierda a derecha*).

De manera posterior, completado el vaciado de los moldes, se procedió a ejecutar el registro de temperaturas, y cuando se observó que las temperaturas disminuyeron aproximadamente a 800 °C se efectuó la rotura de los moldes a fin de evidenciar la solidificación del molde y el comportamiento de las camisas exotérmicas, un esquema a de lo antes mencionado puede apreciarse en la Figura 4.1b.

a)



b)



Figura 4.1. Esquema del registro de temperaturas durante el proceso de fundición. a) Ubicación de los moldes durante el colado y b) Pieza en proceso de solidificación en la que se usó una mazarota con camisa exotérmica de forma esférica, adicionalmente se aprecia el termopar en contacto con la mazarota.

Referente al comportamiento de los termopares, es importante destacar que la aleación que componen estos (Chromel/Alumel), poseen una temperatura de operación de hasta $1260\text{ }^{\circ}\text{C}$ y punto de fusión de alrededor de $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, permitiendo de esta manera registrar las altas temperaturas presentes en el experimento [52]. Durante la realización de los experimentos uno de los principales componentes que debe cuidarse son los cables de conexión, evitándose el contacto con superficies metálicas a fin de minimizar el riesgo de presentar interferencias por contacto durante la transmisión de los datos. Cabe indicar, como se aprecia en la Figura 4.1b, en el caso de los termopares que tenían contacto con la interfase entre “mazarota (o camisa) / metal fundido” se incorporó en la parte final de los termopares tipo aguja un aislante refractario a fin de reducir la transferencia de calor hacia el cable de conexión y de esta manera reducir su posible daño.

Complementariamente a las pruebas definitivas ejecutadas, se realizaron también pruebas comparativas para estimar la eficiencia de las camisas exotérmicas mediante un análisis termográfico empleándose para ello una cámara térmica marca FLUKE modelo Ti 480pro, facilitada por el laboratorio de Transferencia de Calor de la Escuela Politécnica Nacional.

Mediante este análisis como se observa en la Figura 4.2, se registraron las temperaturas de dos mazarotas de forma cilíndrica, una convencional y la otra con camisa exotérmica en diferentes intervalos de tiempo. Como se puede apreciar desde la Figura 4.2a hasta a Figura 4.2c la temperatura en la mazarota con camisa exotérmica retiene el calor por más tiempo en comparación con la mazarota que no tiene camisa, evidenciándose así un enfriamiento más lento para la mazarota con camisa exotérmica. Un hecho interesante a notar es que como se aprecia en las imágenes, la mazarota con camisa exotérmica presenta una temperatura casi constante en su cara exterior (interfase “mazarota (o camisa) / molde”), mostrando de esta manera un comportamiento aislante luego de que se genera la reacción exotérmica. Este hecho particular, puede deberse a la Alúmina que es formada por la reacción termítica y que forma parte de los productos de la reacción de la camisa [22, 34-36, 40, 61].

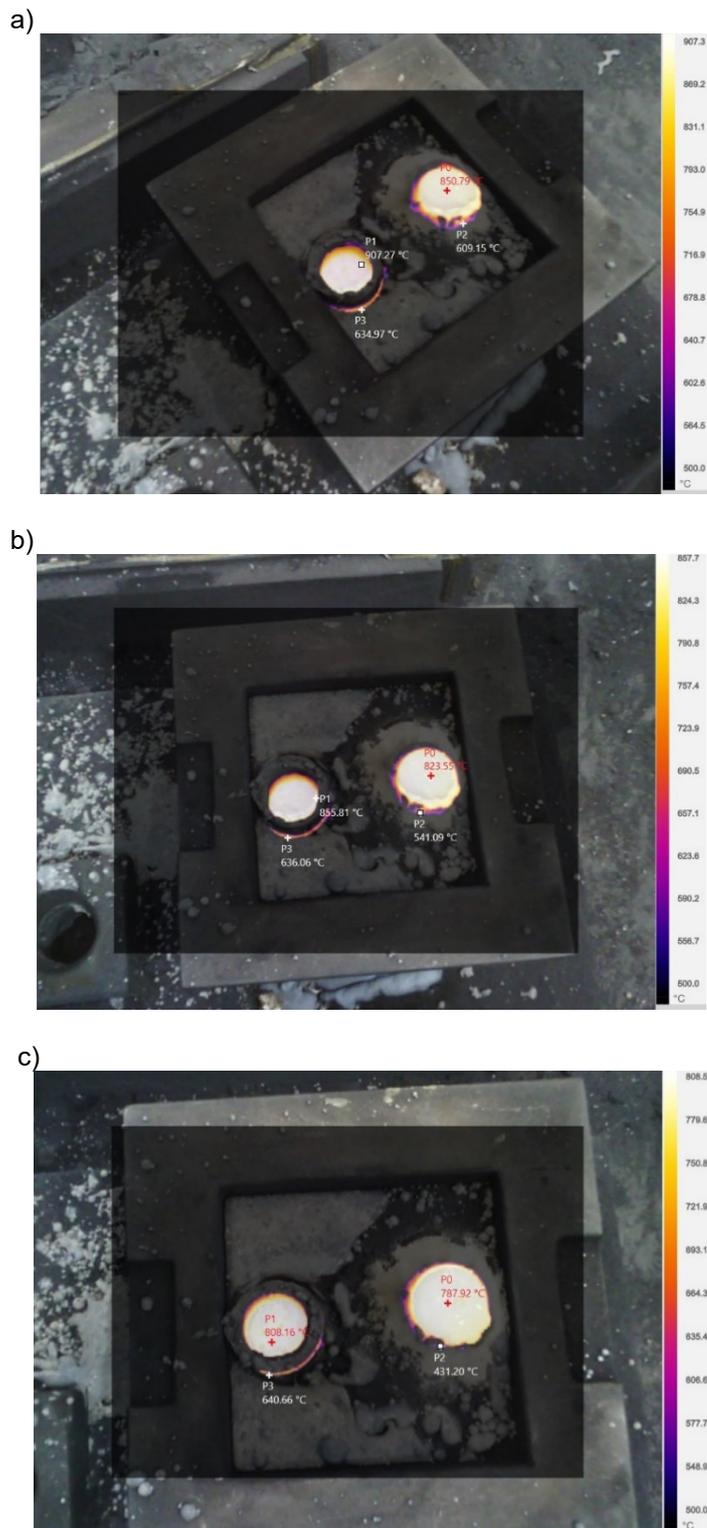


Figura 4.2. Análisis termográficos comparativos de mazarotas con camisa (izquierda) y sin camisa (derecha) para diferentes intervalos de tiempo. a) 10 minutos después de fundir, b) 20 minutos después de fundir y c) 30 minutos después de fundir. Las temperaturas mostradas para este caso se muestran en °C.

En lo que respecta al estudio del desempeño y comportamiento de la mazarota en la Figura 4.3 se pueden apreciar los cortes transversales de las mazarotas elaboradas.

Adicionalmente, se muestran los resultados concernientes a porosidades y rechupes, obtenidos mediante las simulaciones; esto con el fin de poder observar la concordancia entre lo predicho por los modelos computacionales y los experimentos.

Es así como, en lo que respecta a las mazarotas convencionales, las porosidades a nivel experimental se localizan en los puntos donde las simulaciones prevén la formación de estas. En lo referente a la contracción por rechupe, en las imágenes ubicadas en la parte inferior derecha se aprecia un acuerdo entre la simulación numérica y el resultado experimental. Un hecho interesante que puede apreciarse es que, para el caso de las mazarotas con camisa exotérmica, el volumen de material que ha quedado en la mazarota se observa reducido.

En lo que respecta a desempeño de la camisa exotérmica, se puede apreciar que la mazarota de tipo esférica es la que mejor resultado muestra debido a que presenta un menor volumen con relación a la mazarota tipo cilíndrica, siendo esto un indicio de la cantidad de material que ha sido alimentado a la pieza. En el caso de las mazarotas convencionales (Figura 4.3a y Figura 4.3.b), puede verse que la mazarota de tipo cilíndrica aparentemente muestra un mejor desempeño por su margen de seguridad del alimentador (FSM, *por sus siglas en inglés*) conforme se indica en la normativa India [7] por encima del nivel de entrada que alimenta a la pieza, no así la mazarota de tipo esférica.

Por otra parte, para el caso de las mazarotas con camisa exotérmica (Figura 4.3c y Figura 4.3.d), la mazarota de tipo esférica es la que de manera aparente muestra un mejor desempeño conforme su FSM en comparación con la mazarota de tipo cilíndrica; referente a esta última, es importante destacar que durante el proceso de fundición no se empleó una tapa lo cual pudo haber propiciado este tipo de comportamiento.

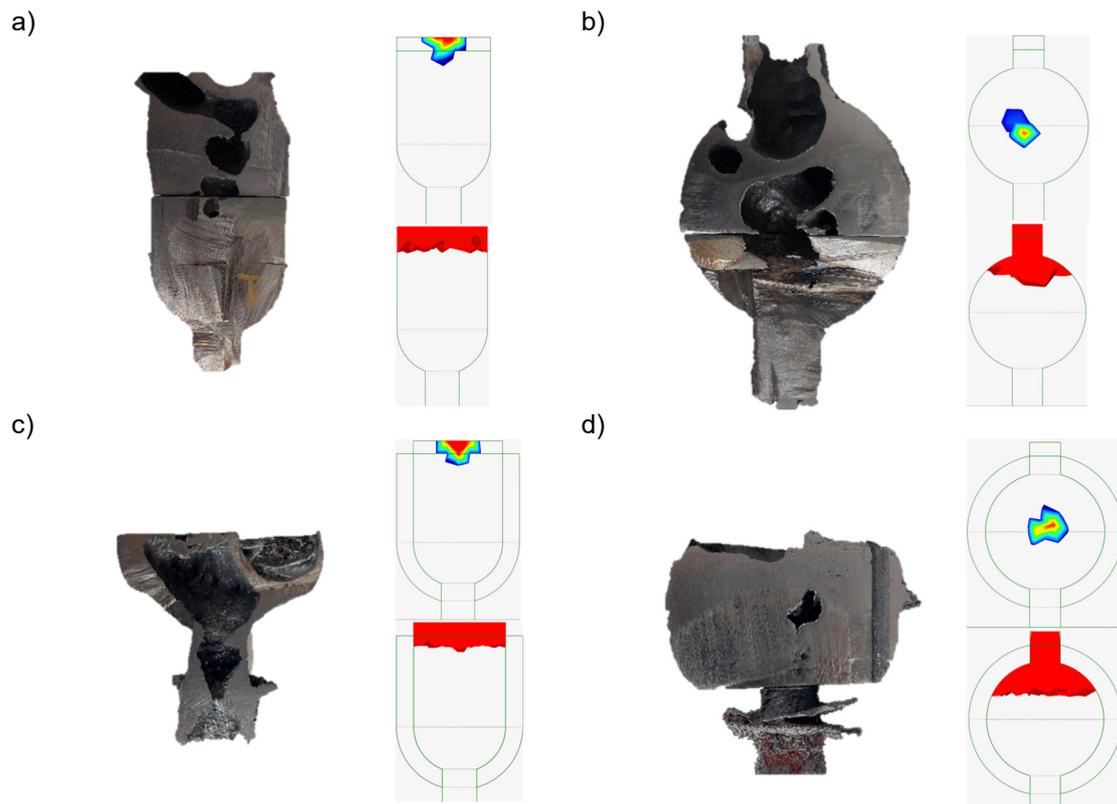


Figura 4.3. Vista de la sección transversal de la distribución de poros en las mazarotas experimentales y simuladas (esquina superior derecha) y del volumen total de contracción (esquina inferior derecha). a) Mazarota cilíndrica sin camisa, b) Mazarota esférica sin camisa, c) Mazarota cilíndrica con camisa y d) Mazarota esférica con camisa.

4.2. Resultados parte numérico-computacional

Respecto a la parte numérica-computacional, luego de efectuar varias simulaciones en las que se estudia el tamaño y la forma, se puede observar que las mazarotas de tipo cilíndrica y esférica convencionales tienen porcentajes de porosidad altos como se indica en la Tabla 4.1, que si se observa la Figura 4.3 es consistente con lo evidenciado a nivel experimental. Por otro lado, analizando el criterio de Niyama [1, 10, 22, 28, 41, 42, 54], mismo que relaciona el gradiente de temperatura con la velocidad de enfriamiento para el punto analizado, se puede apreciar que la mazarota con camisa exotérmica de tipo esférica con un 60 % del volumen inicial, se encuentra dentro de los rangos aceptables para reducir los defectos que se pudiesen presentar en la pieza [1]. Si bien a nivel experimental se puede apreciar en la Figura 4.3c que la mazarota cilíndrica con camisa exotérmica fue la que mayor volumen disminuyó notando de esta manera su mayor contribución hacia la pieza, se debe considerar que su FSM es inferior al mínimo determinado mediante la normativa India [7]; por tal motivo, evidenciando que el FSM de la mazarota esférica con camisa exotérmica cumple con el mínimo (Figura

4.3d), puede considerarse a esta como la alternativa más idónea a nivel experimental. Lo antes mencionado puede contrastarse con base en los volúmenes de porosidades expresados en porcentaje respecto al volumen total de la mazarota, mostrados en la Tabla 4.2.

Tabla 4.1. Análisis comparativos de porosidad, microporosidad y Niyama.

Elemento	Porosidad %	Microporosidad %	Niyama
Convencional – 100 %			
Cilíndrica	0.00	0.03	1.23
Esférica	52.40	0.18	0.42
Exotérmica – 100 %			
Cilíndrica	0.00	0.03	1.06
Esférica	0.00	0.04	1.14
Convencional – 60 %			
Cilíndrica	0.00	0.02	1.28
Esférica	1.25	0.07	0.71
Exotérmica – 60 %			
Cilíndrica	0.00	0.08	0.65
Esférica	8.60	0.24	0.37

Tabla 4.2. Análisis comparativos de porosidad experimental.

Porosidad (Experimental)	
Cilíndrica %	Esférica %
Convencional – 100 %	
28.26	36.52
Exotérmica – 100 %	
71.89	45.85

En la Figura 4.4 se muestran los resultados referentes a temperatura inicial, temperatura final y tiempo de solidificación, si bien las mazarotas con camisa exotérmica presentan un mejor desempeño tanto para las de volumen normal como aquellas reducidas al 60 % del volumen, hay que tener en cuenta el factor económico, y costos dentro de los procesos de fundición [11, 14], por consiguiente observando la Figura 4.4b, Figura 4.4d y Figura 4.4f, se puede ver que la mazarota esférica con camisa exotérmica y con reducción al 60 % del volumen permite mantener el calor de manera similar a usar la mazarota con un volumen normal pero con una reducción en la cantidad de material

usado, por tal motivo esta es la mejor alternativa con base en estos parámetros. Cabe indicar que las temperaturas de la pieza a las que se hace referencia en la Figura 4.4, fueron registradas en un punto ubicado en el centroide de esta.

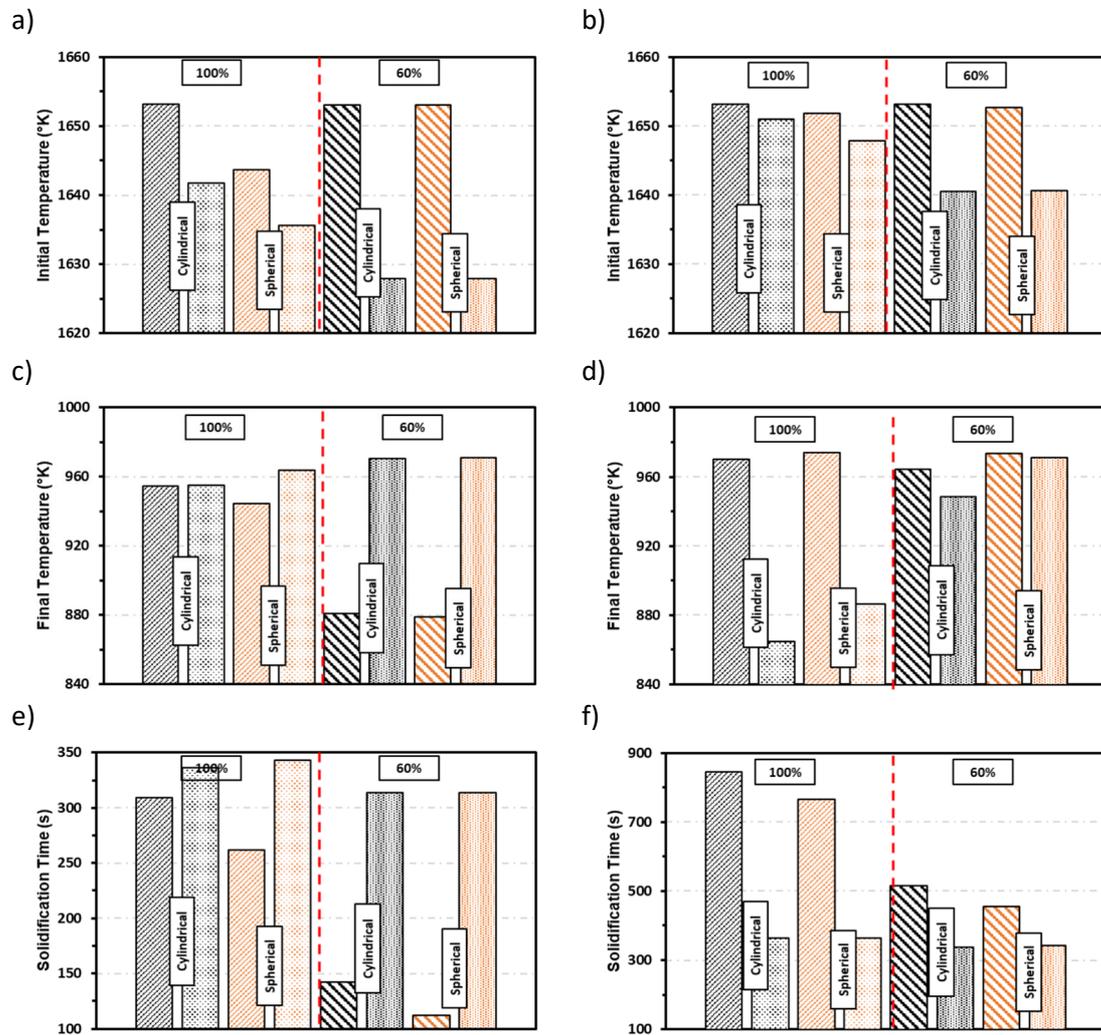


Figura 4.4. Resultados de las simulaciones de la influencia del tamaño y forma para las mazarotas (sombreado) y piezas (punteado) estudiadas. a) Temperatura inicial de solidificación para mazarotas convencionales, b) Temperatura inicial de solidificación para mazarotas con camisa exotérmica, c) Temperatura final de solidificación para mazarotas convencionales, d) Temperatura final de solidificación para mazarotas con camisa exotérmica, e) Tiempo final de solidificación para mazarotas convencionales y f) Tiempo final de solidificación para mazarotas con camisa exotérmica.

Analizando aún más sobre el efecto de la variación del tamaño en las mazarotas, las curvas de enfriamiento mostradas en la Figura 4.5a permiten apreciar de mejor manera como el cambio en el tamaño de las diferentes formas estudiadas influencia la temperatura y el tiempo de solidificación. Se aprecia también, que la reducción en el

tamaño sin analizar una forma adecuada podría no aportar el calor suficiente para mantener la temperatura del metal sobre la temperatura de líquido durante el proceso de vaciado y solidificación; esto puede contrastarse de mejor manera con los datos mostrados en la Figura 4.5b, en la que se muestran los valores concernientes al área bajo las curvas de enfriamiento de la Figura 4.5a.

De ambas gráficas se puede establecer que el reducir el tamaño de la mazarota de un volumen inicial de 100 % a un volumen del 60 %, cuando no se emplean camisas exotérmicas y considerando la variación de la temperatura en función del tiempo cuando la temperatura se encuentra sobre el límite de líquido, los valores de áreas bajo la curva de las mazarotas son mayores cuando se tiene un volumen del 100 %. Por otra parte, cuando se emplean mazarotas exotérmicas, se puede observar que el reducir el tamaño de la mazarota de un volumen inicial de 100 % a un volumen del 60 %, cuando se emplean camisas exotérmicas y considerando la variación de la temperatura en función del tiempo cuando la temperatura se encuentra sobre el límite de líquido, los valores de áreas bajo la curva de las mazarotas también son mayores cuando se tiene un volumen del 100 %. No obstante, para este último caso, si se comparan los incrementos en los valores respecto al uso y no uso de camisas exotérmicas, se puede evidenciar que para las mazarotas reducidas a un volumen de 60 % del inicial, al incorporárseles una camisa exotérmica, el valor del área se incrementa hasta en cuatro veces, y respecto a un volumen de mazarota del 100 % sin camisa hasta en aproximadamente dos veces el valor del área; con lo cual se puede notar efectivamente que el uso de una camisa exotérmica favorece al comportamiento térmico en la mazarota.

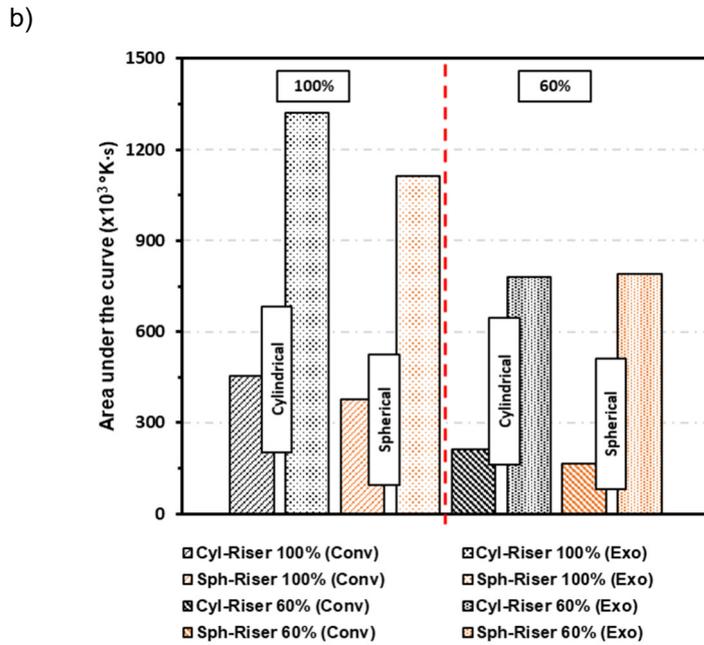
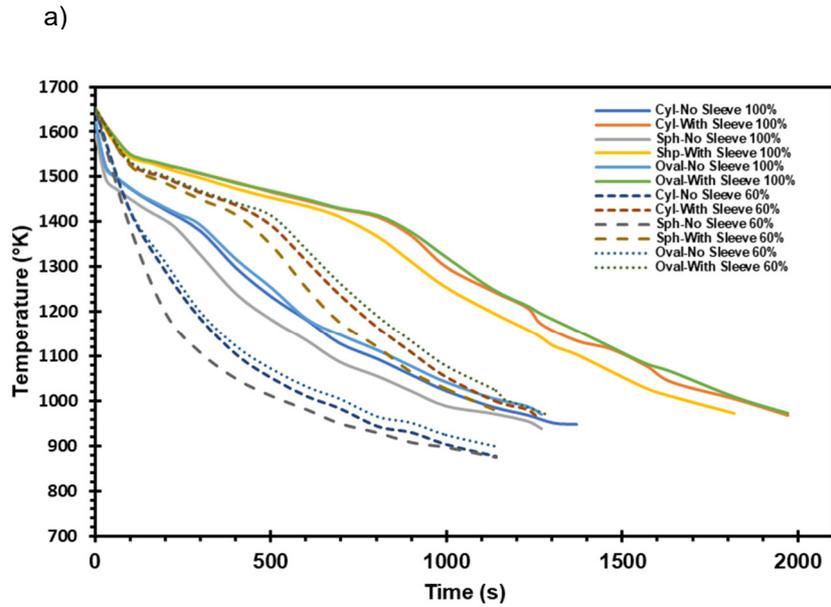


Figura 4.5. Análisis termográfico comparativos de mazarotas con camisa (izquierda) y sin camisa (Derecha) para diferentes intervalos de tiempo. a) 10 minutos después de fundir, b) 20 minutos después de fundir y c) 30 minutos después de fundir. Las temperaturas mostradas para este caso se muestran en °C.

4.3. Comparación de modelos numéricos vs. experimentales

Con relación a la comparación entre los resultados obtenidos mediante el proceso experimental y los obtenidos por medio de las simulaciones (Figura 4.6) puede observarse que las curvas de presentan tendencias similares pero el ajuste y acople de las curvas no es coincidente en casi toda su extensión.

Considerando la ubicación de los puntos de los termopares (Figura 3.1d), cabe recordar que el punto 1 se encuentra en contacto directo con la camisa exotérmica y el metal fundido, mientras los puntos 2 y 3 se encuentran en el molde. Es así que, observando la tendencia de las curvas registradas por los termopares de los puntos 2 y 3 se puede apreciar que para todos los casos, la transferencia de calor desde un tiempo $t = 0$ segundos hasta aproximadamente $t = 300$ segundos, el calor se transfiere mucho más lento en comparación a la transferencia que se puede apreciar mediante el proceso de simulación, dando a notar que el coeficiente de transferencia de calor y calor específico para la arena que conforma el molde, es menor al provisto por el software para el material analizado.

Por otro lado, si se analizan los valores registrados por el punto 1 se puede ver que en el caso de la Figura 4.6a la temperatura registrada por el termopar a lo largo del tiempo en la parte experimental, es menor que aquella registrada mediante la simulación; para el caso de las Figuras 4.6b a 4.6c, igualmente la temperatura registrada por el termopar a lo largo del tiempo en la parte experimental, es menor que la registrada mediante la simulación pero en un intervalo de tiempo $t = 0$ segundos hasta aproximadamente $t = 1000$ segundos. El comportamiento de las curvas de enfriamiento obtenidas durante el desarrollo de la parte experimental, aun cuando no son completamente idénticas a las curvas obtenidas mediante las simulaciones, son semejantes y pueden ser comparables. Cabe destacar que en el desarrollo de la parte experimental, existen incontables variables adicionales que no son consideradas al realizar los análisis numéricos-computacionales como son el reemplazo de fluidos (aire – metal) en la cavidad del molde, la variación en ciertos sectores, de la densidad de la arena del molde producto de la compactación para conformación del mismo, proceso de vaciado, capacidad de respuesta de los termopares ante cambios rápidos de velocidad, entre otros; y son estos factores los que posiblemente pueden generar el comportamiento observado y registrado a nivel experimental.

Analizando específicamente el caso de la arena de moldeo, observando el comportamiento de las lecturas en los puntos 2 y 3 tanto para la parte experimental como modelamiento computacional, en investigaciones como las realizadas por Zych *et. al.* [54] concluyen que esa reducción en los valores de conductividad puede estar relacionada con la pirólisis de la mezcla y el calor emitido, lo cual disturba y ralentiza el flujo del calor desde la fundición al interior del molde; lo cual pudo contrastarse en la presente investigación. Otra observación importante para notar y que puede ser uno de

los factores que propician esta ralentización es el reuso descontrolado de la arena de moldeo, futuras investigaciones podrían indagar en los cambios de los coeficientes térmicos conforme se genera la degradación de la arena por el constante uso y de esta manera determinar el tiempo de vida adecuado para este tipo de proceso a escala industrial.

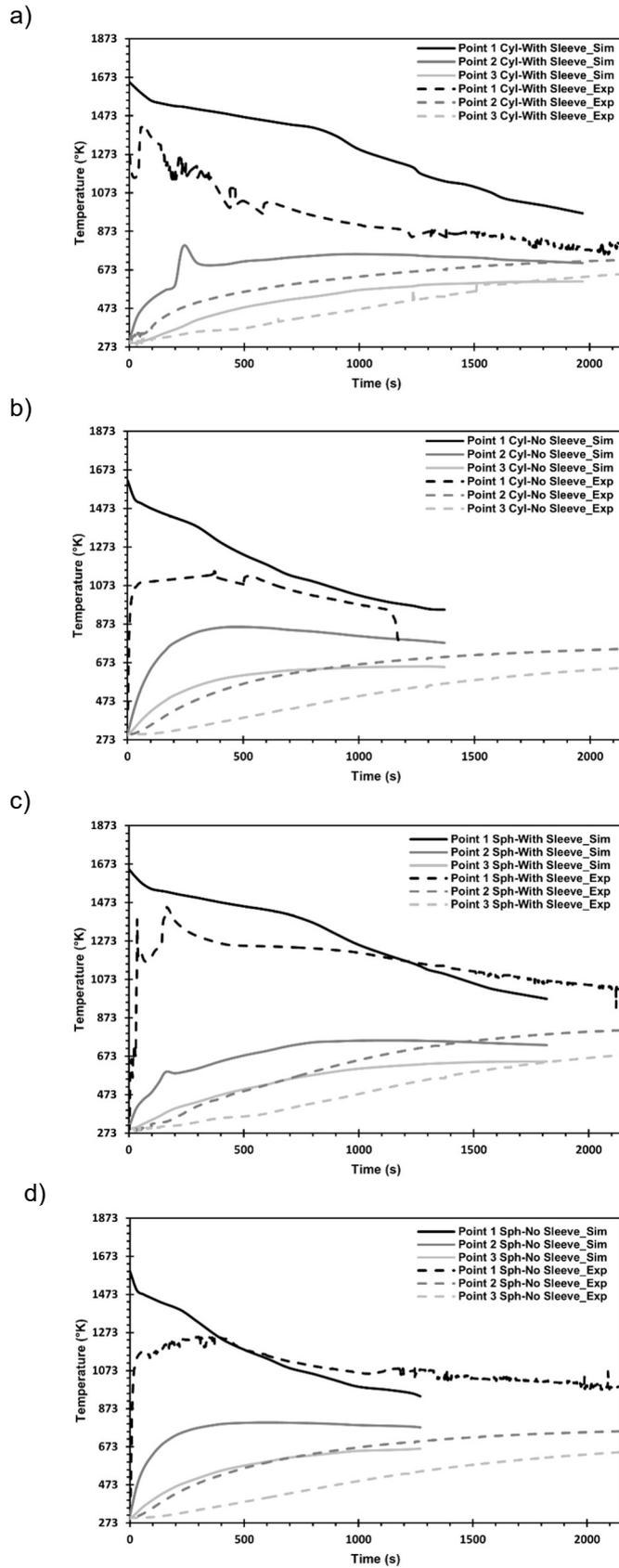


Figura 4.6. Análisis comparativo entre resultados experimentales y simulaciones para mazarotas de forma cilíndrica y esférica. a) Mazarota cilíndrica con camisa exotérmica, b) Mazarota cilíndrica sin camisa exotérmica, c) Mazarota esférica con camisa exotérmica y d) Mazarota esférica sin camisa exotérmica.

Sobre las reacciones termíticas, si bien la variación en sus composiciones depende mucho del fabricante, en el presente trabajo, así como en el realizado por Mei *et. al.* [29] se evidencia que el punto de activación del compuesto exotérmico se encuentra de los 960 °C a 1060 °C, siendo estudiados por Mei *et. al.* [29] mediante pruebas de Análisis Térmico Diferencial (DTA, *por sus siglas en inglés*); no obstante, la temperatura máxima alcanzada difiere de resultados de otros trabajos [47, 50], debido principalmente a las características de los materiales empleados y en específico al tamaño de las partículas.

4.3.1. Propuesta de nomogramas de diseño para mazarotas con camisas exotérmicas

Con base en los diferentes resultados obtenidos mediante las simulaciones y con la finalidad de aportar métodos teórico-prácticos desde una perspectiva técnico-científica a la industria de la fundición, se han propuesto nomogramas para el diseño de mazarotas con formas cilíndricas y esféricas que emplean camisas exotérmicas. El desarrollo de estos nomogramas toma como base un análisis de diferentes relaciones, tales como la variación del volumen, tiempo de solidificación de la mazarota y su módulo, a fin de establecer correlaciones que permitan el dimensionamiento adecuado de las mazarotas.

La primera relación analizada consiste en un factor de proporcionalidad (en adelante denominado como k) que correlaciona el valor del porcentaje de reducción de una mazarota con un volumen inicial determinado, respecto a un volumen reducido y su influencia en el valor del módulo de la mazarota. El proceso de deducción analítica seguido para determinar dicho factor fue el siguiente:

Como datos de inicio se tiene que:

$$\begin{cases} 'n'_R: \text{Dato inicial} \\ 'n'_{ER}: \text{Dato reducido} \end{cases} \quad (4.1)$$

Donde 'n' corresponde al parámetro a estudiar (Ej. Volumen, área, diámetro, etc.)

Posteriormente, considerando como caso de análisis una mazarota de forma cilíndrica con una geometría como la indicada en la Tabla 2.4 donde el diámetro Φ es igual a la altura H , para una reducción k en su volumen, se tiene que:

$$\begin{aligned} V_{ER} &= k \cdot V_R & (4.2) \\ \frac{\pi \cdot (\Phi_{ER})^3}{3} &= k \cdot \frac{\pi \cdot (\Phi_R)^3}{3} \\ (\Phi_{ER})^3 &= k \cdot (\Phi_R)^3 \end{aligned}$$

Donde V_{ER} corresponde al volumen reducido, V_R al volumen inicial, Φ_{ER} al diámetro reducido y Φ_R al diámetro original. Llegándose así a obtener la expresión:

$$\Phi_{ER} = (k)^{\frac{1}{3}} \cdot \Phi_R \quad (4.3)$$

Si se sabe que el módulo (M) de la mazarota para el caso de una forma cilíndrica, viene dado por:

$$M = \frac{4}{21} \cdot \Phi \quad (4.4)$$

Entonces, la expresión que determina el valor del módulo de acuerdo con el porcentaje de reducción en su volumen en el caso de una mazarota de forma cilíndrica será:

$$M_{ER} = \frac{4}{21} \cdot (k)^{\frac{1}{3}} \cdot \Phi_R \quad (4.5)$$

El mismo procedimiento puede aplicarse para una mazarota de forma esférica cuya expresión de valor del módulo de acuerdo con el porcentaje de reducción en su volumen, será:

$$M_{ER} = \frac{1}{6} \cdot (k)^{\frac{1}{3}} \cdot \Phi_R \quad (4.6)$$

Es así, como con la ecuación 4.5 y ecuación 4.6, aplicando diferentes valores a k en el intervalo de [0.0, 1.0] y evaluando para diferentes diámetros entre 2 cm a 10 cm, fueron construidas las gráficas M_{ER} vs k para las mazarotas de forma cilíndrica (Figura 4.7 *imagen superior*) y forma esférica (Figura 4.8 *imagen superior*).

La segunda relación analizada es la referente al tiempo en el cual la mazarota tarda en llegar a la temperatura de líquido, el valor k para un intervalo de [0.3, 1.0] y valores de espesor de la camisa exotérmica de 0 cm, 0.5 cm y 1.0 cm, cuyas gráficas t vs k fueron construidas para las mazarotas de forma cilíndrica (Figura 4.7 *imagen inferior*) y forma esférica (Figura 4.8 *imagen inferior*). Algo importante a destacar es que, analizando los valores de porosidades y rechupes de las diferentes simulaciones se determinó una zona (área de color gris) en la cual existe una alta probabilidad de que se presenten imperfecciones en la pieza fundida.

De esta manera correlacionando las gráficas M_{ER} vs k y t vs k se obtienen los nomogramas de diseño para mazarotas exotérmicas de formas cilíndricas y esféricas. Cabe indicar que, en dichas gráficas de ser requeridos valores intermedios, estos pueden ser interpolados entre las curvas de referencia.

El modo de empleo del nomograma y los pasos para la obtención de los parámetros de diseño geométrico de las mazarotas es el siguiente:

1. En las gráficas t vs k se determina el punto de intersección de acuerdo con el espesor de la camisa exotérmica a emplear, el tiempo, y el k de reducción de volumen.
2. Una vez determinado el valor, se proyecta verticalmente una línea hacia la gráfica M_{ER} vs k y dependiendo del diámetro inicial elegido, se proyecta una línea horizontal hacia el eje M_{ER} donde se determinará el valor del módulo que será empleado en cualquiera de las ecuaciones 4.5 o 4.6 para la determinación del diámetro de la mazarota.

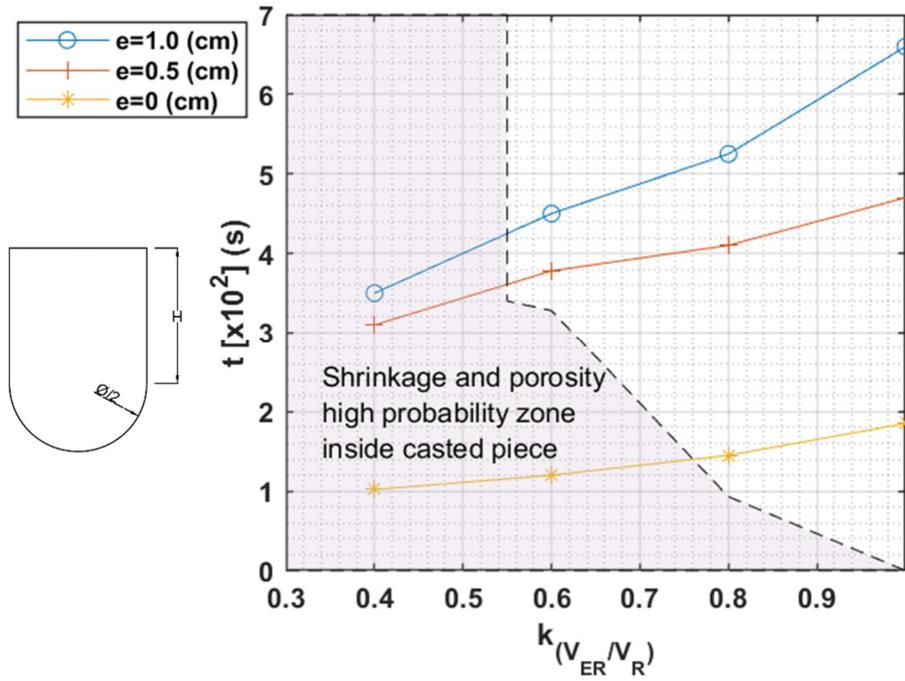
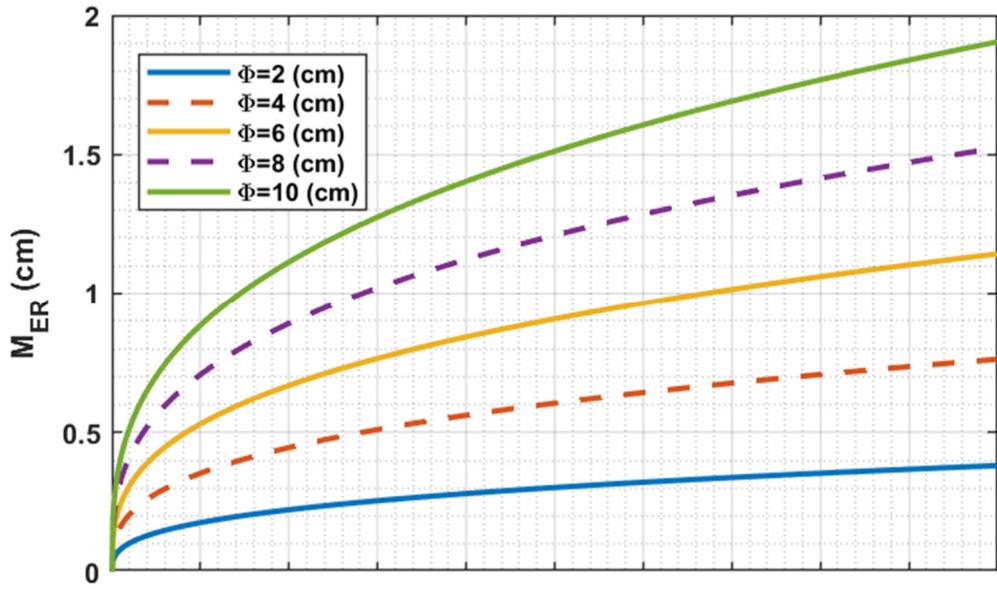


Figura 4.7. Nomograma de diseño para mazarotas de forma cilíndrica con camisa exotérmica.

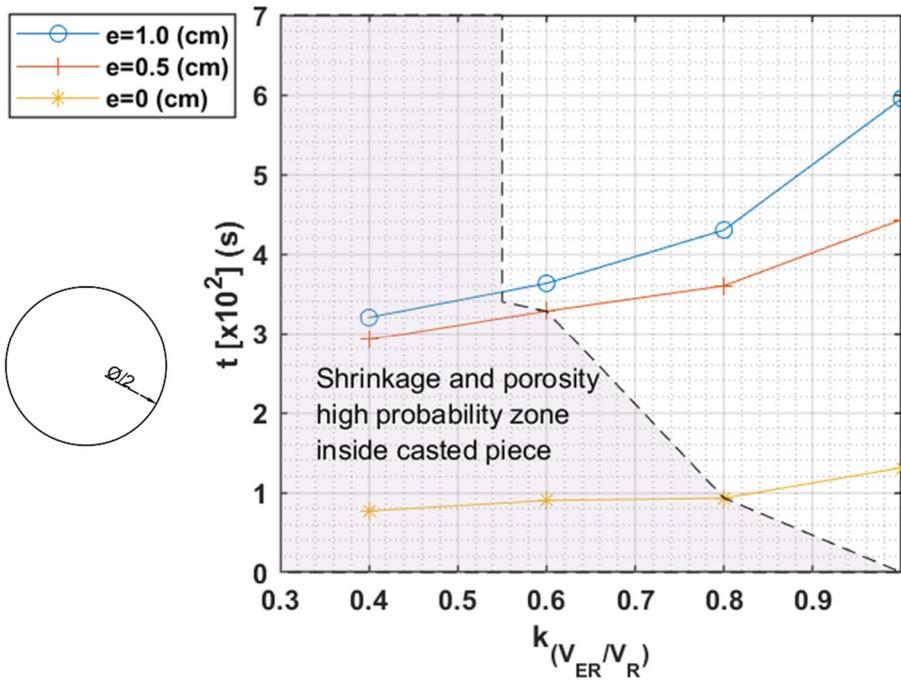
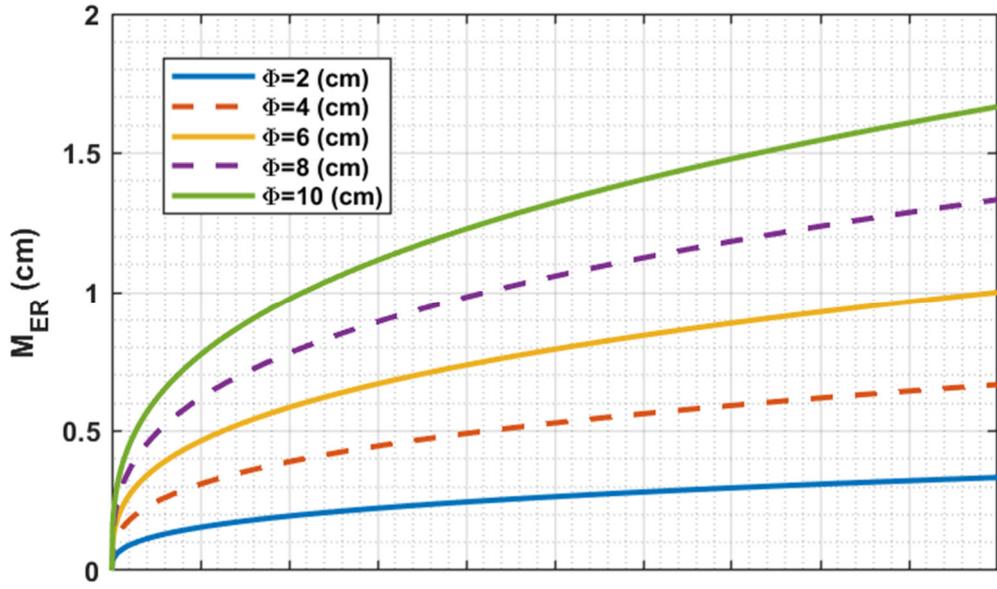


Figura 4.8. Nomograma de diseño para mazarotas de forma esférica con camisa exotérmica.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

De manera general se puede concluir que efectivamente, la variación en el tamaño y la forma de la mazarota, así como la inclusión o no de una camisa exotérmica, modifican sus parámetros dependientes del tiempo. A nivel experimental se verificó que el uso de camisas exotérmicas favorece a la retención de calor dentro de la mazarota, permitiendo de esta manera extender el tiempo en que el hierro se encuentra sobre el límite de líquidus y así reducir las imperfecciones en la pieza a ser fundida.

Con base en los resultados de la Tabla 4.1, Figura 4.3 y Figura 4.5b, al reducir el volumen de las mazarotas con camisa exotérmica al 60 %, la que mejor desempeño con respecto al análisis del área bajo la curva vs. tiempo presenta, es la mazarota de forma esférica. Por otro lado, de lo que se observa en la Figura 4.5a, el punto de activación ocurre mucho más rápido en la camisa con forma cilíndrica que en la de forma esférica; no obstante, la mazarota con camisa exotérmica de forma esférica es la que presenta el menor decaimiento en la temperatura de la mazarota en relación con la mazarota con camisa exotérmica de forma cilíndrica. Además, respecto a la porosidad y rechupe producido en las mazarotas, en la Figura 4.3 se puede apreciar que la simulación muestra una estimación muy aproximada de los lugares donde la parte presenta defectos.

En la Figura 4.5b, que compara el área bajo la curva, muestra que incluso cuando el tamaño de la mazarota es reducido al 60 % del volumen inicial, el área bajo la curva durante el proceso de solidificación es mayor hasta en un 68 % comparado al uso de mazarotas convencionales (sin camisa exotérmica) con un volumen inicial del 100 %. No obstante, se observa también que para un volumen inicial del 100 %, la mazarota con camisa exotérmica de forma cilíndrica es la que mejor área muestra; sin embargo, cuando el volumen es reducido, la mazarota con camisa exotérmica de forma esférica es la que mejor área evidencia.

El uso de parámetros físicos y térmicos adecuados como el calor específico, coeficientes de conductividad térmica en la simulación ha capturado satisfactoriamente el comportamiento general de la evolución de temperatura experimental en los tres puntos estudiados en la mazarota. Las pequeñas diferencias observadas, pueden ser atribuidas a las variaciones reales en los experimentos, que no se pueden controlar

completamente, como son los coeficientes de transferencia de calor, falta de flujo constante durante el llenado, aire atrapado entre el molde y la pieza o la heterogeneidad de la temperatura del metal líquido, como puede apreciarse en la Figura 4.6.

Con relación a los criterios de dimensionamiento de mazarotas sin camisa exotérmica analizados, se puede establecer que el segundo criterio, es el que mayor cantidad de variables considera, como es el caso de la composición del hierro nodular, porcentaje de expansión y contracción de la pieza y su tiempo de solidificación. No obstante, por velocidad de cálculo y determinación práctica de parámetros de dimensionamiento el primer criterio puede resultar mucho más útil.

Los nomogramas para el dimensionamiento de mazarotas con formas cilíndricas y esféricas que además usan camisa exotérmica, apreciables en la Figura 4.7 y Figura 4.8, presentan una alternativa para el diseño de éstas, promoviendo además su uso en procesos de fundición de hierro nodular y favoreciendo de esta manera en el ahorro de tiempo y recursos.

5.2. Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos en el presente trabajo se recomienda que en futuros proyectos se evalúen a nivel experimental las propiedades físicas y térmicas como los coeficientes transferencia de calor, calor específico, entre otros, de las diferentes partes que conforman el sistema de fundición. Debe tenerse en cuenta, el control de calidad durante la elaboración de los materiales y partes a fin de generar la mayor similitud entre experimentos y favorecer la repetibilidad de estos en futuros trabajos.

En lo que respecta al desarrollo de simulaciones numéricas-computacionales de procesos de fundición, a fin de que los parámetros físicos-térmicos empleados satisfagan el modelo y se generen resultados similares a los experimentales, se recomienda emplear las propiedades y coeficientes determinados a nivel experimental.

Sería adecuado también el realizar futuros estudios enfocados en la determinación de posibles alternativas para activadores-iniciadores de la reacción de la camisa exotérmica. Si bien en el presente estudio se indicado una posible alternativa, sería idóneo el evaluar nuevas formas de generar la activación de la reacción termítica.

En futuros proyectos se recomienda analizar al molde como un medio poroso ya que al ser un medio granular, posee gran cantidad de espacios vacíos que intervienen en sus propiedades físico-térmicas, propiciando de esta manera a no obtener resultados que representan completamente la realidad del proceso de fundición.

Bibliografía

- [1] AFS Molding Methods and Materials Division, & Thomas, S. (2020). *Mold & Core Test Handbook (Fifth Ed.)*. American Foundry Society.
- [2] ASM International. (2005). *ASM Handbook*. Ohio: ASM International.
- [3] ASTM International. (2014). *A536-84: Standard Specification for Ductile Iron Castings*. Pennsylvania: ASTM International.
- [4] Ahmad, N. (2015). *Riser Feeding Evaluation Method for Metal Castings Using Numerical Analysis (Tesis Doctoral)*. The Ohio State University.
- [5] Baviskar, L. & Maurya, R. S. (2019). Numerical Investigation of Transient Solidification Behavior of Cast with and without Feeding Aids. *International Journal of Mechanics and Thermodynamics*, 10(1), 1–14.
- [6] Brown, J. R. (Ed.). (2000). Chapter 19 - Feeding of castings. In *Foseco Ferrous Foundryman's Handbook (Eleventh Edition)* (Eleventh Edition, pp. 296–II). Butterworth-Heinemann. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-075064284-2/50020-X](https://doi.org/10.1016/B978-075064284-2/50020-X)
- [7] Bureau of Indian Standards. (2009). *IS 15865:2009 Indian Standard Exothermic and Insulating Sleeves for Use in Foundries – Specification*. Foundry and Steel Castings Sectional Committee, MTD 14.
- [8] Butterworth-Heinemann. (1999). *Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook*. Elsevier Ltd. All.
- [9] Cai, Z., & Zhu, M. (2014). Non-uniform heat transfer behavior during shell solidification in a wide and thick slab continuous casting mold. *Int J Miner Metall Mater* 21, 240–250. <https://doi.org/10.1007/s12613-014-0901-1>
- [10] Carlson, K., & Beckermann, C. (2001) "Use of the Niyama Criterion to Predict Shrinkage-Related Leaks in High-Nickel Steel and Nickel-Based Alloy Castings", in *Proceedings of the 62nd SFSA Technical and Operating Conference*, Paper No. 5.6, Steel Founders' Society of America. https://user.engineering.uiowa.edu/~becker/documents.dir/SFSA/2008-5.6_NiLeakers.pdf
- [11] Chougule, R. G., & Ravi, B. (2006). Casting cost estimation in an integrated product and process design environment. In *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 19(7). <https://doi.org/10.1080/09511920500324605>
- [12] Ciobanu, I., Munteanu, S., Crisan, A., Bedo, T., & Monescu, V. (2014). Riser Analysis Using Casting Simulation Techniques during Solidification. *Inter Metalcast* 8, 63–75. <https://doi.org/10.1007/BF03355596>.
- [13] Chvorinov, N. (1940). *Theory of Casting Solidification*. Giesserei, 17.
- [14] Coatanéa, E., Makkonen, P., Tanja, S., & Castellón-Solano, M. O. (2006). Cost modeling analysis in sand casting foundry. In *Proceedings of NordDesign 2006 Conference*. 353-362.

- [15] Das, S. (2021). Learn Casting and Solidification with Altair Inspire Cast. Altair University
- [16] DeGarmo, E. P., Black, J. T., & Kohser, R. A. (2008). Materials and processes in Manufacturing, 10th Edition, John Wiley & Sons.
- [17] Delvasto, P. (2004). Determinación del calor latente de fusión en hierros fundidos a diferentes velocidades de enfriamiento (Tesis de Maestría). Universidad Simón Bolívar.
- [18] Fernández, S. (2020). Diseño de Experimentos: Diseño Factorial. Universitat Politècnica de Catalunya, Escola d'Enginyeria de Barcelona Est.
- [19] Fischer, S. A., Horvath, L. R., Showman, R. E., & Skerdi, U. (2012). The Evolution of High-Performance Feeding Aids to Improve Casting Quality. Technical Article, American Foundry Society. ASK Chemicals L. P., Dublin, Ohio, USA.
- [20] Goldschmit, M., Ferro, S., & Coppola, A. (2004). Modeling of liquid steel flow with free surface. Progress in Computational Fluid Dynamics, 4(1), 12-19. <https://doi.org/10.1504/PCFD.2004.003782>
- [21] Gueijman, S. F., Candia, A. E., Barbaro, A. J., & Ares, A. E. (2010). Análisis de las estructuras y de los parámetros térmicos durante la solidificación direccional horizontal de aleaciones Zn-Al hipereutécticas. IBEROMET XIX CONAMET/SAM. http://iberomet2010.260mb.com/pdfcongreso/t2/T2_08_ares-ae_n2.pdf
- [22] Hardin, R. A., Williams T. J., & Beckermann C. (2013). Riser Sleeve Properties for Steel Castings and the Effect of Sleeve Type on Casting Yield. Proceedings of the 67th SFSA Technical and Operating Conference. Paper No. 5.2. <https://user.engineering.uiowa.edu/~becker/documents.dir/SFSA/2013-5.2%20Riser%20Sleeve.pdf>
- [23] Henderieckx, S. (2004). Calculation Risers Ductile Iron. GIETECH BV.
- [24] Henderieckx, S. (2006). Ferrous Alloys -Ductile Iron- Groups of irons. GIETECH BV.
- [25] Hryb, D., Cardozo, M., Ferro, S. & Goldschmit, M. (2009). Particle transport in turbulent flow using both Lagrangian and Eulerian formulations. International Communications in Heat and Mass Transfer, 36(5), 451-457. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.01.017>
- [26] Imafuku, I., & Chijiwa, K. (1983). A Mathematica Model for Shrinkage Cavity Prediction in Steel Castings. AFS Transactions, American Foundry Society, 91, 527-540.
- [27] International Organization for Standardization. (2019). Microstructure of cast irons Part 1: Graphite classification by visual analysis (ISO 945-1:2019). <https://www.iso.org/standard/77568.html>

- [28] Islas, A., & Guillén, G. (2015). Propiedades Termo-físicas de la arena para fundición. Fundidores: fundiciones férreas y no férreas en arena, coquilla y fundición a presión, (221), 13–17. <http://www.metalspain.com/FUNDIDORES-12-2015.pdf>
- [29] Junghare, S., Kumari, S., Chaudhary, A., Kumar, R., & Rayalu, S. (2022). Thermite reaction driven pyrotechnic formulation with promising functional performance and reduced emissions. *Journal of Hazardous Materials*, 424(B), 127345. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127345>
- [30] Krajewski, P. K., Piwowarski, G., & Krajewski, W. K. (2014). Determining Temperature Dependencies of Sand Mould Thermal Properties. *Materials Science Forum*, 790–791, 452–457. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.790-791.452>
- [31] Kumar Mohanty, U., & Sarangi, H. (2021). Solidification of Metals and Alloys. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94393>
- [32] Lewis, R.W., Postek, E.W., Han, Z. & Gethin, D.T. (2006). "A finite element model of the squeeze casting process", *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 16(5), 539–572. <https://doi.org/10.1108/09615530610669102>
- [33] Liovic, P., Liow, J-L., & Rudman, M. (2001). A Volume of Fluid (VOF) Method for the Simulation of Metallurgical Flows. *ISIJ International*, 41(3), 225-233. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.225>
- [34] Mei, J. Haldearn, R. D., & Xiao, P. (1999). Mechanisms of the Aluminium-Iron Oxide Thermite Reaction. *Scripta Materialia*, 41(5), 541–548. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(99\)00148-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(99)00148-7)
- [35] Menon, P. (2000). Sleeves, Their Preparation, And Use (Patent No. US 6,133,340). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US6133340A/en>
- [36] Miki, M. (2002). Foundry Exothermic Assembly (Patent No. US 6,372,032). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US6372032B1/en>
- [37] Miyamoto, Y. & Itofuji, H. (2019). Shrinkage Analysis Considering Expansion and Contraction Behavior in Heavy Section Spheroidal Graphite Iron Castings. *MATERIALS TRANSACTIONS*, 59(10), 1578–1584. <https://doi.org/10.2320/matertrans.F-M2018833>
- [38] Mochnacki, B., & Majchrzak, E. (2010). Numerical Modeling of Casting Solidification Using Generalized Finite Difference Method. In *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications, Ltd. 638–642, 2676–2681. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.638-642.2676>
- [39] Mookum, T., & Wiwatanapataphee, B., & Wu, YH. (2010). Modeling of two-fluid flow and heat transfer with solidification in continuous steel casting process under electromagnetic force. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. 63(2). 183-195.

- [40] Neu, M., & Gough, M. (1993). Exothermic Compositions (Patent No. US 5,180,759). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US5180759A/en>
- [41] Niyama, E., Uchida, T., Morikawa, M., & Saito, S. (1982). A Method of Shrinkage Prediction and its Application to Steel Casting Practice. *AFS International Cast Metals Journal*, 7(3), 52–63.
- [42] Patel, A., & Nastac, L. (2014). Mathematical Modeling of Microshrinkage Formation During Solidification of A356 Castings. *International Journal of Metalcasting*, 8, 21–27. <https://doi.org/10.1007/BF03355568>
- [43] Purwadi, W., Idamayanti, D., Ruskandi, C., & Kamal, J. (2016). Effect of Shape Variation on Feeding Efficiency for Local Exothermic-Insulating Sleeve. *AIP Conference Proceedings* 1778, 030017. <https://doi.org/10.1063/1.4965751>
- [44] Ravi, B. (2011). *METAL CASTING: Computer-Aided Design and Analysis*. PHI Learning Private Limited, New Delhi.
- [45] Roine, A., Mansikka-aho, J., Kotiranta, T., Bjorklund, P., & Lamberg, P. (2002). Outokumpu HSC Chemistry® for Windows Chemical Reaction and Equilibrium Software with Extensive Thermochemical Database. <http://www.chemistry-software.com/pdf/HSC/full%20manual%20HSC%20Chemistry%205.pdf>
- [46] Rowan, M., Thomas, B., Pierer, R. & Bernhard, C. (2011). Measuring Mechanical Behavior of Steel During Solidification: Modeling the SSCC Test. *Metallurgical and Materials Transactions B*(42), 837–851. <https://doi.org/10.1007/s11663-010-9470-5>
- [47] Salueña, X., & Nápoles, A. (2000). *Tecnología Mecánica*. Edicions UPC.
- [48] Saraswati, T. E., Prasiwi, O. D. I., Masykur, A., Handayani, N., & Anwar, M. (2017). The Modification of Carbon with Iron Oxide Synthesized in Electrolysis Using the Arc Discharge Method. *{IOP} Conference Series: Materials Science and Engineering*, 176, 12046. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/176/1/012046>
- [49] Sotomayor, O. E., Anrango, J., & Diaz, C. (2022). Characterization of No-Bake Phenolic-Isocyanate and Furanic Binders in Different Base Metal Casting Sands. *International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering*, 12(1). <https://doi.org/10.4018/IJMMME.299042>
- [50] Shouzhu, O., Carlson, K., & Beckermann, C. (2005). Feeding and risering of high-alloy steel castings. *Metallurgical and Materials Transactions B*(36), 97–116. <https://doi.org/10.1007/s11663-005-0010-7>
- [51] Szucki, M., Suchy, J.S., Lelito, J., Malinowski, P. , & Sobczyk, J. (2017). Application of the lattice Boltzmann method for simulation of the mold filling process in the casting industry. *Heat Mass Transfer*, 53, 3421–3431. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2069-5>
- [52] Thermometrics Corporation. (04 de mayo de 2022). TYPE K THERMOCOUPLE (Chromel / Alumel)200°C to +1260°C / -328°F to +2300°F. <https://www.thermometricscorp.com/thertypk.html>

- [53] Twardowska, H., & Aufderheide, R. (2022). Exothermic Sleeve Compositions Containing Aluminum Dross (Patent No. US 6,360,808).
- [54] Val, L. (2018). Análisis de sistemas de alimentación y simulación mediante QuikCAST del proceso de fundición por gravedad de una pieza de aluminio (Tesis de Grado). Universidad de Zaragoza.
- [55] Vesuvius.com. [En línea]. Disponible en: <https://www.vesuvius.com/en/our-solutions/international/foundry/iron-foundry/feeding-systems.html>. [Consultado: 03-mar-2023]
- [56] Wang, N. (2017). Study on a New Type of Exothermic Insulating Riser. 4th International Conference on Material Engineering and Application (ICMEA). *Advances in Engineering Research*, 146, 31–36.
- [57] Wang, X. (2014). Thermal physical and mechanical properties of raw sands and sand cores for aluminum casting (Tesis de Maestría). Montanuniversität Leoben.
- [58] Wiencke, J., Lavelaine, H., Panteix, P.-J., Petitjean, C., & Rapin, C. (2018). Electrolysis of iron in a molten oxide electrolyte. *Journal of Applied Electrochemistry*. <https://doi.org/10.1007/s10800-017-1143-5>
- [59] Williams, T. J. (2016). Determination of Effective Riser Sleeve Thermophysical Properties for Simulation and Analysis of Riser Sleeve Performance (Tesis de Maestría). University of Iowa.
- [60] Wlodawer, R. (1966). Directional solidification of steel castings. Pergamon Oxford.
- [61] Yücel, O., Turan, A., & Can Candeger, K. (2018). Optimization of Exothermic Riser Sleeve Design Parameters. 9th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72138-5_35
- [62] Zeballos, P. & Flores, D. (2015). Síntesis y Caracterización de Pigmentos de Hematita Obtenidos a Partir de Cacarilla de Laminación (Tesis de Grado). Universidad Nacional de San Agustín Arequipa.
- [63] Zych, J., Mocek, J., Snopkiewicz, T., & Jamrozowicz, Ł. (2015). Thermal Conductivity of Moulding Sand with Chemical Binders, Attempts of its Increasing. *Archives of Metallurgy and Materials*. 60. 351-357. <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0058>.

ANEXOS

Anexo 1. Código – Banco de 12 Termopares con placa Arduino

Mega

```
//MEDIDOR DE TEMPERATURA CON MAX31856 y MAX6675.  
//12 CANALES, GRAFICACIÓN EN EXCEL Y LCD
```

```
//Autor: Víctor Andrés Carpio López.  
//Año: 2022
```

```
#include "Adafruit_MAX31856.h"  
#include "max6675.h"  
#include <LiquidCrystal.h>
```

```
//Se definen los pines de la pantalla  
//      RS E  D4 D5 D6 D7  
LiquidCrystal lcd(7, 6, 5, 4, 3, 2);
```

```
//Se crea una variable flotante para almacenar la temperatura.
```

```
//Para MAX31856  
float Lectura_C1=0;  
float Lectura_C2=0;  
float Lectura_C3=0;
```

```
//Para MAX6675  
float Lectura_C4=0;  
float Lectura_C5=0;  
float Lectura_C6=0;  
float Lectura_C7=0;  
float Lectura_C8=0;  
float Lectura_C9=0;  
float Lectura_C10=0;  
float Lectura_C11=0;  
float Lectura_C12=0;
```

```
//Se definen los pines a usar para conectar el modulo 1 MAX31856
```

```
int ktc1CS = 23;  
int ktc1SDI = 25;  
int ktc1SDO = 27;  
int ktc1SCK = 29;
```

```
Adafruit_MAX31856 maxthermo1(ktc1CS, ktc1SDI, ktc1SDO, ktc1SCK);
```

```
//Se definen los pines a usar para conectar el modulo 2 MAX31856
```

```
int ktc2CS = 31;  
int ktc2SDI = 33;
```

```

int ktc2SDO = 35;
int ktc2SCK = 37;
Adafruit_MAX31856 maxthermo2(ktc2CS, ktc2SDI, ktc2SDO, ktc2SCK);

//Se definen los pines a usar para conectar el modulo 3 MAX31856
int ktc3CS = 39;
int ktc3SDI = 41;
int ktc3SDO = 43;
int ktc3SCK = 11;
Adafruit_MAX31856 maxthermo3(ktc3CS, ktc3SDI, ktc3SDO, ktc3SCK);

//Se definen los pines a usar para conectar el modulo 1 MAX6675
//int ktc3SO = 39;
//int ktc3CS = 41;
//int ktc3CLK = 43;
//MAX6675 ktc3(ktc3CLK, ktc3CS, ktc3SO);

//Se definen los pines a usar para conectar el modulo 2 MAX6675
int ktc4SO = 22;
int ktc4CS = 24;
int ktc4CLK = 26;
MAX6675 ktc4(ktc4CLK, ktc4CS, ktc4SO);

//Se definen los pines a usar para conectar el modulo 3 MAX6675
int ktc5SO = 28;
int ktc5CS = 30;
int ktc5CLK = 32;
MAX6675 ktc5(ktc5CLK, ktc5CS, ktc5SO);

//Se definen los pines a usar para conectar el modulo 4 MAX6675
int ktc6SO = 34;
int ktc6CS = 36;
int ktc6CLK = 38;
MAX6675 ktc6(ktc6CLK, ktc6CS, ktc6SO);

//Se definen los pines a usar para conectar el modulo 5 MAX6675
int ktc7SO = 40;
int ktc7CS = 42;
int ktc7CLK = 44;
MAX6675 ktc7(ktc7CLK, ktc7CS, ktc7SO);

//Se definen los pines a usar para conectar el modulo 6 MAX6675
int ktc8SO = 46;
int ktc8CS = 48;
int ktc8CLK = 50;
MAX6675 ktc8(ktc8CLK, ktc8CS, ktc8SO);

//Se definen los pines a usar para conectar el modulo 7 MAX6675
int ktc9SO = 45;
int ktc9CS = 47;

```

```

int ktc9CLK = 49;
MAX6675 ktc9(ktc9CLK, ktc9CS, ktc9SO);

//Se definen los pines a usar para conectar el modulo 8 MAX6675
int ktc10SO = 8;
int ktc10CS = 9;
int ktc10CLK = 10;
MAX6675 ktc10(ktc10CLK, ktc10CS, ktc10SO);

//Se definen los pines a usar para conectar el modulo 9 MAX6675
int ktc11SO = 16;
int ktc11CS = 15;
int ktc11CLK = 14;
MAX6675 ktc11(ktc11CLK, ktc11CS, ktc11SO);

//Se definen los pines a usar para conectar el modulo 10 MAX6675
int ktc12SO = 51;
int ktc12CS = 52;
int ktc12CLK = 53;
MAX6675 ktc12(ktc12CLK, ktc12CS, ktc12SO);

void setup() {

    //Activa comunicacion serial.
    Serial.begin(115200);
    while (!Serial) delay(10);
    pinMode(12,INPUT);
    //delay(1000);

    //Establece tipo de termopar.
    maxthermo1.begin();
    maxthermo2.begin();
    maxthermo3.begin();
    maxthermo1.setThermocoupleType(MAX31856_TCTYPE_K);
    maxthermo2.setThermocoupleType(MAX31856_TCTYPE_K);
    maxthermo3.setThermocoupleType(MAX31856_TCTYPE_K);

    Serial.print("Thermocouple type: ");
    switch (maxthermo1.getThermocoupleType() ) {
        case MAX31856_TCTYPE_B: Serial.println("B Type"); break;
        case MAX31856_TCTYPE_E: Serial.println("E Type"); break;
        case MAX31856_TCTYPE_J: Serial.println("J Type"); break;
        case MAX31856_TCTYPE_K: Serial.println("K Type"); break;
        case MAX31856_TCTYPE_N: Serial.println("N Type"); break;
        case MAX31856_TCTYPE_R: Serial.println("R Type"); break;
        case MAX31856_TCTYPE_S: Serial.println("S Type"); break;
        case MAX31856_TCTYPE_T: Serial.println("T Type"); break;
        case MAX31856_VMODE_G8: Serial.println("Voltage x8 Gain mode"); break;
        case MAX31856_VMODE_G32: Serial.println("Voltage x8 Gain mode"); break;
    }
}

```

```

    default: Serial.println("Unknown"); break;
}

maxthermo1.setConversionMode(MAX31856_CONTINUOUS);
maxthermo2.setConversionMode(MAX31856_CONTINUOUS);
maxthermo3.setConversionMode(MAX31856_CONTINUOUS);

//Activa la comunicación con la pantalla.
lcd.begin(16, 4);
delay(1000);
//Muestra un mensaje inicial.
lcd.clear();
lcd.print(F(" ESCUELA"));
lcd.setCursor( 0, 1);
lcd.print(F(" POLITECNICA"));
lcd.setCursor( 0, 2);
lcd.print(F(" NACIONAL "));
lcd.setCursor( 0, 3);
delay(1000);
//Continúa nuevo mensaje.
lcd.clear();
lcd.print(F(" MAESTRIA"));
lcd.setCursor( 0, 1);
lcd.print(F(" EN"));
lcd.setCursor( 0, 2);
lcd.print(F(" MATERIALES "));
lcd.setCursor( 0, 3);
delay(1000);
//Continúa nuevo mensaje.
lcd.clear();
lcd.print(F("TERMOPAR TIPO K"));
lcd.setCursor( 0, 1);
lcd.print(F(" CON MAX31856/5 "));
lcd.setCursor( 0, 2);
lcd.print(F(" PROYECTO: "));
lcd.setCursor( 0, 3);
lcd.print(F(" EPN-PIS-20-03 "));
delay(1000);
}

void loop() {

    //Leer temperatura.
    //temperatura=ktc.readCelsius();
    //temperatura=ktc.readFahrenheit();

    //Enviar dato de temperatura por el puerto serial MAX31856.
    Lectura_C1 = maxthermo1.readThermocoupleTemperature();
    Lectura_C2 = maxthermo2.readThermocoupleTemperature();
    Lectura_C3 = maxthermo3.readThermocoupleTemperature();

```

```
//Enviar dato de temperatura por el puerto serial MAX6675.
```

```
//Lectura_C3 = ktc3.readCelsius();  
Lectura_C4 = ktc4.readCelsius();  
Lectura_C5 = ktc5.readCelsius();  
Lectura_C6 = ktc6.readCelsius();  
Lectura_C7 = ktc7.readCelsius();  
Lectura_C8 = ktc8.readCelsius();  
Lectura_C9 = ktc9.readCelsius();  
Lectura_C10 = ktc10.readCelsius();  
Lectura_C11 = ktc11.readCelsius();  
Lectura_C12 = ktc12.readCelsius();
```

```
//Enviar datos del lcd por el puerto serial MAX31856.
```

```
lcd.clear();  
lcd.print(F("--TEMPERATURA--"));  
//Temperatura 1  
lcd.setCursor(0, 1);  
lcd.print(F("T1:"));  
lcd.setCursor(4, 1);  
lcd.print(Lectura_C1);  
lcd.print((char)223); //símbolo de grados  
lcd.print("C");  
//Temperatura 2  
lcd.setCursor(0, 2);  
lcd.print(F("T2:"));  
lcd.setCursor(4, 2);  
lcd.print(Lectura_C2);  
lcd.print((char)223); //símbolo de grados  
lcd.print("C");  
//Temperatura 3  
lcd.setCursor(0, 3);  
lcd.print(F("T3:"));  
lcd.setCursor(4, 3);  
lcd.print(Lectura_C3);  
lcd.print((char)223); //símbolo de grados  
lcd.print("C");
```

```
//Imprimir la temperatura en el Terminal Serial
```

```
Serial.print(Lectura_C1);  
Serial.print(",");  
Serial.print(Lectura_C2);  
Serial.println("");  
Serial.print(Lectura_C3);  
Serial.print(",");  
Serial.print(Lectura_C4);  
Serial.print(",");  
Serial.print(Lectura_C5);  
Serial.print(",");  
Serial.print(Lectura_C6);
```

```
Serial.print(",");
Serial.print(Lectura_C7);
Serial.print(",");
Serial.print(Lectura_C8);
Serial.print(",");
Serial.print(Lectura_C9);
Serial.print(",");
Serial.print(Lectura_C10);
Serial.print(",");
Serial.print(Lectura_C11);
Serial.print(",");
Serial.print(Lectura_C12);
Serial.print(",");

//Pausa de un segundo para repetir el proceso
delay(1000);

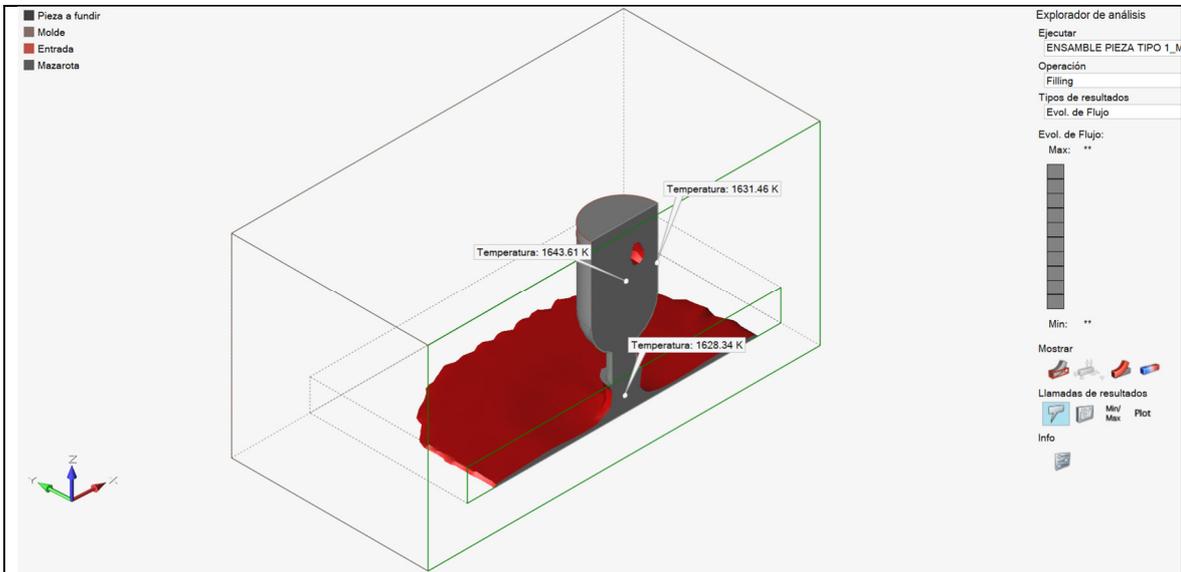
}
```

Anexo 2. Simulaciones

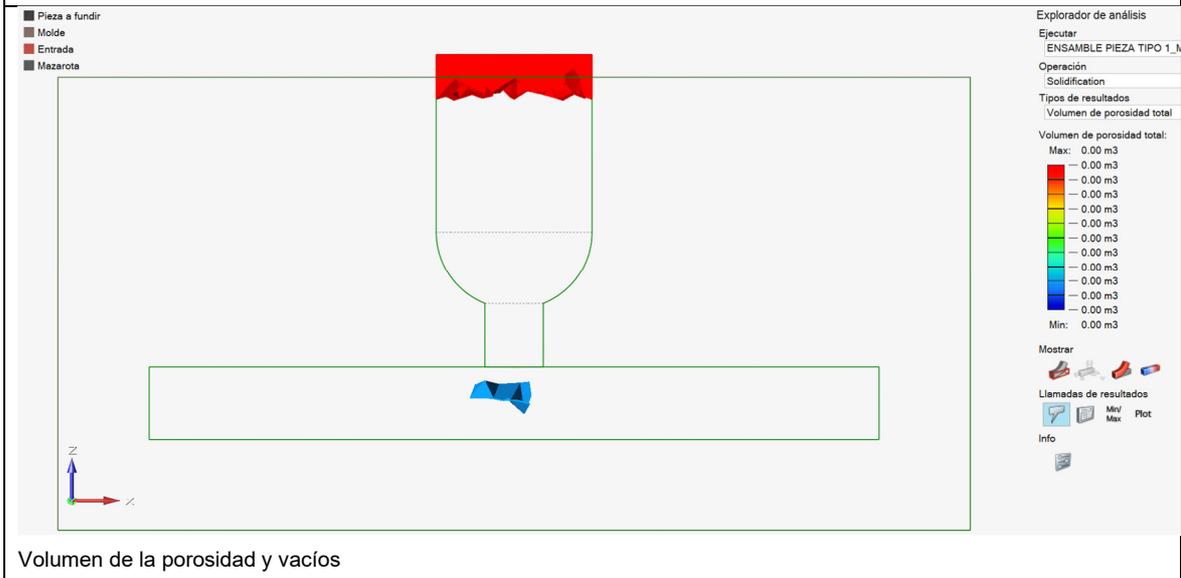
Mazarota cilíndrica convencional – Tamaño 100%

t_v = tiempo de llenado

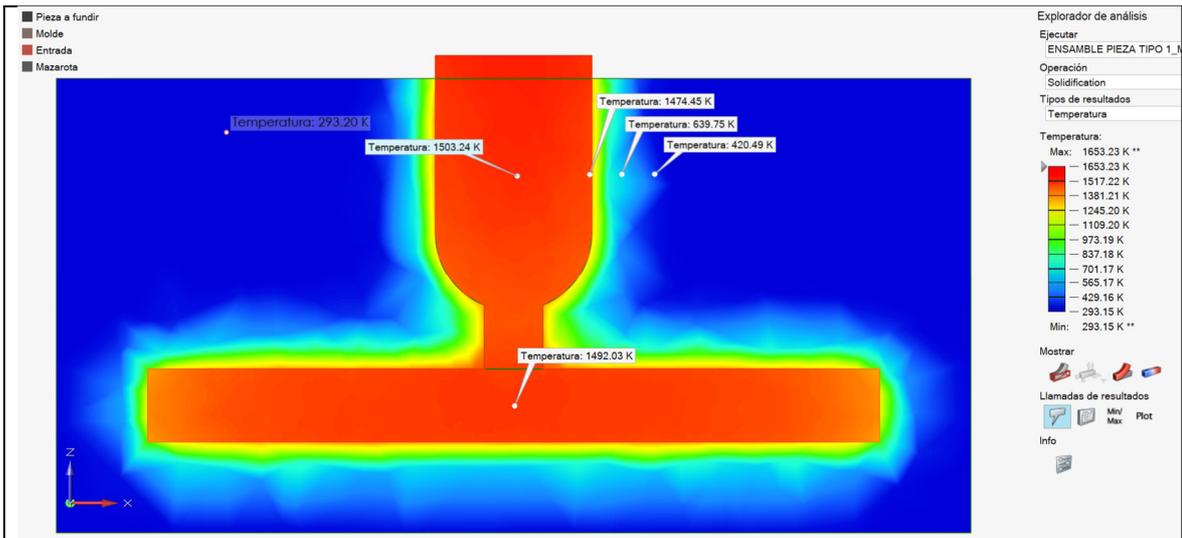
t_s = tiempo de solidificación



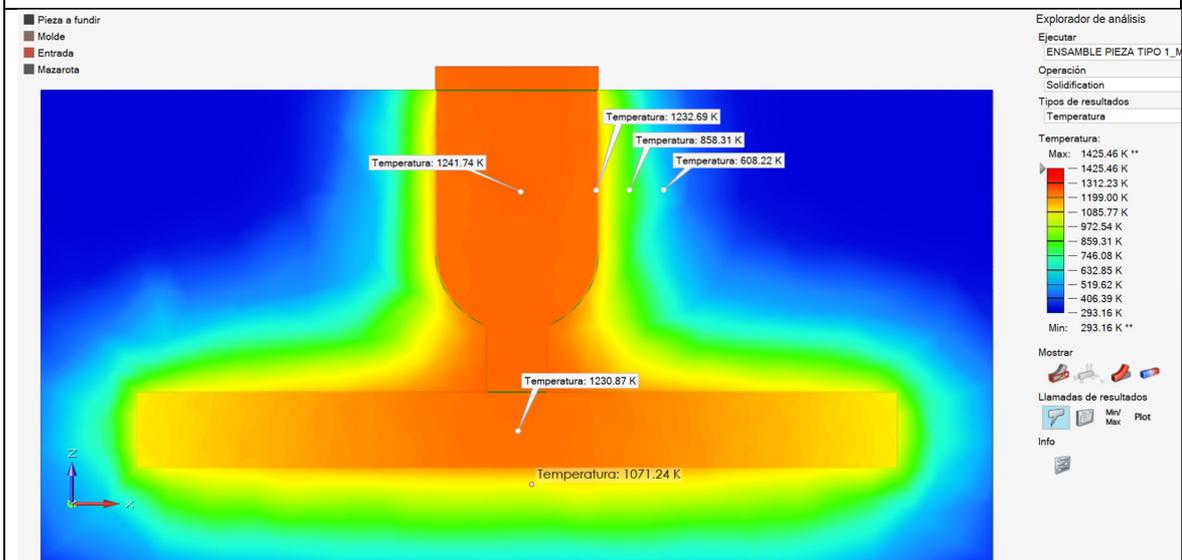
Análisis CFD del proceso de llenado ($t_v=1$ s)



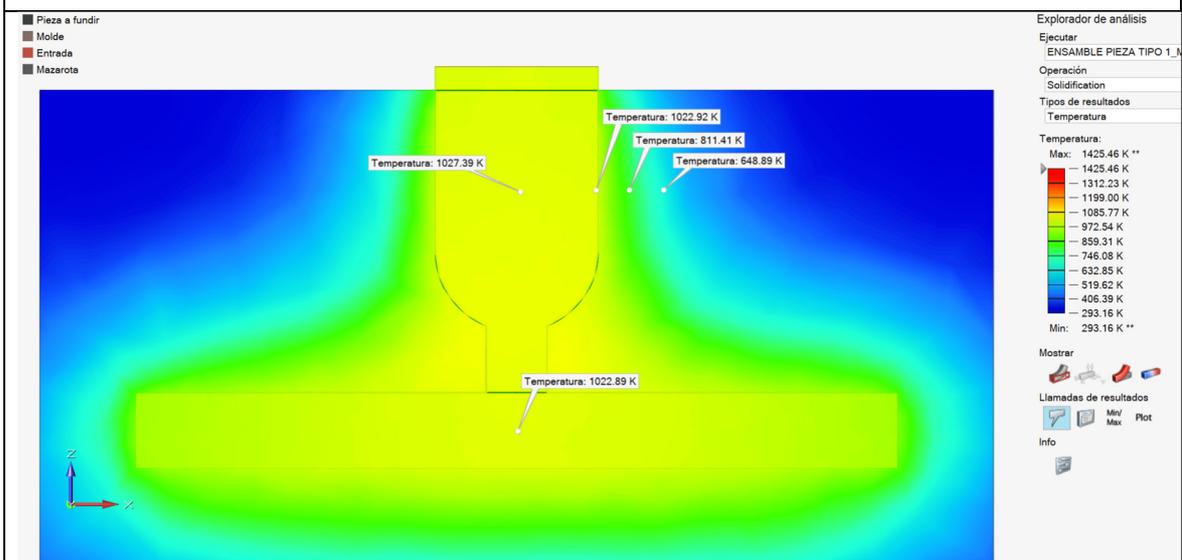
Volumen de la porosidad y vacíos



Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=100$ s)



Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=500$ s)

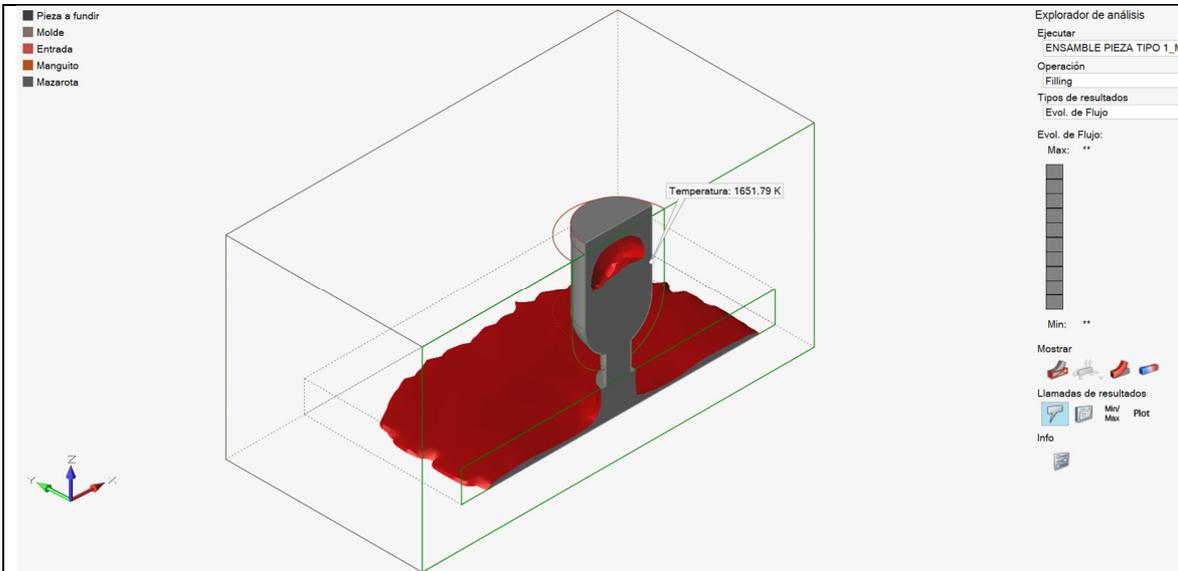


Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=1000$ s)

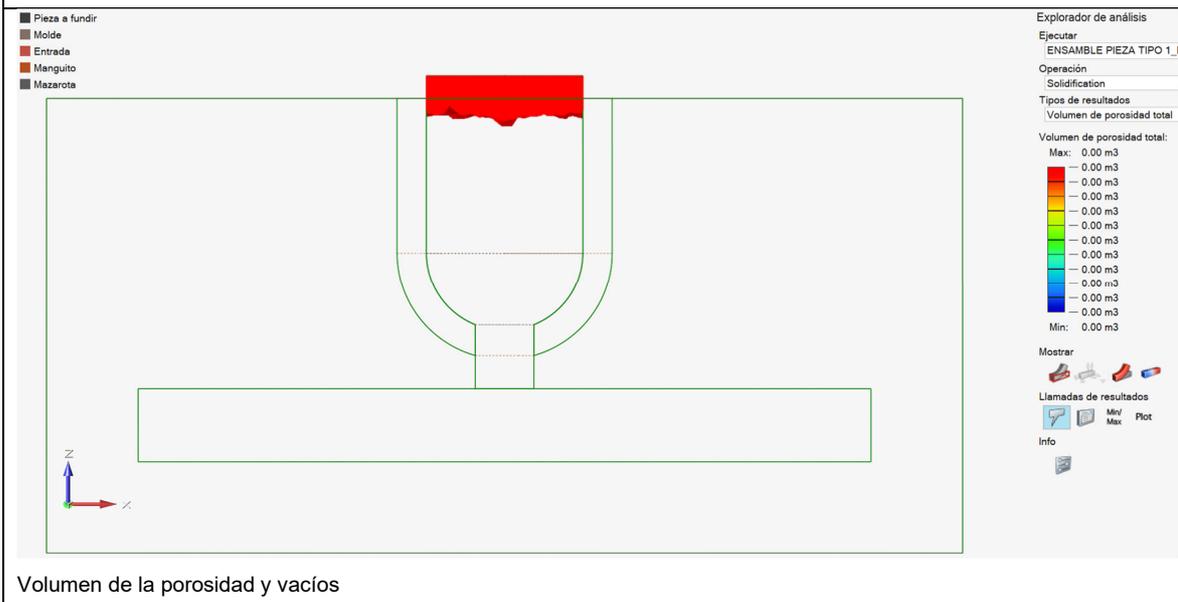
Mazarota cilíndrica con camisa exotérmica – Tamaño 100%

t_v = tiempo de llenado

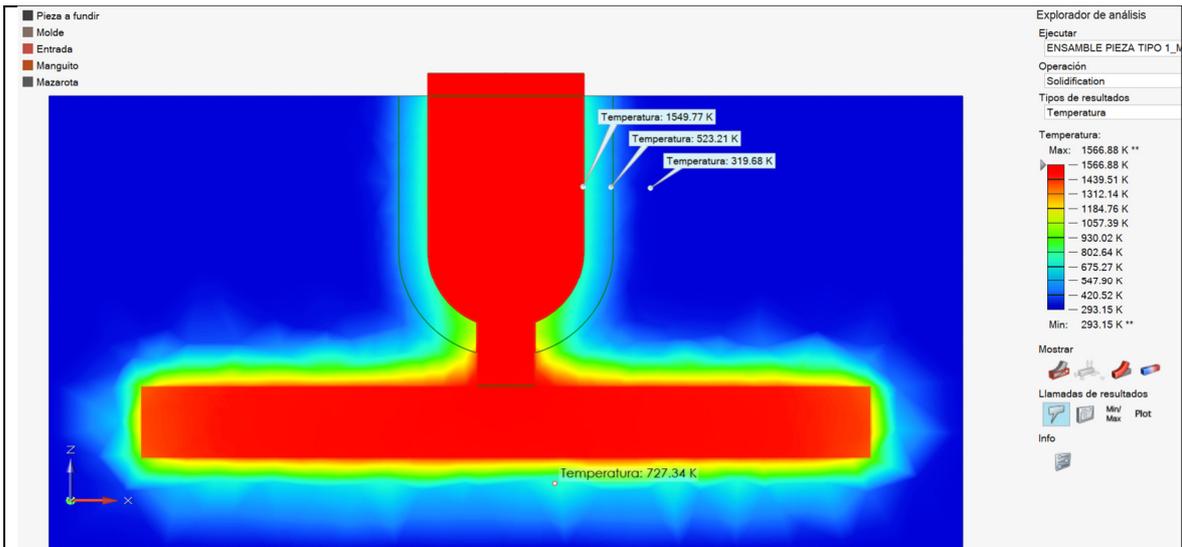
t_s = tiempo de solidificación



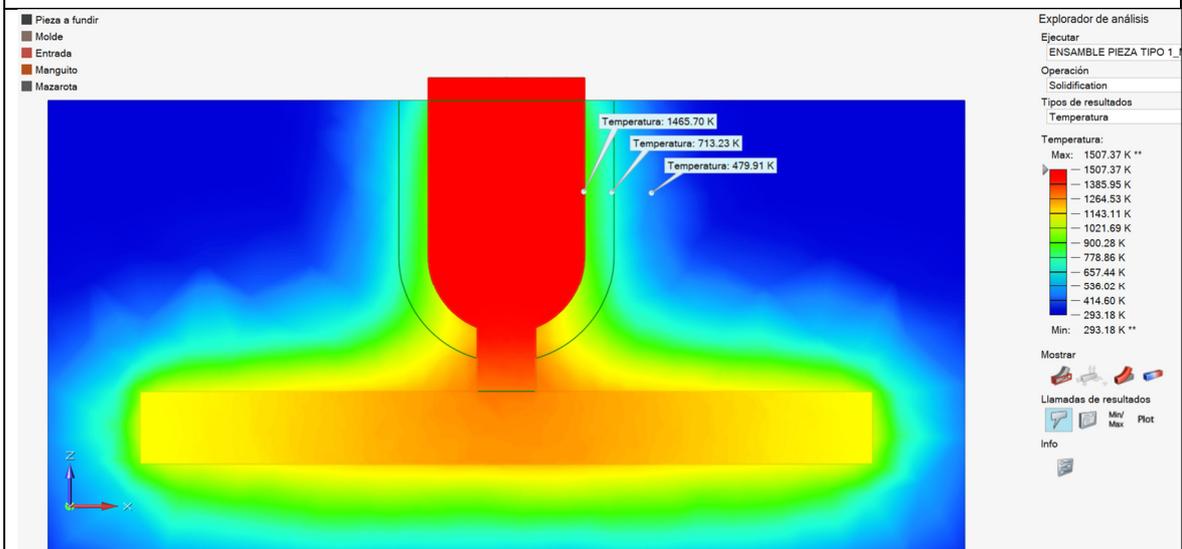
Análisis CFD del proceso de llenado ($t_v=1$ s)



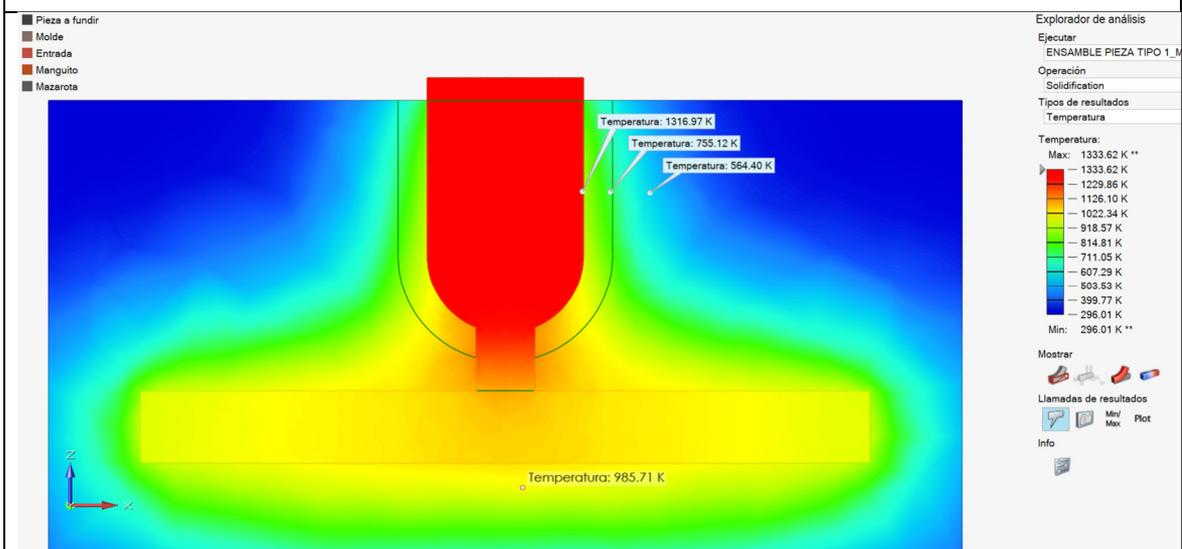
Volumen de la porosidad y vacíos



Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=100$ s)



Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=500$ s)

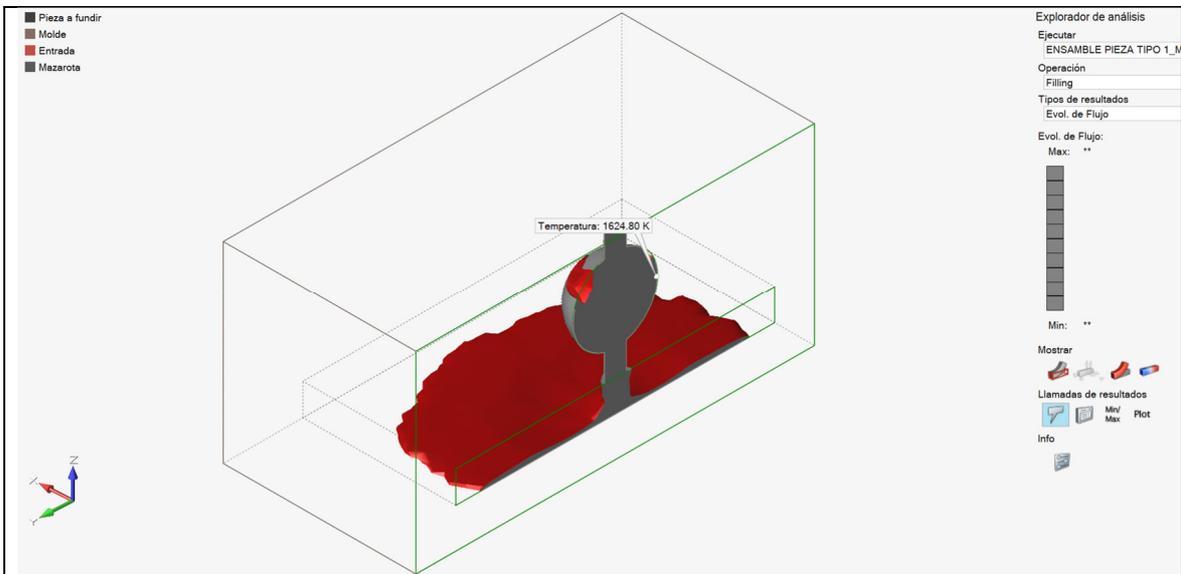


Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=1000$ s)

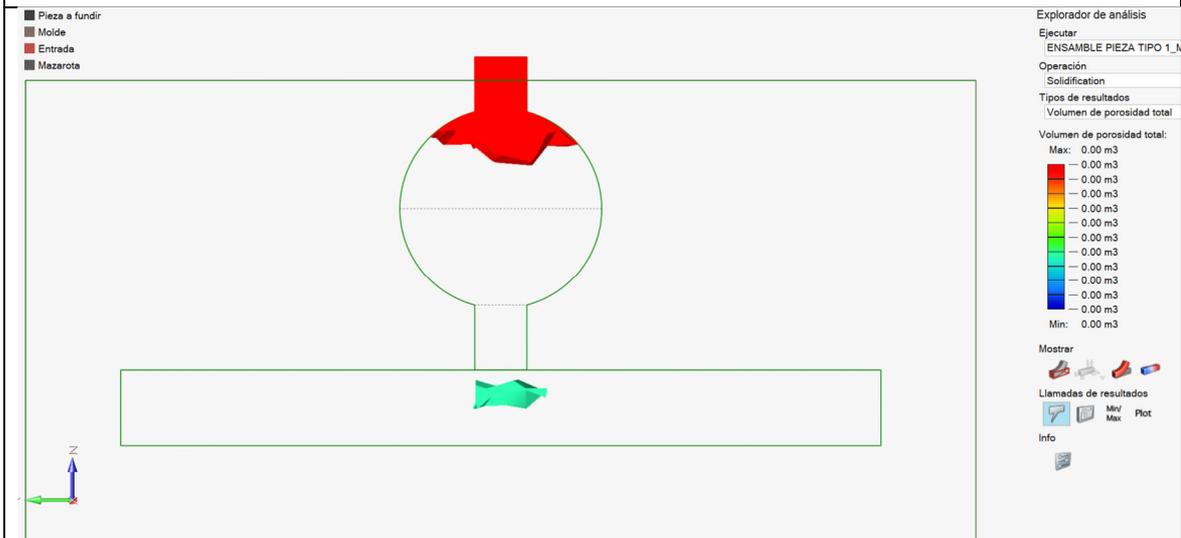
Mazarota esférica convencional – Tamaño 100%

t_v = tiempo de llenado

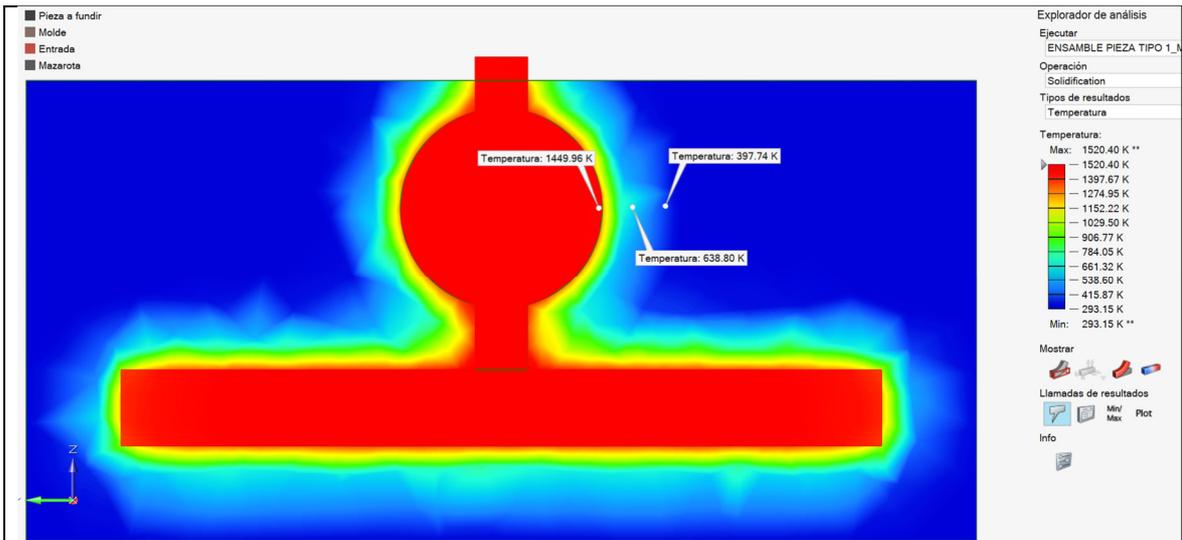
t_s = tiempo de solidificación



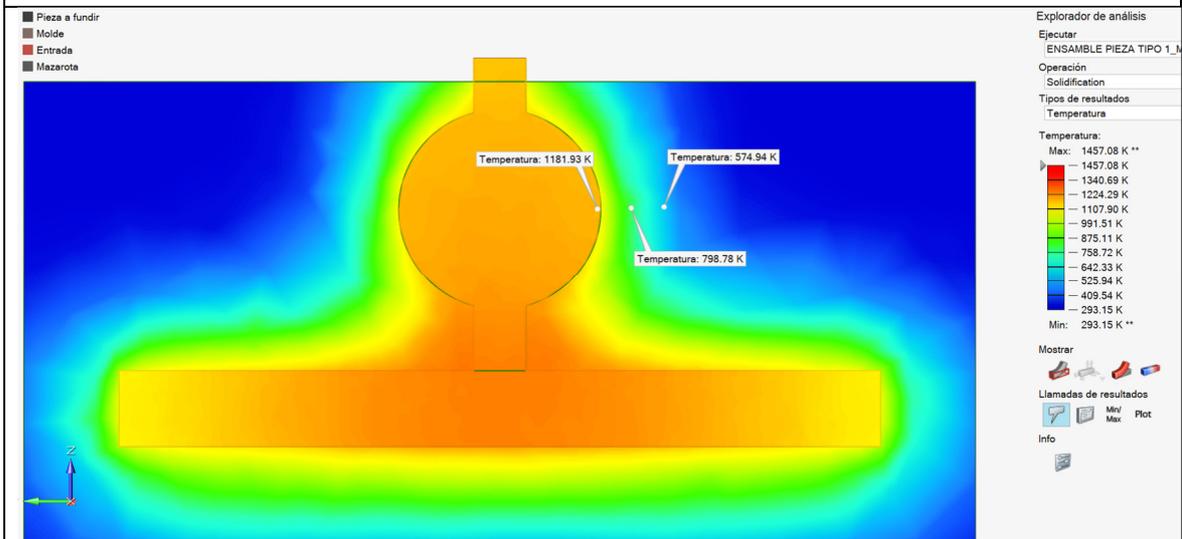
Análisis CFD del proceso de llenado ($t_v=1$ s)



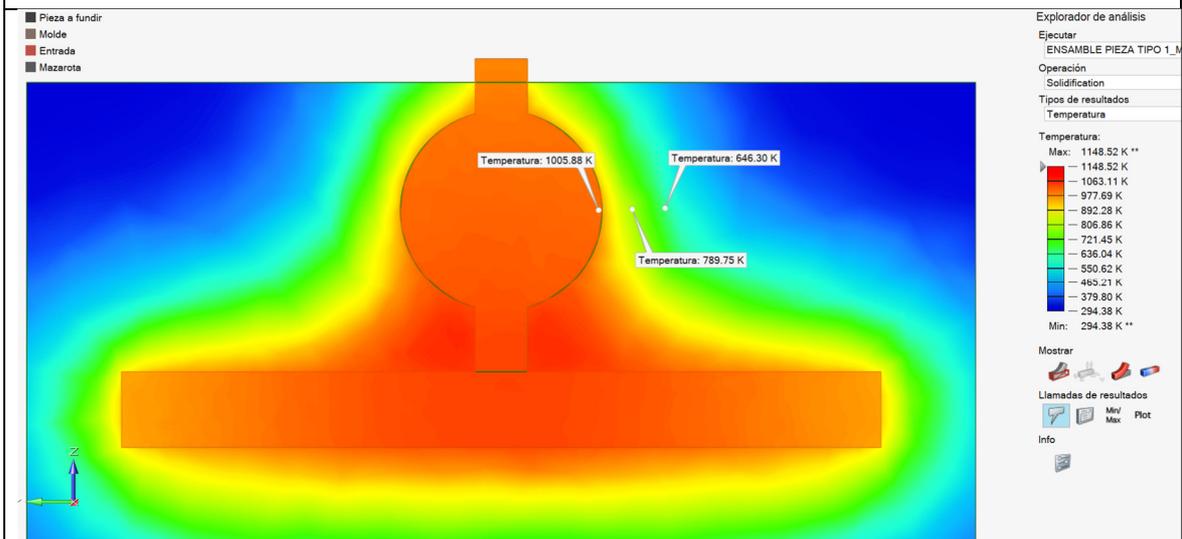
Volumen de la porosidad y vacíos



Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=100$ s)



Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=500$ s)

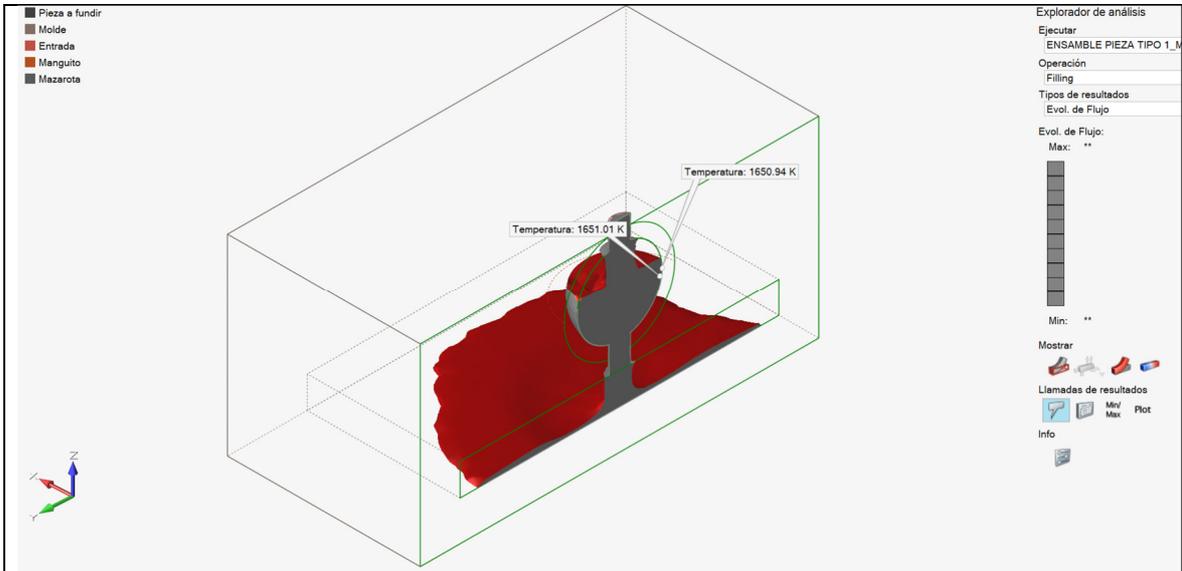


Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=1000$ s)

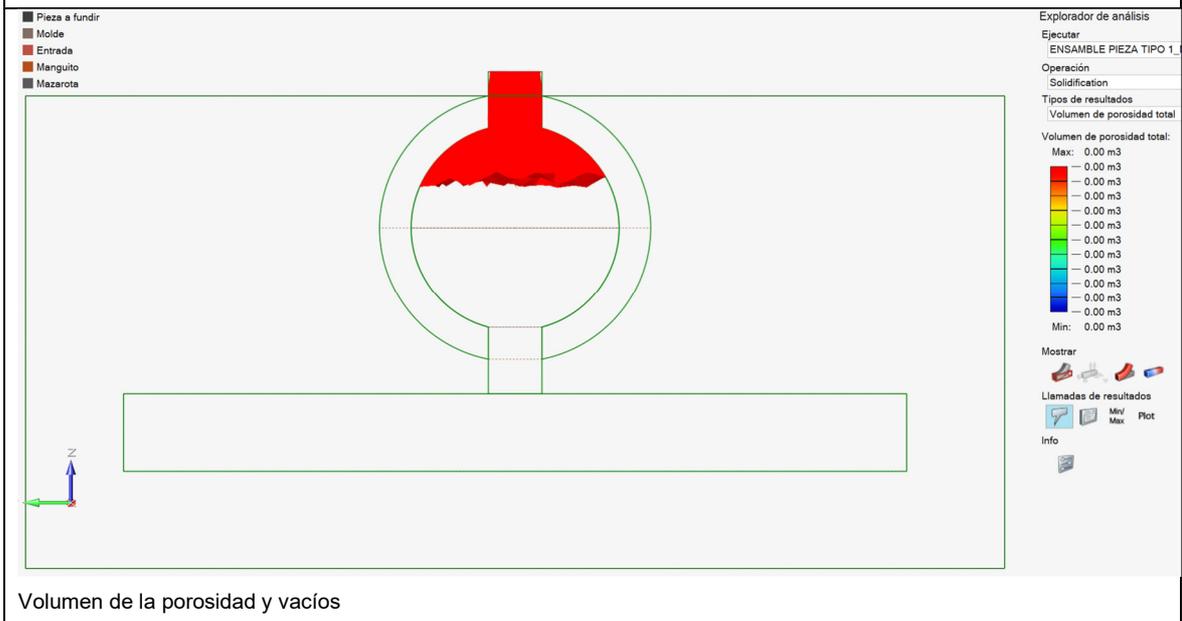
Mazarota esférica con camisa exotérmica – Tamaño 100%

t_v = tiempo de llenado

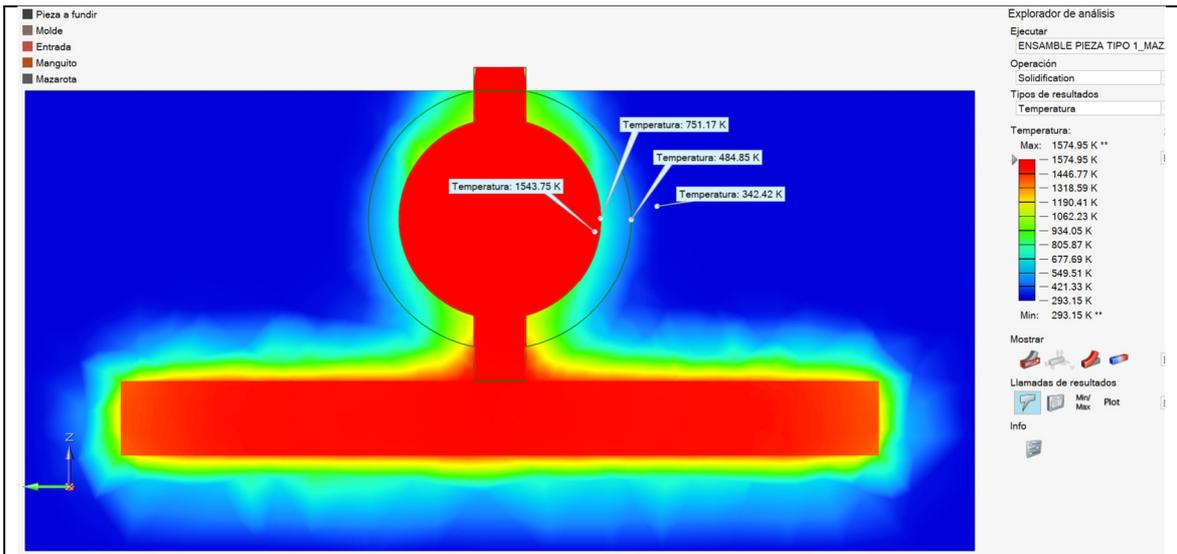
t_s = tiempo de solidificación



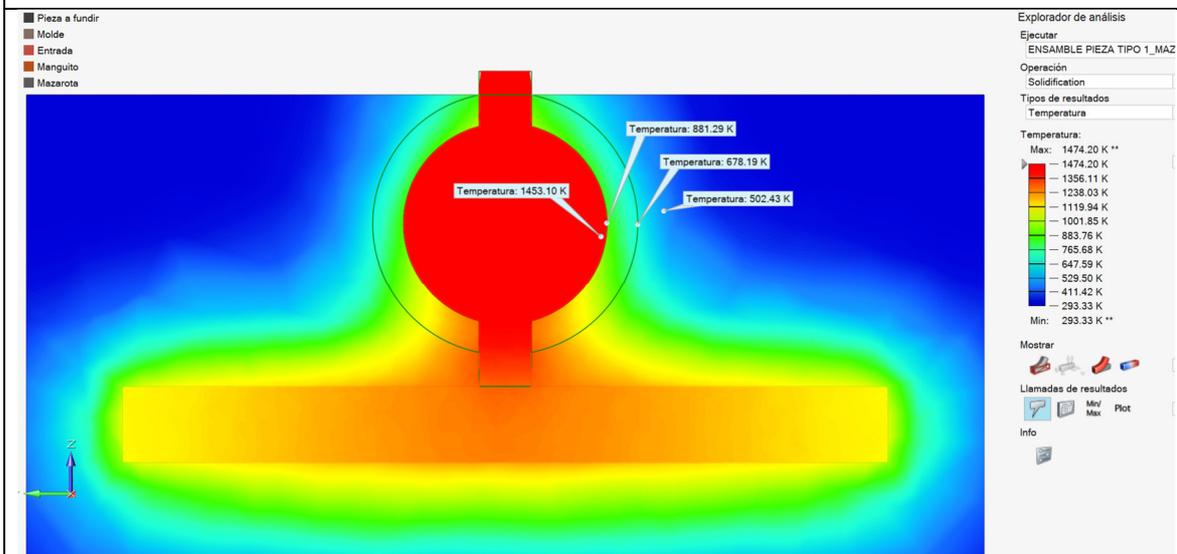
Análisis CFD del proceso de llenado ($t_v=1$ s)



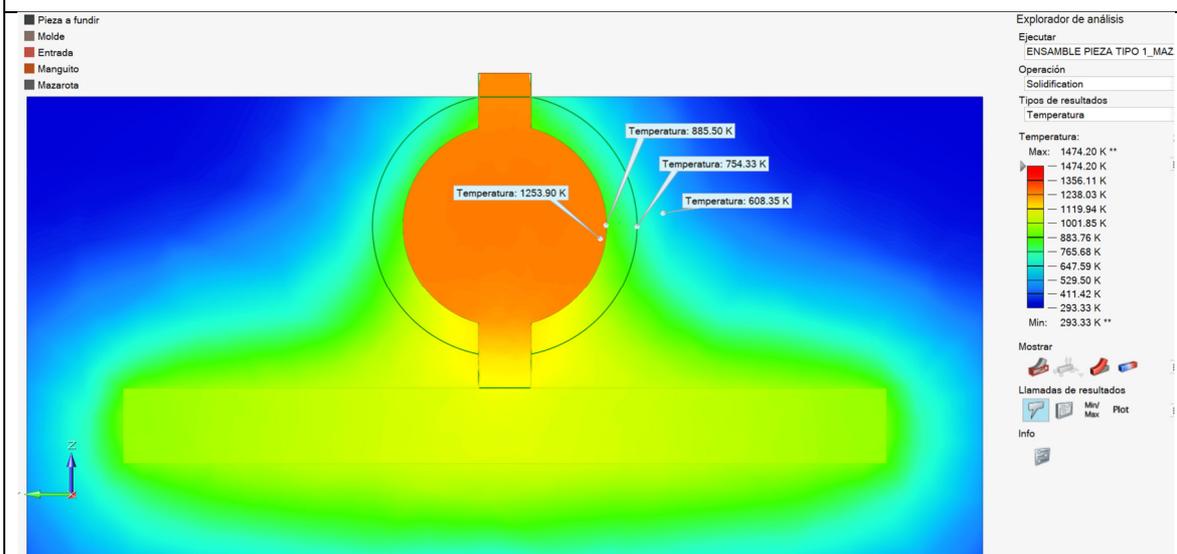
Volumen de la porosidad y vacíos



Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=100$ s)



Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=500$ s)

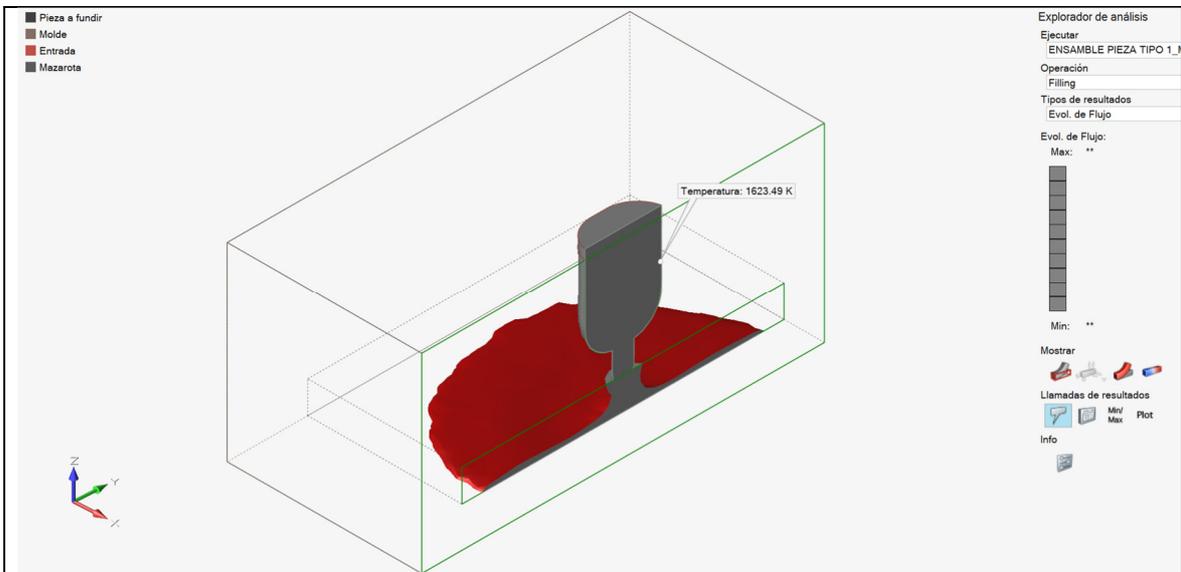


Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=1000$ s)

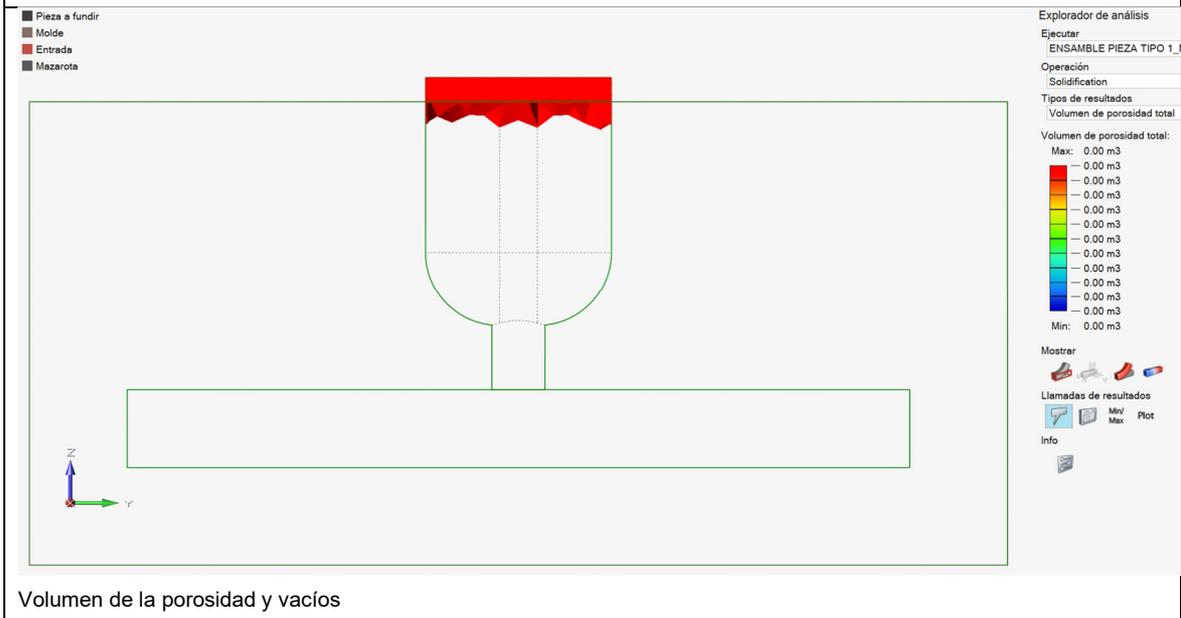
Mazarota ovalada convencional – Tamaño 100%

t_v = tiempo de llenado

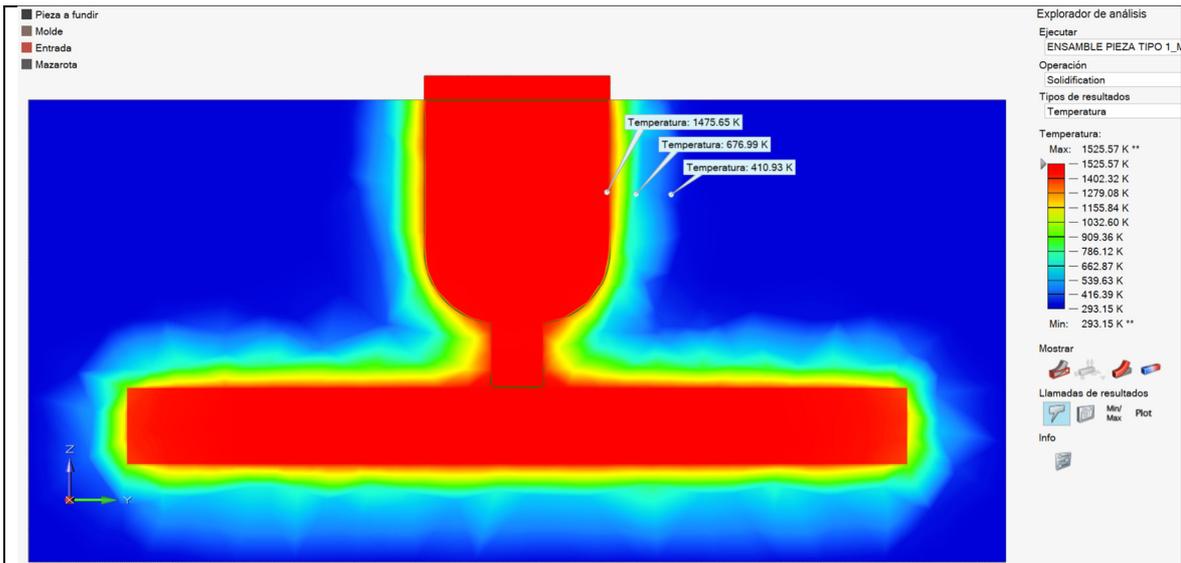
t_s = tiempo de solidificación



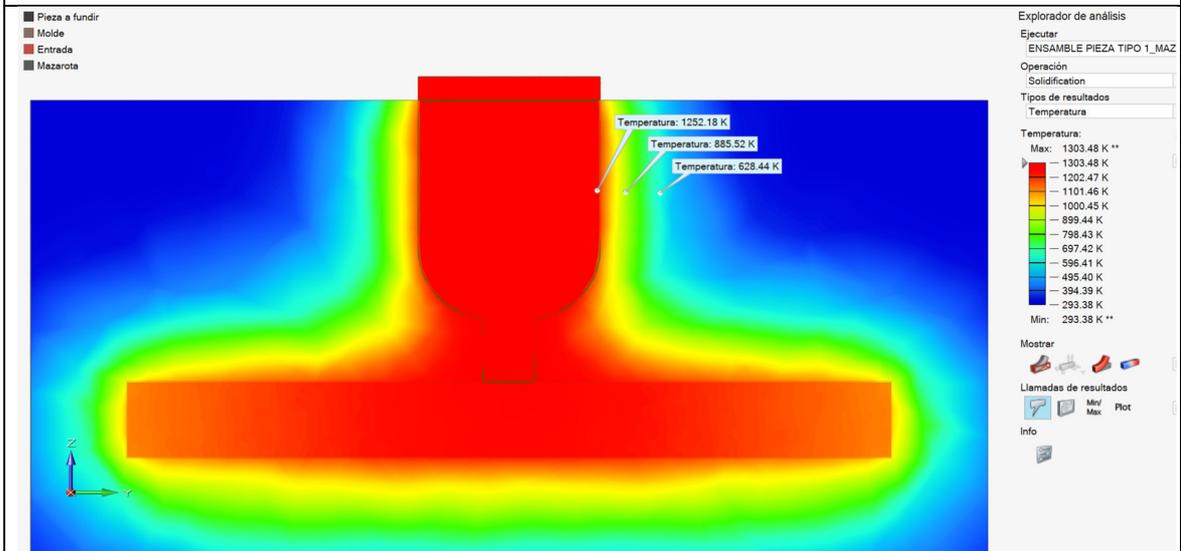
Análisis CFD del proceso de llenado ($t_v=1$ s)



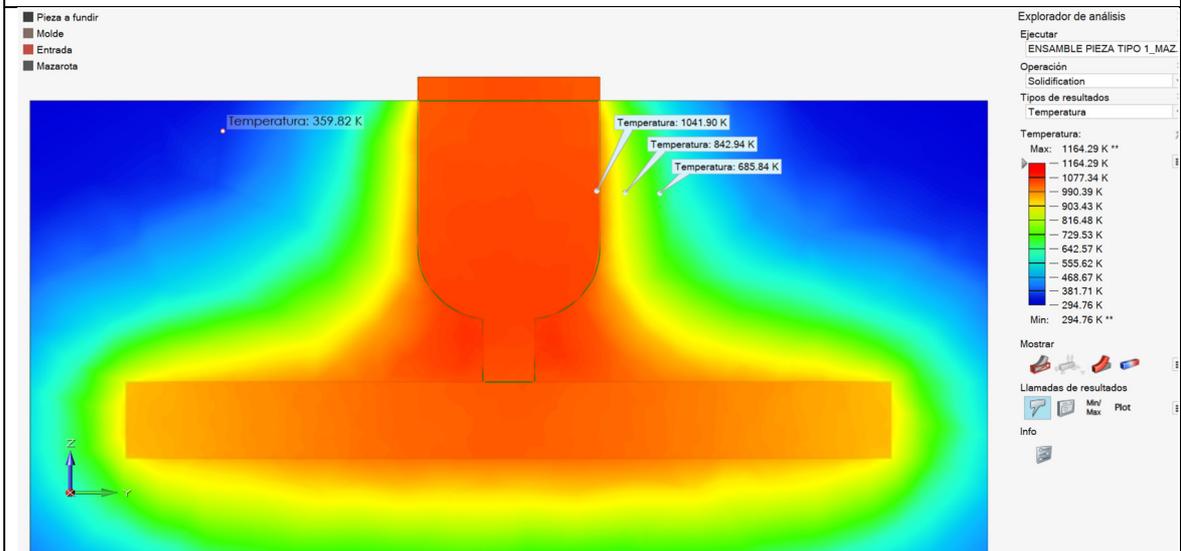
Volumen de la porosidad y vacíos



Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=100$ s)



Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=500$ s)

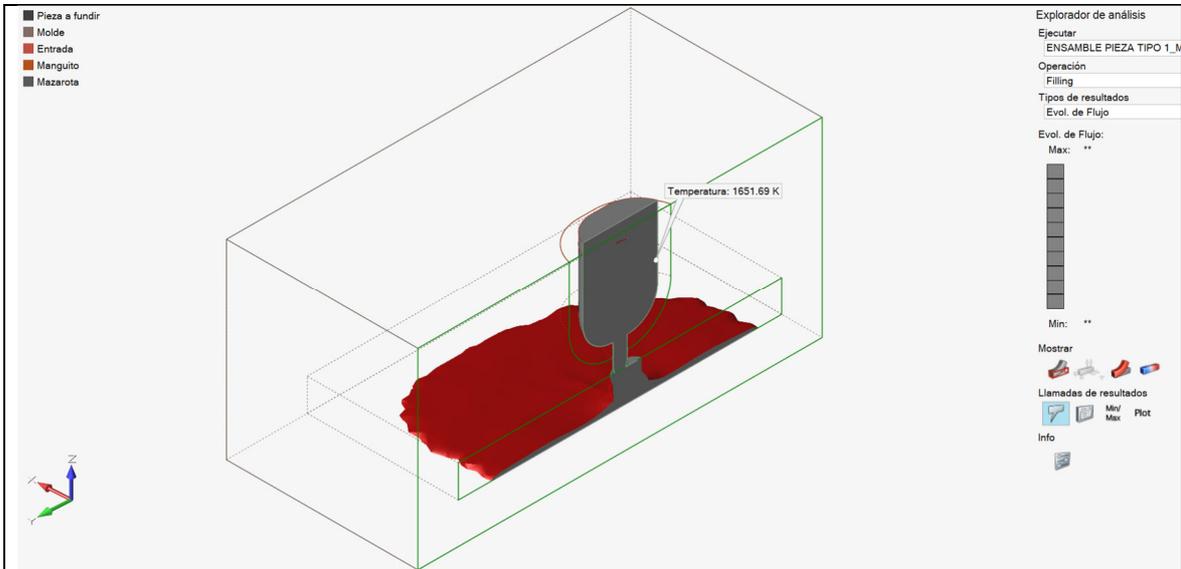


Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=1000$ s)

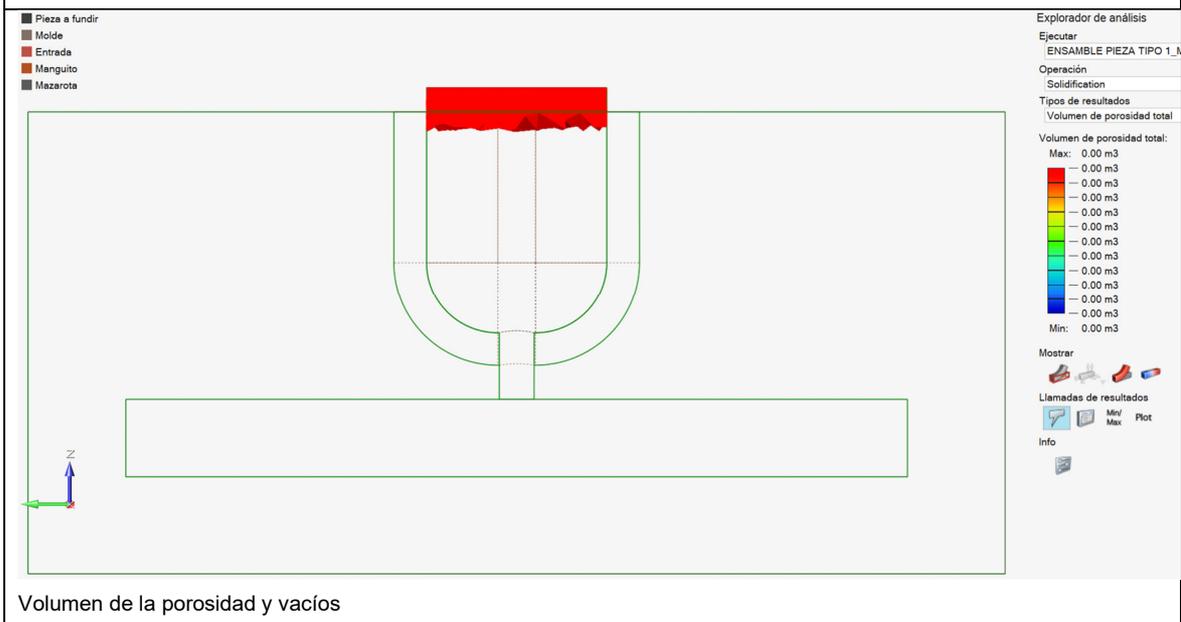
Mazarota ovalada con camisa exotérmica – Tamaño 100%

t_v = tiempo de llenado

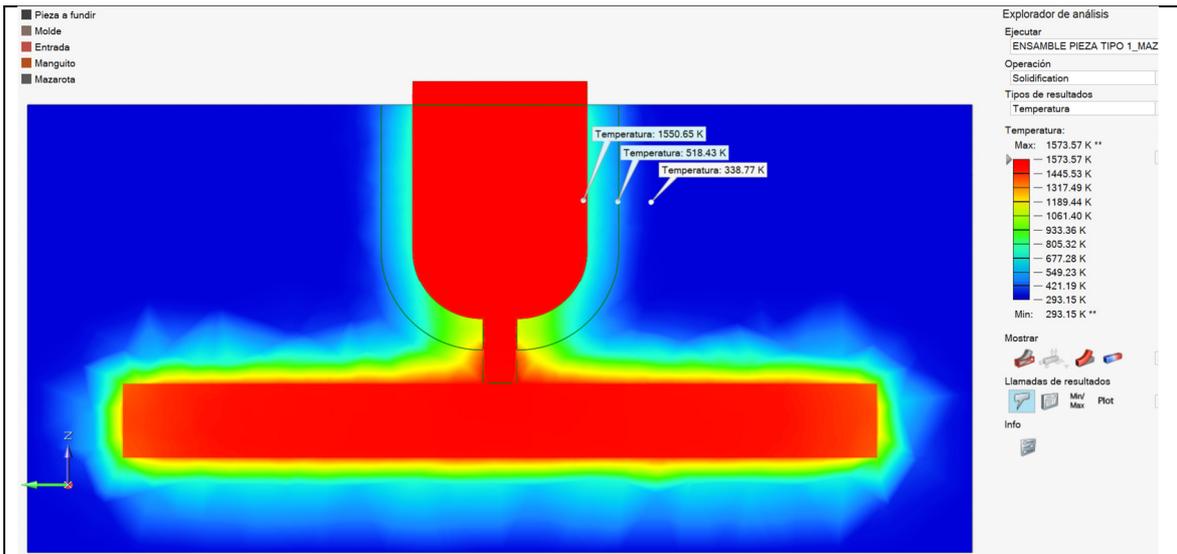
t_s = tiempo de solidificación



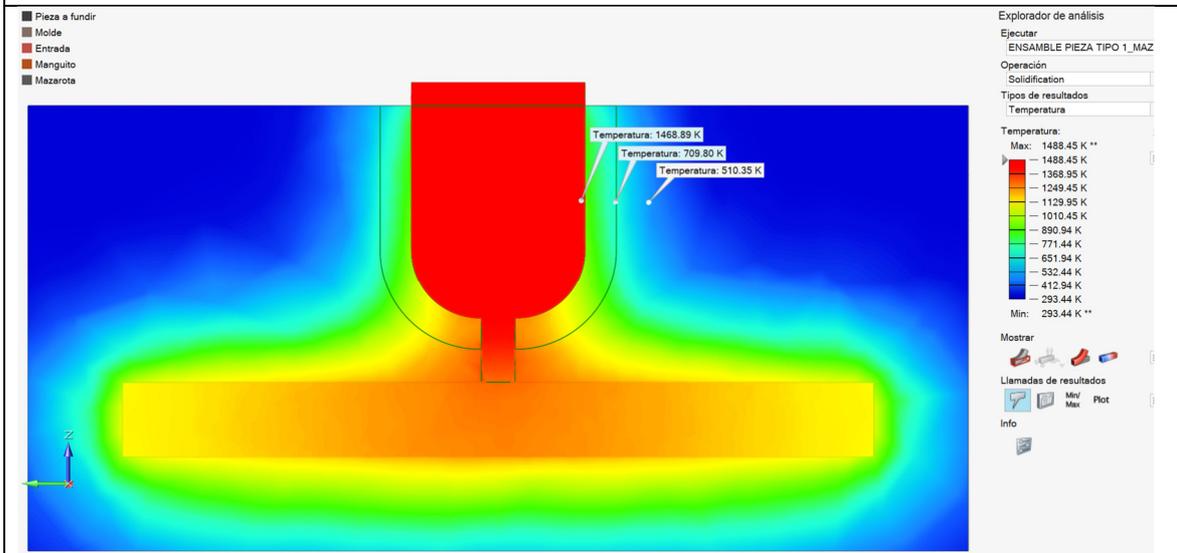
Análisis CFD del proceso de llenado ($t_v=1$ s)



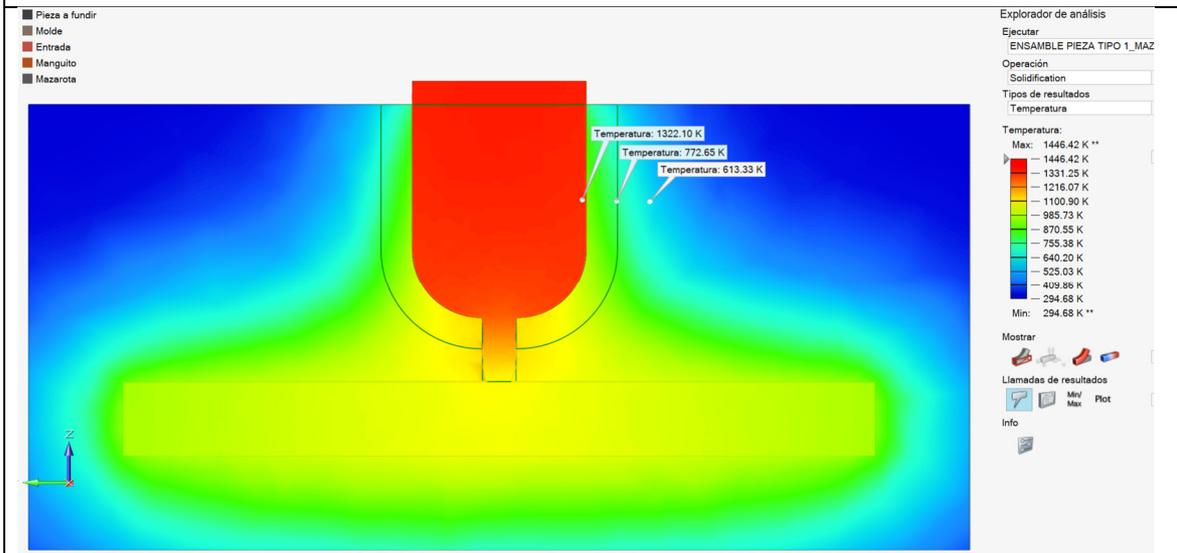
Volumen de la porosidad y vacíos



Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=100$ s)



Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=500$ s)

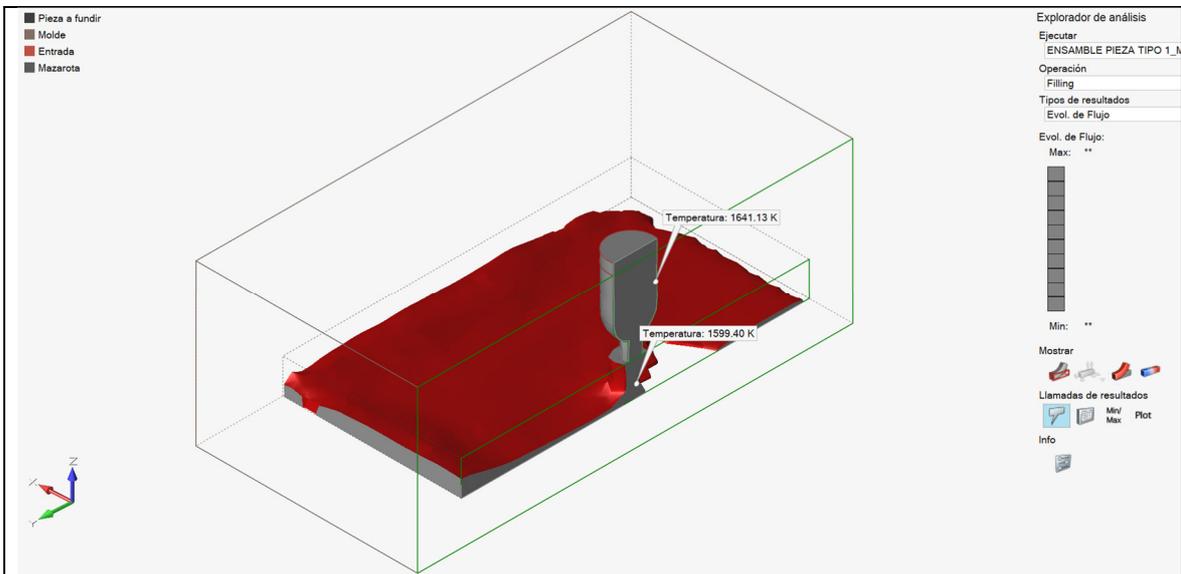


Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=1000$ s)

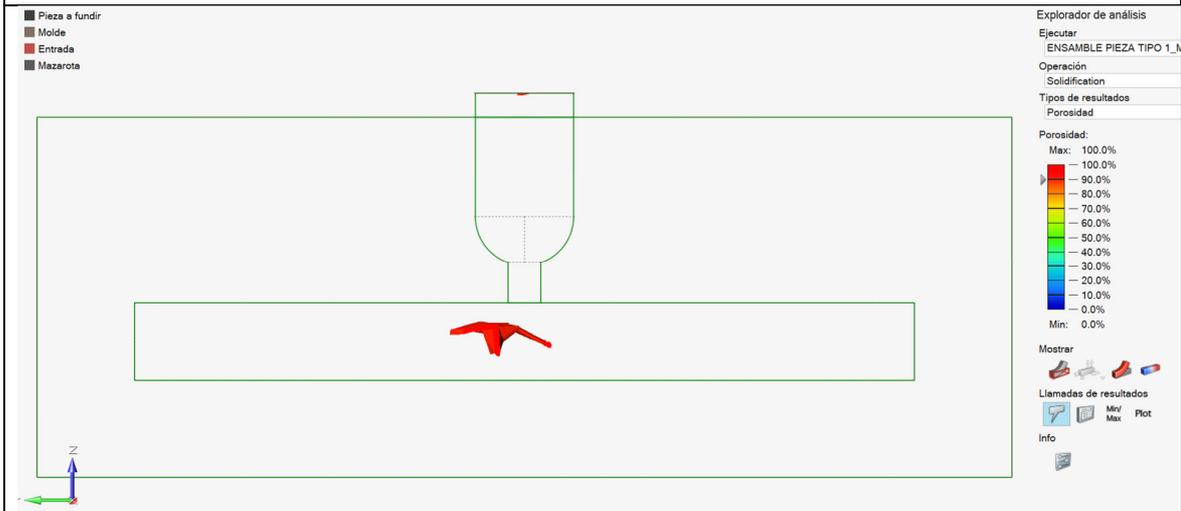
Mazarota cilíndrica convencional – Tamaño 60%

t_v = tiempo de llenado

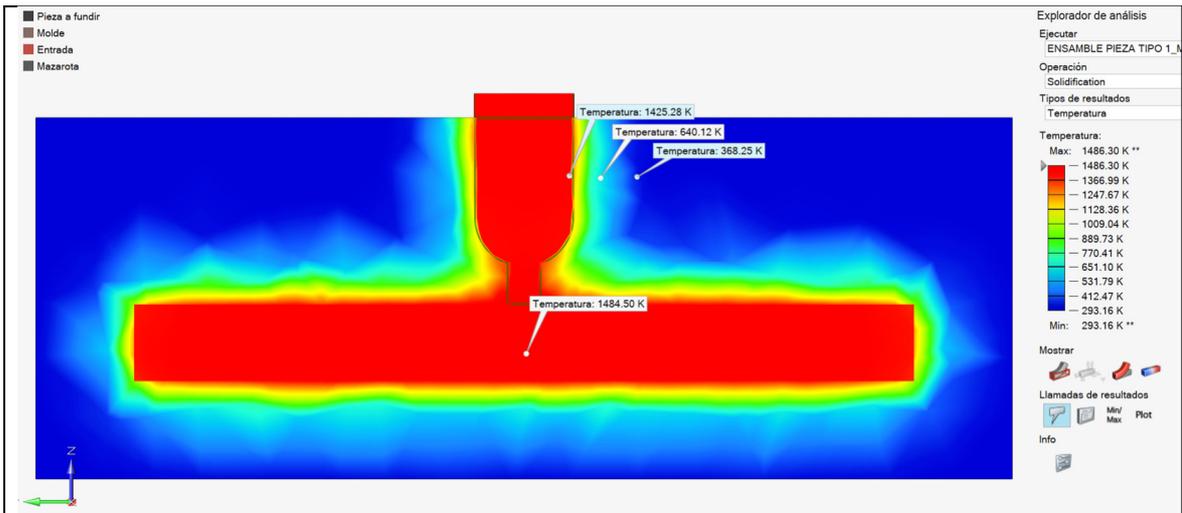
t_s = tiempo de solidificación



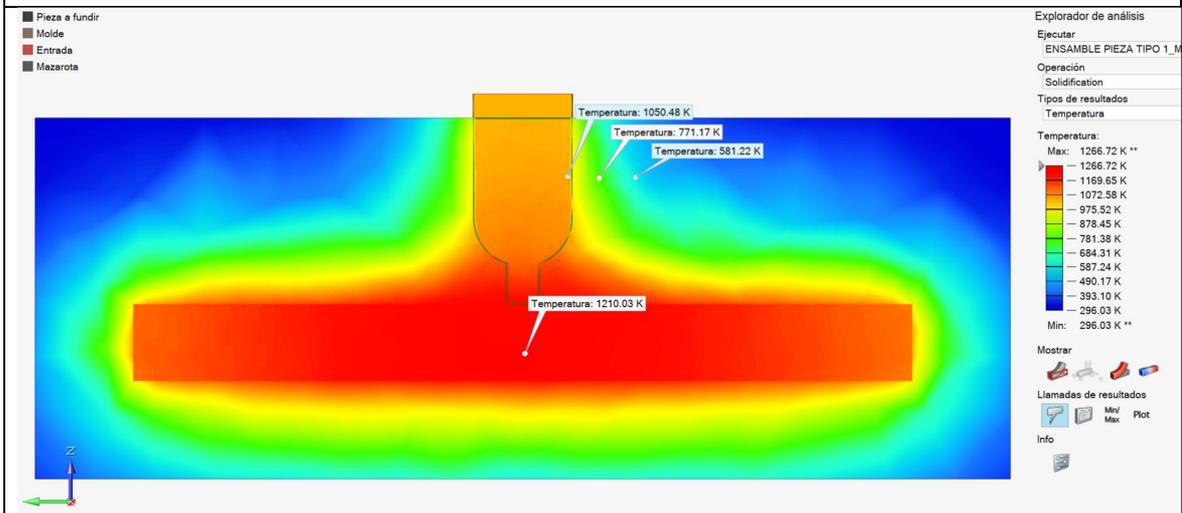
Análisis CFD del proceso de llenado ($t_v=1$ s)



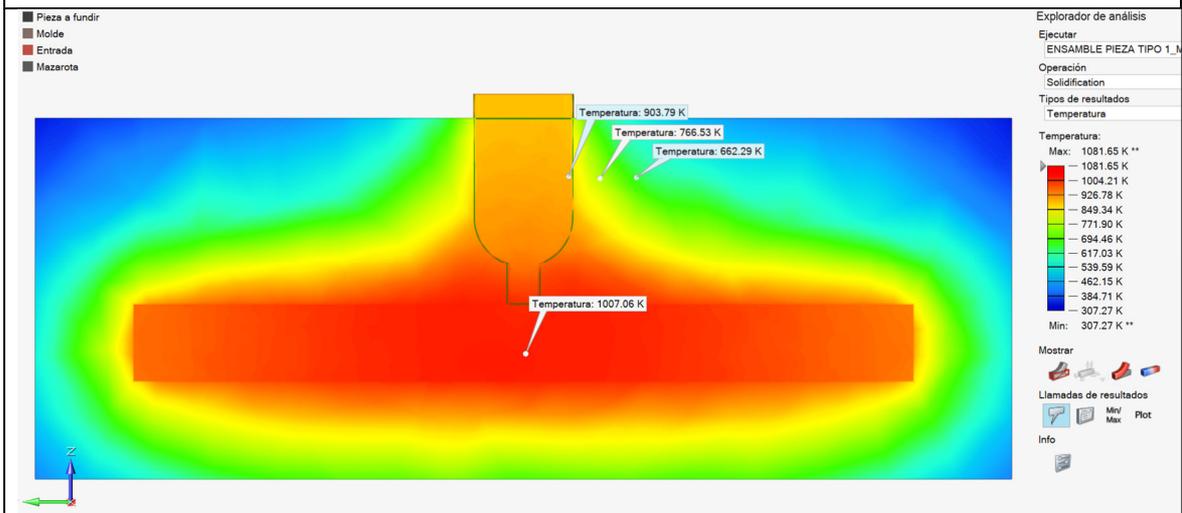
Volumen de la porosidad y vacíos



Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=100$ s)



Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=500$ s)

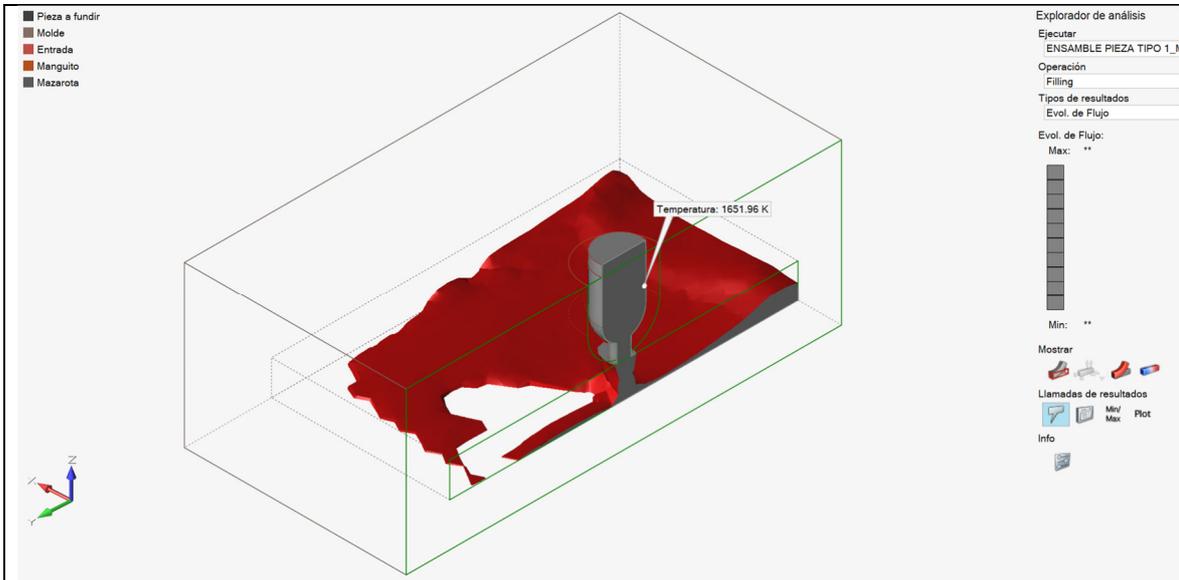


Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=1000$ s)

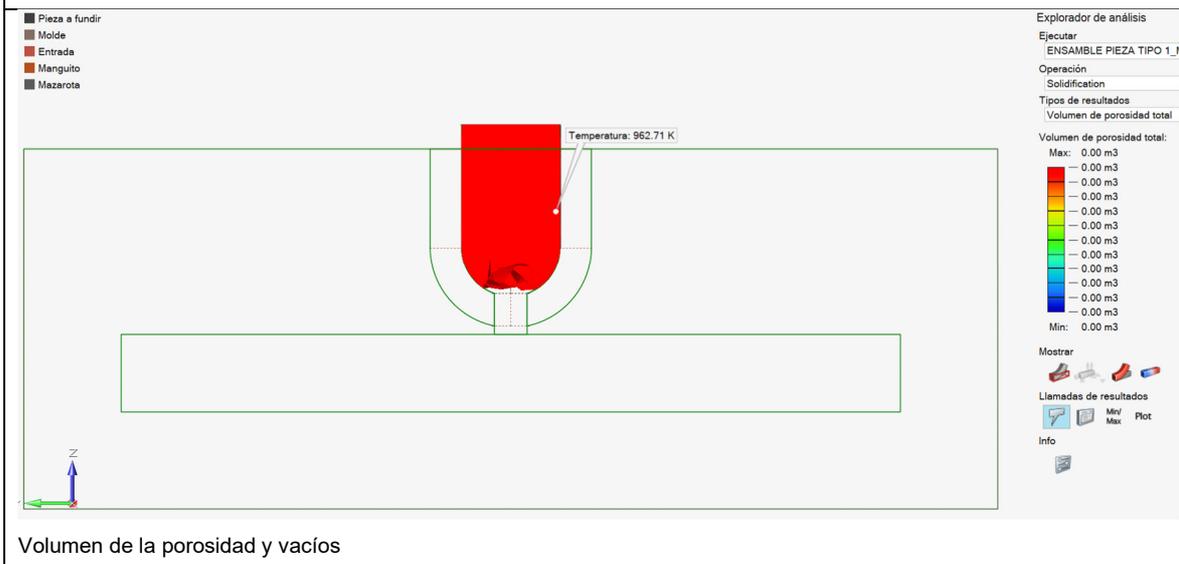
Mazarota cilíndrica con camisa exotérmica – Tamaño 60%

t_v = tiempo de llenado

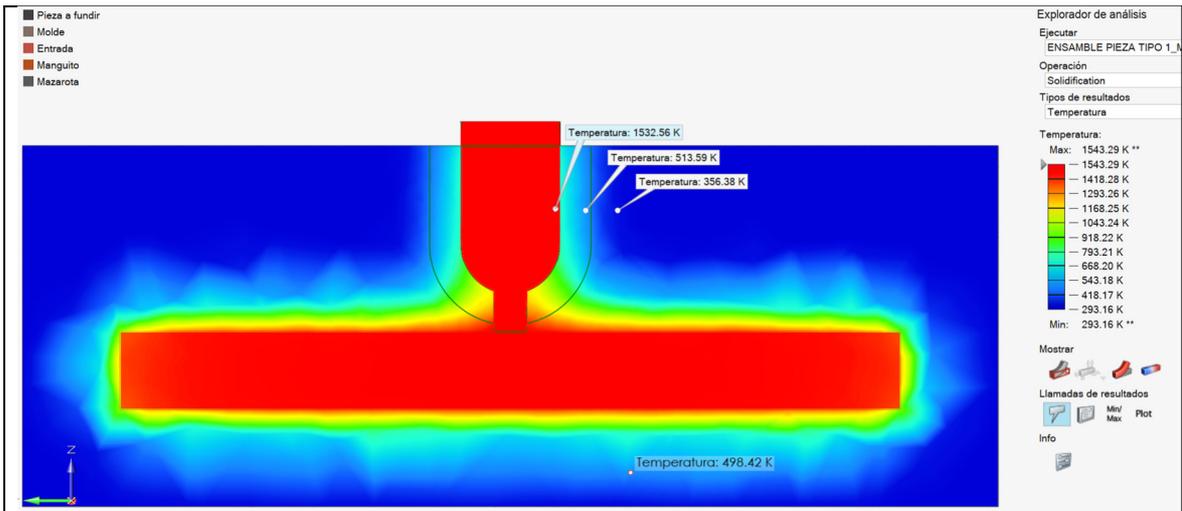
t_s = tiempo de solidificación



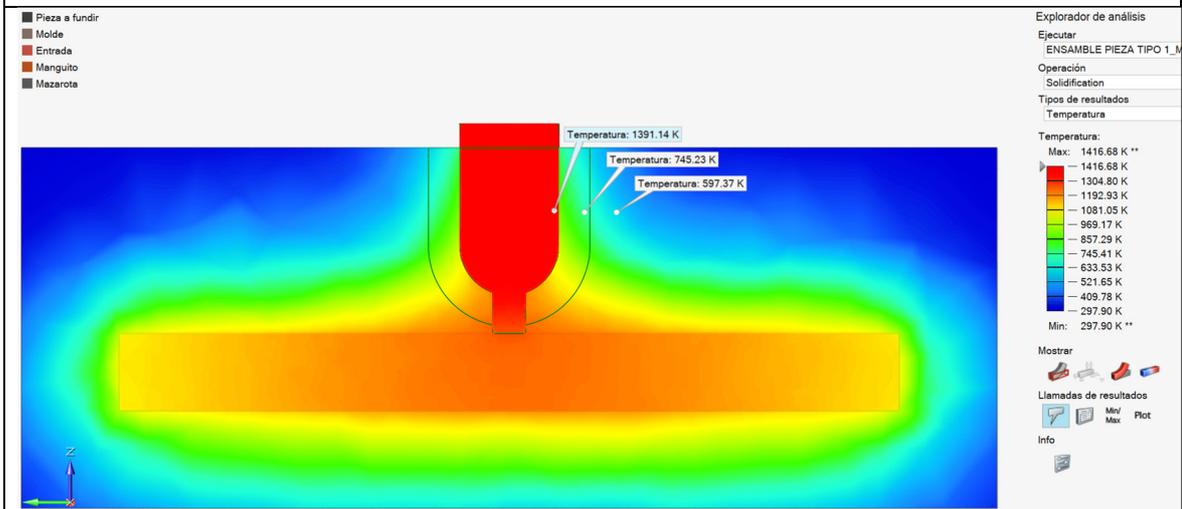
Análisis CFD del proceso de llenado ($t_v=1$ s)



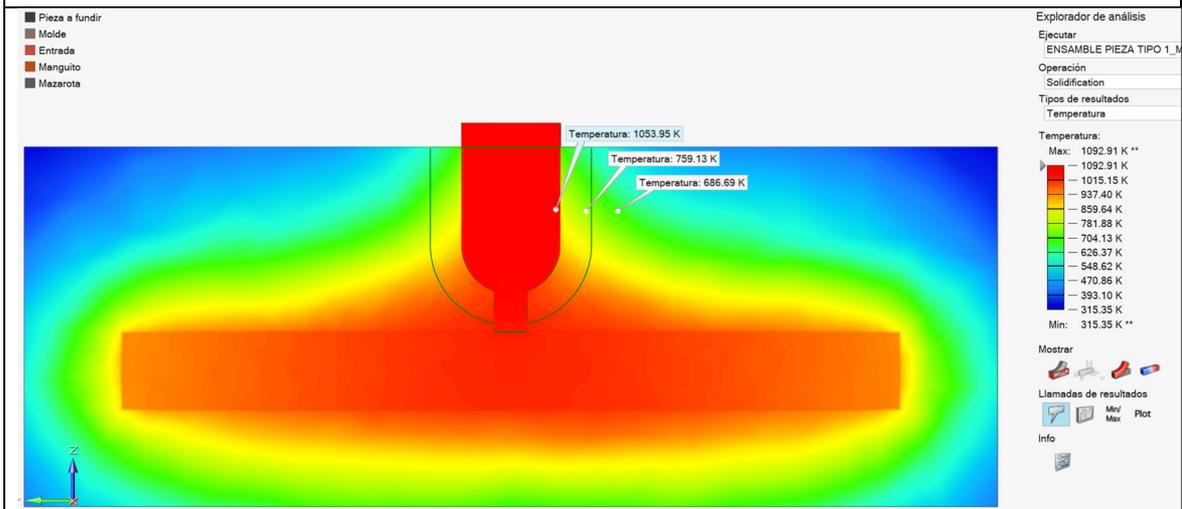
Volumen de la porosidad y vacíos



Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=100$ s)



Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=500$ s)

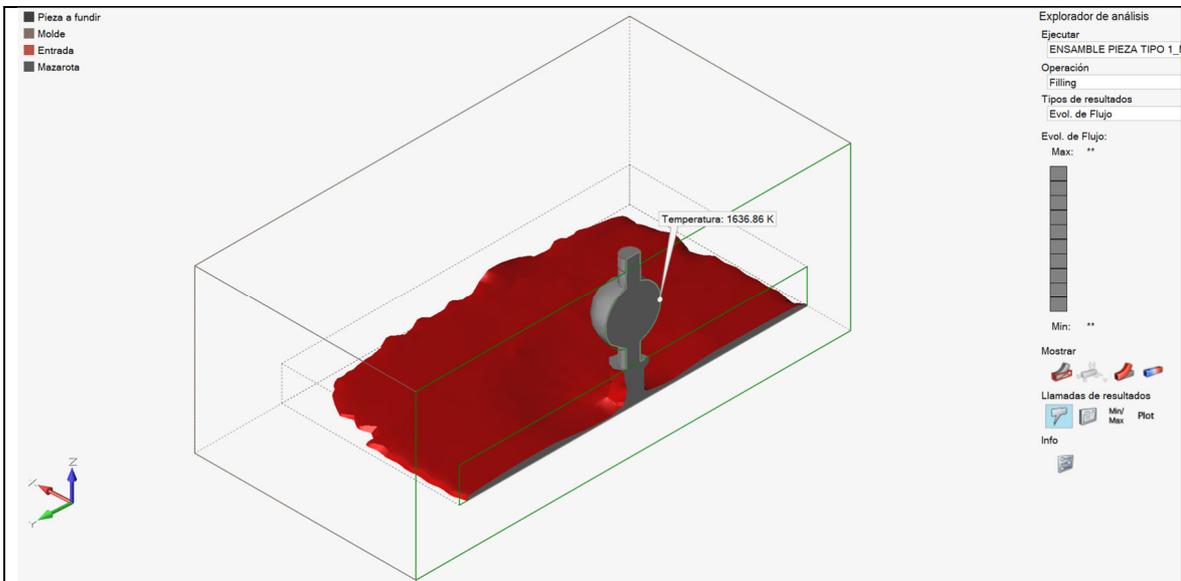


Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=1000$ s)

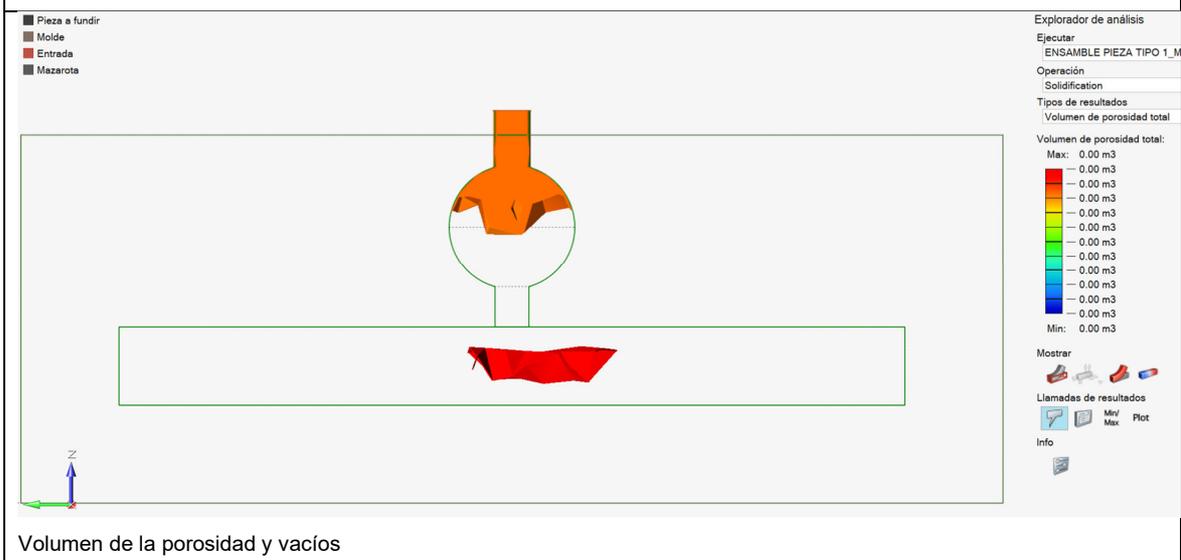
Mazarota esférica convencional – Tamaño 60%

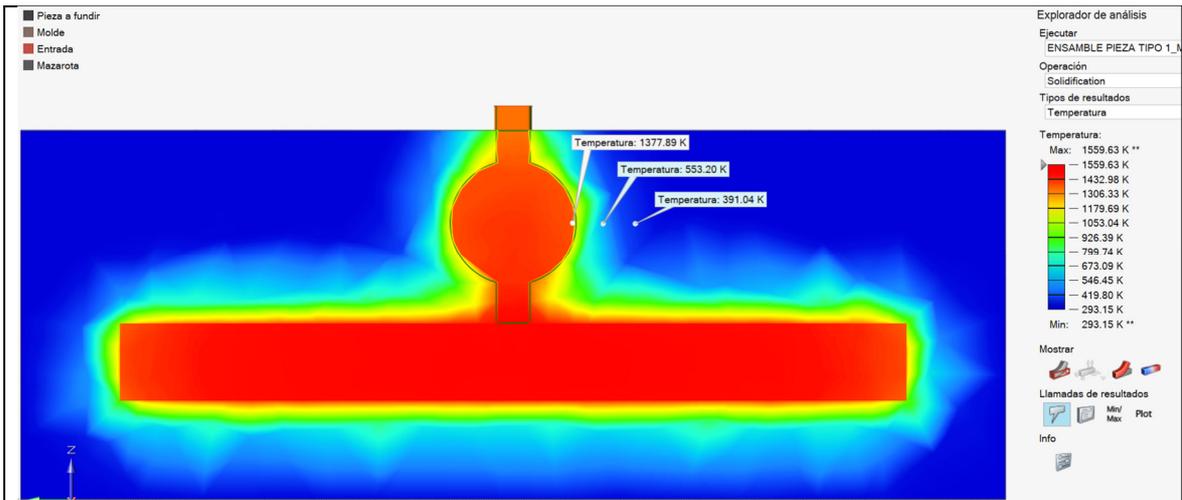
t_v = tiempo de llenado

t_s = tiempo de solidificación

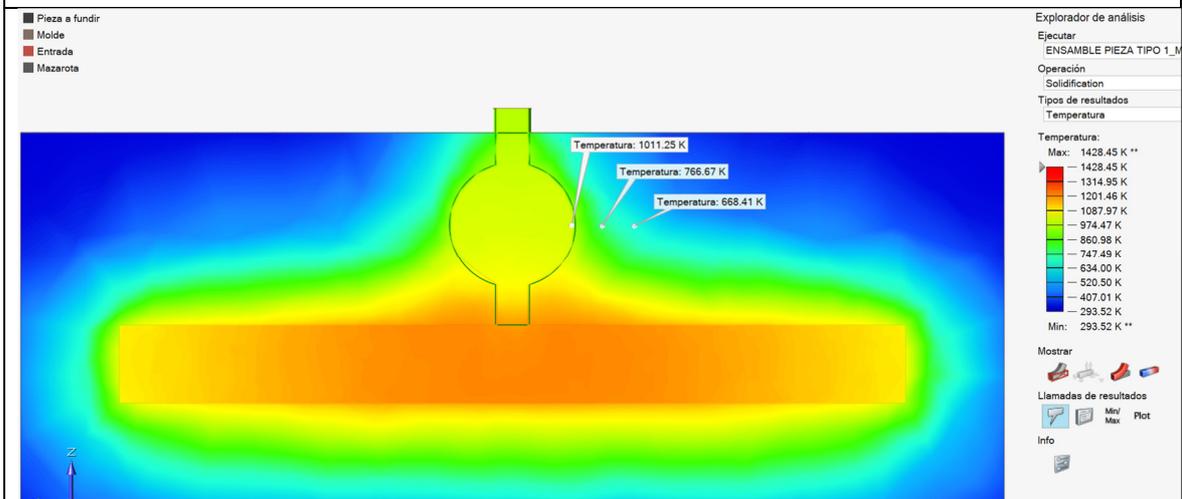


Análisis CFD del proceso de llenado ($t_v=1$ s)

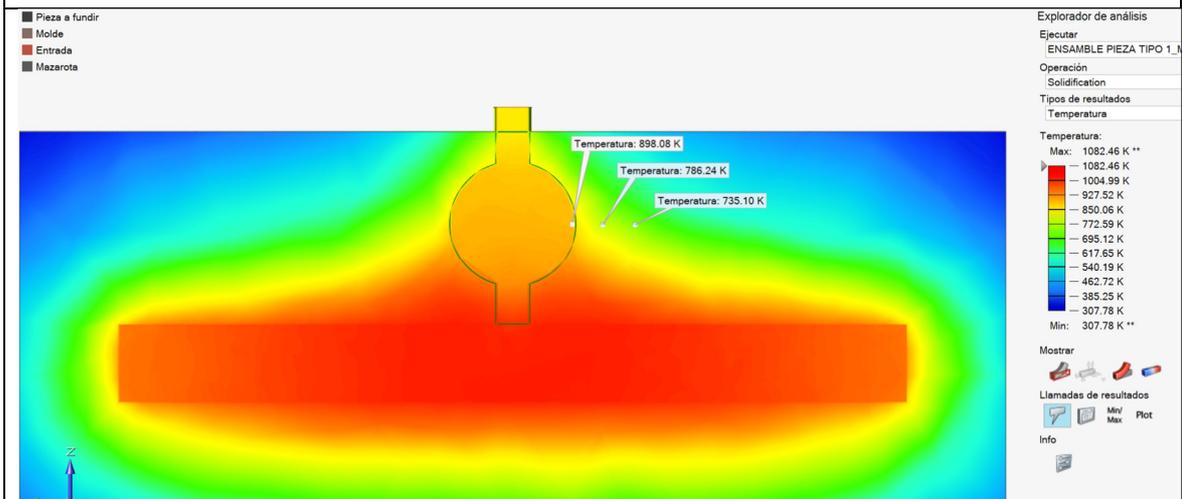




Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=100$ s)



Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=500$ s)

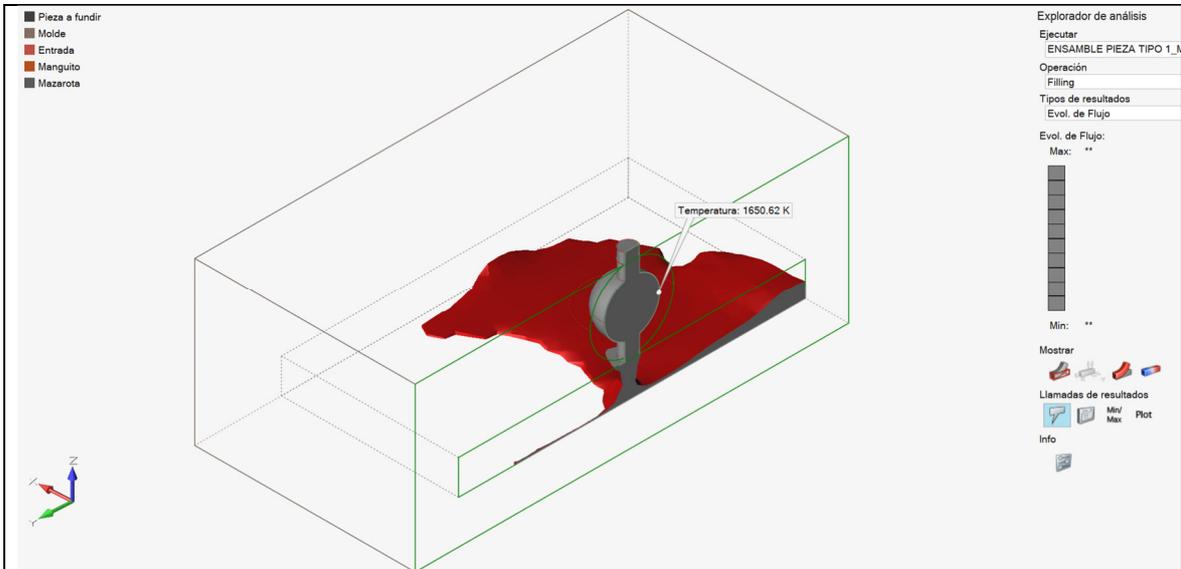


Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=1000$ s)

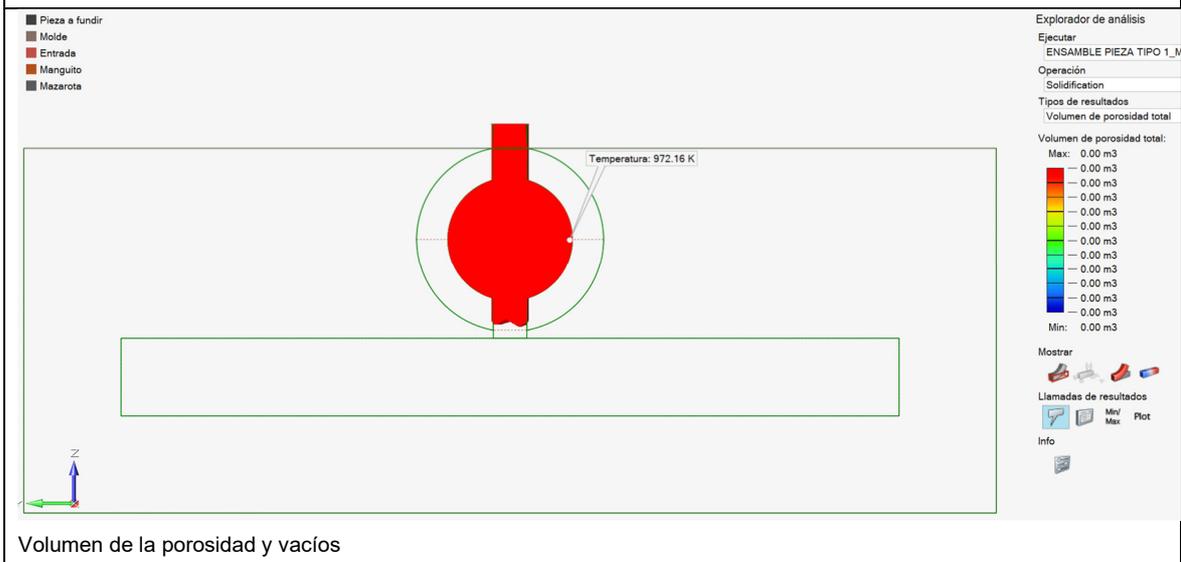
Mazarota esférica con camisa exotérmica – Tamaño 60%

t_v = tiempo de llenado

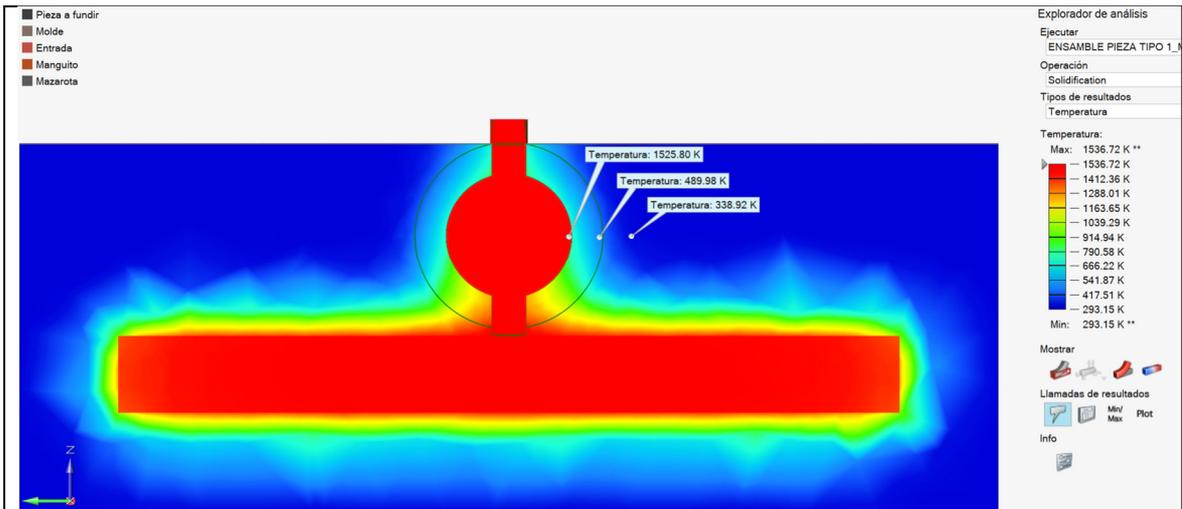
t_s = tiempo de solidificación



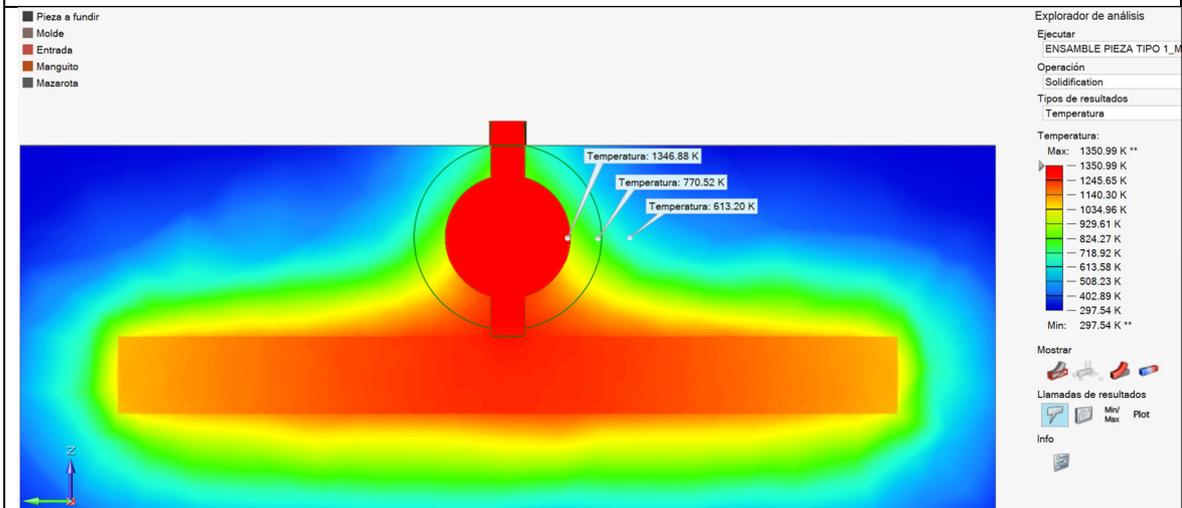
Análisis CFD del proceso de llenado ($t_v=1$ s)



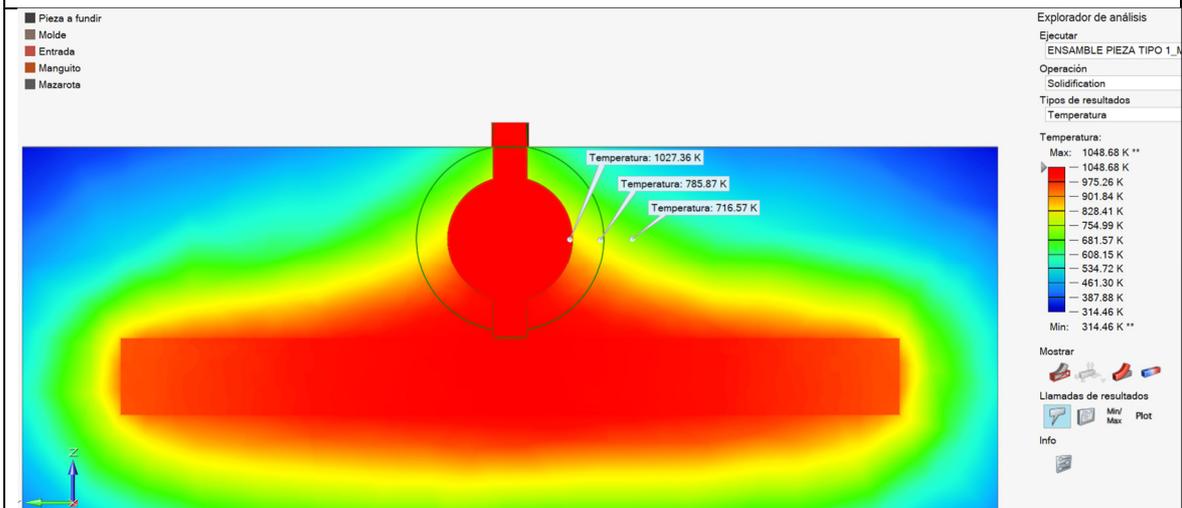
Volumen de la porosidad y vacíos



Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=100$ s)



Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=500$ s)

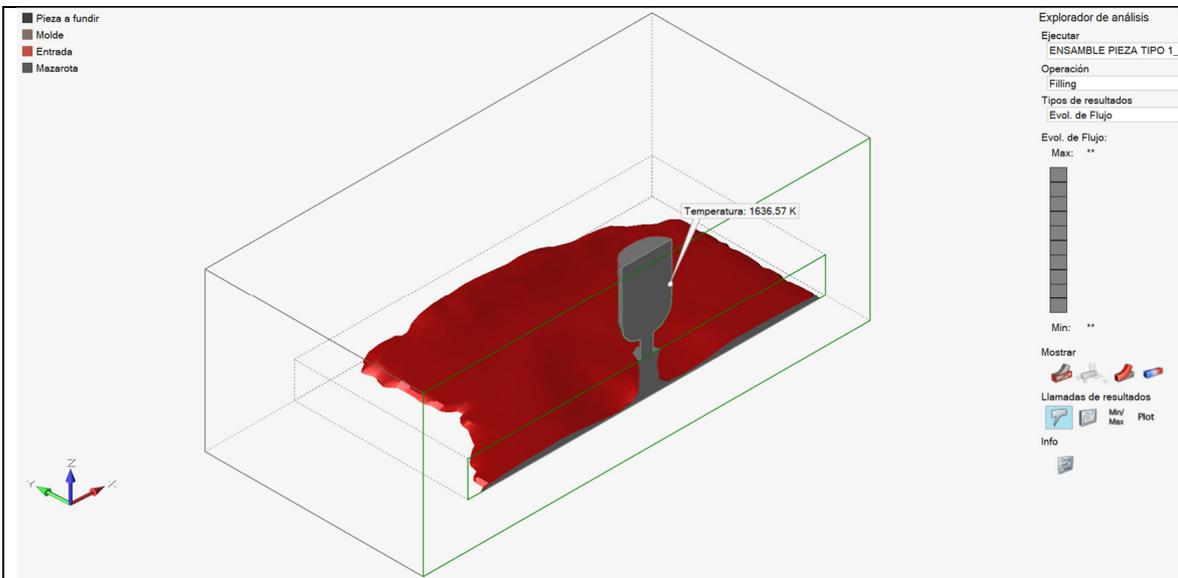


Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=1000$ s)

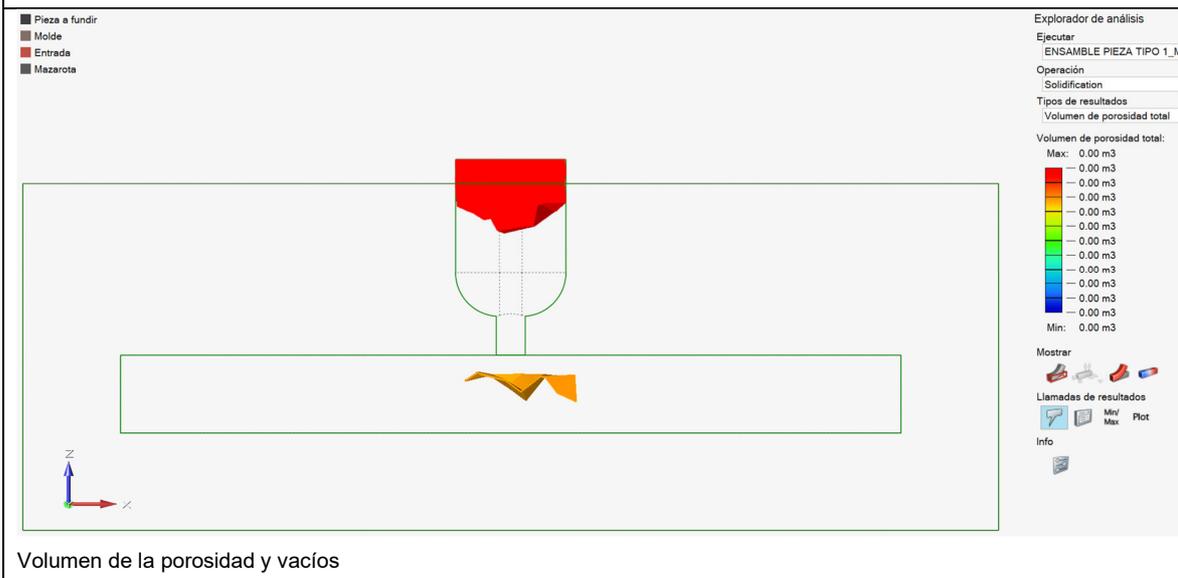
Mazarota ovalada convencional – Tamaño 60%

t_v = tiempo de llenado

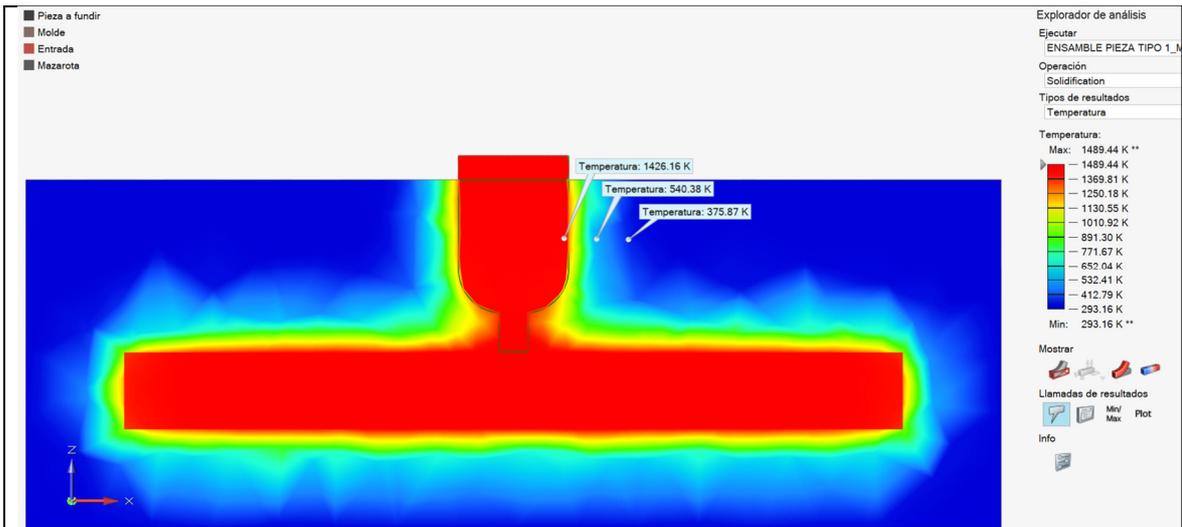
t_s = tiempo de solidificación



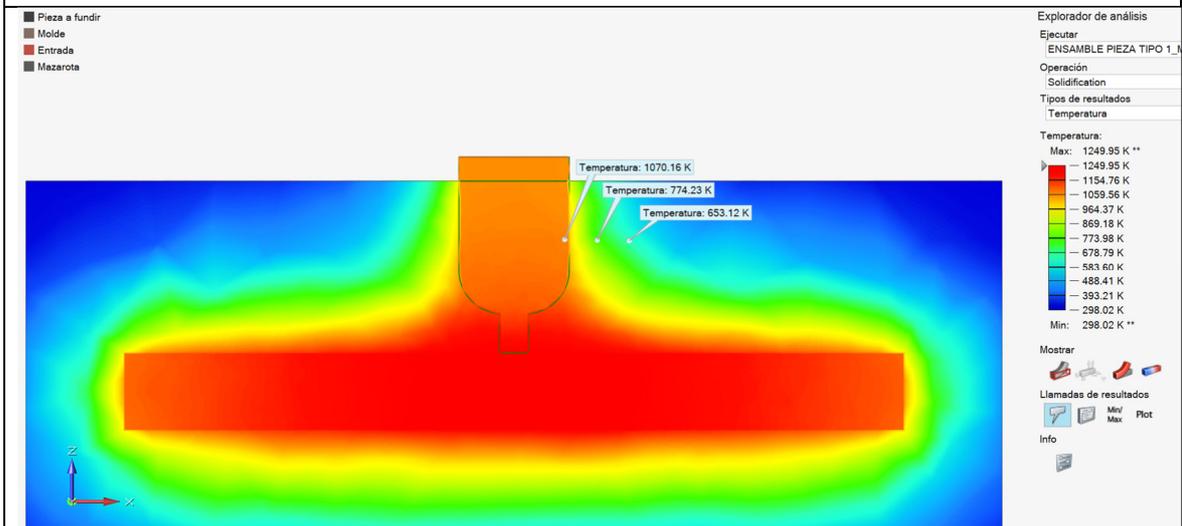
Análisis CFD del proceso de llenado ($t_v=1$ s)



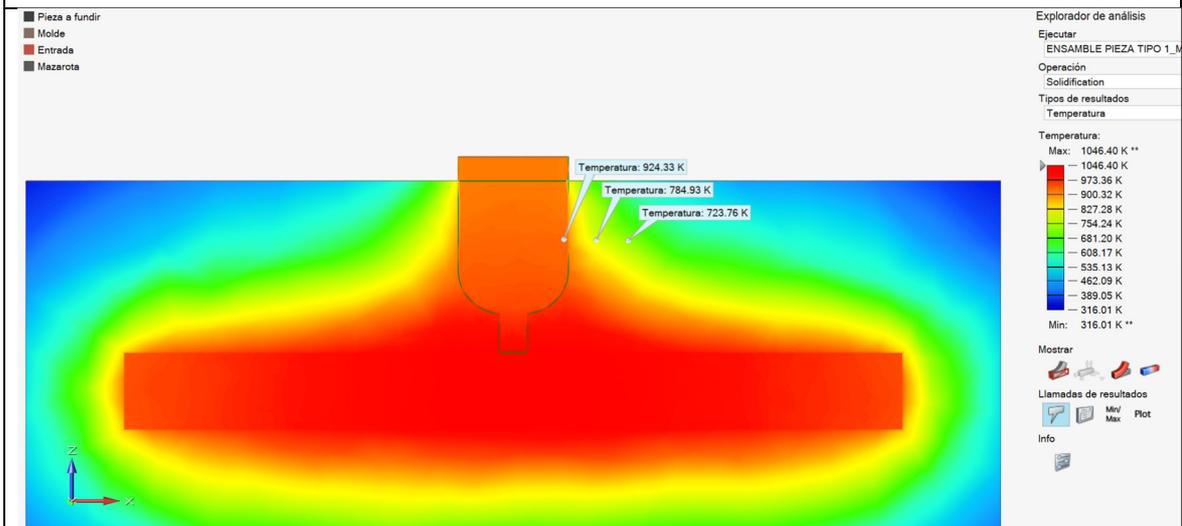
Volumen de la porosidad y vacíos



Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=100$ s)



Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=500$ s)

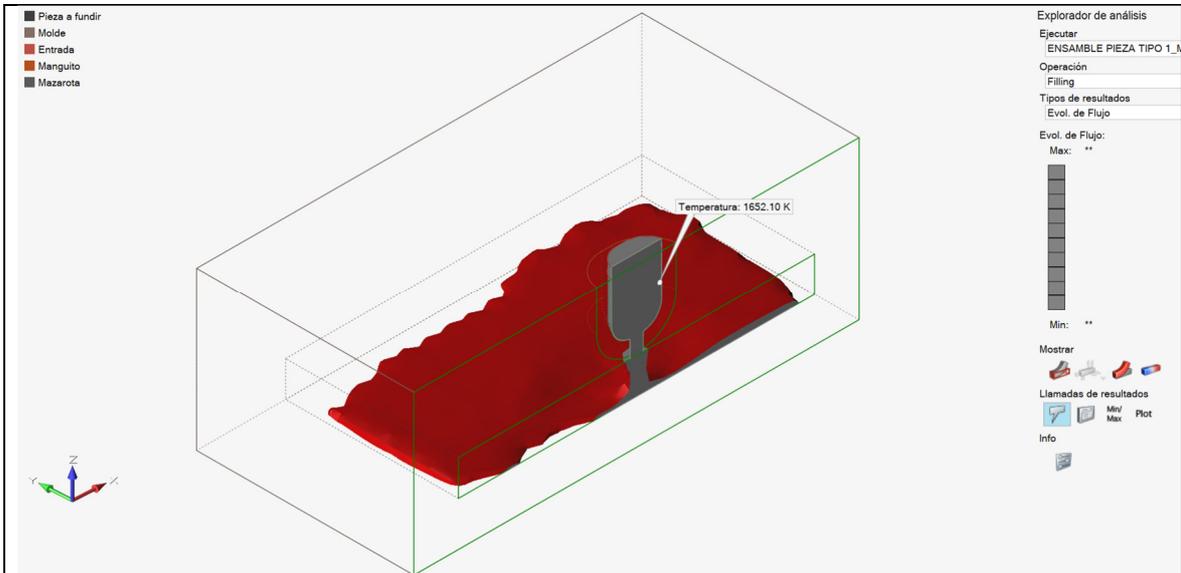


Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=1000$ s)

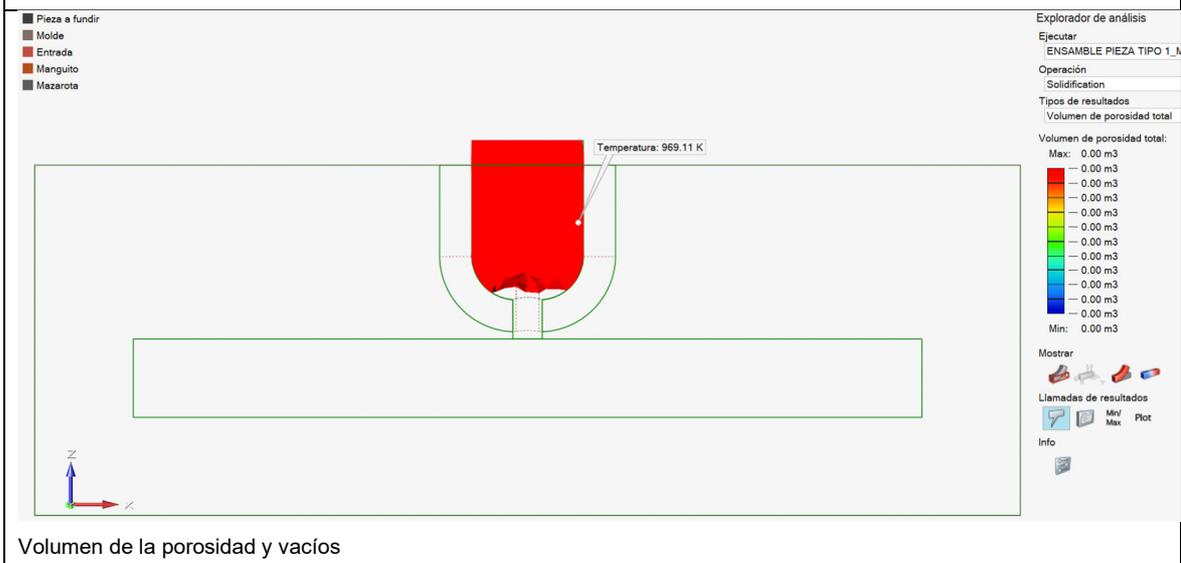
Mazarota ovalada con camisa exotérmica – Tamaño 60%

t_v = tiempo de llenado

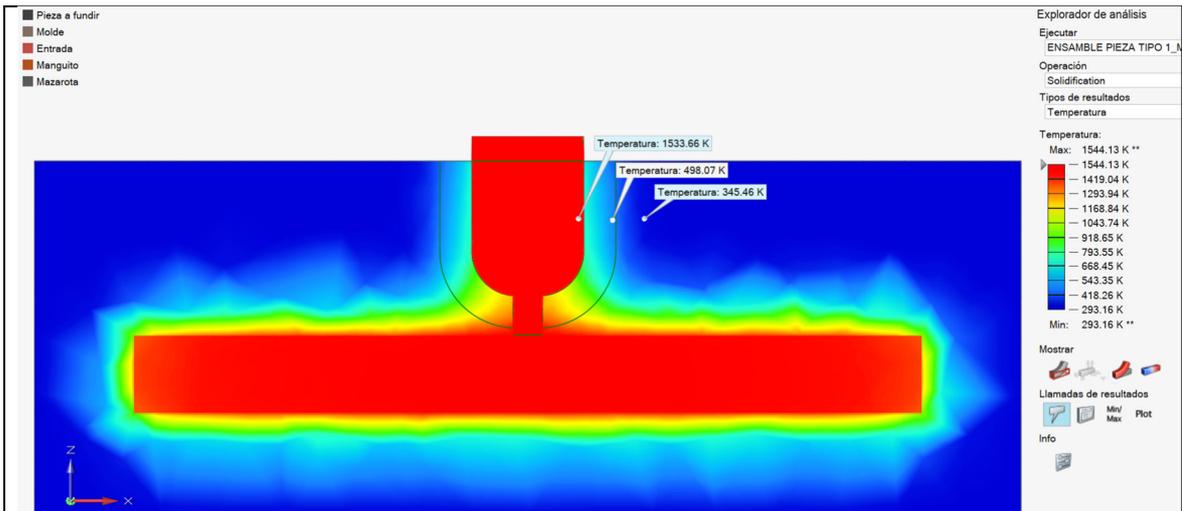
t_s = tiempo de solidificación



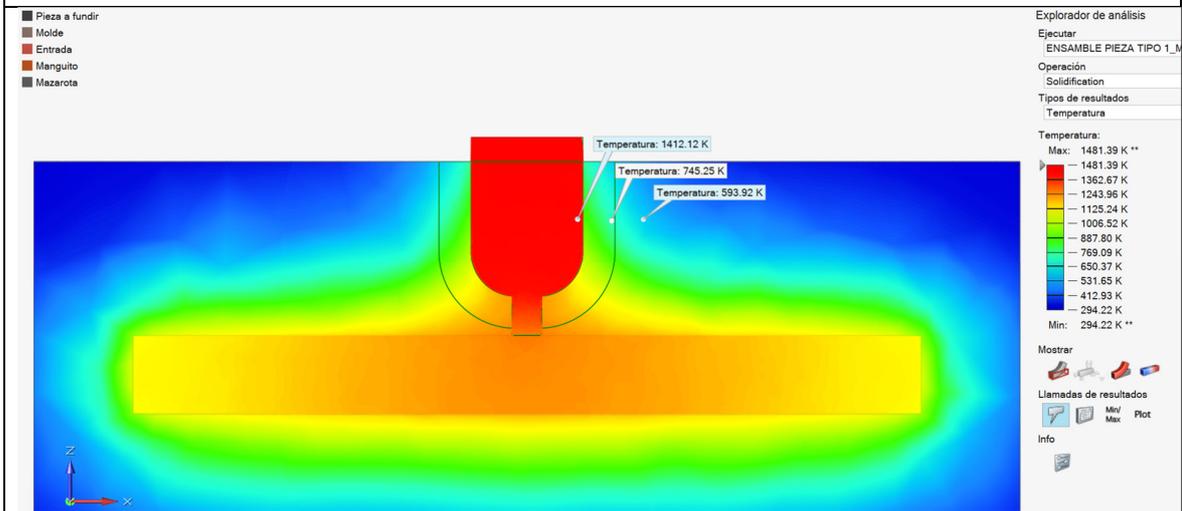
Análisis CFD del proceso de llenado ($t_v=1$ s)



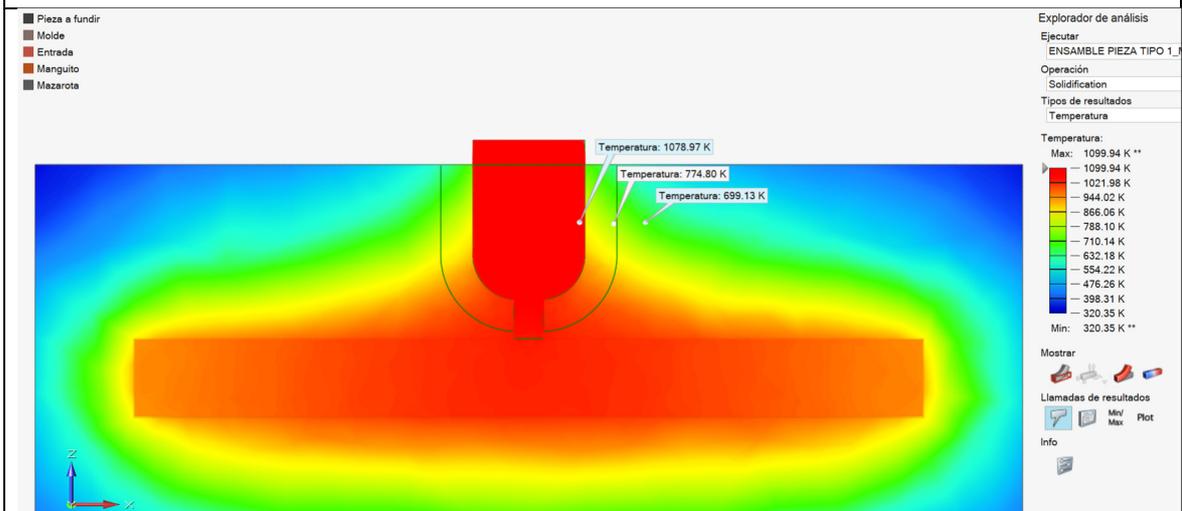
Volumen de la porosidad y vacíos



Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=100$ s)



Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=500$ s)



Análisis de la temperatura con respecto al tiempo ($t_s=1000$ s)