



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial

Simulación numérica del proceso de fusión/solidificación de materiales de cambio de fase embebidos en una matriz de espuma metálica para acumulación de energía solar térmica

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: José Antonio Martínez De La Morena

Director: José Pérez García

Cartagena, a 17 de julio de 2018



Universidad
Politécnica
de Cartagena

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1. Objetivos del Trabajo Fin de Grado.....	7
1.2. Estructura del Trabajo Fin de Grado	8
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	10
3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	21
3.1. Características geométricas de la espuma metálica.....	22
3.1.1. Ratio entre área espuma metálica y volumen de PCM.....	25
3.2. Propiedades termofísicas del PCM utilizado.....	27
3.3. Transmisión de calor: Conducción y convección.....	29
4. METODOLOGÍA DE MODELADO Y MALLADO	33
4.1. Estrategia de modelado	35
4.2. Estrategia de mallado	41
4.3. Condiciones de contorno	45
4.4. Modelos estudiados	47
4.4.1. Modelo 1: Espuma metálica FCC.....	47
4.4.2. Modelo 2: Espuma metálica Lobular	54
5. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN NUMÉRICA	58
5.1. Flow solvers en Fluent	58
5.2. Sistema de ecuaciones.....	60
5.3. Modelado de la transferencia de calor.....	61
5.4. Fusión y Solidificación.....	63
5.5. Flujos Multifásicos.....	65
5.6. Convección natural.....	70
5.7. Estudio de sensibilidad de malla	71
5.8. Simulación de los modelos estudiados	75
5.8.1. Modelo 1: Espuma metálica FCC.....	75
5.8.2. Modelo 2: Espuma metálica Lobular	82
6. RESULTADOS.....	88
7. CONCLUSIONES DEL TRABAJO FIN DE GRADO	104

LISTA DE TABLAS

1. Propiedades termofísicas del n-octadecano
2. Propiedades termofísicas del PCM eritritol
3. Propiedades termofísicas del PCM eritritol
4. Propiedades termofísicas del PCM cera de parafina
5. Densidad del RT44HC en función de la temperatura
6. Propiedades termofísicas de la espuma de aluminio
7. Compatibilidad entre elementos y tipos de malla, Gambit

LISTA DE FIGURAS

1. Definición del problema C. Benard, D. Gobin y A. Zanolì, 1985
2. Gráficas de las isothermas en las fases solidas y líquidas: (a) para 35 minutos; (b) para 10 horas
3. Configuraciones estudiadas por Francis Agyenim, Philip Eames y Mervyn Smyth
4. Comparación de los perfiles medios de temperatura de las tres configuraciones durante el proceso de carga y descarga
5. Configuración del TTHX
6. Configuraciones estudiadas por Abduljalil A. Al-Abidi, Sohif Mat, K. Sopian, M.Y. Sulaiman y Abdulrahman Th Mohammad
7. Comparación de la fracción de líquido en el tubo aleteado, caso A y caso D
8. Influencia del número de aletas en el tiempo de solidificación
9. Influencia de la longitud de la aleta sobre el ratio de solidificación
10. Influencia de la unidad geométrica del PCM en el tiempo de solidificación
11. Modelo sólido de una celda unitaria de (a) espuma metálica con configuración FCC de poros y (b) PCM obtenido tomando la inversa de la estructura de la espuma metálica
12. Evolución de la temperatura en el centro del PCM en función del tiempo para diferentes porosidades
13. Conductividad térmica del PCM en función de la Temperatura y el tamaño de los poros
14. Evolución de la temperatura en el centro del PCM en función del tiempo y de la consideración de la convección natural
15. Estructura FCC según modelo de esferas rígidas ideales
16. Geometría 1: Estructura FCC, AutoCad
17. Geometría 2: Estructura lobular 2D, Gambit
18. Geometría 2: Estructura lobular 3D, Gambit
19. Área y volumen de la espuma metálica, AutoCad
20. Área de espuma metálica y volumen de PCM para el cálculo del ratio de la geometría 2
21. Cálculo del ratio: Geometría 2
22. Clasificación general de los PCM

23. Balance energético de la conducción de calor en un volumen de control cúbico
24. Disciplinas que integran la CFD
25. Tubo con aletas radiales, SolidWorks
26. Tubo con aletas radiales y con carcasa, SolidWorks
27. Ventana “Import IGES File” por defecto, Gambit
28. Ejemplo de hueco entre caras no conectadas, Gambit
29. Ventana de opciones “connect”, Gambit
30. Conectar 3 vértices en forma de T, Gambit
31. Ventana “Merge Faces”, Gambit
32. Ventana para mallado de aristas, Gambit
33. Ventana para mallado de caras, Gambit
34. Ventana “Specify Boundary Types”, Gambit
35. Ventana “Specify Continuum Types”, Gambit
36. Ventana “Export Mesh File”, Gambit
37. Modelo 1 en 2D, Gambit
38. Modelo 1 en 3D, Gambit
39. Malla Modelo 1 en 3D, Gambit
40. Modelo 2 en 2D, Gambit
41. Modelo 2 en 3D, Gambit
42. Malla Modelo 2 en 3D, Gambit
43. Ventana para selección del solver, Fluent
44. Condiciones de contorno térmicas, Fluent
45. Ventana de opciones Solidification/Melting, Fluent
46. Consideración de las fases, Fluent
47. Modelos de flujos multifásicos, Fluent
48. Opciones de Esquemas de Discretización Espacial, Fluent
49. Condiciones de contorno para las fases, Fluent
50. Ventana “Operating Conditions”, Fluent
51. Malla con mayor número de celdas en Modelo 2, Gambit
52. Malla con menor número de celdas en Modelo 2, Gambit
53. Malla utilizada en Modelo 1, Gambit
54. Ventana “Scale Grid”, Fluent
55. Propiedades del agua líquida, Fluent
56. Propiedades del RT44HC
57. Propiedades del aluminio, Fluent

58. Condición de contorno carcasa en Modelo 1, Fluent
59. Condición de contorno fluido caloportador en Modelo 1, Fluent
60. Condición de contorno espuma metálica en Modelo 1, Fluent
61. Solver utilizado en Modelo 1, Fluent
62. Controles de resolución utilizados en Modelo 1, Fluent
63. Condiciones iniciales en Modelo 1, Fluent
64. Parámetros de iteración en Modelo 1, Fluent
65. Propiedades del aire en Modelo 2, Fluent
66. "Operating Condition" en Modelo 2, Fluent
67. Activación VOF en Modelo 2, Fluent
68. Controles de resolución utilizados en Modelo 2, Fluent
69. Parámetros de iteración en Modelo 2, Fluent
70. Velocidad de salida fluido caloportador, Modelo 1
71. Temperatura estática para $t = 0$ s, Modelo 1
72. Temperatura estática para $t = 12$ s, Modelo 1
73. Temperatura estática para $t = 160$ s, Modelo 1
74. Temperatura estática para $t = 320$ s, Modelo 1
75. Temperatura estática para $t = 600$ s, Modelo 1
76. Temperatura estática para $t = 3022$ s, Modelo 1
77. Fracción Líquida para $t = 0$ s, Modelo 1
78. Fracción Líquida para $t = 10$ s, Modelo 1
79. Fracción Líquida para $t = 76$ s, Modelo 1
80. Fracción Líquida para $t = 204$ s, Modelo 1
81. Fracción Líquida para $t = 687$ s, Modelo 1
82. Fracción Líquida para $t = 2962$ s, Modelo 1
83. Convergencia de ecuaciones, Modelo 1
84. Velocidad en z, Modelo 2 con gravedad
85. Fracción Líquida Fusión para $t = 1,64$ s, Modelo 2
86. Fracción Líquida Fusión para $t = 7,24$ s, Modelo 2
87. Fracción Líquida Fusión para $t = 32,34$ s, Modelo 2
88. Fracción Líquida Solidificación para $t = 57,24$ s, Modelo 2
89. Fracción Líquida Solidificación para $t = 69,94$ s, Modelo 2
90. Fracción Líquida Solidificación para $t = 130,44$ s, Modelo 2
91. Convergencia de la Temperatura Estática, Modelo 2
92. Convergencia de ecuaciones, Modelo 2 . 93. Velocidad en z, Modelo 2 sin gravedad

1. INTRODUCCIÓN

La naturaleza intermitente de la energía solar hace imprescindible el desarrollo de tecnologías de almacenamiento de energía térmica más eficientes. El almacenamiento de energía en forma de calor latente (LHTES), permite una mayor densidad energética de almacenamiento, así como, cambios de temperatura mucho más pequeños, en comparación con los que se tienen en sistemas basados en el almacenamiento de energía en forma de calor sensible.

En los sistemas LHTES, el calor se almacena a través del cambio de fase de un material a una temperatura relativamente constante. El uso de PCM para propósitos de LHTES presenta inconvenientes como; la estabilidad a largo plazo de las propiedades termo-físicas del PCM, su baja conductividad térmica, la segregación de fases, y el subenfriamiento durante el proceso de cambio de fase.

En este contexto, en los últimos años se está analizando la mejora en el proceso de fusión/solidificación del PCM, que supone la utilización de una matriz de espuma metálica para incrementar la superficie de transferencia de calor, y por tanto, la velocidad del proceso de carga y descarga de energía en función de la demanda. En general, los PCM poseen una conductividad térmica baja, lo que conlleva una lenta disipación de calor y un irregular frente de fusión. Para los sistemas de almacenamiento de energía esto se traduce en un ratio lento de carga y descarga, es decir, un sistema de baja eficiencia. En consecuencia, en los últimos años se han desarrollado numerosas técnicas con el objetivo concreto de mejorar la conductividad térmica de los PCMs. Las más destacadas son: la adición de nanorellenos de alta conductividad, incluyendo aletas internas, e infiltrando el PCM en grafito y espumas metálicas. De todas estas técnicas, la que ha resultado más atractiva a los investigadores es la infiltración de PCMs en espumas metálicas, debido a la alta conductividad térmica isotrópica que proporciona la estructura metálica, ya que esta forma una red continua que extiende el calor de forma más rápida alrededor de la matriz de PCM.

Una espuma metálica es un material metálico poroso, con estructura de celdas irregulares o regulares, de elevada porosidad. Es decir, que contiene una gran fracción de huecos, o volúmenes llenos de gas (poros). Los poros pueden formar volúmenes cerrados o sellados (espumas de celda cerrada, “closed-cell foam”), o una red de cavidades interconectadas (espumas de celda abierta, “open-cell foam”). Debido a la alta relación superficie-volumen, las espumas metálicas ligeras de células abiertas y alta porosidad presentan una excelente combinación de compacidad, bajo peso, y alta conductividad térmica. Por ello, las espumas metálicas han emergido como uno de los materiales más prometedores para su uso en LHTES.

Las espumas metálicas presentan una conductividad térmica de un orden de magnitud superior a los materiales sólidos convencionales, al mismo tiempo, su estructura interna aleatoria, y su alta porosidad puede acelerar el proceso de cambio de fase sin reducir significativamente la capacidad de almacenamiento de calor del PCM. Además, la

distribución de los ligamentos de espuma en el PCM hace que el proceso de fusión/solidificación sea más uniforme.

Existen diferentes procesos de fabricación, y muchos tipos de espumas metálicas, siendo las más utilizadas de Aluminio, Cobre, y/o Níquel. Los parámetros geométricos que caracterizan las espumas metálicas son; porosidad (típicamente por encima de 90%), densidad de poros (PPI, número de poros por pulgada, que varía típicamente de 10 a 40), tamaño de poro (mm), y el diámetro del ligamento. Normalmente, la porosidad y el tamaño de poro son los parámetros independientes utilizados para describir las características de la estructura de medios porosos. Además, para el modelado de las espumas metálicas se requieren correlaciones para definir otras propiedades tales como: permeabilidad (k), coeficiente de inercia (CI), densidad de área de superficie interfacial (A_{sf}), y conductividad térmica efectiva (k_{eff}).

El proceso de fusión/solidificación del PCM embebido en la matriz de espuma metálica se puede estudiar experimental o numéricamente. En este TFG se estudiará mediante simulación numérica, pudiendo abordarse el problema a nivel microscópico (pore-scale approach), o macroscópico (volume-averaged scale). En el primer caso se debe reproducir la intrincada estructura real de la espuma metálica, y se estudia solo el proceso de transferencia de calor entre el PCM y la espuma metálica, en un número reducido de celdas. En la aproximación, macroscópica, se suele estudiar un número significativo de celdas, representativas de la estructura real, o simplificada (modelizada), de la espuma metálica. Por otra parte, en ambas escalas de aproximación, los modelos numéricos pueden ser 2D o 3D.

1.1. OBJETIVOS DEL TRABAJO FIN DE GRADO

El objetivo principal del Trabajo Fin de Grado es definir geoméricamente y modelar la espuma metálica en la que se embeben los materiales de cambio de fase estudiados (Phase Change Material, PCM). Para ello, se definirán varios modelos, tanto en 2D como 3D. Posteriormente, se procederá a la simulación de dichos modelos en el software de Fluent, permitiendo resolver los problemas planteados. Como objetivos de simulación se encuentran la simulación del proceso de fusión y solidificación, así como el estudio de la convección natural en este proceso.

El PCM constituye el relleno de la matriz metálica porosa que actúa como superficie extendida de un intercambiador de calor para acumulación de energía solar térmica (Thermal Energy Storage, TES). Una vez definida la geometría, se desarrollará una metodología de simulación numérica, que permita evaluar, y caracterizar, el proceso de fusión/solidificación (cambio de fase) del PCM, así como, la mejora que se produce en dicho proceso de carga y descarga de energía, en forma de calor sensible y latente, al aumentar la superficie de transferencia.

El Trabajo Fin de Grado incluye también realizar una revisión bibliográfica en relación con las estrategias de modelado de la espuma metálica a nivel macroscópico y/o microscópico, en función de sus características geométricas, así como, de los modelos

numéricos utilizados por otros investigadores para simular el proceso de fusión/solidificación, teniendo en cuenta efectos como la convección natural, o el cambio de volumen del PCM durante el proceso de cambio de fase.

1.2. ESTRUCTURA DEL TRABAJO FIN DE GRADO

En este capítulo de introducción, se han detallado cuáles son los objetivos del presente TFG y se ha presentado el contexto científico en el que aparecen los sistemas de almacenamiento de energía en forma de calor latente, así como la aplicación de los materiales avanzados de cambio de fase para acumulación de energía.

En el capítulo 2, se resumen las principales simulaciones que han servido de base y precedentes al TFG. Se ordenan cronológicamente, según la publicación de los artículos, ya que la simulación numérica CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) continúa desarrollándose y avanzando considerablemente en el tiempo, siendo necesario establecer, en consecuencia, un orden temporal.

El capítulo 3 introduce el problema que se resuelve en el presente trabajo. Por un lado, se explican las geometrías que finalmente han sido seleccionadas para la espuma metálica, y por otro, las propiedades termo-físicas de los PCM que se han utilizado para realizar las simulaciones numéricas. También se describe el proceso de transmisión de calor, que constituye el principal estudio del problema, a través de los mecanismos de conducción y convección de calor.

En el capítulo 4, se recoge una amplia explicación sobre la metodología de modelado y mallado. Se exponen las opciones existentes para realizar el modelo deseado, justificando cuál es el método escogido, así como el procedimiento básico que debe seguirse para la óptima obtención de cualquier modelo. Igualmente se describe la estrategia de mallado. También se detallan las condiciones de contorno, imprescindibles en el devenir de la simulación, que deben establecerse en la herramienta de modelado. Finalmente, se presentan los modelos realizados y posteriormente estudiados.

El capítulo 5 corresponde a la metodología de simulación numérica. Recoge una breve introducción al software de Fluent, que es la herramienta de simulación empleada en el TFG, así como una explicación de los pasos a seguir en la metodología desarrollada. Se presenta el sistema de ecuaciones que se resolverá numéricamente. Las simulaciones incluyen el proceso de fusión y solidificación, la convección natural, así como un estudio de sensibilidad de malla. Además, se realiza una profunda explicación sobre los flujos multifásicos, ya que será necesario su empleo para la simulación de uno de los modelos presentados.

En el capítulo 6, se muestran tanto los planteamientos de las simulaciones de cada modelo como sus resultados, justificando en cada caso qué se ha simulado y los comentarios sobre el resultado obtenido.

El capítulo 7 pone cierre al TFG mediante la exposición de las conclusiones derivadas del mismo, que pueden servir de base para futuros trabajos e investigaciones respecto al problema planteado.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo, se resumen las principales simulaciones numéricas y conclusiones de los artículos e investigaciones contenidos en la bibliografía, que se han considerado de mayor interés.

Ya sobre 1985, C. Benard, D. Gobin y A. Zanolì [10], analizaron el proceso de fusión en un recinto rectangular que contiene el PCM, acoplado la conducción de calor en el sólido y la convección natural en la fusión del PCM. El propósito de su estudio fue dar una visión más profunda al acoplamiento de varios fenómenos físicos en los que gobierna el proceso de fusión.

El PCM contenido en el recinto se trata de n-octadecano al 99,9% puro, cuyas propiedades termofísicas se resumen en la Tabla 1.

Thermophysical property	Temperature range	Value
Fusion temperature		28.05
Latent heat (J kg^{-1})		241000
Thermal conductivity ($\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)	liquid	0.157
	solid	0.390
Specific heat ($\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)	liquid	2200
	solid	1900
Density (kg m^{-3})	liquid T_F	776.8
	liquid 30°C	775.5
	liquid 40°C	768.4
	solid	814
Kinematic viscosity ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)	30°C	5.005×10^{-6}
	35°C	4.468×10^{-6}
	40°C	4.013×10^{-6}

Tabla 1. Propiedades termofísicas del n-octadecano

Las hipótesis del problema que resolvieron son las siguientes:

1. El material líquido es incompresible, un fluido newtoniano y sigue la aproximación de Boussinesq.
2. El proceso es bidimensional.
3. Las propiedades termofísicas de las fases sólida y líquida son constantes dentro del rango de temperaturas de interés.
4. El flujo es laminar.
5. No se tiene en cuenta el cambio de densidad del material durante la solidificación.
6. El flujo convectivo apenas está influenciado por el movimiento de la superficie de contacto.
7. En cada paso de tiempo, la convección natural se encuentra en estado estacionario.

Dicho problema estudiado se describe en la Figura 1.

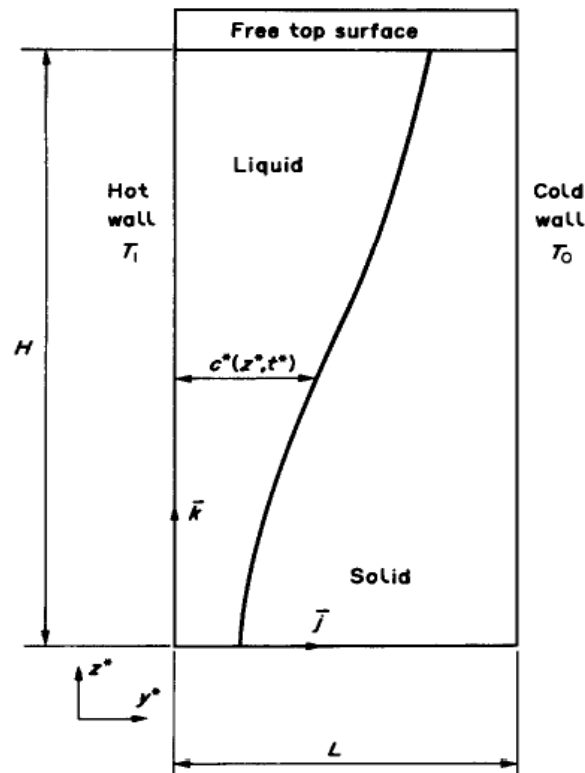


Figura 1. Definición del problema de C. Benard, D. Gobin y A. Zanolli, 1985. [10].

El método de solución adoptado fue el siguiente:

- Resolver de forma separada las ecuaciones de la convección natural en la cavidad líquida fija no rectangular.
- Utilizar régimen estacionario en el campo de temperaturas para calcular la transferencia de calor en la superficie de contacto (en la zona del líquido).
- Simular simultáneamente el movimiento de la superficie de contacto y la ecuación de la conducción de calor transitoria en la fase sólida en un paso de tiempo predeterminado.

Las Figura 2 muestra las isotermas obtenidas en la simulación, y como conclusiones de este artículo se obtienen las siguientes:

- La transmisión de calor empieza a ser significativa con el transcurso del tiempo en función del área de intercambio de calor. Cuanto mayor sea esta área más rápido se apreciará dicha transferencia de calor, es decir, antes fundirá el PCM.
- La expansión volumétrica del PCM fundido provoca que este fluya de vez en cuando sobre la superficie de la fase sólida. Aunque la influencia de esta perturbación se limita en la parte superior del dominio del sólido.
- El flujo de la convección natural en la fase líquida (PCM) sigue siendo laminar.

- Las propiedades termofísicas de las fases sólida y líquida pueden considerarse constantes.
- La superficie de contacto puede considerarse lisa.

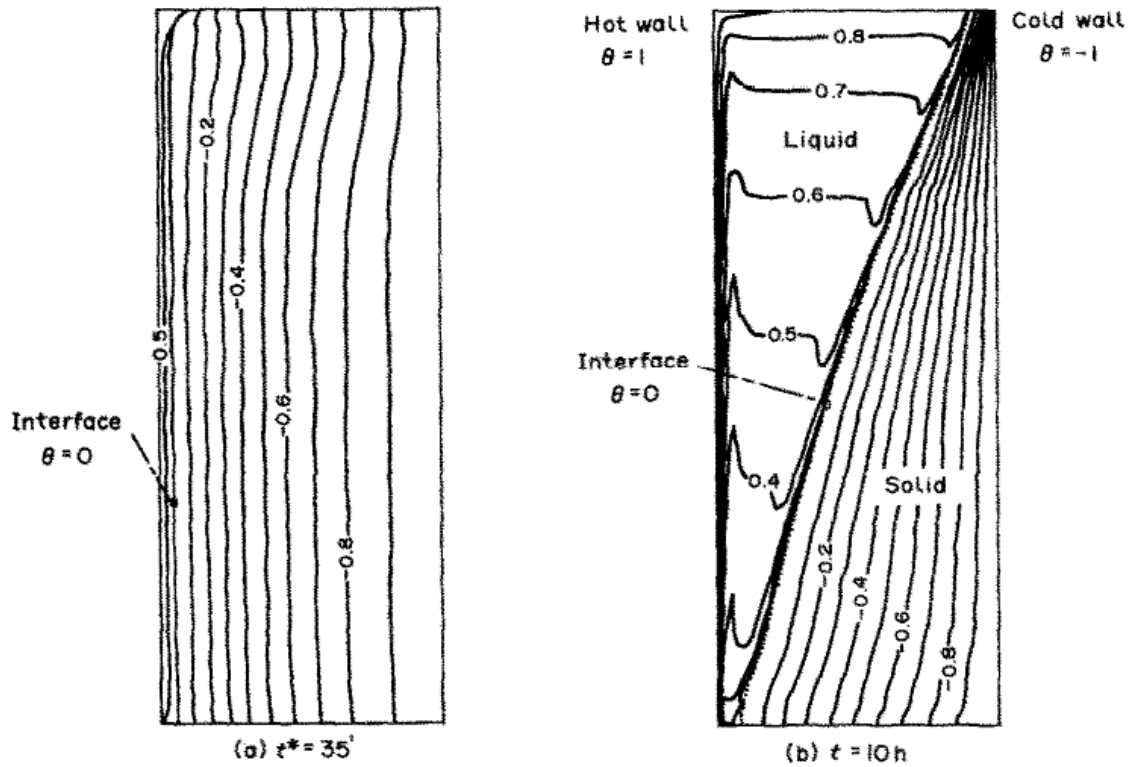


Figura 2. Gráficas de las isotermas en las fases sólidas y líquidas: (a) para 35 minutos; (b) para 10 horas.

Más tarde, en 2009, Francis Agyenim, Philip Eames y Mervyn Smyth [26] realizaron un estudio experimental basado en el diseño de un sistema de almacenamiento de energía que consiste en un intercambiador horizontal de tubos concéntricos haciendo uso de un PCM, el eritritol (sus propiedades termofísicas se encuentran en la Tabla 2). Estudiaron tres configuraciones: un sistema de control sin mejora de la transferencia de calor, sistemas mejorados con aletas circulares, y con aletas longitudinales.

Property	Value
Melting point, T_m	117.7 °C
Heat of fusion, λ_{PCM}	339.8 kJ kg ⁻¹
Specific heat of PCM, liquid, $C_{p,l}$	2.76 kJ kg ⁻¹ K ⁻¹
Specific heat of PCM, solid, $C_{p,s}$	1.38 kJ kg ⁻¹ K ⁻¹
Thermal conductivity of PCM, liquid, k_l	0.326 W m ⁻¹ K ⁻¹ (140 °C)
Thermal conductivity of PCM, solid, k_s	0.733 W m ⁻¹ K ⁻¹ (20 °C)
Density of PCM, liquid, ρ_l	1300 kg m ⁻³ (140 °C)
Density of PCM, solid, ρ_s	1480 kg m ⁻³ (20 °C)

Tabla 2. Propiedades termofísicas del PCM Eritritol.

A pesar de ser un estudio experimental, y el problema del presente TFG consistir en una simulación numérica, las conclusiones de este estudio se consideran de especial importancia para la comprensión de la transferencia de calor entre un sólido y el PCM para la acumulación de energía.

Los experimentos que realizaron fueron de fusión y solidificación, para estudiar el efecto de variar la tasa de flujo másico del HTF (fluido caloportador) sobre el comportamiento térmico del PCM. Una vez demostrado qué tasa de flujo másico favorece la transmisión de calor, se utilizará dicho flujo para comparar las configuraciones durante la carga y descarga. La carga se realiza durante 8 horas. El HTF utilizado es aceite. En el primer experimento, Figura 3 (a), el PCM llena el espacio del cilindro y el HTF circula a través del tubo que no posee aumento de transferencia de calor. En el segundo experimento, Figura 3 (b), se emplea un tubo que integra 8 aletas circulares de cobre. La tercera configuración, Figura 3 (c), consiste en un tubo con 8 aletas longitudinales de cobre espaciadas igualmente 45°C alrededor del diámetro del tubo.

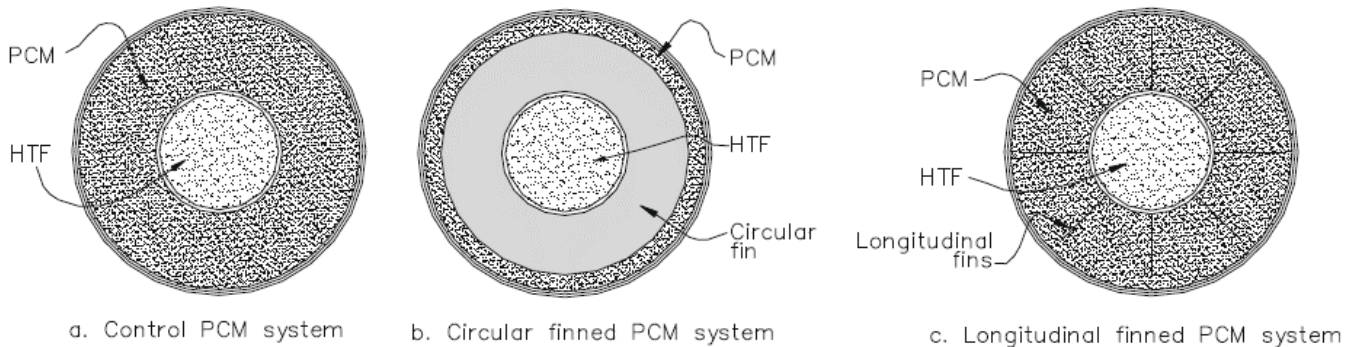


Figura 3. Configuraciones estudiadas por Francis Agyenim, Philip Eames y Mervyn Smyth, 2009 [26].

En cuanto a los parámetros de trabajo, se selecciona una temperatura de entrada constante del HTF de 140°C , y se toman valores de flujos másicos de 15, 20, 25 y 30 kg/min . El flujo es laminar excepto a la entrada del depósito PCM debido al cambio de diámetro del tubo que pasa de 28 a 51 mm. De los distintos flujos másicos, se observa que para los 15 kg/min el flujo regresa al estado laminar después de 0,8 m, y sin embargo, para el resto de flujos no alcanza el estado laminar. Además, se concluye que cuanto mayor es el flujo másico, mayores son las fluctuaciones de velocidad, mejorándose así la transferencia de calor al PCM. Por lo tanto, la comparación de configuraciones se realiza con los 30 kg/min^{-1} . En la Figura 4 se recogen los perfiles de temperaturas medios para la carga y descarga de las configuraciones mencionadas.

Finalmente, las conclusiones del estudio son:

- Cuanto mayor es el flujo másico, mejor es la transferencia de calor al PCM.
- La energía que el PCM absorbe durante la carga es en forma de calor sensible.
- La temperatura media en el sistema con aletas longitudinales es mayor en comparación con el sistema de aletas circulares y con el del tubo desnudo.
- En general, el uso de aletas produce una notable mejora en el proceso de transferencia de calor al PCM (se incrementa la superficie de transferencia de calor).

- Durante la carga y descarga, la región inferior del sistema de control es controlada por conducción, mientras que la región superior es controlada por convección.
- Como queda patente en la Figura 4, el sistema de aletas longitudinales es el más idóneo para lograr la óptima transferencia de calor. Además, se observa que el tiempo de solidificación es mayor que el de fusión.

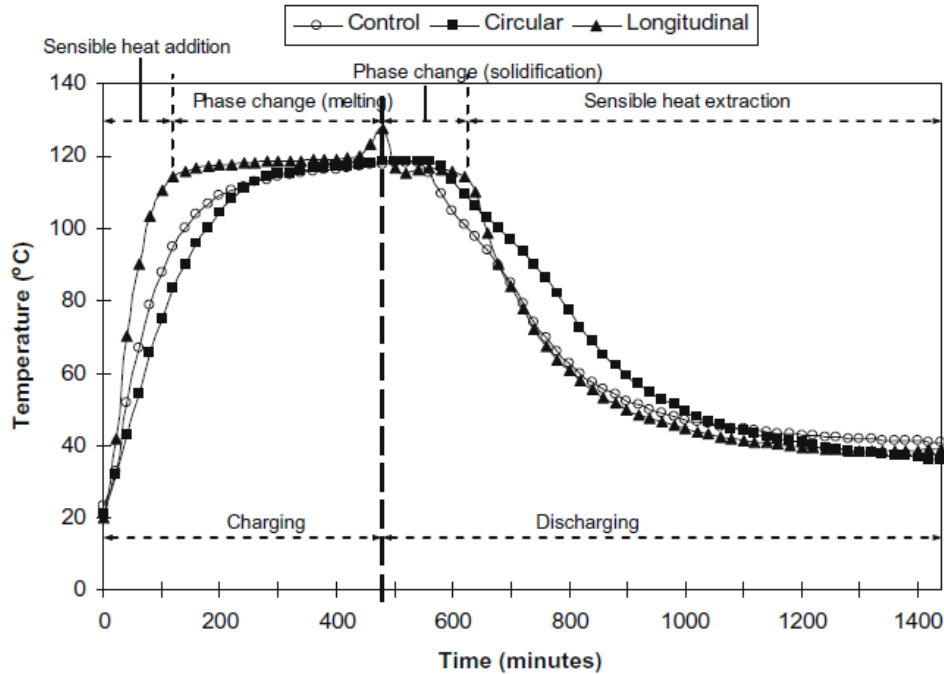


Figura 4. Comparación de los perfiles medios de temperatura de las tres configuraciones durante el proceso de carga y descarga.

En 2013 se publican dos artículos, de Abduljalil A. Al-Abidi, Sohif Mat, K. Sopian, M.Y. Sulaiman y Abdulrahman Th Mohammad [1], de lo más influyentes en cuanto a la simulación numérica del proceso de fusión y solidificación. Se tratan de un estudio numérico, en el que se investiga la fusión y solidificación de un PCM en un intercambiador de triple tubo (TTHX). Para la simulación numérica se considera el intercambiador con y sin aletas internas y externas para aumentar la transferencia de calor durante el proceso de carga y descarga del PCM. Además, usando un modelo numérico 2D, se estudia mediante el software Fluent 6.3.26 la solidificación del PCM en el interior y el exterior del tubo. El material utilizado como PCM es el RT82 (Rubitherm GmbH), cuyas propiedades termo-físicas se adjuntan en la Tabla 3.

Property	RT82	Copper
Density of PCM, solid, ρ_s (kg/m ³)	950	8978
Density of PCM, liquid, ρ_l (kg/m ³)	770	–
Specific heat of PCM, liquid, C_{p_l} , C_{p_s} (J/kg K)	2000	381
Latent heat of fusion, L (J/kg)	176,000	–
Melting temperature, T_m (K)	350.15–358.15	–
Thermal conductivity, k (W/m K)	0.2	387.6
Thermal expansion coefficient (1/K)	0.001	–
Dynamic Viscosity, μ (kg/m s)	0.03499	–

Tabla 3. Propiedades termofísicas del PCM RT82.

El planteamiento de este estudio se presenta mediante la Figura 5 en la que se representa la configuración del TTHX, y la Figura 6 en la que se recogen las configuraciones estudiadas.

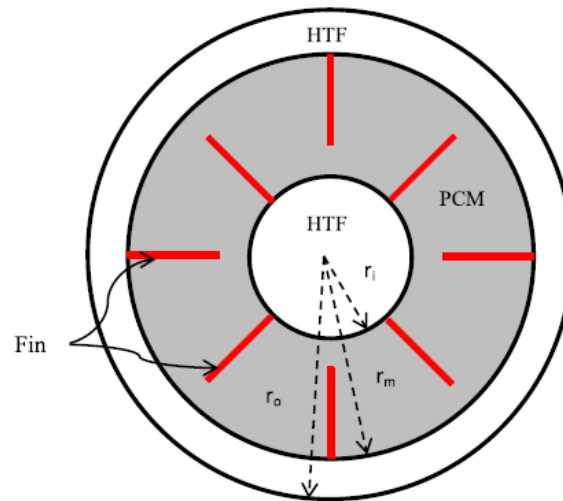


Figura 5. Configuración del TTHX.

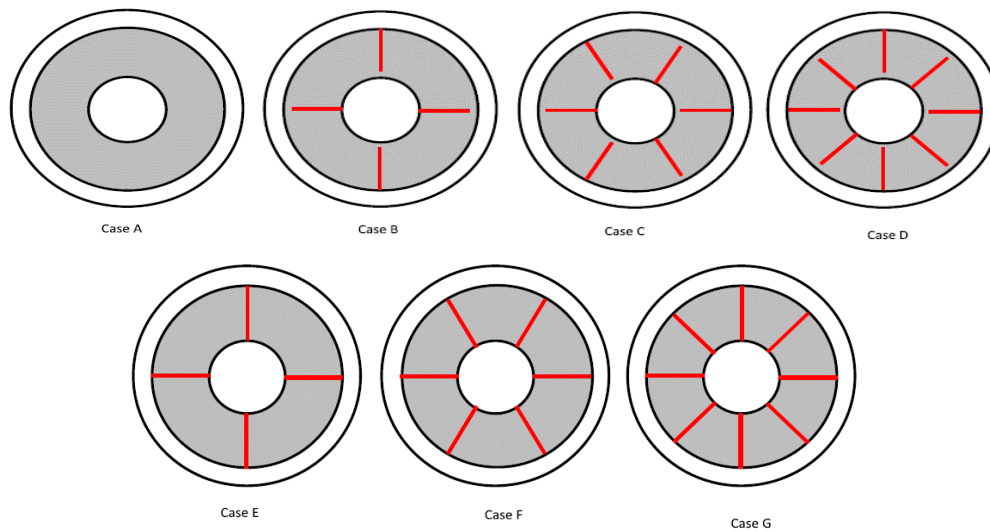


Figura 6. Configuraciones estudiadas por Abduljalil A. Al-Abidi, Sohif Mat, K. Sopian, M.Y. Sulaiman y Abdulrahman Th Mohammad. [1]

Tras realizar las simulaciones numéricas, los autores concluyen lo siguiente:

- Emplear aletas embebidas en el PCM constituye una de las bases para la mejora de la transferencia de calor. Se comparó la fracción de fusión del caso A con el caso D (conclusiones en figura 7).

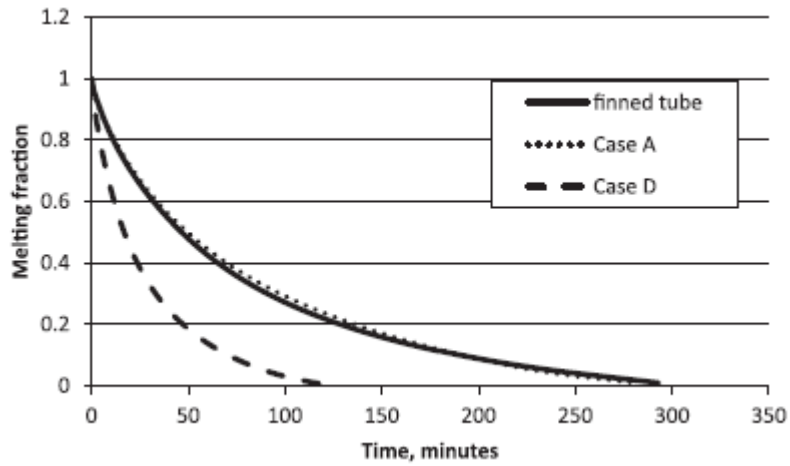


Figura 7. Comparación de la fracción de líquido en el tubo aleteado, caso A y caso D.

- Al aumentar el número de aletas se reduce la solidificación (véase Figura 8). Con la fusión ocurre al contrario, cuantas más aletas más se incrementa la fusión.

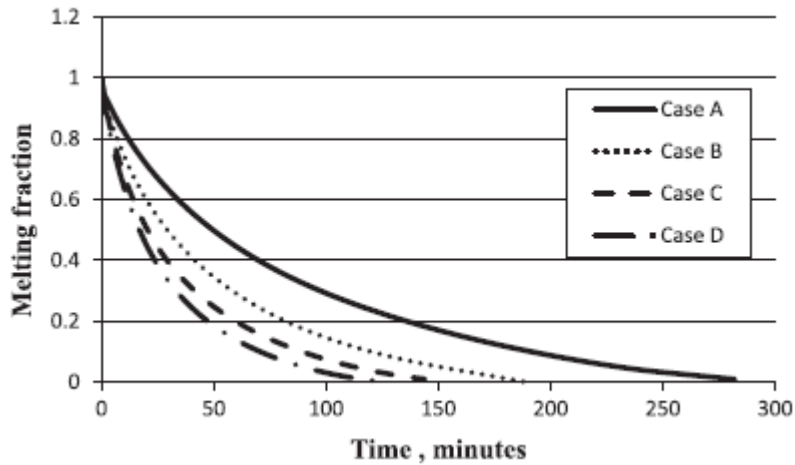


Figura 8. Influencia del número de aletas en el tiempo de solidificación.

- El tiempo de solidificación disminuye al aumentar la longitud de las aletas (véase Figura 9).

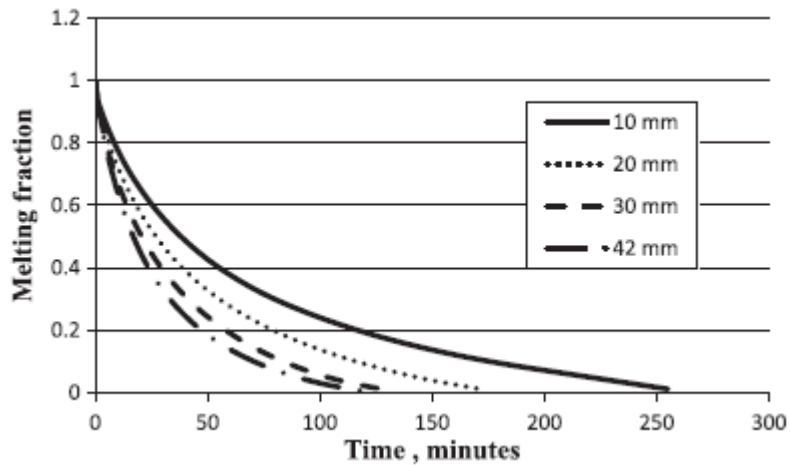


Figura 9. Influencia de la longitud de la aleta sobre el ratio de solidificación.

- El caso G (8 celdas de PCM) logra una completa solidificación en un tiempo pequeño.
- A partir de un determinado número de celdas de rejilla (cells grid) la solución numérica es independiente de dicho número de celdas de rejilla, ya que se logra la convergencia de las ecuaciones (residuos entre 10^{-3} y 10^{-6}).
- La convección natural es de especial importancia en el proceso de solidificación. Este hecho justifica que junto con el estudio de fusión y solidificación debe realizarse el de la convección natural.
- El ratio de transferencia de calor disminuye cuando la resistencia térmica aumenta debido al incremento de capas sólidas con baja conductividad térmica del PCM.
- El tiempo requerido para la solidificación disminuye al aumentar el número de cavidades de PCM (véase Figura 10).

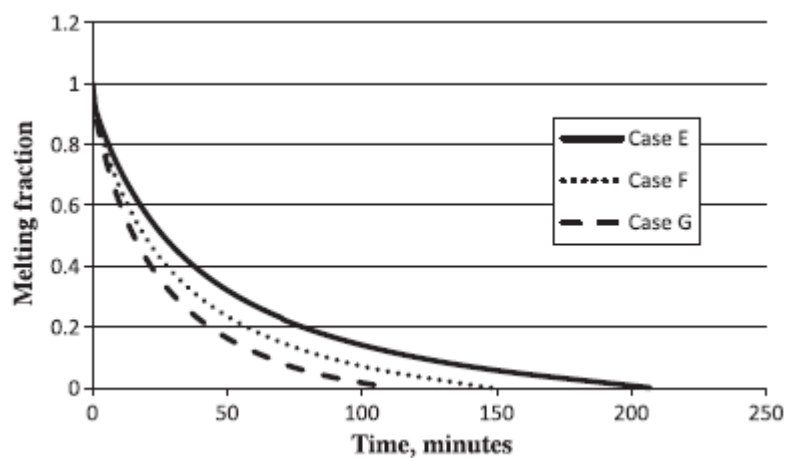


Figura 10. Influencia de la unidad geométrica del PCM en el tiempo de solidificación.

Todas las Figuras de la 7 a la 10, representan la fracción líquida para la solidificación de diferentes casos.

Finalmente, en 2014, Sriharsha S. Sundarram y Wei Li [5] publicaron un artículo en el que además de realizar una simulación numérica, emplearon una geometría diferente de espuma metálica respecto a otros artículos. Dicha geometría ha servido de idea para uno de los modelos estudiados en este TFG, y que se presentará en el capítulo 4. El objetivo de su investigación era estudiar el efecto de la porosidad y el tamaño de los poros sobre el rendimiento del PCM infiltrado en la espuma metálica, haciendo uso de un modelo tridimensional. La espuma metálica utilizada posee una estructura FCC (Face Centered Cubic, véase Figura 11).

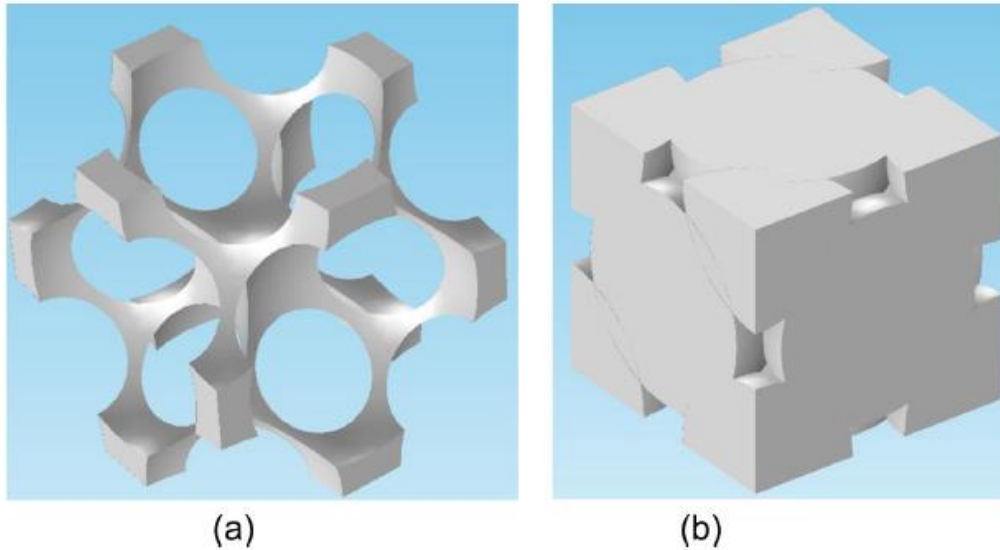


Figura 11. Modelo sólido de una celda unitaria de (a) espuma metálica con configuración FCC de poros y (b) PCM obtenido tomando la inversa de la estructura de la espuma metálica.

La espuma metálica utilizada es de Aluminio, y el PCM es cera de parafina, cuyas propiedades se adjuntan en la Tabla 4.

	Aluminum	Paraffin wax
Density (Kg/m ³)	2800	780
Specific heat (J/Kg-K)	910	2500 (solid and liquid)
Thermal conductivity (W/m-K)	237	0.20
Latent heat (KJ/Kg)	—	180
Melting range (K)	—	321–335
Viscosity (Pa S)	—	0.024 (liquid)

Tabla 4. Propiedades del aluminio y la cera de parafina.

Las principales simulaciones consisten; una de ellas en la evaluación de la temperatura (Figura 12) y la conductividad térmica (Figura 13) de modelos idénticos, pero con distinta porosidad del PCM desde las 5 hasta las 100 μm . Y la otra, en el estudio del modelo con y sin considerar la convección natural para evaluar su influencia sobre el proceso de fusión y solidificación (Figura 14).

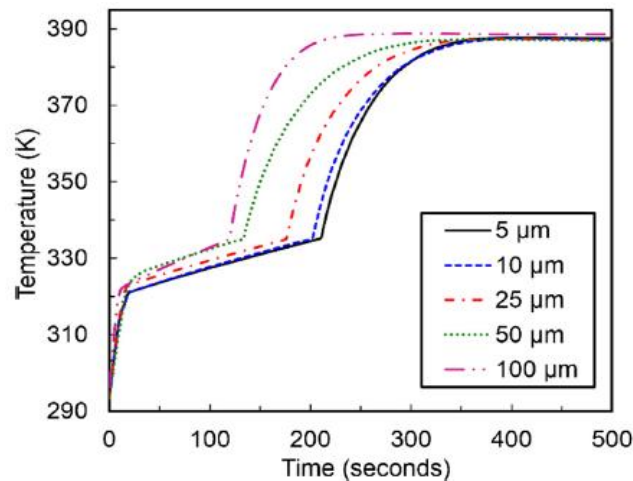


Figura 12. Evolución de la temperatura en el centro del PCM en función del tiempo para diferentes porosidades.

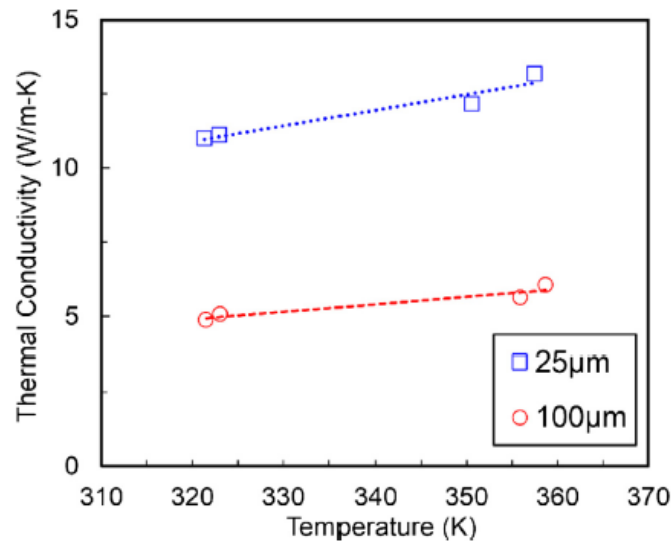


Figura 13. Conductividad térmica del PCM en función de la Temperatura y el tamaño de los poros.

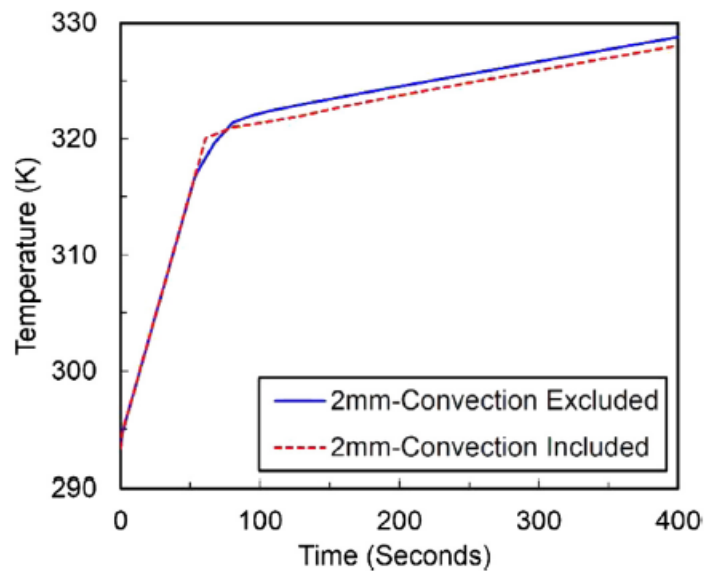


Figura 14. Evolución de la temperatura en el centro del PCM en función del tiempo y de la consideración de la convección natural

Las conclusiones que finalmente se extraen del artículo son:

- Los efectos del tamaño de la porosidad y el tamaño de los poros son más pronunciados para elevadas generaciones de calor y bajas condiciones de enfriamiento convectivo. Además, tienen una destacada influencia sobre el rendimiento del PCM.
- La conductividad térmica puede verse doblada reduciendo el tamaño de los poros de 100 a 25 µm (Figura 14).
- Existe una porosidad óptima para el sistema formado por el PCM y la espuma metálica, pero ese valor óptimo solo se da en altas condiciones de enfriamiento.

- El PCM absorbe una cantidad sustancial de calor durante el cambio de fase, mientras su temperatura permanece constante.
- Considerar la convección natural disminuye ligeramente la evolución de la temperatura del PCM (véase Figura 13). Esta disminución se debe a la consideración de la gravedad, siendo en este caso insignificante.

3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Como se ha venido adelantando en los capítulos anteriores, el problema a resolver aborda la transmisión de calor, concretamente la conducción y la convección natural. Es necesario insistir en que no se trata de un problema ficticio con condiciones irreales, sino que se pretende dar una solución realista y mejorada para el almacenamiento de energía en forma de calor latente. Esto es, una solución aplicable a la vida real.

Desde un punto de vista tecnológico y humano, el problema también es considerado como una necesidad en sí misma. A medida que avanza el tiempo, el desarrollo de la ciencia y la tecnología implica también una evolución y mejora de los sistemas de almacenamiento de energía. Y es este el principal propósito con el que se inició el presente TFG.

Aunque disponemos de la energía solar de manera diaria, se trata de una energía intermitente, ya que solo se obtiene durante las horas de sol y es dependiente de la climatología. Por lo tanto, una solución ideal sería poder almacenarla durante esas horas de sol para poder utilizarla en ausencia de la misma. Esto permitiría un gran ahorro de energía, con bajo consumo y una gran eficiencia. Es aquí donde entran en juego los materiales avanzados de cambio de fase, ya permiten desacoplar en el tiempo la producción de energía y su consumo. Además, permiten acumular energía en diferentes escalas de tiempo y niveles de temperatura, en función de su composición físico-química.

El problema estudiado consiste en la acumulación de energía solar térmica haciendo uso de un material avanzado de cambio de fase embebido en una matriz metálica, y contenido en la carcasa de un intercambiador de calor. El hecho de que se haya decidido que el PCM se incruste en una matriz metálica se debe a que esta supone una mejora en el proceso de fusión y solidificación ya que, como se indicaba en la introducción, incrementa la superficie de transferencia de calor, y por tanto, la velocidad del proceso de carga y descarga de energía. Inicialmente se manejan dos planteamientos del problema:

Geometría 1: El PCM se encuentra almacenado en la carcasa (contenedor) de un intercambiador de calor. La espuma metálica posee una geometría formada por una estructura cúbica centrada en las caras (FCC) que se dispone de forma radial (de forma análoga a aletas radiales) alrededor del tubo del intercambiador, y embebe al PCM.

Geometría 2: El PCM se encuentra almacenado en la carcasa del intercambiador, pero este ocupa volúmenes separados cuya superficie de transferencia es de forma lobular. La espuma metálica, adaptada a la geometría de los lóbulos, confina los volúmenes de PCM.

3.1. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA ESPUMA METÁLICA

Una vez se ha decidido utilizar espuma metálica como superficie de intercambio de calor, se procede al estudio de las posibles geometrías que se utilizarán para el modelado numérico del problema. En cualquier caso, se debe justificar la geometría o geometrías diseñadas ya que no cualquiera es válida, sino que su estructura debe suponer una coherente mejora al proceso de transmisión de calor.

Geometría 1: Una de las geometrías que resulta más interesante es el estudio de una estructura cúbica centrada en las caras (FCC, Face Centered Cubic). Este tipo de estructura es común en algunos metales como el hierro, el aluminio, el cobre, el platino, y el oro. Por tanto, al ser una espuma metálica y desear una estructura FCC, se ha seleccionado el aluminio como material de dicha espuma. La geometría 1 es una analogía con la estructura FCC, pero a nivel macroscópico. Una estructura FCC es aquella en la que, a nivel microscópico en cada celda hay 4 átomos: $6 \times \frac{1}{2}$ de cada cara y $8 \times \frac{1}{8}$ de cada vértice. En la Figura 15 se muestra esta configuración según el modelo de esferas rígidas ideales, siendo “a” la constante de red cuyo valor es de $4R/\sqrt{2}$, y “R” el radio atómico de valor 0,124 nm. Además, en estas estructuras se define el factor de empaquetamiento (APF) según la ecuación:

$$\frac{\text{Volumen de átomos en la celda unitaria}}{\text{Volumen de la celda unitaria}}$$

En este caso, el factor toma un valor de 0,74, lo que indica que el 26% del volumen de la celdilla unitaria está vacía.

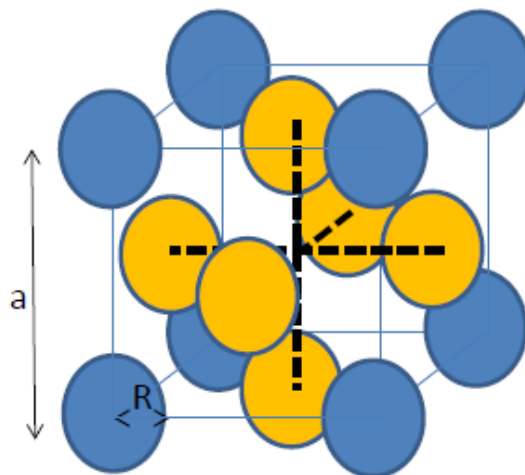


Figura 15. Estructura FCC según modelo de esferas rígidas ideales.

Para diseñar una geometría propia, se ha tomado como referencia tanto la estructura FCC que en 2014 estudiaron Sriharsha S. Sundarram y Wei Li como la propia definición de estructura FCC, pero mediante una analogía a nivel macroscópico (Figura 15), pero trasladándola a nivel macroscópico. En definitiva, la geometría final consiste en un cubo perfecto al cual se le quita el volumen formado por una esfera central que definen las seis

esferas amarillas pequeñas de la Figura 15, y el volumen formado por las ocho esferas azules de las esquinas. Así, se asegura que la geometría propuesta es FCC y se aproxima al máximo a su propia definición.

Esta geometría ha sido estudiada mediante el software de AutoCad, donde se ha reproducido y calculado el área y su volumen. En la Figura 16 se muestra la geometría diseñada en AutoCad. Como se puede observar, su aspecto es muy similar a la definición de la Figura 15. La espuma metálica es el sólido, y los huecos están llenos de espuma metálica.

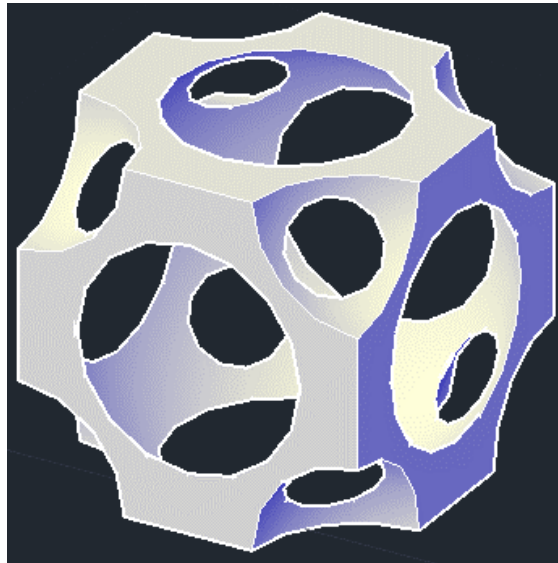


Figura 16. Geometría 1: Estructura FCC, AutoCad

A continuación se ha calculado, también en AutoCad, el área de la espuma metálica, y el volumen de PCM. El motivo de calcular estas propiedades es el llamado “ratio entre área de espuma metálica y volumen de PCM”. Este parámetro define la calidad de la superficie de intercambio de calor para transmitir calor. En el próximo apartado se desarrolla ampliamente este ratio, debido su papel fundamental en las superficies de intercambio de calor.

La geometría 2 de espuma metálica que se ha estudiado ya no responde a una estructura FCC, sino que se trata de una geometría que se adapta a la estructura de lóbulos que contiene al PCM. No se trata, en este caso, de elementos radiales como la anterior, sino de un único bloque de espuma metálica en el que se embebe el PCM. La ventaja de este modelo reside en que permite realizar previamente un estudio numérico en 2D, además de que existe una mayor superficie metálica que envuelve al PCM por lo que se favorece la fusión y solidificación. La Figura 17 muestra esta segunda geometría en 2D que directamente se ha realizado en el software de modelado y mallado “Gambit”. Se observan las 4 paredes dentro de las cuales se encuentra la espuma metálica adaptada a la geometría lobular que contiene el PCM. De la misma manera, en la Figura 18 se representa la espuma metálica en 3D.

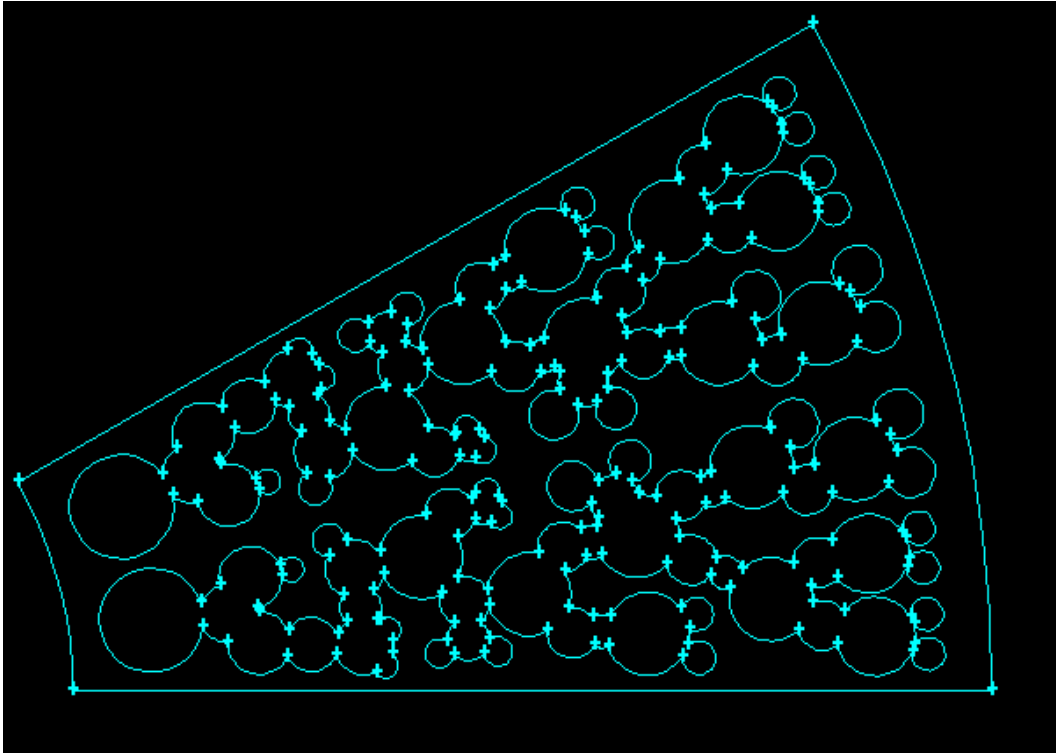


Figura 17. Geometría 2: Estructura lobular 2D, Gambit.

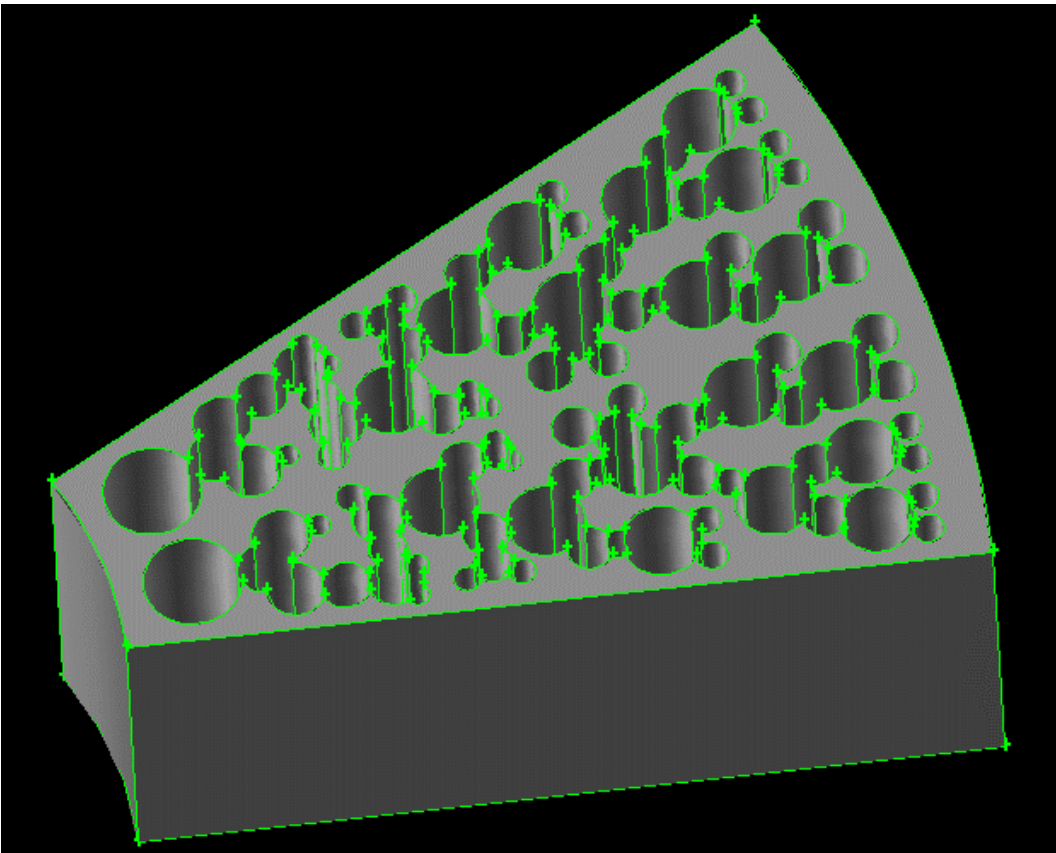


Figura 18. Geometría 2: Estructura lobular 3D, Gambit.

3.1.1. RATIO ENTRE ÁREA ESPUMA METÁLICA Y VOLUMEN DE PCM

El parámetro principal que permite caracterizar las geometrías modeladas es el ratio entre el área de espuma metálica y el volumen de PCM. Por ser un ratio, su ecuación viene dada por:

$$\text{Ratio} = \frac{A_{\text{esp}}}{V_{\text{PCM}}}$$

Al ser el cociente entre un área y un volumen, sus unidades son m^{-1} . Cuanto mayor es este ratio, mayor es el flujo de calor intercambiado con el PCM. Como consecuencia, existe una mayor conducción y transferencia de calor. Para que la transmisión de calor comience a ser adecuada, este ratio debe ser mayor que 1, pero para una superficie de intercambio de calor se le exige un ratio bastante mayor. Por lo tanto, nuestra geometría debe poseer un ratio considerablemente alto para que la transferencia de calor se produzca de la mejor forma posible, ya que este es uno de los principales motivos de emplear la espuma metálica, además de poseer una alta conductividad térmica. A continuación, se calculará el ratio para las dos geometrías.

En la geometría 1, se ha calculado mediante el ratio definido para un volumen FCC simple. Como el cubo posee 4 mm de lado, conocemos su volumen:

$V_{\text{cubo}} = l^3 = 4^3 = 64 \text{ mm}^3$, donde l es el lado de cubo. A este volumen del cubo se le restará el volumen obtenido para la espuma metálica, obteniendo así el volumen de PCM. En la Figura 19 se muestra el valor del área y el volumen calculado en AutoCad.

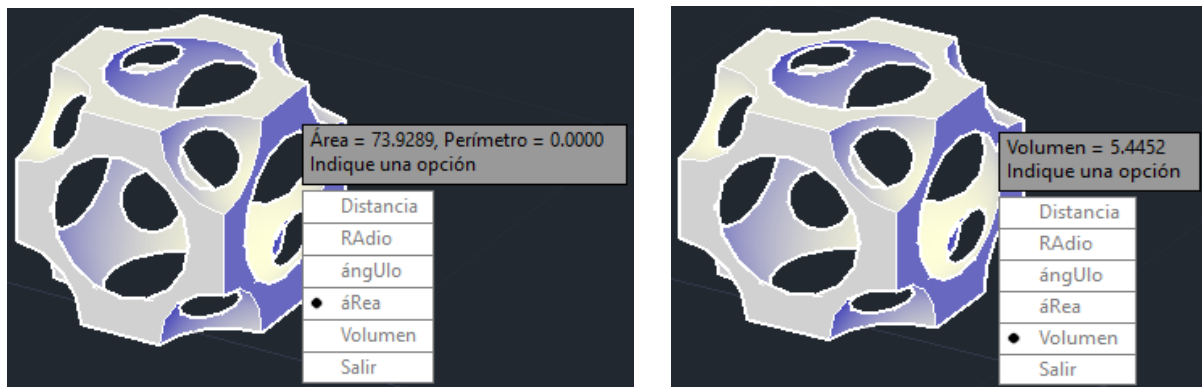


Figura 19. Área y Volumen de la Espuma Metálica, AutoCad.

La esfera interior cuyo volumen se le resta al cubo, posee un radio de 2,4 mm, mientras que las esferas de las esquinas, que solo le retan 1/8 de cada una al cubo, es de 1,25 mm.

Una vez obtenidos esos datos, conseguimos obtener el ratio.

- $V_{\text{cubo}} = 64 \text{ mm}^3$
- $A_{\text{esp}} = 73,9289 \text{ mm}^2$
- $V_{\text{esp}} = 5,4452 \text{ mm}^3$
- $V_{\text{PCM}} = V_{\text{cubo}} - V_{\text{esp}} = 64 - 5,4452 = 58,5548 \text{ mm}^3$

- $$\text{Ratio} = \frac{A_{esp}}{V_{PCM}} = \frac{73,9289 \times 10^{-6}}{58,5548 \times 10^{-9}} = 1262,55918 \text{ m}^{-1}$$

De los cálculos realizados, se deduce que para este tipo de geometrías, el ratio depende de un factor que se ha denominado tamaño de las esferas que se restan al cubo. Cuanto mayor es el tamaño de las esferas que se restan, menor será el área de espuma metálica, y mayor el volumen de PCM, lo cual produce una disminución del ratio. Esto es así, ya que en ese caso, según la definición de ratio, el cociente entre el área de espuma metálica y volumen de PCM disminuiría. Por eso es importante tener en cuenta este cociente (ratio) a la hora de diseñar la geometría de la espuma metálica.

Como se deduce, también, de lo comentado en párrafos anteriores, la geometría 1 posee un excepcional ratio por lo que su uso mejorará y facilitará el proceso de transmisión de calor. Se ha conseguido, con creces, el objetivo indispensable que deben cumplir las geometrías que tienen la función de actuar como superficie de intercambio de calor. Cabe destacar que este ratio es para una única unidad geométrica.

Para la obtención del ratio de la geometría 2, al ser la espuma metálica un único bloque, se ha calculado directamente en Gambit. Mediante el uso de la información de las caras y los volúmenes, Gambit proporciona, entre otras informaciones, las áreas y los volúmenes de las propias caras y volúmenes seleccionados. La desventaja que presenta, es que el área de las superficies laterales de la espuma metálica está formada por muchas caras pequeñas, en concreto 101 caras, y no como una única cara común, lo que supone un trabajo laborioso, ya que hay que ir solicitando a Gambit una a una el área de cada una de esas caras, y luego sumarlas. El hecho de que no exista una única cara que sea el área transversal se debe al modelado, ya que Gambit no permite que se superpongan dos geometrías, esto es, que un mismo espacio del entorno gráfico pertenezca a una cara pequeña y a una cara grande. Y las caras pequeñas se crean solas al extruir los lóbulos del 2D, por lo que no es posible tener esa única cara que facilite ese cálculo. Aun así, el cálculo a mano de esta área sería mucho más complicado.

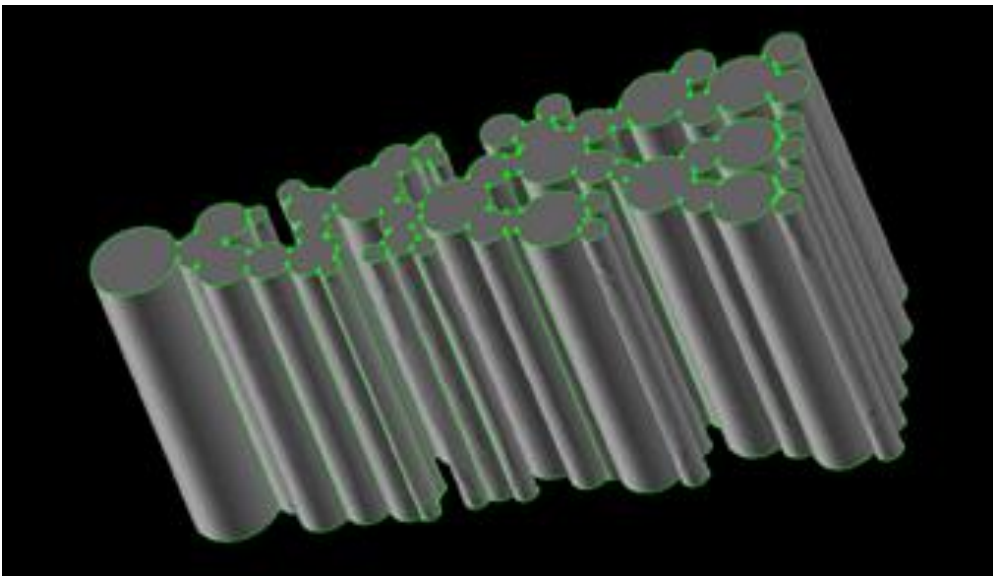


Figura 20. Área de espuma metálica y volumen de PCM para el cálculo del ratio de la geometría 2.

Por un lado se ha calculado el área de la sección transversal del volumen ocupado por el PCM, y como se conoce la altura, el volumen del PCM es el producto de la altura de dicho volumen multiplicada por esa área transversal. El área de la espuma metálica se ha obtenido sumando las distintas áreas laterales que la componen. En la Figura 20, se muestra el área de espuma metálica, y el volumen de PCM, que es el que se encuentra dentro de los lóbulos.

Vol=	635.029747 mm ³	R=	2006.30673 1/m
Atransversal=	63.503512 mm ²		2.00630673 1/mm
Suma(Alaterales)=	1274.06446 mm ²		

Figura 21. Cálculo del ratio: Geometría 2.

Los cálculos se han realizado en Excel, y los valores obtenidos son los que se presentan en la Figura 21. “Vol” es el volumen de PCM, “Atransversal” es el área transversal del volumen de PCM, y “Suma(Alaterales)” es la suma de todas las áreas laterales que conforman el bloque de la espuma metálica. El ratio será la división “Suma(Alaterales)/Vol”.

En el caso de la geometría 2, el ratio depende del número y tamaño de los lóbulos. En cuanto al número, es importante que exista el mayor número posible, ya que así tendremos más PCM que fundir, pudiendo acumular más energía. Por otro lado, el tamaño de los lóbulos debe ser el menor posible, ya que si este es demasiado grande, se dificulta la fusión del PCM en el centro del lóbulo, por estar más alejado de la espuma metálica. Por tanto, un mayor número de lóbulos con un menor tamaño aumentan el ratio.

Además, se debe buscar la manera de que los lóbulos estén interconectados con el fin de poder obtener continuidad en la fusión del PCM. Así, las capas del PCM líquido interactuarán entre sí, y la solución del problema será más eficiente.

El ratio obtenido para la geometría 2 es todavía mayor que el de la geometría 1, por lo que se podría decir que la geometría 2 es mejor superficie de intercambio de calor que la 1. Aun así, la geometría 1 también es muy buena superficie de transferencia de calor ya que posee un ratio superior a 1000 m⁻¹.

De este estudio, se decide que las simulaciones se van a realizar principalmente para este modelo, puesto que su ratio es mayor y, previsiblemente, será más eficiente en el proceso de fusión/solidificación.

3.2. PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE PCM Y ESPUMA METÁLICA

En primer lugar, conviene realizar una clasificación general de los materiales avanzados de cambio de fase, para tener un mayor conocimiento sobre el que se ha utilizado en este estudio.

La clasificación general de los PCM se realiza en base a su composición, pudiendo diferenciarse tres tipos: orgánicos, inorgánicos y eutécticos; tal y como muestra la Figura 22.

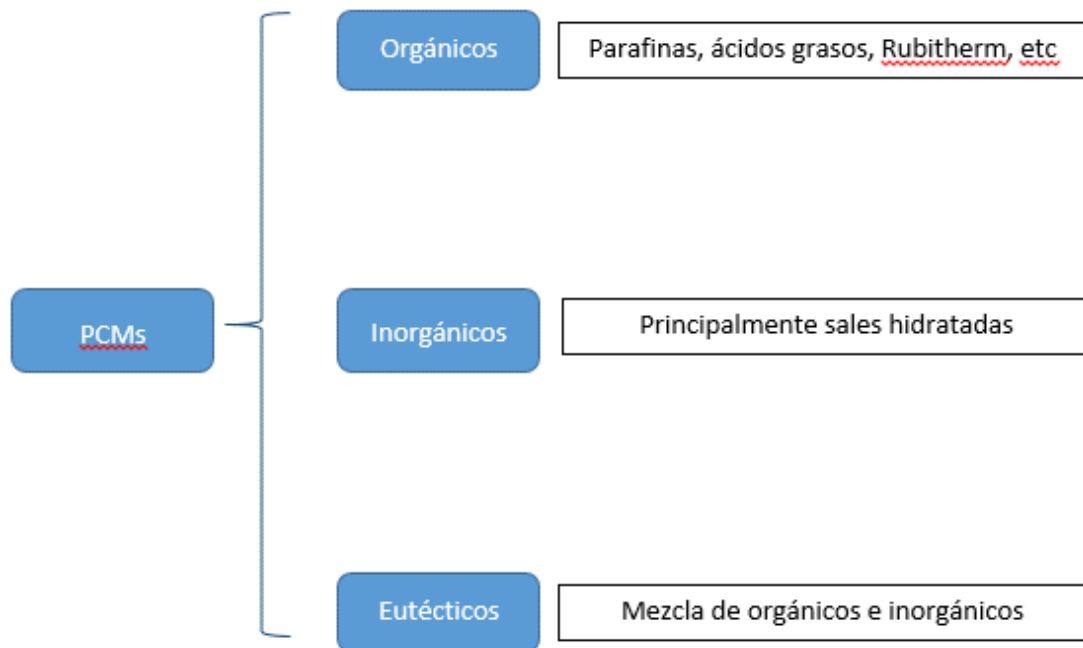


Figura 22. Clasificación general de los PCM.

Los PCM orgánicos más ampliamente utilizados son las parafinas, que responden generalmente a la fórmula C_nH_{2n+2} . También son orgánicos determinados alcoholes y ácidos grasos. Por otro lado, los PCM inorgánicos se dividen entre metales y sales hidratadas. Y finalmente, los eutécticos son la mezcla entre orgánicos e inorgánicos.

El PCM utilizado en el TFG se trata de una parafina y, por tanto, de un PCM orgánico. Se trata del RT44HC, comercialmente perteneciente a la gama de Rubitherm GmbH. Cabe comentar, de que a pesar de que una de las desventajas de los PCM orgánicos es su baja conductividad térmica, en este caso no supone un hándicap en la transmisión de calor ya que este se encuentra embebido en una matriz de espuma metálica.

En el caso del presente estudio, es de especial importancia utilizar las propiedades del PCM en función de la temperatura. El problema planteado trata la simulación de la fusión y solidificación. Pues bien, a la hora de proceder al software de Fluent para la simulación, se deberán establecer las propiedades de todos los materiales. Si se introducen las propiedades del material que funde y solidifica, en este caso el PCM, para una temperatura determinada como puede ser la ambiente, la simulación no poseerá una convergencia adecuada, pudiendo incluso no llegar a converger. Por tanto, es indispensable establecer las propiedades del material que funde y solidifica en función de la temperatura (propiedades = $f(T)$).

Para obtener las propiedades del RT44HC se ha recurrido a la Tesis de Baelor, en la cual se realizó el estudio experimental de las propiedades de este PCM en función de la

temperatura. De todas las propiedades que en la tesis se obtienen, se han tomado aquellas que, en función de la temperatura, son necesarias para Fluent, que se describen a continuación.

- Densidad (kg/m^3): La densidad se definirá linealmente basada en una recta de regresión. Como bien es sabido, la densidad depende de la temperatura y viceversa. Se definirá mediante 5 puntos que se muestran en la tabla 5, donde se observa que a partir de unos 330 K la densidad no varía aunque la temperatura continúe subiendo.

PUNTO	TEMPERATURA (K)	DENSIDAD (kg/m^3)
1	323	783,14
2	333	756
3	343	756
4	353	756
5	363	756

Tabla 5. Densidad del RT44HC en función de la temperatura.

- Calor específico (J/kgK): Es la cantidad de calor que hay que suministrarle al PCM para elevar su temperatura en una unidad. En este caso, el calor específico viene dado por un polinomio de tercer grado, según la ecuación 1:

$$C_p (T) = 73800 T^3 - 633,2 T^2 + 1,8451 T - 0,001777 \quad (1)$$

- La conductividad térmica toma un valor constante, ya que es una propiedad del material. Su valor es de $0,02 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.
- Viscosidad ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$): La viscosidad, también dependiente de la temperatura, viene dada por la ecuación 3.2.3 de tercer grado:

$$\mu (T) = 0,264189 T^3 - 0,002008 T^2 + 5,168 \times 10^{-6} T - 4,447 \times 10^{-9} \quad (2)$$

- Calor latente de fusión (J/kg): Al igual que la conductividad térmica, es una propiedad del material por lo que tiene un valor constante de 246000 J/kg .
- Temperatura de solidus (K): Temperatura a partir de la cual el PCM pasa ha estado sólido. Es de 315 K .
- Temperatura de liquidus (K): Temperatura a partir del cual el PCM pasa a estado líquido. Es de 325 K .

En cuanto a la espuma metálica, se ha utilizado espuma de aluminio cuyas propiedades no deben ir en función de la temperatura, ya que durante el estudio el aluminio ni funde ni solidifica, ya que tiene un punto de fusión muy elevado, propio de los metales. Se han

tomado las propiedades que Fluent asigna, por defecto, al aluminio (Tabla 6). Solo se toman las propiedades necesarias para la simulación.

ESPUMA DE ALUMINIO	
Densidad (kg/m ³)	2719
Calor Específico (J/kgK)	871
Conductividad Térmica (W/m K)	202,4

Tabla 6. Propiedades termofísicas de la espuma de aluminio.

3.3. TRANSMISIÓN DE CALOR: CONDUCCIÓN Y CONVECCIÓN

El flujo de energía térmica desde una materia que ocupa una región del espacio hasta otra materia que ocupa una región diferente del mismo se conoce como transferencia de calor. Esta transmisión de calor puede ocurrir mediante tres mecanismos de transferencia de calor, los cuales pueden coexistir: conducción, convección y radiación. Este TFG aborda los dos primeros, por lo que a partir de aquí solamente se hará referencia a esos dos mecanismos.

La conducción de calor se produce cuando existe una interacción directa entre moléculas a diferentes temperaturas, es decir, cuando existe contacto directo sin intercambio de materia en sólidos y fluidos (líquidos y gases). En los sólidos se debe principalmente al movimiento de electrones y a la vibración de la red cristalina; en fluidos debido a las colisiones entre moléculas. En el problema que se ha planteado, se producen dos conducciones. La primera se produce durante la fusión, la espuma metálica recibe calor de una pared a mayor temperatura y conduce el calor al PCM hasta que funde. Una vez fundido, la temperatura del PCM es mayor que la de la espuma metálica por lo que es este el que conduce el calor a la espuma (solidificación) Este mecanismo de transmisión de calor sigue la Ley de Fourier que responde a la siguiente ecuación:

$$q = -k\nabla T = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3), \text{ donde } q \text{ es el}$$

calor por unidad de tiempo y de superficie en W/m²; k es la conductividad térmica del material en W/m·K; y ∇T es el gradiente del campo de temperaturas. El signo negativo de la Ley de Fourier se debe a que dicha Ley establece que “si existe una diferencia de temperaturas en un cuerpo, se origina una transferencia de energía desde la región de mayor temperatura hacia la de menor temperatura”, contraria a la función gradiente. Si se realiza el balance energético en el elemento de volumen que sería el cubo de la geometría 1, sería tal cual se representa en la Figura 23.

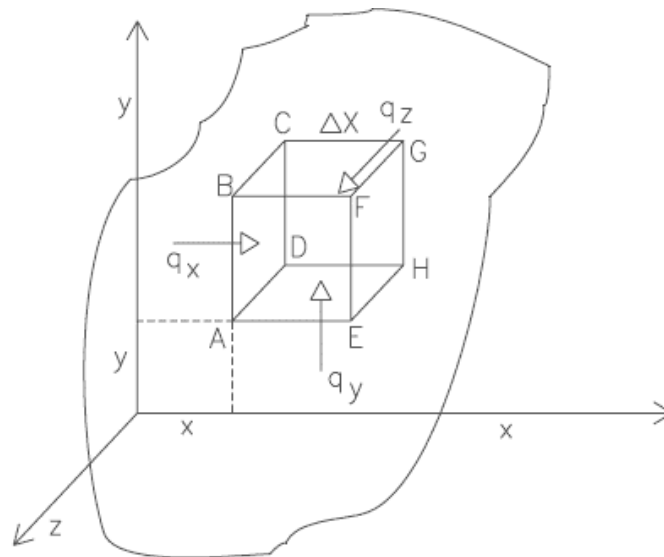


Figura 23. Balance energético de la conducción de calor en un volumen de control cúbico.

De la aplicación del balance energético al volumen de control de la Figura 20, aparece la ecuación general de la conducción de calor. Este balance de energía establece que el flujo neto de calor que entra y sale por conducción del elemento de volumen, sumado a la energía generada en el interior de dicho elemento de volumen debe ser igual a la variación de energía almacenada en el elemento de volumen en la unidad de tiempo:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q' = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

Una forma más simplificada de escribir esta ecuación, sería la siguiente:

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q' = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5); \text{ El primer}$$

término corresponde a La Ley de Fourier. Nótese que el término correspondiente a la Ley de Fourier no posee delante el término negativo que debe llevar por definición de la propia Ley, debido a que se ha pasado del segundo miembro al primero de la ecuación; q' es la energía generada en el interior del elemento de volumen; y el término del segundo miembro es la variación de la energía almacenada en el elemento de volumen.

En cuanto a la convección natural, ésta se produce en el seno del propio fluido, debido al campo de temperaturas, produciendo una variación de densidad en el mismo. La energía en el fluido se transmite por conducción y se transporta de un punto a otro gracias al movimiento del fluido. Cuanto mayor es la velocidad del fluido mayor es el flujo de calor por convección por unidad de área. Se distinguen dos tipos de convección: la convección natural y la convección forzada. La convección natural es aquella que se produce debido al movimiento del fluido, originado por las fuerzas de empuje debidas a la acción gravitatoria y a la dilatación del fluido, como consecuencia del calentamiento de las capas de este. Por otro lado, la convección forzada es la debida al movimiento del fluido, pero originado por agentes externos como pueden ser ventiladores, bombas hidráulicas, etc. En el problema de este trabajo se estudia la convección natural, que es la que se produce

debido a las dilataciones del PCM al fundir y solidificar, y a la acción de la gravedad. Como no se incluye ningún agente externo que mueva el fluido, la convección forzada no tiene lugar en este caso.

El fenómeno de convección sigue la ley de Newton, ecuación 6:

$q = \bar{h}_c \cdot A(T_s - T_\infty)$ (6), donde q es el calor producido por convección, \bar{h}_c es el coeficiente medio de transferencia de calor por convección en la interfase líquido-sólido en $W/m^2 \cdot K$, que puede obtenerse mediante la ecuación 3.3.4, T_s la temperatura del sólido, y T_∞ la temperatura del fluido.

$$\bar{h}_c = \frac{1}{S} \int h dS \quad (7)$$

El coeficiente de calor h , no es un parámetro fijo, sino que depende, de una forma en general compleja, de distintas variables como la geometría del problema, la velocidad del fluido y las temperaturas. Por lo tanto, a partir de este punto, cuando se haga referencia al coeficiente medio de transferencia de calor se empleará la letra h . Como su valor ni siquiera es constante en toda una superficie, lo que se utiliza es un valor promedio (coeficiente medio de transferencia de calor) para toda la superficie (ecuaciones 6 y 7). A modo de ejemplo, para tener un orden de magnitud de este parámetro, el coeficiente h del aire, el cual forma parte de uno de los modelos del trabajo, oscila entre los 5 y los 25 $W/m^2 \cdot K$.

En resumen, en el TFG se tratan dos mecanismos de transmisión de calor: conducción y convección natural. Por tanto, se trata de un problema transitorio. La conducción se produce de la espuma metálica al PCM en el proceso de carga, y del PCM a la espuma metálica en el proceso de descarga. El proceso de carga, corresponde al período durante el cual el PCM está recibiendo calor por conducción de la espuma metálica, es decir, está aumentando su temperatura. Al ser la acumulación de energía durante el cambio de fase una de las principales propiedades de los PCMs, motivo por el que están siendo tan ampliamente utilizados en los ya mencionados sistemas LHTES, ese aumento de temperatura acaba fundiendo el PCM, es decir, produciendo un cambio de fase (acumulando energía). Por esta razón, se utilizarán indistintamente durante este estudio los términos “fusión” y “proceso de carga”, ya que con ambos nos estamos refiriendo al mismo proceso físico. Por otro lado, el proceso de descarga es análogo al de carga, pero a la inversa. El PCM fundido, alcanza una temperatura mayor que la espuma metálica, por lo que la conducción de calor se produce en sentido contrario, del PCM a la espuma metálica (“El calor siempre va del cuerpo más caliente al más frío”). Se deduce, por tanto, que la solidificación y el proceso de descarga hacen referencia al mismo fenómeno físico. Simultáneamente, cuando el PCM funde, el movimiento del PCM fundido (originado por la dilatación del mismo y la acción de la gravedad) origina la convección natural.

La transferencia de calor, en los casos estudiados, da lugar a la fusión y solidificación del PCM, por lo que a continuación se incluyen sus ecuaciones.

La entalpía del material se calcula como la suma de entalpías sensibles, h , y el calor latente ΔH .

$$H = h + \Delta H \quad (8), \text{ donde } h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (9)$$

La ecuación de la energía del proceso fusión/solidificación viene descrita por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla(\rho \vec{v} H) = \nabla(k \nabla T) + S \quad (10), \text{ donde } H \text{ es la entalpía, } \rho \text{ la densidad, } \vec{v} \text{ la velocidad del fluido y } S \text{ el término fuente.}$$

La ecuación de momento, en función de la fracción líquida es:

$$S = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} \cdot A_{mush}(\vec{v} - \vec{v}_p) \quad (11), \text{ siendo } \beta \text{ la fracción líquida, } \varepsilon \text{ es número pequeño (0,0001) para evitar la división por cero, } A_{mush} \text{ es el área de la zona blanda y } \vec{v}_p \text{ es la velocidad del sólido debida al empuje del material solidificado fuera del dominio.}$$

FUSIÓN (CARGA) :



SOLIDIFICACIÓN (DESCARGA) :



4. METODOLOGÍA DE MODELADO Y MALLADO

Hoy en día, gracias al potencial de los ordenadores, ya no solo es posible obtener resultados de problemas de fluidos de forma experimental, sino que también pueden obtenerse numéricamente. La ventaja principal de la simulación numérica es la posibilidad de resolver cualquier problema simplemente cambiando en cualquier momento materiales, parámetros, ecuaciones, tolerancias... Así como resolver modelos microscópicos y/o a gran escala con un simple cambio de unidades. Interesadamente, cabe decir que este tipo de resoluciones supone un gran ahorro económico, como se puede deducir.

La resolución numérica de flujos recibe el nombre de CFD (Dinámica de Fluidos Computacional). A su vez, la CFD combina diferentes disciplinas en una sola debido a la complejidad de los problemas. Estas disciplinas son: las matemáticas, que son la herramienta para resolver las ecuaciones que se apliquen; la mecánica de fluidos, que es aquella que estudia el comportamiento y propiedades de los fluidos, además de definir las ecuaciones que describen todos los procesos relacionados con los mismos; y por último, la informática, que es la herramienta que permite integrar las dos disciplinas anteriores y aplicarlas simultáneamente para llegar a una solución numérica, es decir, lo que coloquialmente se llamaría “resolver un problema de fluidos con el ordenador”. En la Figura 24, se muestra esquemáticamente esta relación entre CFD y disciplinas científicas.

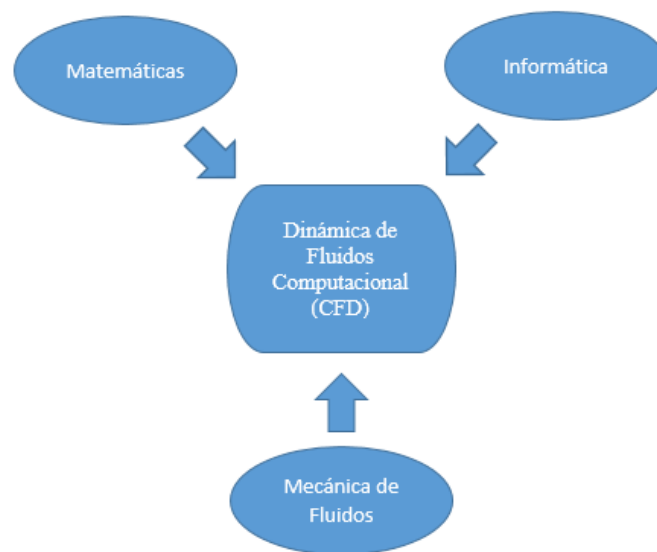


Figura 24. Disciplinas que integran la CFD.

Al igual que la resolución tradicional de un problema sigue una secuencia, también la posee una resolución numérica. En la CFD, la secuencia de resolución consta de tres partes fundamentales, en el siguiente orden:

1. Pre-proceso.
2. Solver.
3. Postproceso.

A continuación se resumen las tres etapas relacionándolas con el presente TFG, a fin de entender cuál es la estructura común de todos los problemas que se resuelven numéricamente, y cuál ha sido su aplicación en este trabajo.

Pre-proceso

Esta parte comprende, a su vez, las siguientes etapas:

- Definición de una geometría o dominio computacional. En el TFG, se han definido dos geometrías diferentes del problema planteado, dentro del dominio computacional de ANSYS.
- Generación de una malla numérica adecuada (número de celdas, tipo de malla, tamaño de celdas, etc). En el mismo software en el que se han realizado los dos modelos (geometrías) de este trabajo, se ha generado la malla adecuada para su resolución con un coste computacional aceptable.
- Especificar los modelos físicos que se van a modelar. En este caso, se ha especificado que se trata de un problema de acumulación de energía gracias al cambio de fase de un PCM, el cual es posible a través del proceso de transferencia de calor entre la espuma metálica y el PCM.
- Especificar las propiedades físicas del medio. En lo que al TFG respecta, definir las propiedades del PCM, de la espuma metálica, y del volumen de aire necesario para permitir la dilatación o expansión del aire.
- Establecer las condiciones iniciales y de contorno. Estas condiciones dependen del problema y de la geometría, por lo que se explicarán más adelante.

Solver (Procesamiento)

En esta etapa se resuelve el modelo matemático con el uso del propio software (ya que en él hemos dicho que están integradas las 3 disciplinas ya mencionadas). El usuario selecciona las iteraciones, en caso de que el problema sea estacionario, o los parámetros de tiempo, si el problema es transitorio (no estacionario). Posteriormente, manda la orden de ejecutar, y espera los resultados, los cuales pueden tardar desde horas, días e incluso semanas en obtenerse. Este tiempo, que recibe el nombre de “tiempo de simulación”, depende del modelo a resolver, principalmente del tamaño de la malla y el número de celdas. Como es de esperar, cuanto mayor sea el número de celdas a simular, mayor será el tiempo de simulación.

Post-proceso

Esta etapa es la que permite la aglomeración todos los datos de los resultados gráficos. Haciendo uso de las herramientas que proporciona el software, en este caso Fluent, el usuario representará los resultados que considere necesarios para la solución del problema que ha resuelto.

Volviendo al TFG, una vez se ha definido y planteado el problema (pre-proceso), se procede al modelado y mallado de los modelos estudiados (pre-proceso), que se presentarán a continuación. Por tanto, este capítulo constituye, como se deduce, la etapa de pre-proceso. El software que se ha utilizado para realizar los modelos y mallados es “Gambit” en su versión 2.4.6, que forma parte de ANSYS. Posteriormente, se exportará la malla al software de Fluent, también de ANSYS.

En un primer lugar se va a explicar la metodología de modelado y mallado que se ha creado, tras haberse estudiado a fondo como objetivo principal. La estrategia que se propone es válida para realizar cualquier modelo, si bien después se explicará detalladamente, en el apartado 4.4, cómo se han realizado en el dominio computacional cada uno de los modelos realizados. Finalmente, se hará un especial hincapié en las condiciones de contorno, imprescindibles para la correcta solución del problema.

4.1. ESTRATEGIA DE MODELADO

El primer paso para la realización de cualquier modelo debe ser dar un pequeño salto al final, esto es, pensar qué es lo que finalmente se va a querer simular. ¿Por qué? Pues porque los softwares de fluidos son complejos, y poseen varias limitaciones. A modo de ejemplo, imagine que desea simular un proceso de transmisión de calor, como este caso, mediante una espuma metálica y un PCM, pero la geometría que ha escogido es compleja de manera que no puede modelarla mediante un programa de generación de mallas (en especial si no se es experto en ello) como es Gambit. Esto supondría que la validación y cálculos de la espuma metálica fueran en vano, pues no servirían en la consecución del resultado. Para evitarlo, primeramente se propone intentar modelarla en el software de generación de mallas, y asegurarse de que es posible su modelado antes de proceder a su validación. Otro ejemplo que supondría todavía una mayor incertidumbre, consistiría en que una vez realizado el modelo, no se conozcan exactamente los fenómenos físicos que intervienen, de manera que a la hora de la simulación no se tengan claros los modelos de resolución a utilizar. En consecuencia, se acabarían aplicando los modelos que se “creen” que son los adecuados y posiblemente el problema no converja (no se obtenga una solución válida). Para que esto no suceda, se deben conocer exactamente cuáles son los fenómenos físicos que intervienen y qué modelos de solución se tendrán que aplicar en Fluent. De esta manera, se puede considerar que la primera fase del modelado es el estudio físico del problema planteado.

No obstante, Gambit permite la opción de importar el modelo ya hecho desde otros programas de diseño. Entre los principales programas de diseño relacionados con la Ingeniería Mecánica destacan AutoCad, y sobre todo SolidWorks, ya que este último es más potente que AutoCad en cuanto a modelado 3D. En cuanto a 2D, ambos son igual de válidos. En este trabajo se ha realizado el estudio sobre cómo debe importarse y depurarse una geometría modelada en otro programa. A continuación se explica el estudio realizado.

Se decide realizar el modelo de un tubo con aletas radiales en SolidWorks para importarlo en Gambit, y así comprobar si se consigue llegar a obtener una depuración adecuada del

modelo en Gambit y mallarla. El hecho de realizar la prueba con un tubo de aletas radiales se debe a que se trata de un modelo más sencillo de lo que realmente se quieren modelar, por lo que si no se consigue con este, tampoco se podrá con los demás. En la figura 25 y 26, se muestra el modelo diseñado en SolidWorks. En la 25 se representa el tubo aleteado, y en la 26 el tubo dentro de la carcasa.

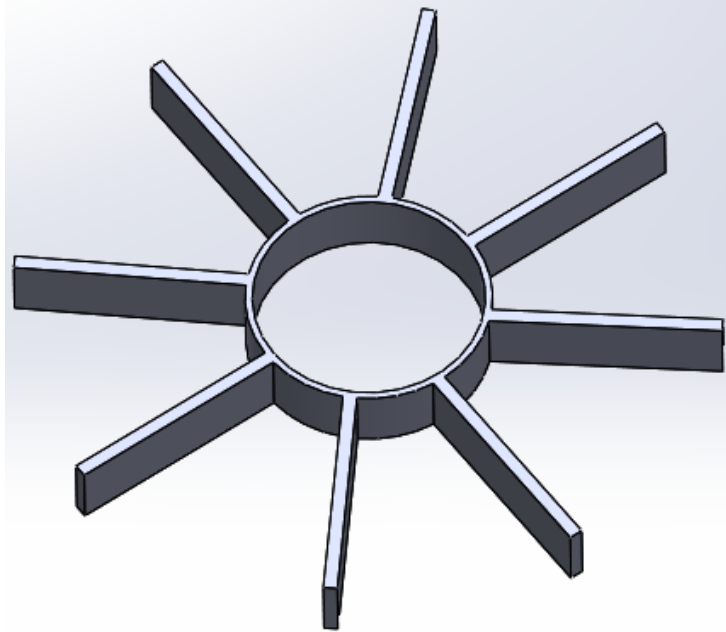


Figura 25. Tubo con aletas radiales, SolidWorks.

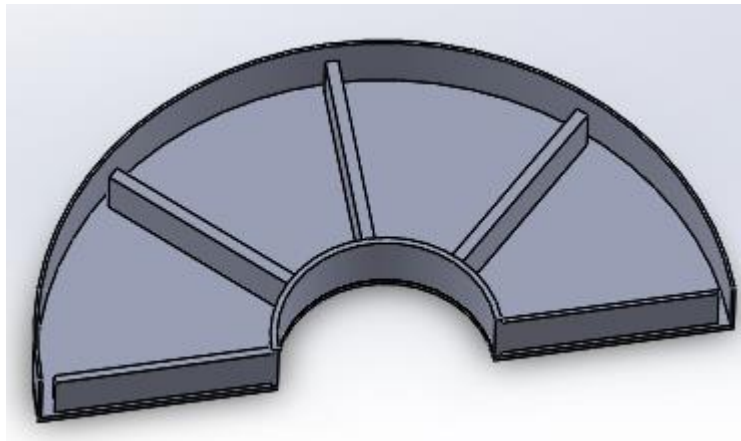


Figura 26. Tubo con aletas radiales y con carcasa, SolidWorks.

En esta última figura, se observa perfectamente que la carcasa delimita el espacio en el que se encontrará el PCM, y que las aletas radiales no llegan a estar en contacto con la carcasa para que el PCM entre aletas esté comunicado, de manera que no se creen compartimentos de PCM entre ellas.

Una vez que se tiene el modelo CAD, el procedimiento para importarlo en Gambit es el siguiente:

1. Dentro del programa donde se ha realizado el modelo (AutoCad o SolidWorks) se debe clicar en “Guardar como”, y después en “Tipo” se debe seleccionar IGES (*.igs). Intente no dejar espacios entre palabras al nombrar el archivo, para evitar posibles problemas futuros. De esta manera, se habrá guardado un fichero que contiene el modelo, el cual puede ser reconocido por Gambit. Incidir que este formato .igs, es para modelos CAD.
2. Ejecutar Gambit.
3. *File/ Import / IGES*. Aparecerá la siguiente ventana por defecto:

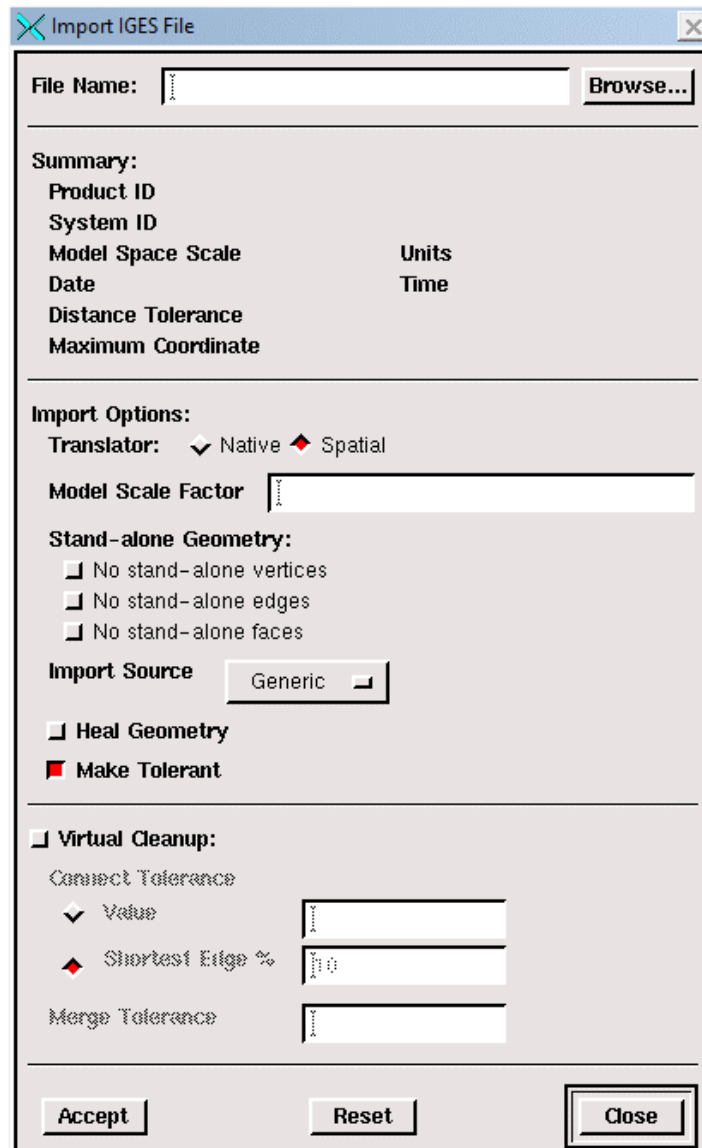


Figura 27. Ventana Import IGES File por defecto, Gambit.



4. Clicar en “Browse”, buscar el archivo .igs guardado en el paso 1 y seleccionarlo.
5. En “Translator” se dispone de dos opciones: Native o Spatial. Ambos son válidos, ya que su misión es traducir el modelo CAD a formato de Gambit.

Sin embargo, es mejor utilizar el Spatial ya que este traduce de IGES a una geometría real en Gambit. Además también permite traducir de ACIS a IGES y de IGES a Gambit. Native también pasa de IGES a Gambit, pero es más propenso a crear caras virtuales, lo que dificulta el depurado del modelado y el mallado. Otra distinción es que el Native ha sido desarrollado por la propia empresa de ANSYS, de ahí que reciba el nombre de “Nativo”; y el Spatial ha sido desarrollado por la empresa Spatial Technology Inc.

6. La opción “stand-alone geometry” permite especificar si se quieren conservar o no los vértices, aristas y/o caras que no están conectadas a una entidad superior (el orden de menor a mayor entidad es: vértice, arista, cara y volumen). Por ejemplo si se selecciona “no stand-alone edges” Gambit borrará todas las aristas que no pertenezcan a una cara o un volumen. Aconsejo no seleccionar ninguna de ellas, ya que al haber realizado el modelo en un software distinto de Gambit, no sabemos exactamente si cada entidad pertenece a una superior o no, por lo que de marcar alguna se correría el riesgo de que Gambit eliminase algunas pequeñas entidades de forma que de algún error en el modelo y no se caiga en el error. Mejor reproducir el modelo tal cual se ha realizado y si sobra alguna entidad siempre se está a tiempo de borrarla (este caso es mucho más fácil de visualizar). Por entidad se hace referencia a los vértices, aristas, caras y volúmenes.
7. En “Import source” se seleccionará el programa en el que se realizó el modelo, en este caso SolidWorks.
8. Escoger entre “Heal Geometry” y “Make tolerant”. Si se selecciona la primera, Gambit intentará reparar la geometría durante la importación y además aplicará a su vez la opción “Make tolerant”, se quiera o no. Si por el contrario se escoge “Make tolerant”, Gambit asigna automáticamente una tolerancia a todo vértice y arista a fin de mantener la integridad topológica durante la importación. Esto es más impreciso. Se recomienda aplicar la opción “Heal Geometry”, ya que engloba las dos.
9. Por último, “virtual cleanup” interesa activarla, ya que intenta arreglar los huecos que pueden quedar en la importación. Se recomienda mantener “Shortest edge” al 10%, y las otras opciones desactivadas. Esto le indica que tratará de reparar todos los huecos cuya medida sea el un 10% de la longitud de la arista más corta, estableciendo ese valor como una tolerancia. Aun así, en “Value” podemos establecer directamente el valor de tolerancia que se desee, aunque con el 10% de la arista más corta es normalmente suficiente. La opción “Merge tolerance” permite establecer el valor para el cual se juntan las entidades que se encuentran a una distancia igual o inferior a la tolerancia definida.
10. Acepte, y ya tenemos el modelo en el dominio computacional de Gambit.

Al visualizar los vértices, aristas y caras del modelo importado, observará que existe una cantidad demasiado grande de ellas para el modelo que ha realizado. He aquí la gran desventaja que posee realizar el modelo en un software diferente al de Gambit. Y es que el modelo importado posee varios defectos entre los más comunes: aristas más cortas que el modelo original, de manera que no conectan como deberían o directamente no conectan; aristas y caras virtuales, las cuales suponen problemas al estar mezcladas con las reales; entidades duplicadas, etc, por lo que se debe recurrir a lo que se conoce como depurado del modelo. Comentar, que la técnica de depurado que a continuación se explica puede no ser suficiente para acabar con todas las impurezas acarreadas de la importación. De hecho, en el modelo presentado en las Figuras 25 y 26, tras realizar este depurado, continuó dando errores, por lo que se tuvo que recurrir a realizar los modelos más complejos directamente en Gambit. Es verdad que resulta más sencillo realizar el modelo en un programa de diseño CAD que hacerlo directamente en Gambit, pero esto último es aconsejable, ya que de lo contrario, se requiere realizar una depuración profunda que puede incluso ser insuficiente. Aun así, se describe a continuación la técnica que, tras el estudio realizado, se propone para realizar de forma eficaz el depurado de forma óptima.

La técnica que se propone para el depurado de un modelo importado de IGES a Gambit es el siguiente:

1. Clicar en “Specify Color Mode” de manera que se cambiará de “based on entity types”  a “connectivity based” . Por defecto, Gambit colorea las entidades de un color u otro según su tipo (“based on entity types”), por lo que en este paso se le ordenará que colorea las entidades según si están conectadas a otra o no. Si el color de las aristas es naranja, indica que las caras no están conectadas entre sí, lo que indica que existen huecos entre las aristas que forman las caras. En la figura 28 se muestra un ejemplo de caras no conectadas.

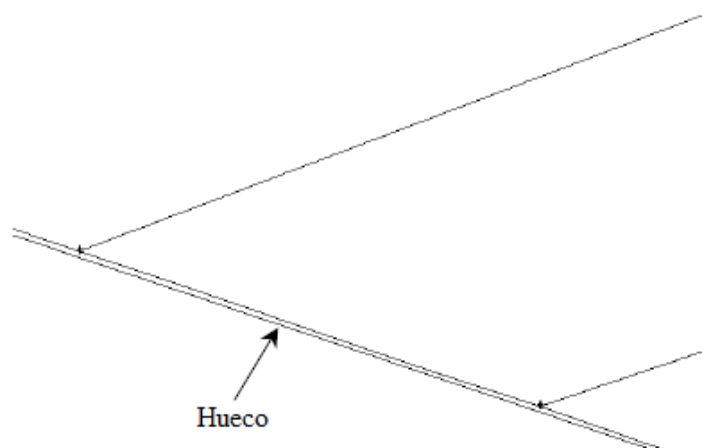


Figura 28. Ejemplo de hueco entre caras no conectadas, Gambit.

2. Ampliar el modelo importando haciendo zoom. Para ello mantener pulsada la tecla ctrl del teclado y hacer un recuadro con el ratón sobre el modelo. El objetivo es observar en un primer vistazo si se ha perdido alguna entidad durante la importación.

- Realizar las operaciones “connect vertices”, “connect edges” y “connect faces” seleccionando todos los vértices, todas las aristas, y todas las caras. Lo que Gambit hará será eliminar dichas entidades que estén duplicadas, solapadas o que estén a una distancia inferior a una tolerancia establecida. Estos comandos son los más eficaces en el depurado. No obstante, es posible que alguna o algunas de esas entidades no pueda ser eliminada, ya que aunque estén solapadas o duplicadas pueden pertenecer a entidades superiores diferentes, de manera que hasta que no se borre esa entidad superior a la que pertenece no se puede eliminar la entidad inferior. En la figura 29 se muestran las ventanas con sus opciones.

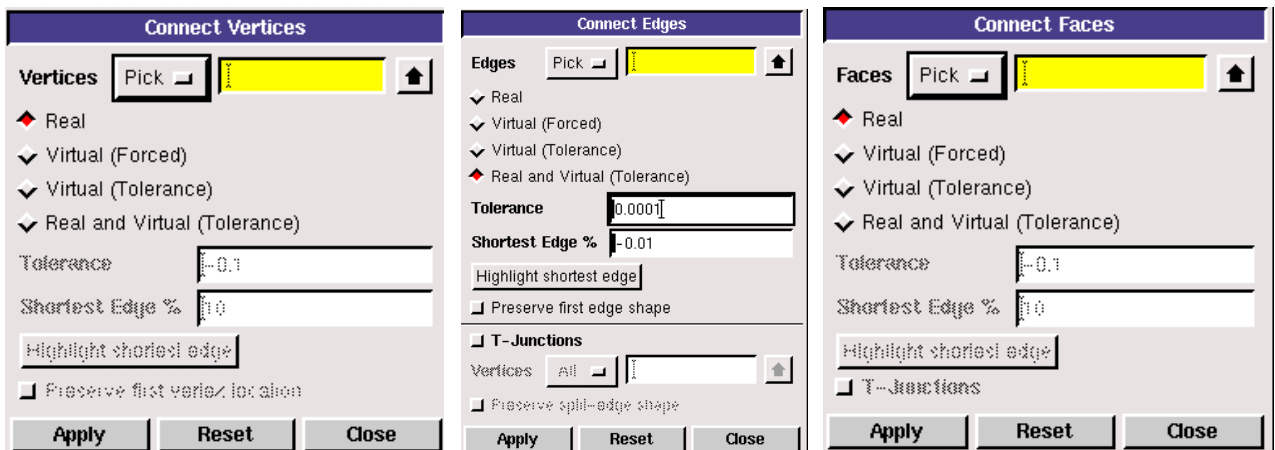


Figura 29. Ventana opciones “connect”, Gambit.

Si se de alguna entidad existen elementos reales y virtuales se seleccionará “Real and virtual geometry”. Si solo existen elementos reales “Real”; y si solo existen virtuales “Virtual (Forced). La opción T-Junctions sirve para conectar 3 vértices que no están conectados en forma de T (véase Figura 30).

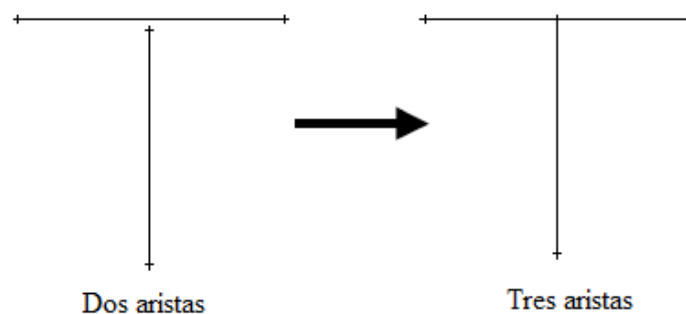


Figura 30. Conectar 3 vértices en forma de T, Gambit.

- Si el modelo sigue dando errores, se recurrirá a buscar la arista más corta y eliminarla. Para ello, en la ventana “connect edges” (Figura 29) se selecciona “Highlight shortest edge”. A continuación se seleccionan los dos vértices que forman la arista y se clic en “Aplicar”. En ese momento, Gambit mostrará un error que dirá que los dos vértices pueden formar una geometría no válida.
- Abrir “Edit defaults” y cambiar el valor de la variable `GEOMETRY.VERTEX.CONNECT_REMOVE_SHORT_EDGE` a 1. Después, repetir el paso 4 y ahora no dará error y sí borrará la arista más corta.

6. Por último, para reducir el número de caras, se utiliza la ventana de “Merge Faces” (Figura 31) para unir caras, que forman parte de la misma superficie, en una sola.

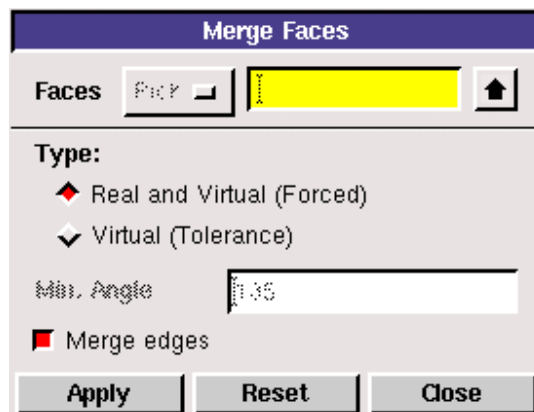




Figura 31. Ventana “Merge Faces”, Gambit”

Hasta ahora se ha explicado, según la experiencia adquirida, cómo importar y depurar un modelo CAD en Gambit. Por otro lado, se ha aconsejado realizar el modelo directamente en Gambit, ya que se consigue un modelo mucho más “limpio”. Nos centramos ahora en cómo realizar un modelo directamente en Gambit.

Para realizar un modelo directamente en Gambit, se cuenta con la ventaja de que conocemos exactamente cada uno de las entidades que lo forman, pues lo hemos hecho nosotros. Por tanto, no requiere depurado. En cuanto a los pasos a seguir, estos dependen del modelo que se vaya a realizar, lo que sí se recoge son una serie de tips al respecto:

- Para reproducir alguna entidad, sobre todo superior (cara y volumen), utilizar la opción “Copy”  trasladándola o rotándola a las coordenadas deseadas.
- Para saber las coordenadas de un vértice, la longitud de una arista, el área de una superficie, o a qué entidad superior pertenece una inferior, hacer uso de “Summarize”  dentro de cada entidad.
- Aplicar la opción “connect” de la Figura 29 una vez terminado el modelo, para asegurar que todo está correcto.

4.2. ESTRATEGIA DE MALLADO

Conseguido el modelo deseado, comienza el proceso de mallado también incluido en la etapa de Pre-proceso de la CFD.

En primer lugar se debe comenzar mallando las entidades de menor entidad, es decir los vértices. Se explica cómo hacer el mallado por entidades:

Aristas

A las aristas hay que determinarles el número de nodos. Existen dos opciones para hacerlo, determinar los nodos mediante “Interval Size” o mediante “Interval count”.

“Interval size”: Establece un tamaño para cada intervalo, es decir, cada cuánta longitud de la arista se coloca un nodo. Cuanto menor sea su valor, mayor densidad de nodos sobre la arista.

“Interval count”: Establece el número de nodos que queremos colocar sobre la arista. Si se esoge, por ejemplo, un “Interval count” de 10, se tendrán 9 nodos sobre la arista. Es decir, el número de nodos sobre la arista será de $n - 1$, siendo n el “Interval count” asignado. Si se escoge un “Interval count” de 1, no habrá ningún nodo sobre la arista. En este caso cuanto mayor valor se le asigne, mayor densidad de nodos sobre la arista.

En la Figura 32 se muestra la ventana de mallado de aristas con las opciones que hay que escoger. Solo se deberá elegir la forma, entre las dos explicadas, en la que se van a designar los nodos. Si ya se ha mallado la arista y se quiere variar el número de nodos, se puede hacer directamente cambiando su “Interval”, o utilizar primero la opción “Remove old mesh” y después seleccionar el nuevo “Interval”.

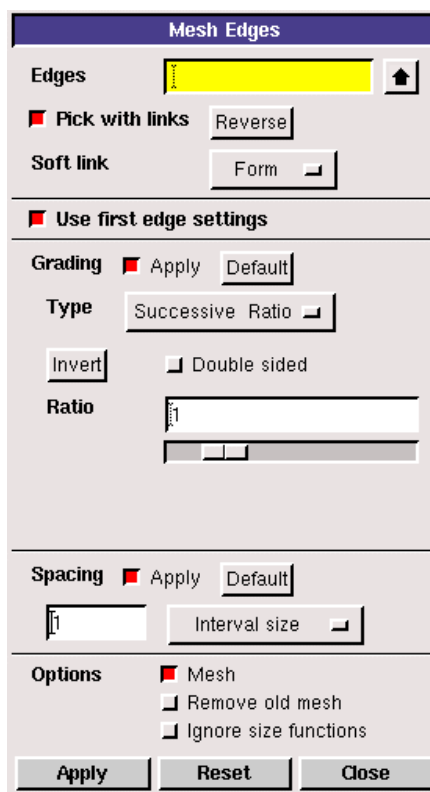


Figura 32. Ventana para mallado de aristas, Gambit.

Caras

El mallado de las caras dependerá de su entidad inferior, es decir, de las aristas. Según la cantidad de nodos que contengan las aristas que forman la cara, así será el número de celdas (densidad de celdas) que posea la cara. Existen distintos tipos de mallado, de los cuales se van a explicar los que se consideran que son suficientes para mallar cualquier geometría. Estas mallas son:

- Quad Map/Submap: Genera una malla con celdas cuadradas con una distribución constante. Ideal para mallar caras cuadradas, arcos de circunferencia, paredes rectangulares, etc.
- Quad Pave: También genera una malla cuadrada pero esta se adapta al contorno de la cara. Es decir, si tenemos un círculo, esta se adaptará formando cuadrados pero sin seguir una estructura constante, a diferencia de la malla anterior.
- Quad Tri Primitive: Para generar celdas cuadradas en una geometría irregular, que difiere bastante de una geometría cuadrada.
- Tri Pave: Genera una malla con celdas triangulares. Se adapta bien a cualquier geometría. En caso de duda, casi siempre se puede recurrir a este tipo de malla.
- Quad/Tri Map: Genera celdas cuadradas y/o triangulares dependiendo de la necesidad que encuentre según el espacio de que dispone. Siempre que sea posible seguirá la estructura Map.
- Quad/Tri Pave: Genera celdas cuadradas y/o triangulares dependiendo de la necesidad que encuentre según el espacio de que dispone. Siempre que sea posible seguirá la estructura Pave.

En cuanto al espaciado, se dejará siempre “Interval Size” 1, ya que si queremos una mayor o menor densidad se recomienda cambiarla mediante las aristas. La Figura 33 muestra la ventana que aparece por defecto al abrir “mesh faces”.

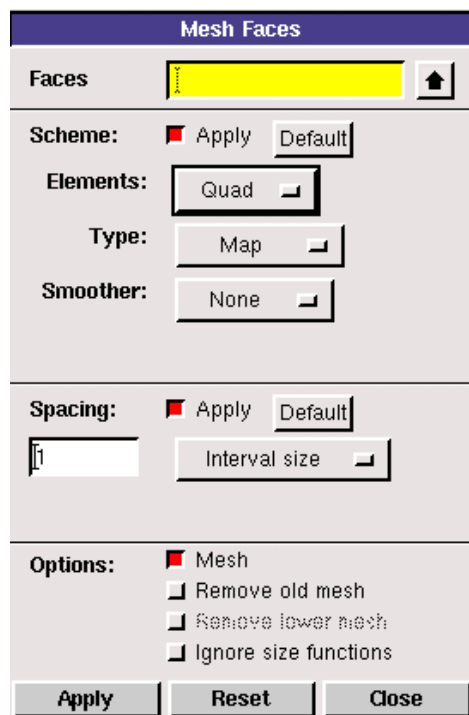


Figura 33. Ventana para mallado de caras, Gambit.

Si el modelo es 3D, también habrá que mallar los volúmenes.

Volúmenes

Es la última entidad que se debe mallar, ya que es la superior de todas. Para que el volumen quede bien mallado, es necesario mallar en primer lugar las caras que lo forman, aunque en la mayoría de casos no es necesario mallar todas ellas. En el caso de que una cara barra una parte del volumen, con mallar esa cara ya no es necesario mallar el resto de caras que mallan esa misma parte de volumen. En cuanto a los tipos de mallado de volúmenes se encuentran:

- Hex Map: Se utiliza si todas las caras que forman el volumen han sido malladas según el tipo Quad Map/Submap. “Hex” implica que todos los elementos son hexaédricos.
- Hex Tet Primitive: Si todas las caras que forman el volumen han sido malladas con el tipo Quad Tri Primitive. Divide el volumen en cuatro partes hexaédricas y crea una región cuadrada en cada una de ellas.
- Hex Cooper: Borra los patrones de mallado de las caras, y malla el volumen con elementos hexaédricos.
- Hex/Wedge Cooper: El volumen es mallado con elementos hexaédricos, pero incluye algún elemento irregular donde proceda. Es poco utilizada.
- Tet/Hybrid TGrid: Especifica que la malla contiene elementos hexaédricos, tetraédricos, piramidales e irregulares, según proceda. Este mallado sirve cualquier volumen, siempre que las caras que lo forman hayan sido malladas mediante Tri Pave.

En la Tabla 7 se muestra la compatibilidad entre los elementos que forman la malla y el tipo de malla:

Tipo de malla	Elementos		
	Hex	Hex/Wedge	Tet/Hybrid
Map	X		
Submap	X		
Tet Primitive	X		
Cooper	X	X	
Stairstep	X		
TGrid			X
Hex Core			X

Tabla 7. Compatibilidad entre elementos y tipos de malla, Gambit.

4.3. CONDICIONES DE CONTORNO

Lo último que se debe realizar en Gambit, antes de exportar la malla, consiste en determinar las condiciones de contorno que definen el modelo. Al exportar la malla a Fluent, este tendrá definido el modelo y la malla, pero debe comprender cuál es el problema que tiene que resolver, motivo por el que se deben establecer las condiciones de contorno del modelo en Gambit. No confundir las condiciones de contorno de Gambit con las de Fluent. Las condiciones de contorno de Gambit determinan cuáles son las paredes, cuál es la entrada y salida del fluido (si la hay), qué volumen o cara es el sólido o sólidos y cuál el fluido o fluidos. En cambio, las condiciones de contorno de Fluent, a partir de las de Gambit, determinan las propiedades de esos contornos (se explicará detalladamente en el capítulo 5).

En Gambit hay que determinar dos tipos de condiciones de contorno: “Specify Boundary Types” y “Specify Continuum Types”.

Dentro de las “Specify Boundary Types” se deben seleccionar las entidades que constituyen una de las condiciones de contorno de las que se muestran en la Figura 34.

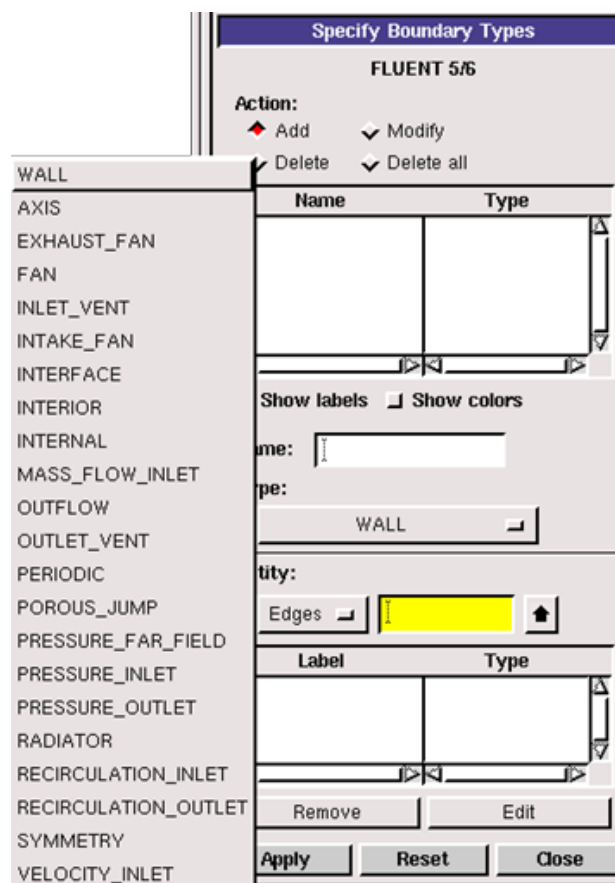


Figura 34. Ventana “Specify Boundary Types”, Gambit

De todas ellas, las más comunes son:

- Wall: Establece la condición de pared a las entidades seleccionadas.

- Outflow: Establece la condición de salida del fluido delimitado por las entidades correspondientes.
- Pressure_Inlet: Establece la condición de entrada permitiendo asignarle, posteriormente en Fluent, un valor para esa presión de entrada.
- Pressure_Outlet: Idem que la Pressure_Inlet pero con salida en vez de entrada.
- Symmetry: Establece la condición de simetría para las entidades que actúan como eje de simetría. Por ejemplo, en este TFG se ha simulado un tubo, pero en vez de realizar el modelo del tubo completo, se ha realizado una sección de 45 y 90 grados.
- Velocity_Inlet: Establece la condición de entrada del fluido permitiendo asignarle, posteriormente en Fluent, un valor para esa velocidad de entrada.

Por otro lado, dentro de “Specify Continuum Types” se deben distinguir las entidades superiores que son sólidas y las que son líquidas. Para ello simplemente se seleccionan las entidades y se les asigna como fluido o como sólido (Figura 35).

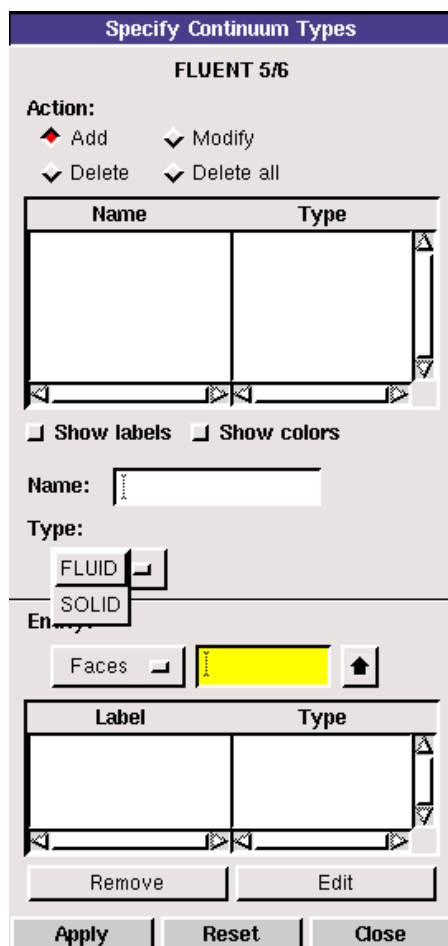


Figura 35. Ventana “Specify Continuum Types”, Gambit.

Establecidas las condiciones de contorno, el siguiente paso es exportar la malla. Para ello:

File/Export/Mesh. Aparecerá la siguiente ventana (Figura 36).

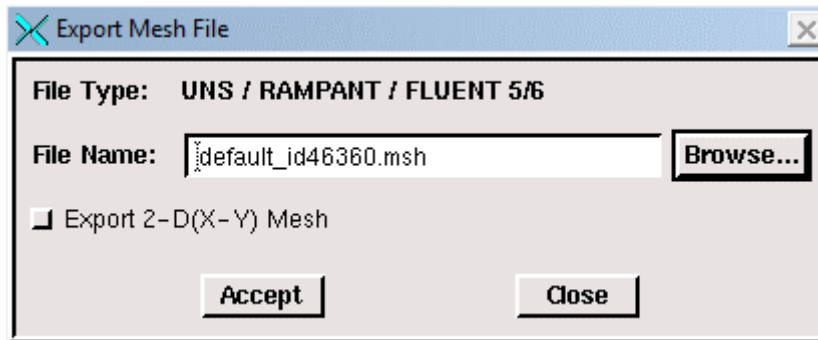


Figura 36. Ventana “Export Mesh File”.

Se escribe el nombre deseado y se elige la carpeta donde se guardará el archivo. Si el modelo es 2D se marcará la opción “Export 2-D(X-Y) Mesh”, si es 3D no. Acepte, y se habrá generado un fichero .msh, que contiene la malla del modelo y las condiciones de contorno.

4.4. MODELOS ESTUDIADOS

En este apartado se presentan y describen los modelos estudiados en el TFG, así como se indican los pasos que se han seguido para su modelado, a fin de que sirvan de ejemplo como dos modelos realizados directamente en Gambit. A partir de ahora se diferenciará entre modelo 1 y modelo 2.

4.4.1. MODELO 1: ESPUMA METÁLICA FCC

En primer lugar se muestran las figuras, en 2D y 3D, del que a partir de ahora se llamará modelo 1, para posteriormente explicar cómo se ha modelado y cuál es su función.

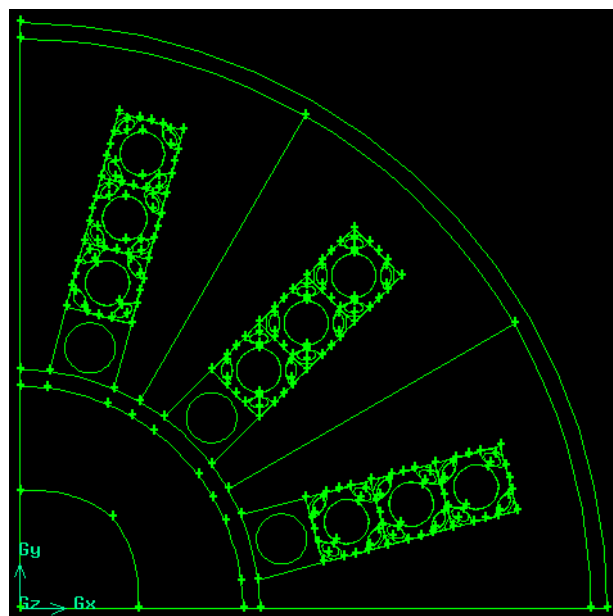


Figura 37. Modelo 1 en 2D, Gambit.

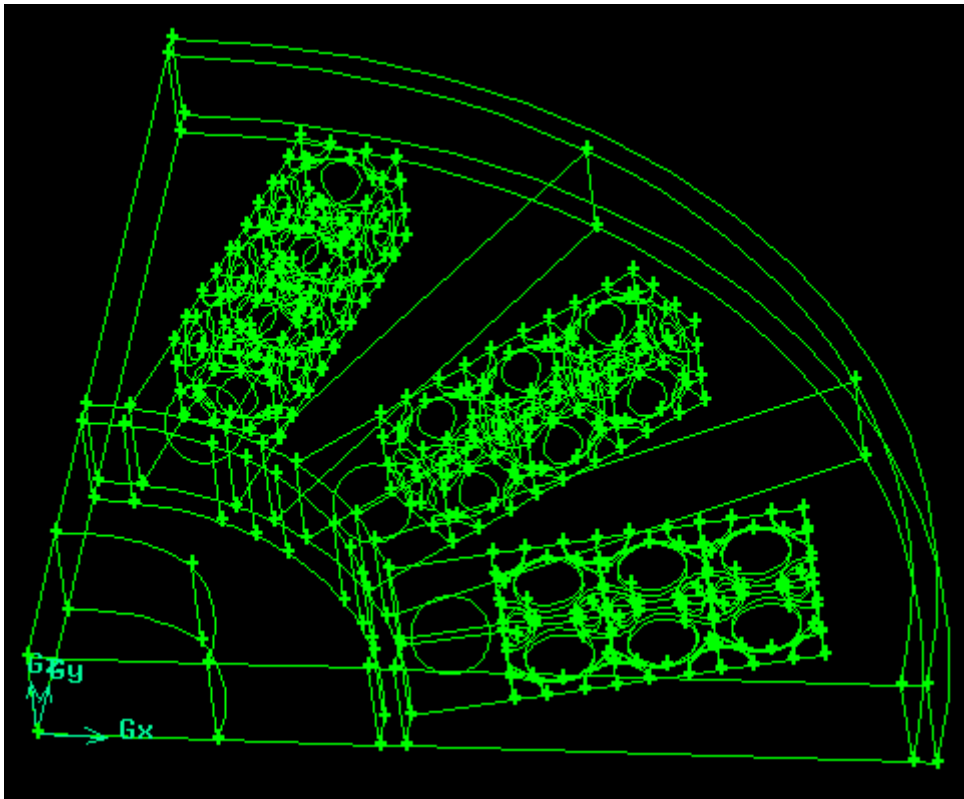


Figura 38. Modelo 1 en 3D, Gambit.

Como se observa en el 3D, se trata de una sección de 90° de lo que sería el tubo completo. Se ha realizado a 90° para simplificar el modelado, y dado que el comportamiento de esta sección será el mismo que el resto del tubo, ya que se encuentra a las mismas condiciones.

En 90° se han dispuesto 3 geometrías idénticas de espuma metálica, que tendría un efecto similar al de aletas radiales. El primer cubo, que está en contacto con la pared exterior del tubo es diferente, ya que solo se le ha quitado una esfera central, de 1,5 mm de radio, con el objetivo de dar consistencia a la unión entre espuma y tubo pues de esta manera comparten un área mayor. Tras este primer cubo, se han acoplado 3 más en dirección radial que según la geometría escogida, y que se ha explicado en el apartado 3.1 del capítulo 3. La longitud de cada lado del cubo es de 4 mm. Los rectángulos que se observan entre las 3 geometrías de espuma no son nada, se crean al rotar de 30° a 90° (dos rotaciones dos rectángulos). No se les asigna condiciones de contorno de manera que Fluent las considerara como “default-interior”. La altura del volumen es de 4 mm.

El radio exterior del tubo es de 14,282857 mm, y su espesor de 1 mm. El hecho de no haber tomado un radio exacto, como por ejemplo 15 mm, se debe a que para que el lado del cubo sean 4 mm, ya no se pueda tomar un radio exacto. También se podría haber hecho al revés tomar un radio exacto, y que el lado del cubo sea el que salga, pero se ha preferido tomar un lado exacto del cubo para realizar mejor el estudio de la geometría de espuma metálica FCC. Al igual que la espuma metálica, el tubo y la carcasa son de aluminio. El fluido que circula por el interior del tubo es agua y entra por abajo según la dirección positiva del eje z.

El funcionamiento es el que sigue. El fluido caloportador (agua) entra a una velocidad de 1 m/s, a una temperatura de 360 K. El tubo, la espuma metálica, el PCM y la carcasa (de 1 mm de espesor) se encuentran a una temperatura inicial de 300 K. Por lo tanto, tal y como establece la ciencia de la transferencia de calor *“La transferencia de calor se produce siempre que existe un gradiente térmico o cuando dos sistemas con diferentes temperaturas se ponen en contacto. El proceso persiste hasta alcanzar el equilibrio térmico, es decir, hasta que se igualan las temperaturas”*, al encontrarse el fluido a una temperatura de 60 K superior respecto al resto de componentes del modelo, se produce la transmisión de calor. Así, el fluido transmite el calor al tubo de aluminio el cual aumenta su temperatura de forma progresiva. Al ser la temperatura del tubo mayor que la de la espuma metálica, esta también comienza a aumentar su temperatura. La espuma metálica, mediante conducción, transmite el calor en dirección planar y radial al PCM, y al ser la temperatura de liquidus de este inferior a la que alcanza el sistema, funde. El PCM se encuentra contenido entre la pared interior de la carcasa y la pared exterior del tubo y embebido en la matriz de espuma metálica. La transferencia de calor se mantiene hasta que la temperatura del PCM iguala a la temperatura inicial del HTF. A este proceso se le ha denominado como fusión o proceso de carga del PCM, ya que en esta etapa es cuando acumula energía. Al ir cediendo calor, el fluido ha disminuido de temperatura, por lo que en ese momento la temperatura del PCM, que idealmente será de 360 K, es mayor que la del fluido. De ese modo, al existir un gradiente de temperaturas en el sistema y al ir el calor del cuerpo más caliente al más frío, se produce el proceso a la inversa. Ahora es el PCM el que transmite el calor al resto del sistema, hasta que su temperatura vuelve a ser inferior a la de la espuma metálica. Este proceso recibe el nombre de solidificación o descarga del PCM, pues es en esta etapa en la que libera (aporta) la energía almacenada. A modo de recordatorio, la espuma metálica, el tubo y la carcasa de ninguna manera verán alteradas sus propiedades a las temperaturas de trabajo del sistema, ya que al ser un metal posee un elevado punto de fusión.

Se explica detalladamente cómo se ha realizado el modelado, mallado y establecido las condiciones de contorno del Modelo 1.

En primer lugar se realiza un modelo de 90° para simplificar las operaciones (el modelo tiene 360°, es un tubo), ya que teniendo los 90°, el resto del modelo es simétrico por lo que se puede completar rotando 90°, 180° y 270° el modelo de 90°. Se decide realizar un único modelo de espuma metálica entre el diámetro exterior del tubo y el diámetro interior de la carcasa.

Tras realizar el modelo completo a 90° en Gambit, se llega a la conclusión de que la distancia entre la espuma metálica y la carcasa es demasiado amplia, por lo que se decide aprovechar este espacio para aumentar la superficie de transferencia de calor realizando cuatro geometrías FCC consecutivas de espuma metálica. Además, en vez de realizar un modelo de 90°, se va a realizar uno a 30° para simplificar aún más las operaciones tanto de modelado como de mallado, pues posteriormente se consiguen los 90° rotando dos veces (la primera de 30° a 60°, y la segunda de 60° a 90°), de ahí los dos rectángulos que

se ha comentado que aparecen. Como se deduce, las secciones del tubo son simétricas de 30° en 30° .

Cómo se ha realizado el modelo en Gambit (30°)

1. Seleccione un lado del cubo de 4 mm de lado, por lo que el radio del tubo será arbitrario en función de dónde se sitúe el vértice central del primer cubo a 45° . Se prefiere elegir un lado exacto del cubo que un radio exacto del tubo. Las dos cosas no es posible conseguir las.
2. Para que el diámetro exterior del tubo sea próximo a 30 mm, sitúo un vértice en el punto (10, 10, 0). Este vértice se encuentra en el centro del lado inferior de la cara inferior del primer cubo. Como quiero que el lado del cubo sea de 4 mm, dado que el cubo está inclinado 45° la distancia de los catetos es de 1.4142135626 mm. Para tener una arista de 2 mm a 45° hay que sumar en la dirección x e y esa distancia de catetos. Así, sitúo los vértices que forman el lado inferior del cubo en (8.585786437, 11.4142135626, 0) y (11.4142135626, 8.585786437, 0).
3. Uno esos dos vértices y ya tengo el lado inferior del cubo.
4. Como el modelo lo realizo a 30° , roto el lado del cubo 30° en sentido horario (-30°).
5. Coloque vértice en el (0,0,0), y la distancia de este vértice a cualquiera de los dos que forman la cara inferior del cubo me da el radio exterior del tubo Así, el radio exterior del tubo es de 14.282857 mm.
6. Sitúo un vértice en el (14.282857, 0, 0) y como el tubo tiene un espesor de 1 mm, sitúo un vértice en el (13.282857, 0, 0), y trazo un arco de radio 14.282857 y 13.282857, ambos desde 0 a 30° .
7. Sitúo un vértice en el (35,0,0) para hacer el arco del exterior de la carcasa, y como esta tiene 1 mm de espesor, coloco otro vértice en el (34,0,0). Es decir, el radio exterior de la carcasa es de 35 mm
8. Realizar dos arcos de 0 a 30° , uno de radio 35 mm y otro de 34 mm.
9. Tenemos el lado inferior del cubo pero quiero crear toda la cara. Para ello lo haré mediante crear cara con “sweep edges”. Como tiene que medir 4 mm en diagonal a 45° hay que sumar 1.4142135626 mm en x y en y por cada 2 mm en diagonal. Por tanto, sitúo un vértice en $(10 + 2 \times 1.4142135626, 10 + 2 \times 1.4142135626, 0)$.
10. Creo arista de vértices (10,10,0) y $(10 + 2 \times 1.4142135626, 10 + 2 \times 1.4142135626, 0)$.
11. “sweep edges” seleccionando el lado inferior y como edge a seguir el creado en el paso 10.
12. Aunque queremos 3 cubos, primero se va a modelar el segundo cubo y una vez esté mallado se copiará dos veces a una distancia $(2 \times 1.4142135626, 2 \times 1.4142135626)$. Para hacer la cara inferior del segundo cubo, hay que repetir los pasos 9, 10 y 11, pero hay que sumarle la coordenada x e y 2×1.4142135626

- mm. Así para crear el cubo 2 se necesita un vértice en $(10 + 2 \times 1.4142135626 + 2 \times 1.4142135626, 10 + 2 \times 1.4142135626 + 2 \times 1.4142135626, 0)$.
13. Extruir a 3D. Extruir en +4, de manera que ya tenemos el volumen de fluido caloportador 1, el volumen fluido caloportador 2, volumen tubo que contiene al FC, volumen carcasa y volumen de PCM contenido en carcasa en 3 tramos de 30° (estos volúmenes se eliminarán, ya que al extruir se crean caras y aristas repetidas por lo que no dejará mallarlo posteriormente) Hay que depurar bien al extruir.
 14. Una vez se tienen el cubo 1 y 2 (directamente al extruir), se procede a sustraerle los correspondientes volúmenes para obtener el volumen de espuma metálica y PCM correspondiente.
 15. Se hace la esfera de 1.5 mm, y se mueve ese volumen hasta el punto $(11.4142135626, 11.4142135626)$.
 16. Al volumen primer cubo se le sustrae el volumen esfera 1.5 mm, obteniendo así el volumen de espuma metálica. El volumen esfera 1.5 mm, en este caso, corresponde al volumen de PCM en el primer cubo.
 17. Se hace una esfera de 2.4mm y se mueve a la distancia $10 + 3 \times 1.4142135626$ mm.
 18. Se hacen 4 esferas de 1.25 mm, y se mueven a los cuatro vértices de la cara superior del segundo cubo, ya que sabemos sus coordenadas.
 19. Se copian esos 4 cubos a una distancia de -4 mm en z, y ya tenemos las 8 esferas situadas en los 8 vértices.
 20. Sustraer al volumen cubo 2 (reteniendo este volumen) el volumen esfera 2.4 mm y los 8 volúmenes esfera 1.25mm, y ya tenemos el volumen espuma metálica del cubo 2.
 21. Para obtener el volumen de PCM del cubo 2, se sustrae al volumen cubo 2 el volumen espuma metálica cubo 2 (reteniendo este volumen).
 22. Una vez se haya realizado el punto 13 del mallado, se copia el volumen espuma metálica cubo 2 y el volumen PCM cubo 2 a las coordenadas $(2 \times 1.4142135626, 2 \times 1.4142135626)$. Copiar los mismos volúmenes del cubo 3 y copiarlos rotándolos las coordenadas $(2 \times 1.4142135626, 2 \times 1.4142135626)$.
 23. Crear volumen del tramo central del PCM de la carcasa. Para ello crear el volumen mediante “wareframe”.
 24. Copiar rotando a +30° y a -30° los siguientes 8 volúmenes: volumen espuma metálica cubo 1, volumen PCM cubo 1, volumen espuma metálica cubo 2, volumen PCM cubo 2, volumen espuma metálica cubo 3, volumen PCM cubo 3, volumen espuma metálica cubo 4, volumen PCM cubo 4, y volumen PCM central carcasa.
 25. Una vez realizado el paso 15 del mallado se copia rotando a +30° y a -30° el volumen PCM central carcasa, y ya tenemos el modelo y mallado completos.

Cómo se ha realizado el mallado en Gambit

1. Primero se realiza el mallado 2D de las superficies que constituyen el fluido caloportador (FC), el tubo por el que circula el fluido caloportador y la carcasa.
2. Para mallar la superficie de fluido caloportador dado que el modelo se ha realizado a 30°, supone la existencia de una estructura triangular de manera que no podría utilizarse el tipo de mallado preferible que es Quad elements y Map type. Por tanto, el modelo realizado (30°) se copia dos veces rotándolo para formar los 90°.
3. Para mallar la superficie fluido caloportador se hacen 2 arcos intermedios para obtener una mejor precisión de mallado (se crea el vértice (5.5, 5.5, 0)).
4. Para mallar la superficie fluido caloportador1 utilizo un interval count de 24 para cada lado, y para el arco de apoyo un interval count (IC) de 24 en cada arco, y el tipo de mallado es “Quad Map”. Para mallar la superficie fluido caloportador2 utilizo el mismo tipo de mallado, y el interval count de 48 que debe obtenerse (24+24 de cada tramo de arco), se divide en 3 tramos de interval count 8 (donde están los cubos, y el resto en 6 tramos de interval count 4).
5. Para mallar la superficie del tubo utilizo el mismo interval count 48 dividido en los 3 tramos de IC8 y los 6 tramos de IC4.
6. Para mallar la carcasa uso para la arista interior 3 tramos de interval count 16, y para la arista exterior un interval count 48.
7. Extruir a 3D, para ello “sweep faces” seleccionando todo y se extruye en z hasta +4.
8. Se malla el volumen FC1 y para ello solo falta utilizar en los laterales un IC6 (mallado Hex Map).
9. Se malla el volumen FC2 para ello solo falta utilizar en los laterales un IC6 (mallado Hex Map).
10. Se malla el volumen Tubo FC para ello solo falta utilizar en los laterales IC6 (mallado Hex Map). Y previamente hay que mallar el rectángulo de la cara que comparte el tubo con el 1er cubo (mallado Hex Map, sus IC ya venían del 2D).
11. Se malla el volumen PCM del cubo 1 con interval size 0.5 (mallado Tet/Hybrid TGrid).
12. Se malla el volumen espuma metálica del cubo 1 (mallado Tet/Hybrid TGrid). Lado pegado al tubo IC8, los otros lados IC16 (el lado pegado al cubo 2 dividido en un tramo central de IC4 y dos de IC5).
13. Se malla el volumen espuma metálica cubo 2 y el volumen PCM cubo 2 (ambos mallado Tet/Hybrid TGrid). Esferas grandes en las caras IC28, en los lados un tramo central de IC6 y dos de IC5. Huecos esferas pequeñas IC12, laterales huecos esferas pequeñas IC6.

14. Se malla el volumen de la carcasa y para ello solo falta poner en los laterales IC6 (mallado Hex Map).
15. Una vez realizado el punto 23 del modelado se malla el volumen PCM carcasa (mallado Tet/Hybrid TGrid). Para ello los cubos ya tienen su IC, falta poner a los laterales que dividen en 30° se pone IC20.
16. Una vez realizado el punto 25 del modelado, ya está todo mallado.

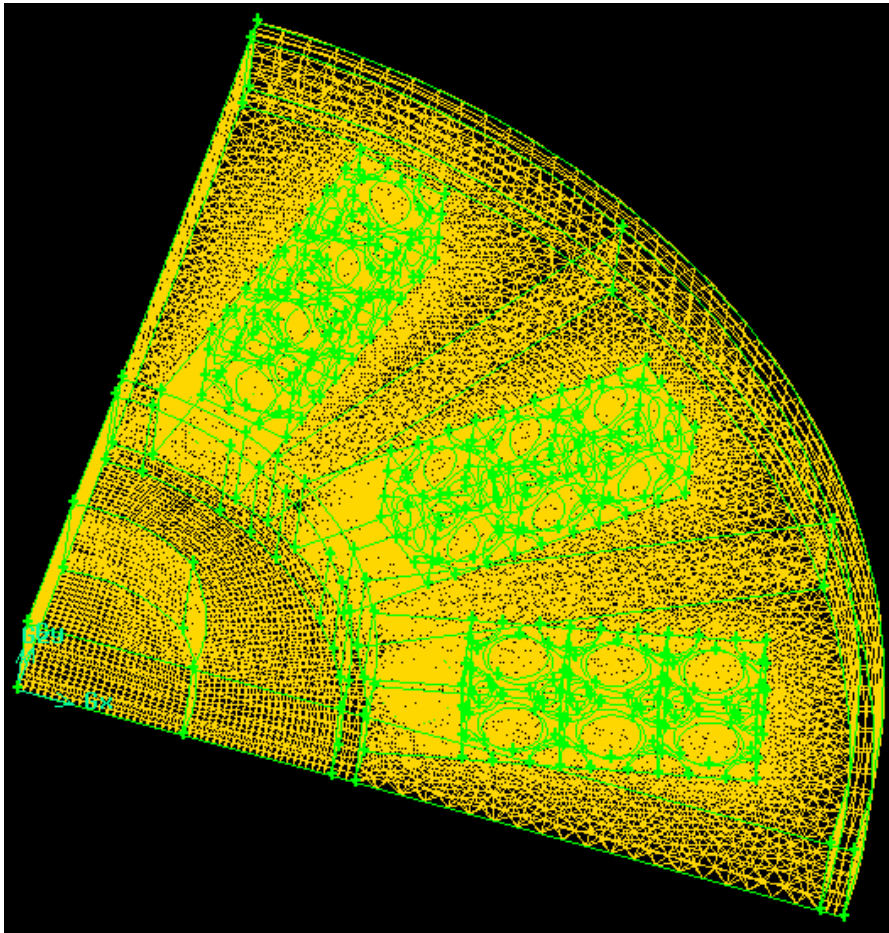


Figura 39. Malla Modelo 1 en 3D, Gambit.

Condiciones de contorno establecidas

Specify Boundary Types:

- Tipo Wall: tubo superior, tubo inferior, tubo exterior, tubo interior, carcasa superior, carcasa inferior, carcasa exterior, carcasa interior, tapa inferior, tapa superior y espuma metálica.
- Tipo symmetry: Las 6 caras que son simétricas (por eso se ha hecho el modelo de 90°)
- Tipo Velocity Inlet: Entrada del Fluido Caloportador (FC).

- Tipo Outflow: Salida Fluido Caloportador.

Specify Continuum Types:

- Tipo Sólido: volumen tubo, volumen carcasa, volumen espuma metálica.
- Tipo Fluido: volumen Fluido Caloportador y volumen PCM.

4.4.2. MODELO 2: ESPUMA METÁLICA LOBULAR

En primer lugar se adjuntan las figuras del Modelo 2, en 2D y 3D.

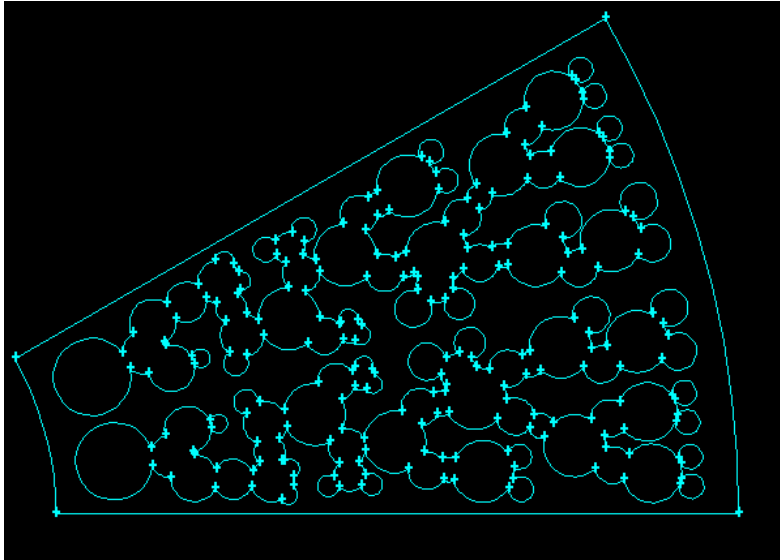


Figura 40. Modelo 2 en 2D, Gambit.

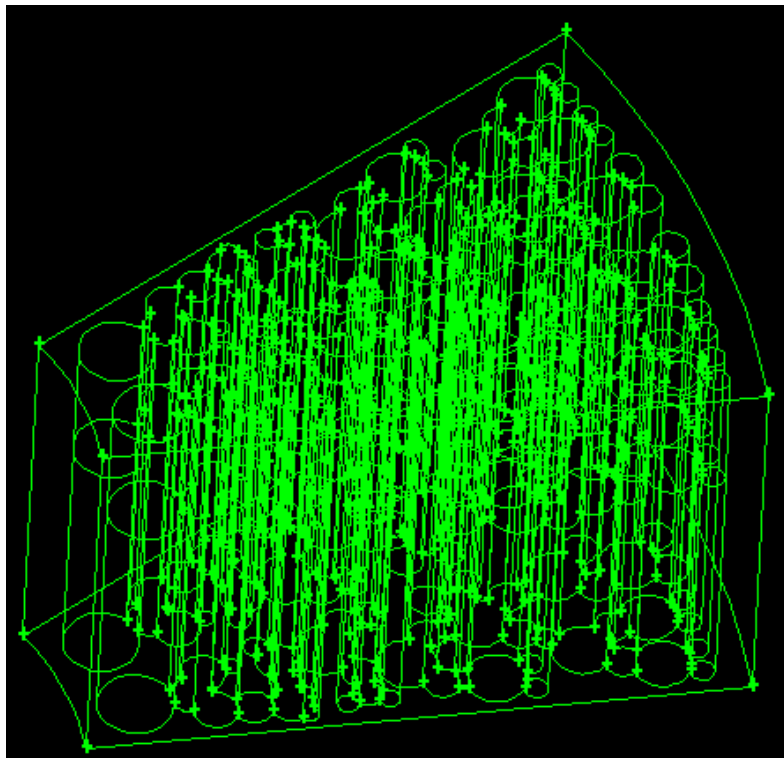


Figura 41. Modelo 2 en 3D, Gambit.

Se trata de una sección de 30° del tubo, pero en este caso no se va a simular la entrada del fluido, sino que directamente se le pondrá la temperatura de 360 K a la pared exterior del tubo (que es el arco de la izquierda de la Figura). El PCM se encuentra dentro del volumen que forman los lóbulos hasta una altura de 10 mm, y se encuentra embebido en una matriz de espuma metálica que se adapta a esa geometría lobular. En este modelo, dentro de los lóbulos y por encima de los 10 mm de PCM, se encuentran 5 mm de aire, con el objetivo de poder tener en cuenta las dilataciones del PCM al fusionarse y poder simular la convección natural. Se tienen 5 volúmenes, a los que se llamará PCM 1, PCM2, Aire 1, Aire 2 y Espuma metálica. El 1 y 2 se utilizan porque como existen dos geometrías iguales de PCM y aire, para diferenciarlas.

El fenómeno de transferencia de calor se produce de manera análoga al modelo 1. La pared exterior del tubo se encuentra a 360 K. En consecuencia, la espuma metálica aumenta su temperatura progresivamente, y transmite por conducción el calor al PCM fundiéndose este (Carga). Una vez que la temperatura del PCM es mayor que la de la espuma, el proceso se produce a la inversa, siendo el calor conducido desde el PCM hasta la espuma metálica (Descarga).

Cómo se ha realizado el modelo en Gambit (30°)

1. Se realiza un arco de radio 10 mm y hasta 30°.
2. Se realiza un arco de radio 32 mm hasta 30°.
3. Colocar 8 vértices sobre los dos arcos anteriores.
4. Trazar vértices entre los 10 y los 32 mm.
5. Trazar líneas rectas desde los vértices del arco de 10 mm hasta los del de 32 mm. De esta manera se habrá creado una rejilla sobre la cual se podrán colocar los vértices que serán el centro de cada lóbulo.
6. Colocar vértices en las intersecciones entre los arcos y las líneas rectas creadas.
7. Hacer círculos sobre esos vértices e ir enlazando unos con otros siguiendo la geometría lobular deseada con las opciones “Split edge” y “Substract faces”.
8. Extruir el 2D 10 mm en la dirección positiva del eje z.
9. Ya se tiene el volumen de PCM, ahora para obtener el volumen de aire, se utiliza la opción de crear un volumen a partir de la extrusión de caras “sweep faces” y se seleccionan las dos caras que ejercen de superficie de contacto (entre el PCM y el aire) y la cara de espuma metálica. Se extruye 5 mm en dirección +z.
10. Como se habrán creado dos volúmenes de espuma metálica, y se quiere que esta forme un único bloque, se utiliza “Unit volumes” y se seleccionan ambos.

Cómo se ha realizado el mallado en Gambit

1. En primer lugar se han mallado las 3 caras del 2D (las dos lobulares de PCM y la de la espuma metálica). Al arco pequeño se le ha puesto un Interval Count (IC) de 10. Al grande un IC 25.
2. A las paredes simétricas se les ha puesto IC 35.
3. A los lóbulos, dada la complejidad de referirse a cada uno de ellos y que sea entendible, se les ha ido poniendo IC en función de la longitud de la arista, cuanto más grande pues un IC más grande.
4. Una vez malladas las aristas, se han mallado las 3 caras con la malla Tri Pave.
5. Mallado el 2D, se pasa a 3D, donde los homólogos a los arcos y paredes del paso 1 y 2 se les debe poner el mismo IC que a estas.
6. Se comienza mallando las aristas verticales que forman las caras del PCM y el aire. En el caso de las aristas del aire se utiliza un IC 20, mientras que a las del PCM, al medir 5 mm, un IC de 11.
7. Se mallan las dos caras que forman la interfase entre el PCM y el aire, y las dos caras que forman la parte superior del aire.
8. Se mallan todas las caras del aire y todas las del PCM, mediante el mallado Tri Pave. Con este mismo mallado se malla una de las paredes laterales, y la pared del tubo exterior.
9. Mallar los 5 volúmenes. Todos ellos, al haber mallado las caras con Tri Pave, se mallan con Tet/Hybrid TGrid.
10. Ya hemos mallado el modelo.

En la Figura 41 se muestra el modelo de lóbulos mallado en 3D.

Condiciones de contorno establecida

Specify Boundary Types:

- Tipo Wall: pared exterior tubo, pared interior carcasa, tapa superior (cara aire 1, cara aire 2, y cara espuma metálica situada en +15 mm, según eje z).
- Tipo symmetry: Las 2 paredes que delimitan los 30°.

Specify Continuum Types:

- Tipo Sólido: volumen de espuma metálica.
- Tipo Fluido: volúmenes de PCM 1, PCM 2, aire 1 y aire 2.

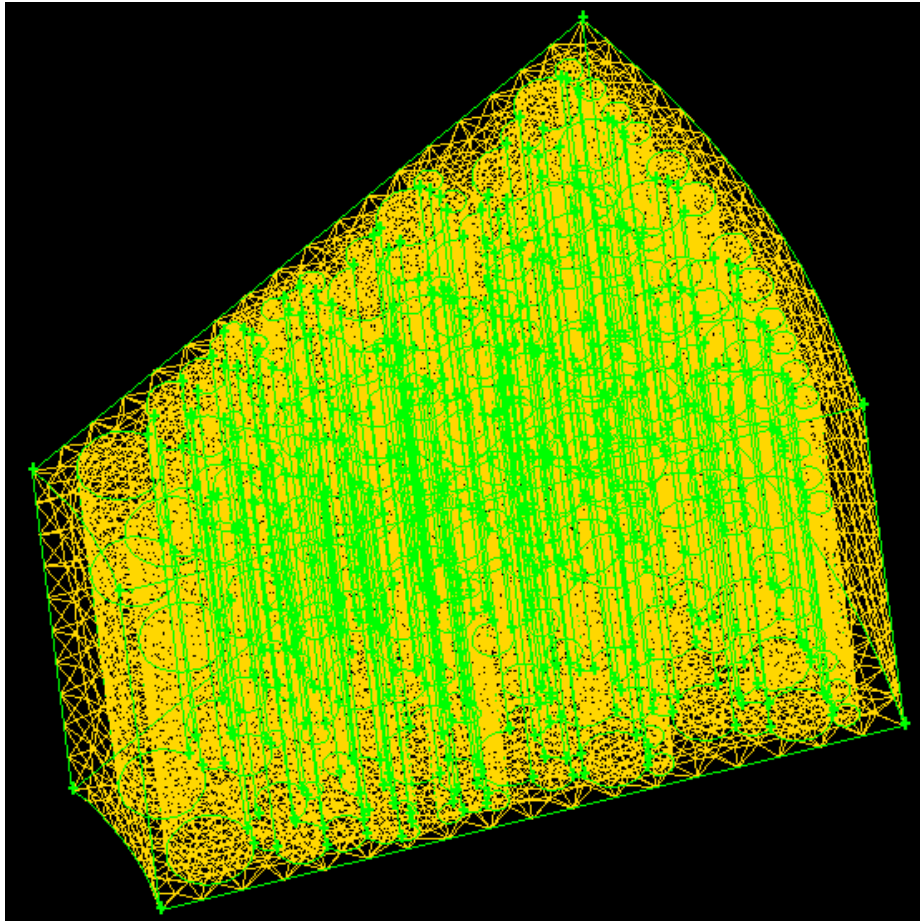


Figura 42. Malla en Modelo 2 en 3D, Gambit.

Cabe mencionar, que de este modelo de espuma metálica lobular se realizó, previamente al modelo aquí presentado, una variante en cuanto al volumen de aire. Primero se realizó el modelo de forma idéntica al de la Figura 42, pero la altura del volumen de aire en vez de ser 5 mm, era de 1 mm. Tras realizar, para ese primer modelo, las mismas simulaciones que las que se incluyen en el capítulo 6 de resultados, se observó un comportamiento de la convección natural que no se entendían bien. Se llegó a la conclusión de que su causa podía deberse a que con un volumen de aire de 1 mm de altura, no es suficiente para contener las dilataciones/expansiones que experimenta el PCM al fundir. Por lo tanto, se aumentó la altura del volumen de aire de 1 mm a 5 mm. Con el nuevo modelo, ya sí se obtuvo un comportamiento esperado de la convección natural, como se muestra en el capítulo 6.

5. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN NUMÉRICA

En este capítulo, se describen tanto las ecuaciones que Fluent utiliza para resolver los modelos realizados, como el procedimiento para simular los fenómenos de transmisión de calor junto con la fusión y solidificación, y junto con flujos multifásicos. Por último se mostrará dicho procedimiento, aplicado a los modelos estudiados, para obtener su simulación.

5.1. FLOW SOLVERS EN FLUENT

En primer lugar, se van a hacer una distinción entre los diferentes solvers (métodos numéricos) que permite utilizar Fluent: Pressure-Based Solver y Density-Based Solver. En ambos métodos, el campo de velocidad se resuelve mediante las ecuaciones de momento. El “density-based” utiliza la ecuación de continuidad para obtener el campo de densidades, mientras que el campo de presiones se calcula mediante la ecuación de estado. Por otro lado, en el “pressure-based” el campo de presiones se calcula resolviendo una ecuación de corrección de presión que es obtenida mediante la manipulación de las ecuaciones de continuidad y momento. Además, ambos solver utilizan un proceso de discretización similar (volúmenes finitos), pero la aproximación usada para linealizar y resolver las ecuaciones discretizadas es diferente.

Al usar cualquiera de los métodos, Fluent resolverá las ecuaciones de conservación de masa y momento, y la ecuación de la energía cuando sea necesario (en este TFG es necesario, ya que para poder simular la fusión y solidificación se debe resolver la ecuación de la energía). En ambos casos, además, utiliza una técnica de control basada en el volumen que consiste en:

- La división del volumen en volúmenes de control discretos mediante el uso de una malla computacional.
- Integración de las ecuaciones que gobiernan el flujo en los volúmenes de control individuales para construir ecuaciones algebraicas para las variables discretas dependientes, como la velocidad, presión, temperatura.
- Linealización de las ecuaciones discretizadas y resolución del sistema lineal de ecuaciones resultante, actualizando así los valores de las variables dependientes.

Pressure-Based Solver

Este solver, a su vez, se divide en dos tipos: Segregado y acoplado. Es decir, se tiene el “Pressure-Based Segregated” y el “Pressure-Based Coupled”.

El “Pressure-Based Segregated” emplea un algoritmo de resolución en el que las ecuaciones de gobierno se resuelven de forma secuencial (esto es, segregado de cualquier otro). Dado que estas ecuaciones de gobierno no son lineales y están acopladas, el bucle de resolución debe llevarse a cabo de forma iterativa para así poder obtener una solución numérica que converja. Cada ecuación de gobierno, mientras se resuelve, es

“desacoplada” o “segregada” del resto. Sin embargo, la convergencia de la solución es lenta, ya que cada iteración sigue los siguientes pasos:

1. Actualizar las propiedades de los fluidos basándose en la solución actual.
2. Resolver las ecuaciones de momento, una detrás de otra, utilizando los valores actualizados de la presión y flujos máxicos en las caras.
3. Resolver la ecuación correctora de presión, a partir de los campos de velocidades y flujo máxico obtenidos.
4. Corregir los flujos máxicos en las caras, presión y campo de velocidades haciendo uso de la corrección de presión obtenida en el paso anterior.
5. Resolver las ecuaciones para diferentes escalares, si existen, como cantidades de turbulencia, energía, intensidad radiactiva, etc, usando los valores de las variables resueltas.
6. Actualizar los términos que surgen de las interacciones entre las diferentes fases.
7. Verificar la convergencia de las ecuaciones.

El “Pressure-Based Coupled” resuelve un sistema de ecuaciones acoplado, incluyendo las ecuaciones de momento y la ecuación de continuidad basada en la presión. En este tipo de solver, los pasos 2 y 3 del segregado son sustituidos por un único paso en el que se resuelve ese sistema de ecuaciones acoplado. El ratio de convergencia de soluciones mejora significativamente con respecto al solver segregado.

La Teoría de Fluent divide el solver basado en la presión, sin embargo, a la hora de seleccionar el solver solo permite distinguir entre “pressure” o “density” y no entre segregado o acoplado. Esto se puede ver en la Figura 43, donde se presenta la ventana que por defecto permite Fluent.

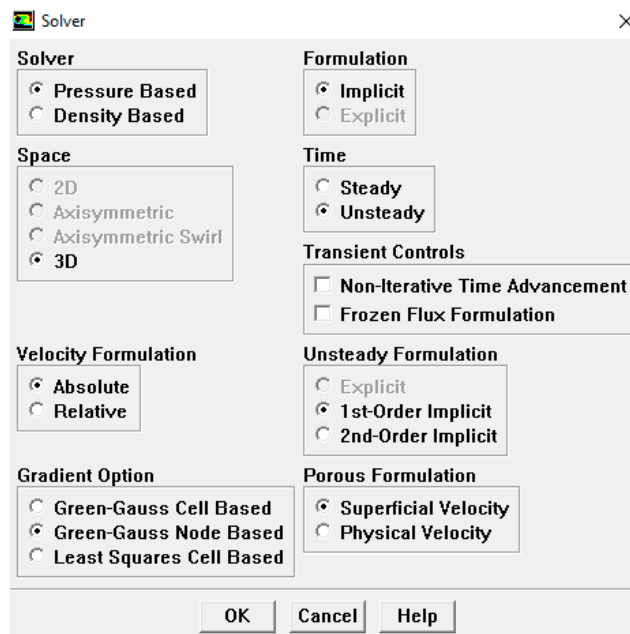


Figura 43. Ventana de selección del solver, Fluent.

Density-Based Solver

Resuelve simultáneamente las ecuaciones de momento, continuidad, energía y transporte de especies. En este solver, cada iteración realiza los siguientes pasos:

1. Actualizar las propiedades de los fluidos basándose en la solución actual.
2. Resolver la ecuación de momento, continuidad, energía y transporte de especies simultáneamente.
3. Cuando sea apropiado, resolver las ecuaciones para diferentes escalares, como cantidades de turbulencia, energía, intensidad radiactiva, etc, usando los valores de las variables resueltas.
4. Cuando deba incluirse el acople entre superficies de contacto, actualiza los términos fuente en las ecuaciones de fase adecuadas.
5. Verificar la convergencia de las ecuaciones.

En el TFG, el solver utilizado tanto para el Modelo 1 como para el Modelo 2, ha sido el “Pressure-Based Solver”, ya que el proceso de fusión y solidificación solo puede estudiarse en Fluent con este solver (como se explicará más adelante).

5.2. SISTEMA DE ECUACIONES

En este apartado, se plantean teóricamente las tres ecuaciones fundamentales de cualquier problema de fluidos.

- Ecuación de continuidad o de conservación de masa
- Ecuación de conservación de momento
- Ecuación de conservación de la energía

Si bien, la ecuación de la energía no siempre es necesario aplicarla

Ecuación de continuidad o de conservación de masa

La ecuación de continuidad, viene descrita por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = S_m \quad (12)$$

Esta ecuación es válida para flujos tanto compresibles como incompresibles. El término S_m es la masa añadida a la fase continua procedente de la fase dispersa secundaria (por ejemplo, debido a la vaporización de gotas de líquido). En el caso del TFG, este término es nulo, pues la fase secundaria (Modelo 2) no es dispersa.

Para geometrías 2D axisimétricas, la ecuación de continuidad viene dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \quad (13)$$

Ecuación de conservación de momento

La ecuación de conservación de momento en un sistema de referencia inercial (sin aceleración) es:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v}) + \nabla(\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla(\bar{\tau}) + \rho\vec{g} + \vec{F} \quad (10)$$
, donde p es la presión estática, $\bar{\tau}$ es el tensor de esfuerzos descrito en la ecuación 10, $\rho\vec{g}$ y \vec{F} son las fuerzas de volumen debidas a la acción de la gravedad y a las fuerzas externas de volumen, respectivamente. El tensor de esfuerzos viene se define como:

$$\bar{\tau} = \mu[(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T) - \frac{2}{3}\nabla\vec{v}I] \quad (11)$$
, donde μ es la viscosidad molecular, I es la matriz identidad, y el segundo término de la derecha es el efecto de la dilatación de volumen.

Para geometrías 2D axisimétricas, la ecuación de conservación de momento se rige por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_x) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial x}(r\rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v_x v_x) = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad (14)$$

Ecuación de conservación de la energía

La ecuación de conservación de la energía viene descrita por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(\vec{v}(\rho E + p)) = -\nabla(\sum_j h_j J_j) + S_h \quad (15)$$

5.3. MODELADO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

El principal fenómeno físico que tiene lugar en el TFG es la transferencia de calor. En este capítulo se detallarán las ecuaciones y el procedimiento para implementar este fenómeno en Fluent, basándose en las configuraciones que han sido necesarias para este TFG.

Cuando ANSYS Fluent modela la transferencia de calor, se deben habilitar los modelos físicos más relevantes (esto es ecuación de continuidad, de momento y energía), establecer las condiciones de contorno térmicas y las propiedades del material que gobierna la transferencia de calor. Fluent resuelve la ecuación de la energía de la siguiente manera:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(\vec{v}(\rho E + p)) = -\nabla(k_{eff}\nabla T - \sum_j h_j J_j + (\bar{\tau}_{eff}\vec{v})) + S_h \quad (16)$$
, donde la k_{eff} es la conductividad térmica efectiva, J_j es el flujo difusivo. Los tres términos de la derecha de la ecuación representan la transferencia de calor debida a la conducción y a la disipación viscosa. S_h incluye el calor por reacción química y otras fuentes de calor volumétricas que se hayan definido. $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$, donde h es la entalpía sensible definida por $\sum_j Y_j h_j$ (para flujo compresible), y por $\sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho}$. Y_j es la fracción

másica de las especies, y $h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT$. La T_{ref} para el solver basado en la presión es de 298,15 K.

En las regiones sólidas, ecuación de transporte de la energía es empleada por Fluent de la siguiente forma:

$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla(\vec{v}\rho h) = \nabla(k\nabla T) + S_h$ (17), donde ρ es la densidad, h la entalpía sensible $h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT$, k la conductividad térmica del sólido y S_h la fuente de calor volumétrica. El segundo término de la izquierda representa la transferencia de energía convectiva debida al movimiento traslacional y rotacional de los sólidos.

A continuación, se explica cómo modelar la transferencia de calor en Fluent. Comentar que los pasos que se van a detallar son solo para tener en cuenta la transferencia de calor en sí misma. Se deberá definir otros ajustes (otros modelos, condiciones de contorno...).

1. Activar la ecuación de la energía. Para ello *Define/Models/Energy*.
2. Solamente si se trabaja con el “Pressure-Based Solver”, y se quieren tener en cuenta los términos de calor por viscosidad se activa mediante *Define/Models/Viscous*.
3. Determinar las condiciones de contorno térmicas en la entrada y salida de flujos, paredes. Para ello *Define/Boundary Conditions*. Se dispone de diferentes condiciones de contorno térmicas. De todas ellas, normalmente se suelen utilizar “Momentum”, “Thermal” y “Multiphase”. En la Figura 44, se muestran todas las opciones.

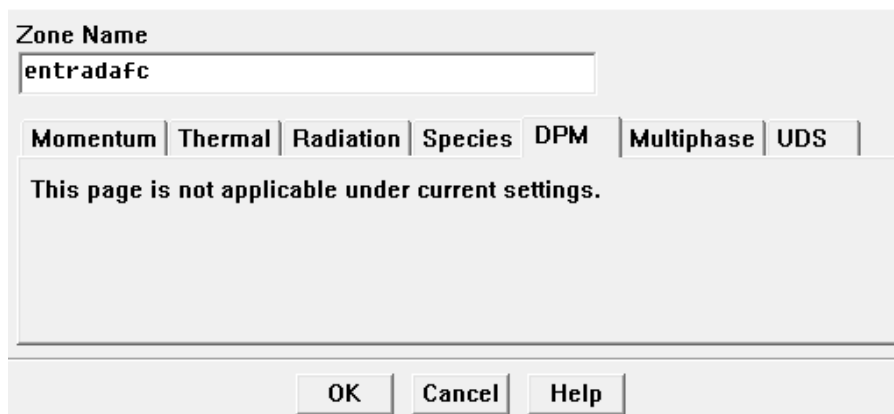


Figura 44. Condiciones de contorno térmicas, Fluent.

En las entradas y salidas de flujo se fijará la temperatura, mientras que en las paredes se puede indicar alguna de las siguientes: flujo de calor, temperatura, calor transferido por convección, radiación externa, combinación entre la radiación externa y la transferencia de calor externa.

4. Definir las propiedades del material referentes a la transferencia de calor.

5.4. FUSIÓN Y SOLIDIFICACIÓN

Como consecuencia de la transferencia de calor, tiene lugar la fusión y la solidificación del RT44HC. Por tanto, además de modelar en Fluent la transferencia de calor, es necesario modelar la fusión y solidificación. Las propiedades del material que funde y solidifica deben establecerse en función de la temperatura.

Fluent nos proporciona las siguientes posibilidades en cuanto a la fusión y la solidificación:

- Cálculo de la fracción de sólido-líquido en metales puros, así como en aleaciones binarias y otros materiales como los PCMs.
- Modelado de los procesos de fusión.
- Modelado de la resistencia térmica de contacto entre el material solidificado y las paredes (por ejemplo si existe la presencia de un hueco de aire).
- Modelado de especies de transporte con fusión y solidificación.
- Post procesado de cantidades relativas a la fusión y solidificación (principalmente la fracción sólido-líquido).

Todas estas posibilidades permiten simular un amplio rango de problemas relacionados con la fusión/solidificación, incluida la cristalización y la fusión continua en el tiempo. Sin embargo, para su correcta aplicación deben tenerse en cuenta una serie de limitaciones:

- Este modelo solo puede ser usado con el solver “Pressure-Based solver”.
- No se puede aplicar a flujos compresibles.
- Dentro de los modelos multifásicos, solo es compatible con el modelo VOF (Volume Of Fluid).
- No se pueden especificar de forma separada las propiedades de sólidos y líquidos en la superficie de contacto utilizada.

Para resolver el proceso de fusión y solidificación, Fluent utiliza una técnica de entalpía-porosidad. En esta técnica, se emplea una cantidad llamada fracción líquida, que indica la fracción del volumen de celda que está en forma líquida (asociada a cada celda del dominio). La fracción líquida se calcula para cada iteración, basándose en un balance entálpico. La entalpía del material se calcula como la suma de entalpías sensibles, h , y el calor latente ΔH .

$$H = h + \Delta H \quad (16), \text{ donde } h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (18),$$

siendo h_{ref} la entalpía de referencia, T_{ref} la temperatura de referenciay C_p calor específico a presión constante.

La fracción líquida (β), puede definirse como:

- $\beta = 0$ si $T < T_{solidus}$
- $\beta = 1$ si $T > T_{liquidus}$

$$\bullet \quad \beta = \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} \text{ si } T_{solidus} < T < T_{Solidus}$$

Definida la fracción líquida, ahora el calor latente contenido puede escribirse en función del calor latente del material, L:

$$\Delta H = \beta L \quad (19)$$

Este calor latente varía entre 0 (para un sólido) y L (para un líquido).

Se llama zona blanda (“mushy zone”) a la región en la cual la fracción líquida varía entre 0 y 1. Esta zona se modela como un medio poroso en la que la porosidad disminuye de 1 a 0 a medida que solidifica. Cuando el material ha solidificado totalmente en una celda, la porosidad se torna a 0 y provocando que la velocidad también decaiga a 0.

Para los problemas de fusión y solidificación, la ecuación de la energía se resuelve de la siguiente manera:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla(\rho \vec{v} H) = \nabla(k \nabla T) + S \quad (20), \text{ donde } H \text{ es la entalpia, } \rho \text{ la densidad, } \vec{v} \text{ la velocidad del fluido y } S \text{ el término fuente.}$$

La ecuación de momento, en función de la fracción líquida es:

$$S = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} \cdot A_{mush} (\vec{v} - \vec{v}_p) \quad (21), \text{ siendo } \beta \text{ la fracción líquida, } \varepsilon \text{ es número pequeño (0,0001) para evitar la división por cero, } A_{mush} \text{ es el área de la zona blanda y } \vec{v}_p \text{ es la velocidad del sólido debida al empuje del material solidificado fuera del dominio.}$$

Se explica, a continuación, el procedimiento para modelar en Fluent el proceso fusión/solidificación:

1. Activar el modelo “Solidification/Melting”. Para ello *Define/Models/Solidification&Melting*. Al activar este modelo, ya se habilita directamente la ecuación de la energía.
2. Determinar el valor “Mushy Zone Constant”. Por defecto aparece 100000, y en caso de no saber qué valor poner se puede dejar, ya que ese valor es válido para las simulaciones. El hecho de especificar el valor es para concretar más en cuanto a porosidad se refiere.
3. Activar o no las “pull velocity”, que son las velocidades de empuje del material. En este TFG no se han estudiado. En la Figura 44, se observa la ventana de opciones de este modelo.

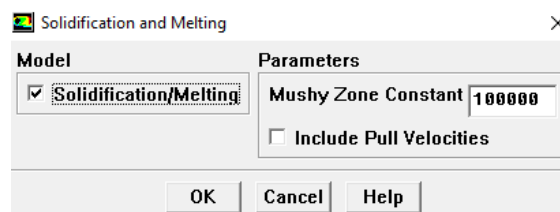


Figura 45. Ventana de opciones de Solidification/Melting, Fluent.

4. Para proceder a la resolución se deben establecer las condiciones de contorno de temperatura correspondientes.

5.5. FLUJOS MULTIFÁSICOS

Un gran número de flujos que se dan en la naturaleza son una mezcla de fases.

Según Fluent, una fase se define como una clase de material identificable que tiene una respuesta inercial particular al interaccionar con el flujo y el campo potencial en el que está inmerso. Por ejemplo, diferente tamaño de partículas sólidas del mismo material se pueden tratar como dos fases diferentes, ya que cada grupo de partículas del mismo tamaño tendrán una respuesta dinámica similar debida al campo fluido. Coloquialmente hablando, una fase es simplemente uno de los estados de la materia como puede ser un sólido, un líquido y un gas. En la Figura 46 se muestra cómo Fluent entiende las fases.

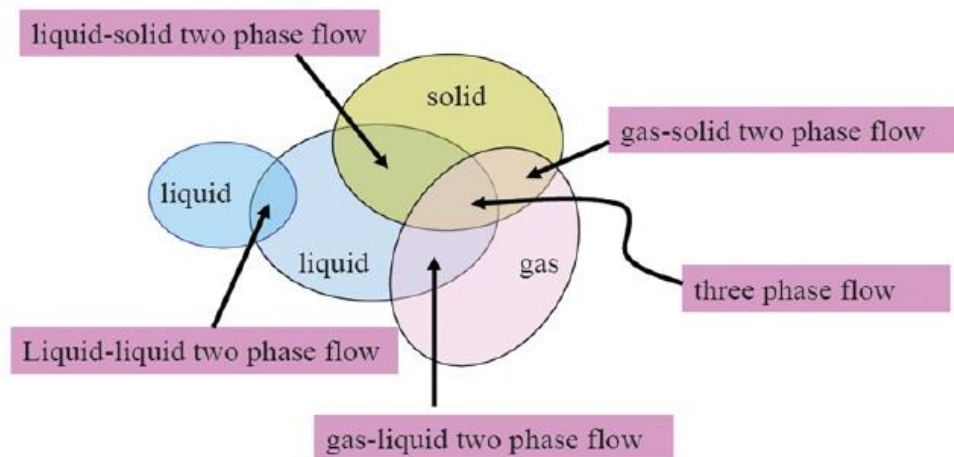


Figura 46. Consideración de las fases, Fluent.

Como se observa, tendremos un flujo de 2 fases si coexisten 2 fases, y 3 fases si coexisten 3.

Los regímenes de flujo multifásico se pueden agrupar en 4 categorías: gas-líquido o flujos líquido-líquido; flujos gas-sólido; flujos líquido-sólidos; y flujos de 3 fases. Se detallan en la tabla 8. Estos flujos multifásicos se pueden desglosar aún más:

Interacciones gas-gas, líquido-líquido, gas-líquido:

- Flujo con gotas
- Flujo con burbujas
- Flujo con bolsas de aire
- Flujo estratificado o con superficie libre

Interacción gas-sólido:

- Flujo con partículas en suspensión
- Lecho fluidificado

Interacción líquido-sólido:

- Flujo con arrastre de partículas.

Por otro lado, los flujos de 3 fases son combinaciones de otros regímenes de flujo, es decir, una combinación de gas-líquido-sólido o dos fases sólidas y una gaseosa, etc. Este tipo de flujos puede darse en una refinería de petróleo, en tecnología de separación química, etc. En la Figura 47 se representan los modelos de flujo multifásico.

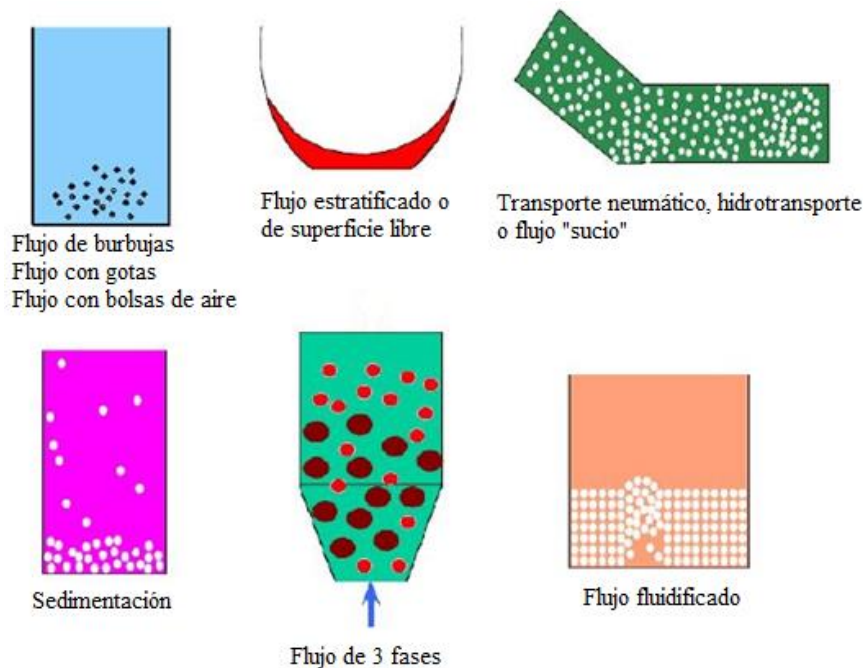


Figura 47. Modelos de flujos multifásicos, Fluent.

Fluent permite emplear diferentes modelos multifásicos, de entre los cuales habrá que decidir cuál se va a utilizar. Estos son:

- Volume of Fluid (VOF)
- Mixture
- Eulerian
- Wet Steam

Sin embargo, el único modelo multifásico que es compatible con el modelo Solidification&Melting de Fluent es el VOF. Por tanto, para la resolución del Modelo 2 se ha utilizado este modelo para el flujo multifásico. De esta manera se detallan las limitaciones del VOF y cómo modelarlo en Fluent (nos centramos en este modelo, ya que es el que se ha estudiado).

El modelo VOF es una técnica de evaluación superficial aplicada a una malla Euleriana, generalmente utilizada para computar soluciones temporalmente dependientes. Está diseñado para dos o más fluidos inmiscibles donde la superficie de contacto entre los fluidos es de interés, y utiliza un solo conjunto de ecuaciones de momento y evalúa la fracción de volumen de cada uno de los fluidos a lo largo de todo el dominio. El VOF es

apropiado para estratificaciones y flujos con superficie libre (caso el Modelo 2). En muchas aplicaciones multifásicas, el proceso puede variar tanto espacial como temporalmente. En esos casos, para que el modelo multifásico sea más preciso se requieren esquemas de discretización espacial y temporal de orden superior. Este segundo orden de esquema temporal está disponible en el “VOF Implicit Scheme”. El esquema temporal de segundo orden no se puede utilizar con el “VOF Explicit Scheme”.

Este modelo puede incluir, en caso de que proceda, la tensión superficial y la adhesión (dos tipos: “Wall Adhesion and Jump Adhesion”) a lo largo de la superficie de contacto entre ambas fases.

Según la página 866 del Tutorial Fluent: *“In general, you can specify the primary and secondary phases whichever way you prefer. It is a good idea to consider how your choice will affect the ease of problem setup, especially with more complicated problems”*.

Limitaciones del VOF:

- Solo se puede utilizar el “pressure-based solver”.
- Todos los volúmenes de control deben llenarse con una sola fase fluida o una combinación de fases. No permite regiones vacías donde no hay presente fluido de ningún tipo.
- Solo un de las fases se puede definir como gas compresible ideal (en el Modelo 2, el aire se comprime al aumentar su temperatura).
- Los flujos con aceleración tangencial (ya sea el flujo másico específico o la caída de presión específica).

Resolución

El primer paso para resolver un caso multifásico es determinar qué régimen de los descritos anteriormente describe mejor el flujo.

1. Asignar el número de fases.
2. Escoger “Explicit o Implicit Scheme”. La formulación explícita no es iterativa y depende del tiempo. Solo se puede utilizar con el “Transient solver” (régimen transitorio. La implícita es iterativa y se puede utilizar tanto para estacionario como para no estacionario, siendo recomendada para estacionario. El implícito permite utilizar mayores “time step” pero puede truncar a errores.
3. Si se tienen en cuenta las “body forces” (gravedad, fuerzas de tensión superficial), hay que habilitar la gravedad y especificar la aceleración gravitacional. Además, hay que habilitar la “Specified Operating Density” estableciéndole el valor de la fase más ligera (de menor densidad). También hay que activar “Implicit Body Force” al definir el modelo VOF. En consecuencia, para simular la convección natural, es necesario realizar este paso, ya que se necesita la gravedad.

4. Especificar cuál es la fase primaria y cuál es la secundaria. Según Fluent, se pueden especificar la fase primaria y secundaria de la manera en que se prefiera, pero es necesario considerar cómo afecta el orden al problema en estudio. En el caso del Modelo 2, se ha definido el aire como fase principal, y el PCM como fase secundaria, ya que es mejor así al comportarse el aire como gas ideal. Para ello *Define/Phases*.
5. Para el VOF hay que especificar el tipo de modelado de las superficies de contacto. Tenemos 3 opciones, según establece Fluent en la Figura 48.

Interface Modeling Type	Implicit Formulation	Explicit Formulation
Sharp	Compressive BGM (steady state only) Modified HRIC	Geo-Reconstruct CICSAM Compressive Modified HRIC
Sharp/Dispersed	Compressive Modified HRIC	
Dispersed	First Order Upwind Second Order Upwind QUICK	First Order Upwind QUICK

Figura 48. Opciones de Esquemas de Discretización Espacial, Fluent.

Hay que escoger los llamados esquemas de discretización espacial para la fracción de volumen. Hay 3 tipos: **Sharp** cuando existe una superficie de contacto diferente entre las fases. **Dispersed** cuando las fases están compenetradas (están interactuando). **Sharp/Dispersed** es un híbrido entre las dos anteriores para flujos que cuentan con superficies de contacto de ambos tipos.

Si se utiliza el modelo tipo **Sharp** se puede habilitar opcionalmente el tratamiento de anti difusión de las superficies de contacto. Este tratamiento se aplica a las celdas de las superficies de contacto y procura suprimir la difusión numérica que puede surgir de los esquemas de advección de la fracción de volumen. Activar ese tratamiento puede tener consecuencias adversas para la convergencia, pero aún así debería utilizarse en casos en los que la malla sea muy gruesa o exista una excesiva difusión numérica.

Dentro de cada esquema de discretización espacial para la fracción de volumen, hay que escoger entre estos:

Geo-Reconstruct: esquema de rastreo de las superficies de contacto basado en la información geométrica. Es el esquema más preciso, pero más costoso computacionalmente. Es el indicado para mallas de baja calidad. ¡Si se utiliza este esquema hay que asegurarse de que no haya “zero-thickness walls” (paredes de espesor nulo) dentro del dominio! Este ha sido el que se ha empleado en el TFG.

CICSAM, Compressive y Modified HRIC: esquemas de captura de superficies de contacto basados en la información algebraica.

6. En cuanto a la inclusión de la transferencia de masa, se puede modelar de una de estas tres maneras: 1. Transferencia unidireccional constante de flujo másico (No aplicable en el modelo VOF). 2. UDF. 3. Transferencia de masa en cavitación, evaporación-condensación, ebullición, o especies generalizadas de transferencia de masa (solo son aplicables en el modelo Mixture y en el Eulerian). Para incluirla hay que utilizar la opción “Phase Interaction”

Type	Primary Phase	Secondary Phase	Mixture
exhaust fan; inlet vent; intake fan; outlet vent; pressure inlet; pressure outlet; velocity inlet	nothing	volume fraction	all others
mass flow inlet	mass flow/flux	mass flow/flux	all others
axis; fan; outflow; periodic; porous jump; radiator; solid; symmetry; wall	nothing	nothing	all others
pressure far-field	not available	not available	not available
fluid	mass source; other porous inputs	mass source; other porous inputs	porous zone; porosity; all others

Figura 49. Condiciones de contorno para las fases, Fluent.

7. Para las condiciones de contorno, en el caso del VOF hay que definir las que se indican en la Figura 49.
8. Si al mismo tiempo se simula la fusión y solidificación, para las fases que ni se funden ni se solidifican se debe establecer el calor latente, la temperatura de liquidus y la temperatura de solidus a cero.

5.6. CONVECCIÓN NATURAL

En el capítulo 3, se definió la convección natural como aquella que se produce en el seno del fluido, originado por las fuerzas de empuje debidas a la acción gravitatoria y a la dilatación del fluido, como consecuencia del calentamiento de las capas de este. En ese caso, cuando se añade calor a un fluido aumenta su temperatura, produciéndose una variación en su densidad (disminuye), se puede inducir un flujo (convección natural) debido a la fuerza de la gravedad actuando sobre esa variación de volumen.

Para modelar en Fluent la convección natural se deben seguir estos pasos:

1. Habilitar la gravedad. *Define/Operating conditions*.
2. Establecer ese valor en unas coordenadas de referencia x, y, z.
3. Si se utiliza la Ley de gas ideal incompresible, hay que establecer un valor distinto de cero para la “Operating Pressure”. Al fijar la presión de operación, hay que indicar un punto del modelo en el que se tiene dicha presión. En este TFG se ha especificado un punto en el volumen de aire.

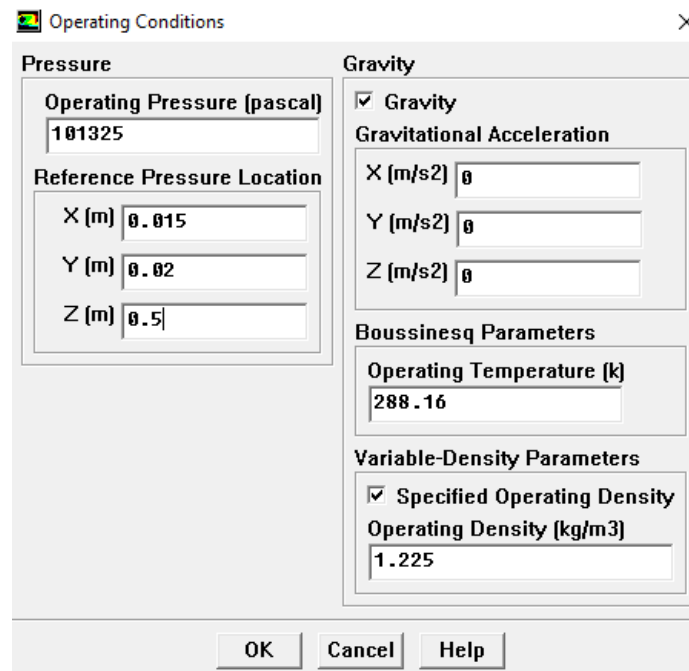


Figura 50. Ventana "Operating Conditions", Fluent.

5.7. ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DE MALLA

La influencia del número de celdas de la malla sobre la solución del problema depende del llamado número de Courant. La condición de Courant establece que *"el dominio de dependencia de un punto en un esquema en diferencias explícitas (que está formado por los puntos del espacio que intervienen en el esquema) debe comprender al dominio de dependencia para la ecuación diferencial"*. En definitiva, según la teoría de mallas, para que la malla sea adecuada el número de Courant debe ser inferior a 1.

En Fluent, el número de Courant es establecido por defecto como 0,25, por lo que si se deja ese valor no habrá ningún problema en cuanto al procesado de la malla.

En este TFG se ha realizado un estudio sobre el tamaño de la malla y su influencia sobre los resultados, lo que se conoce como estudio sensibilidad de malla. Según la citada teoría de mallas, existe un número de celdas a partir del cual por más celdas que se añadan a la malla no habrá ninguna variación en los resultados. Importantísimo tener en cuenta que este número será diferente para cada modelo. También hay que tener en cuenta que cuanto menor sea el número de celdas que posea la malla, más rápido va a ser el proceso de simulación.

En acorde a lo expuesto, se ha realizado el estudio para el Modelo 2, ya que es más rápido de estudiar. Primero se ha realizado un mallado más preciso, con mayor número de nodos en las aristas y por ende, un mayor número de celdas. Después, se abre en Fluent y se simula (se ha hecho con la temperatura estática en el PCM) y se comprueba si converge y si los resultados son coherentes. La Figura 51 muestra la malla de mayor número de celdas del Modelo 2.

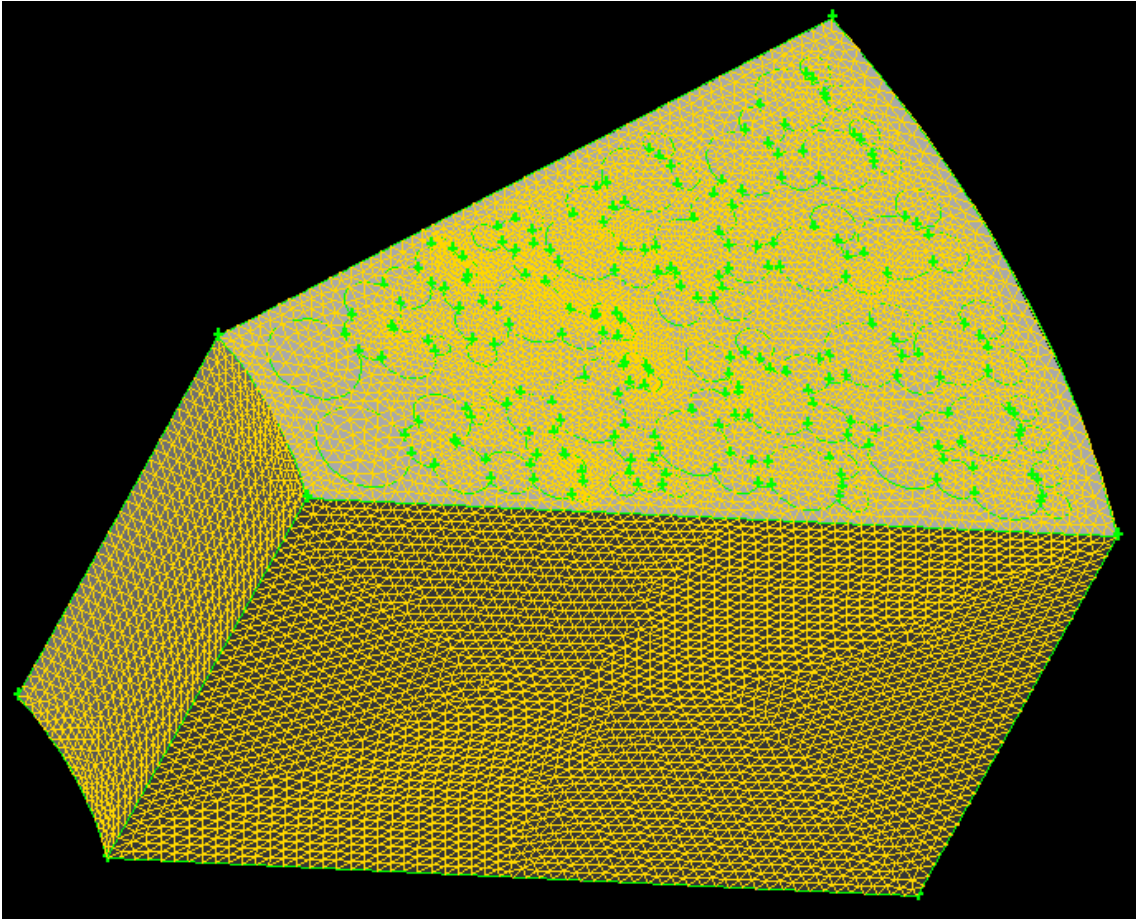


Figura 51. Malla de mayor número de celdas en Modelo 2, Gambit.

En Fluent, mediante *Grid/Info/Size*, obtenemos el tamaño de la malla que es:

Grid Size

Level	Cells	Faces	Nodes	Partitions
0	464482	1011791	117568	1

5 cell zones, 24 face zones.

Con las 464482 celdas el problema converge y la temperatura estática en el PCM aumenta progresivamente, como debe hacer.

Se realiza ahora el mismo proceso, pero con una malla de menor número de celdas para ver si tiene influencia sobre el resultado (Figura 52).

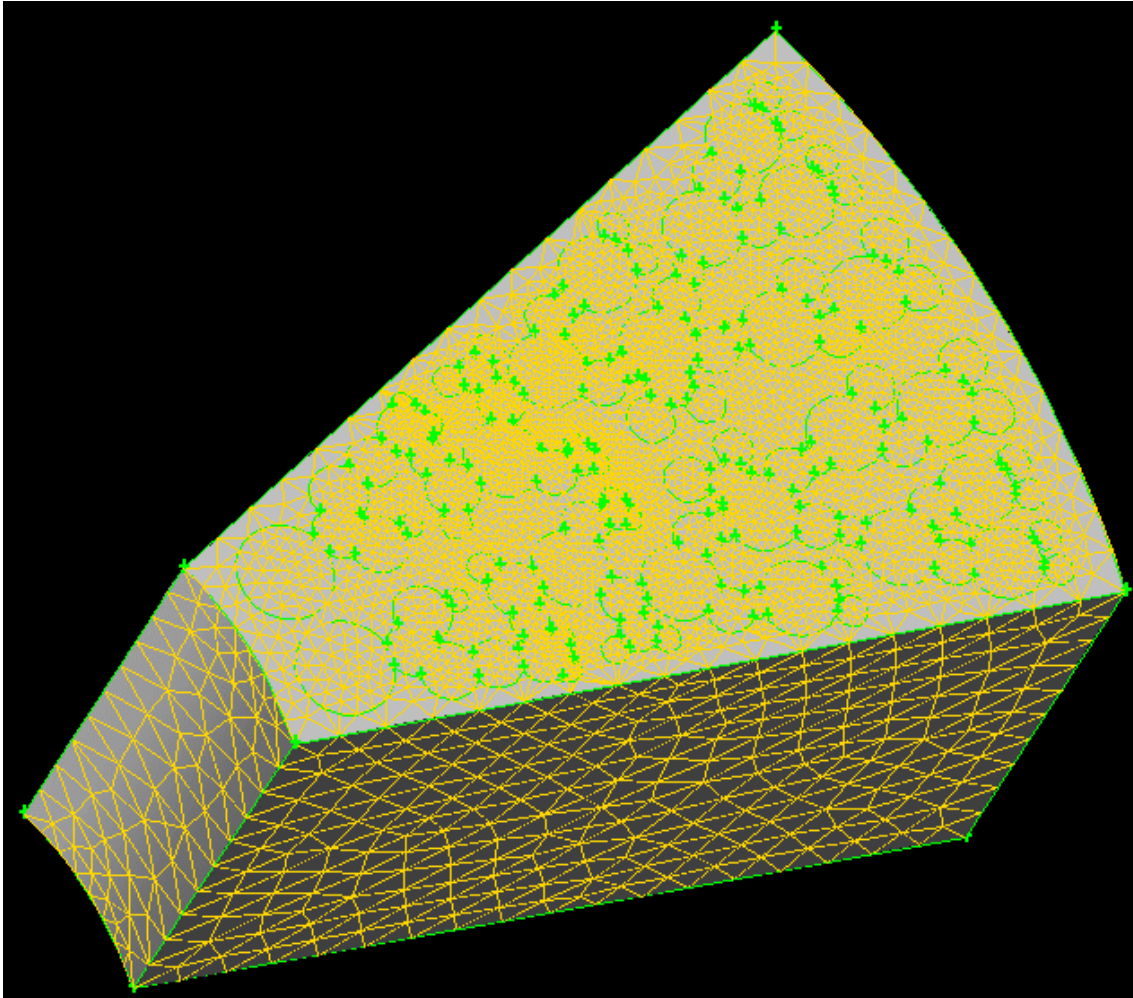


Figura 52. Malla con menor número de celdas en Modelo 2, Gambit.

En Fluent obtenemos:

```

Grid Size
Level   Cells   Faces   Nodes   Partitions
  0     289071  609114  64961   1

5 cell zones, 24 face zones.

```

Al simular, se obtiene el mismo resultado que con la malla anterior, la temperatura estática del PCM aumenta progresivamente y con los mismos valores, por lo que se determina que en este caso la solución es la misma tanto con 464482 celdas que con 289071. Para encontrar el número mínimo a partir del cual la solución no varía habría que seguir disminuyendo el número de celdas, ir simulando y comparar los resultados. Dado la laboriosidad de este proceso, se ha realizado el estudio del modelo 2 con esta última malla, ya que no varía la solución y al tener menos celdas su simulación es más rápida.

Para el Modelo 2, el número de Courant depende, en simulaciones transitorias, del Time Step Size (TSS), que a su vez influye en el proceso de convergencia. Por este motivo,

durante las simulaciones, el TSS inicial se ha fijado inicialmente en 0,01 s y durante un número determinado de Time Steps iniciales se fijan 50 iteraciones por Time Step. Conforme el proceso de resolución converge se puede aumentar el TSS (llegano hasta 0,5 s) y reducir el número de iteraciones hasta 30, ya que durante el TSS pequeño el problema ha convergido.

En cuanto al Modelo 1, no se ha realizado este estudio debido a su complejidad. Directamente se ha utilizado un número de Courant de 0,25.

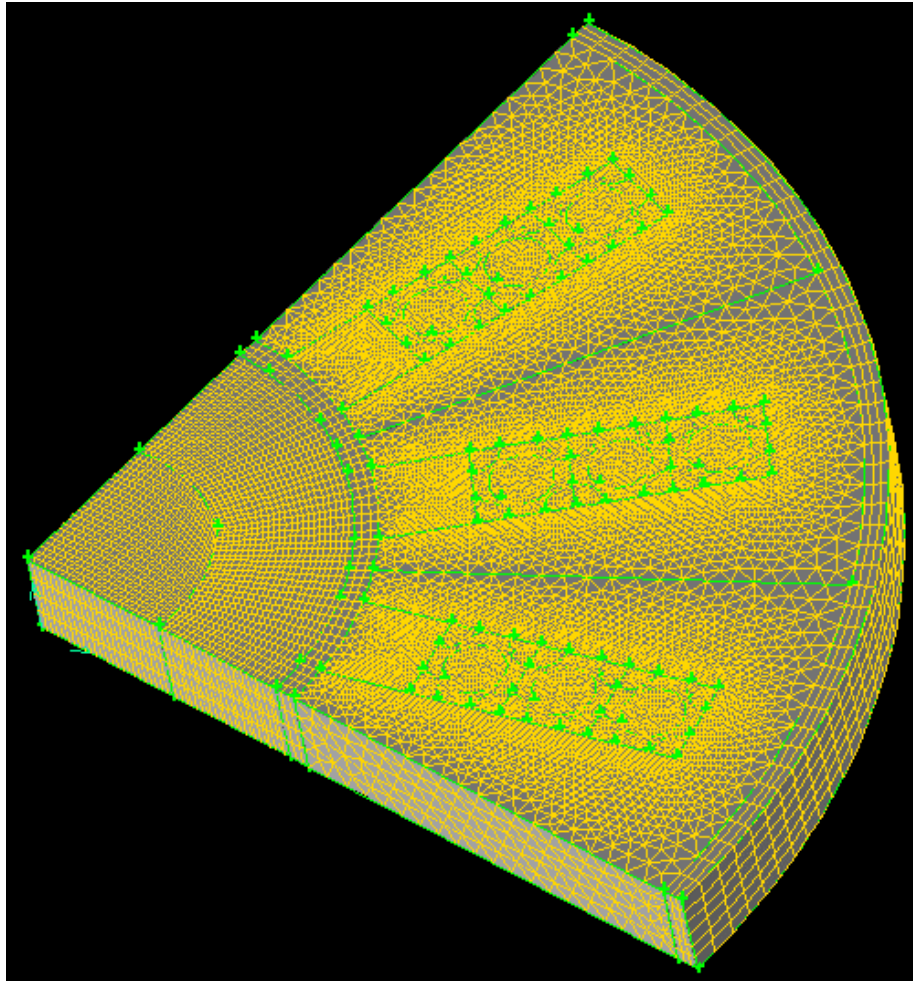


Figura 53. Malla utilizada en Modelo 1, Gambit.

En Fluent obtenemos el número de celdas:

Level	Cells	Faces	Nodes	Partitions
0	298989	634294	70731	1

5 cell zones, 32 face zones.

Al simular, convergen todas las ecuaciones, y los resultados obtenidos son coherentes. Además al seleccionar un número de Courant de 0,25, se ha asegurado una correcta resolución por parte de Fluent.

5.8. SIMULACIÓN DE LOS MODELOS ESTUDIADOS

Este apartado se centra en mostrar el procedimiento que se ha seguido y las condiciones establecidas para la simulación de los dos modelos estudiados.

5.8.1. MODELO 1: ESPUMA METÁLICA FCC

En primer lugar se abre en Fluent el modelo y su malla procedentes de Gambit:

File/Read/Case

Al leerla, Fluent asignará una serie de zonas en función del modelo. En este caso, las zonas creadas son las siguientes:

```
zones,
  default-interior:031
  default-interior:030
  default-interior:029
  default-interior:028
  simetrico:027
  simetrico:026
  simetrico:025
  tubext:024
  tapainfer:022
  tapasup:001
  default-interior
  tubsup
  tubinf
  simetrico
  tubint
  tubext
  carcsup
  carcinf
  carcinter
  carcext
  tapainfer
  tapasup
  espmetal
  entradafc
  salidafc
  wall
  tubext:024-shadow
  wall-shadow
  espmetal-shadow
  carcinter-shadow
  tubext-shadow
  tubint-shadow
  vol.tubo
  vol.carcasa
  volfc
  volespmetal
  pcm
shell conduction zones,
  creating conduction zones for wall 7

  creating conduction zones for wall 10
```

Las zonas a las que asigna el nombre de “default-interior” son aquellas que están en contacto con fluido. Una vez tenemos el modelo leído sin errores, el primer paso es establecer las unidades en las que se ha realizado la malla. En este caso ha sido en milímetros: *Grid/Scale*, y se abre la siguiente ventana donde se selecciona mm:

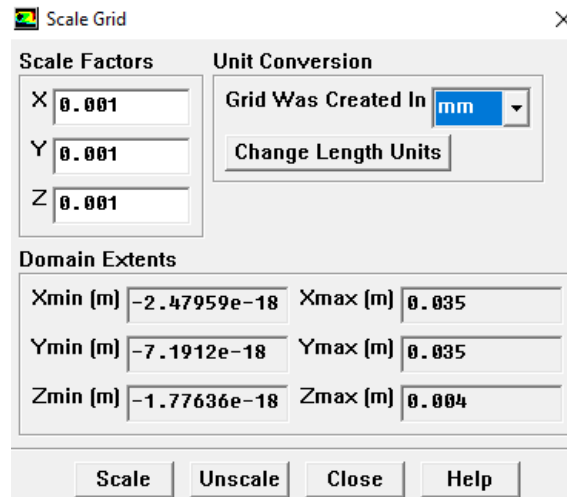


Figura 54. Ventana "Scale Grid", Fluent.

Impuestas las unidades correctas el siguiente paso consiste en visualizar esa zonas que ha creado para comprobar que el modelo es correcto: *Display/Grid*, y se seleccionan la zona o zonas que se quieran visualizar. Después, hay que definir las propiedades de los materiales. Los materiales que intervienen en este modelo son el PCM RT44HC, agua y aluminio. En el capítulo 3 se han definido las propiedades del RT44HC. Las Figuras 55, 56 y 57 muestran las propiedades de los materiales del Modelo 1.

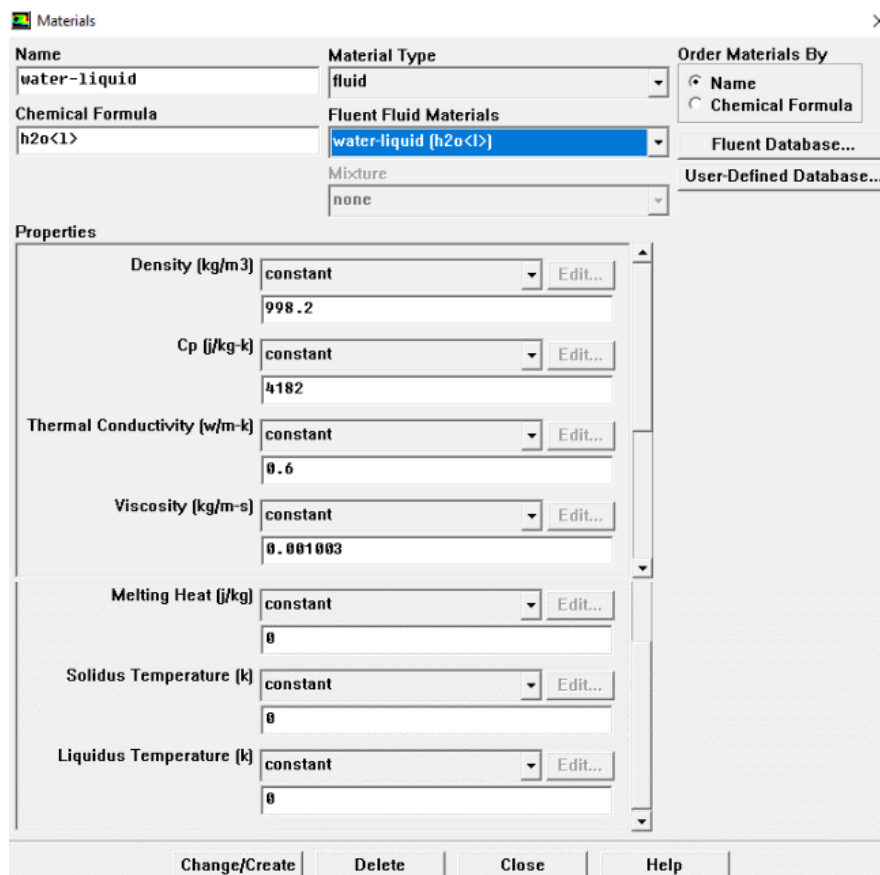


Figura 55. Propiedades del agua líquida, Fluent.

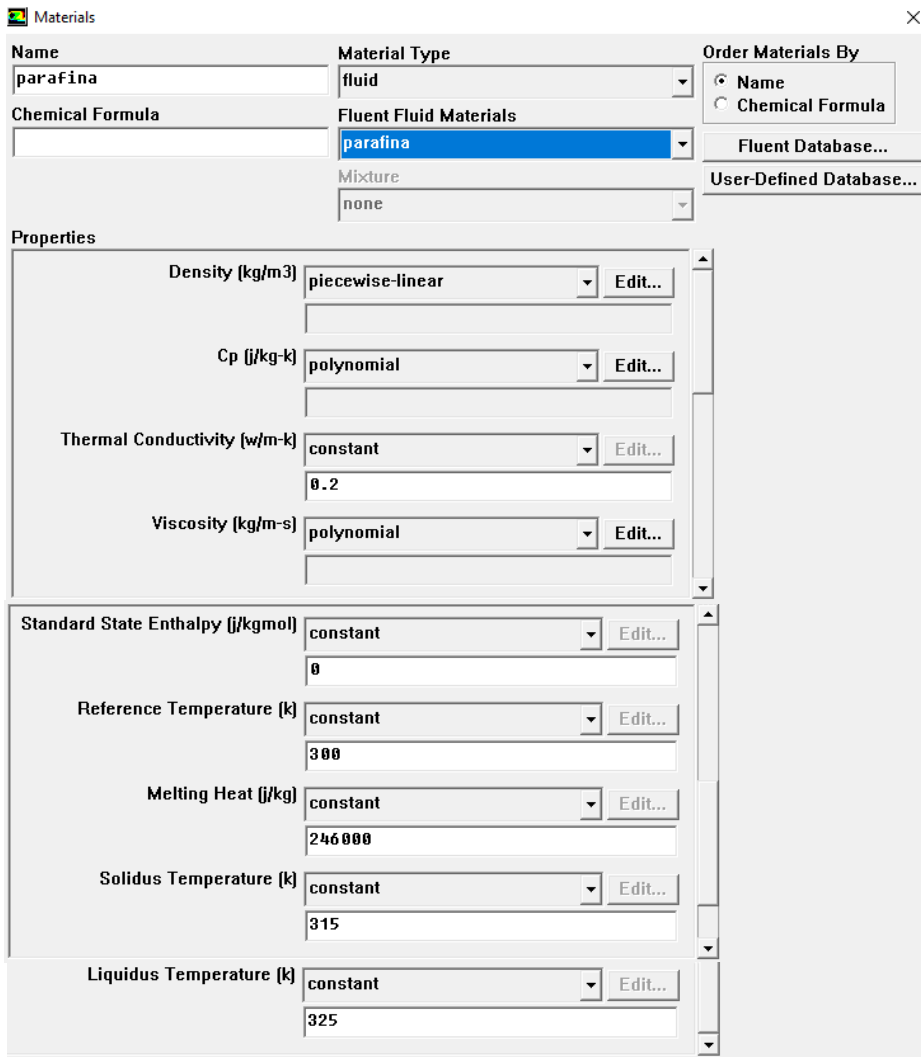


Figura 56. Propiedades del RT44HC, Fluent.

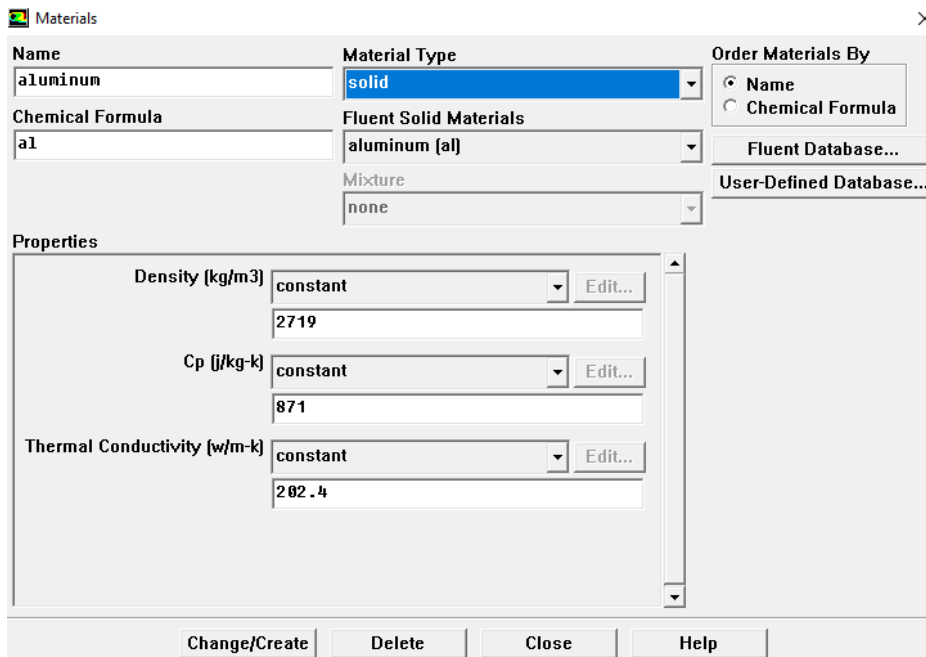


Figura 57. Propiedades del aluminio, Fluent.

Las propiedades del agua líquida y el aluminio son directamente el valor de sus propiedades. Sin embargo, para el PCM las propiedades se han definido en función de la temperatura, ya que es requisito para simular un proceso de fusión y solidificación.

Seguidamente, hay que establecer los modelos necesarios para la resolución de este modelo. En este caso no se precisa de modelos multifásicos, pues no coexisten dos fases, simplemente el PCM embebido en la matriz metálica. Entre el PCM y la espuma metálica se produce transferencia de calor, por lo que es necesario modelar la transferencia de calor. Además, el PCM funde por lo que también se necesita activar el modelo “Solidification&Melting”. Para ello:

Define/Models/Solidification&Melting. Así se activa el modelo “Solidification&Melting”, y en consecuencia, se activa automáticamente la ecuación de la energía.

Hecho esto, se establecen las condiciones de contorno necesarias. De las zonas “default-interior”, salidas de flujo (“outflow”) simetrías no hay que definir nada. De los volúmenes solo hay que indicar el fluido o sólido que contiene. Respecto a las demás condiciones de contorno se han establecido las siguientes:

- Las cuatro caras que forman la carcasa se han considerado adiabáticas (Heat flux = 0 W/m²).

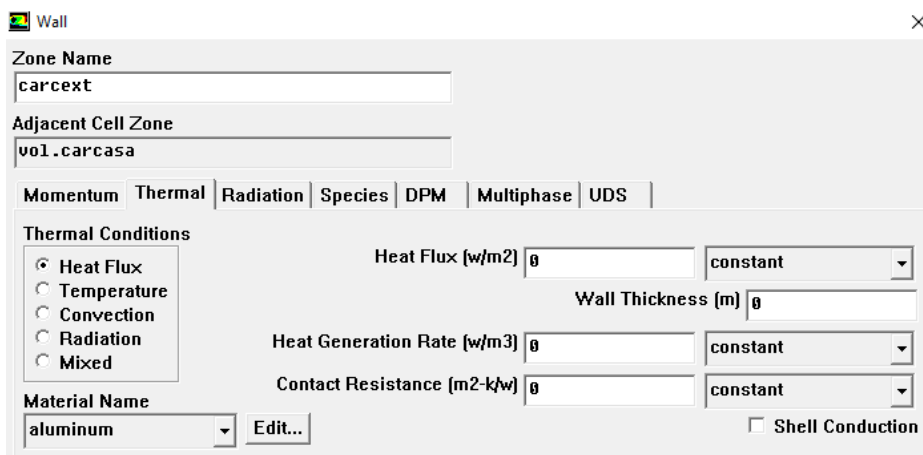
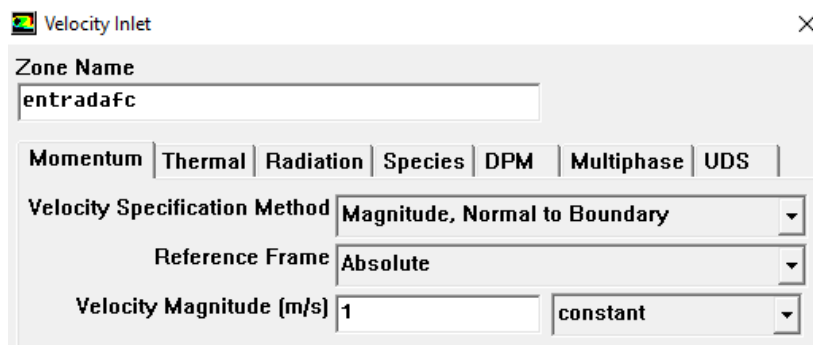


Figura 58. Condición contorno carcasa en Modelo 1, Fluent.

- La entrada del fluido caloportador es a una velocidad de 1 m/s a una temperatura constante de 360 K.



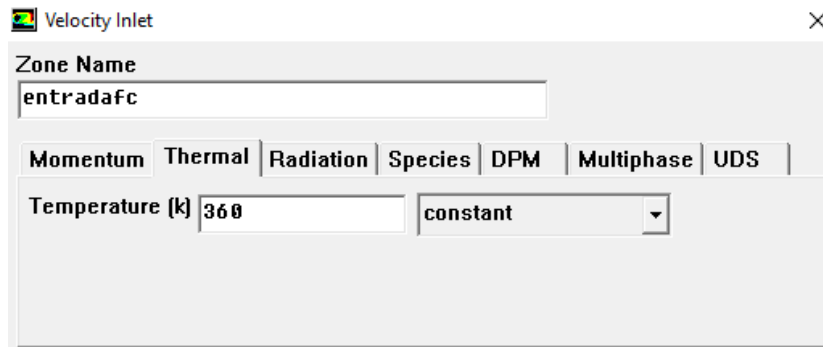


Figura 59. Condición de contorno fluido caloportador en Modelo 1, Fluent.

- A la zona de Espuma metálica se le ha establecido la condición de temperatura “coupled” que quiere decir que su temperatura se acopla al fenómeno físico que esté sufriendo. Al recibir calor su temperatura irá aumentando. Se debe seleccionar la opción “Shell conduction” que es la conducción en dirección planar, ya que la espuma metálica transfiere calor al PCM en dirección radial y planar. Para que no de error hay que asignarle un espesor a una pared virtual que crea Fluent alrededor de la espuma.

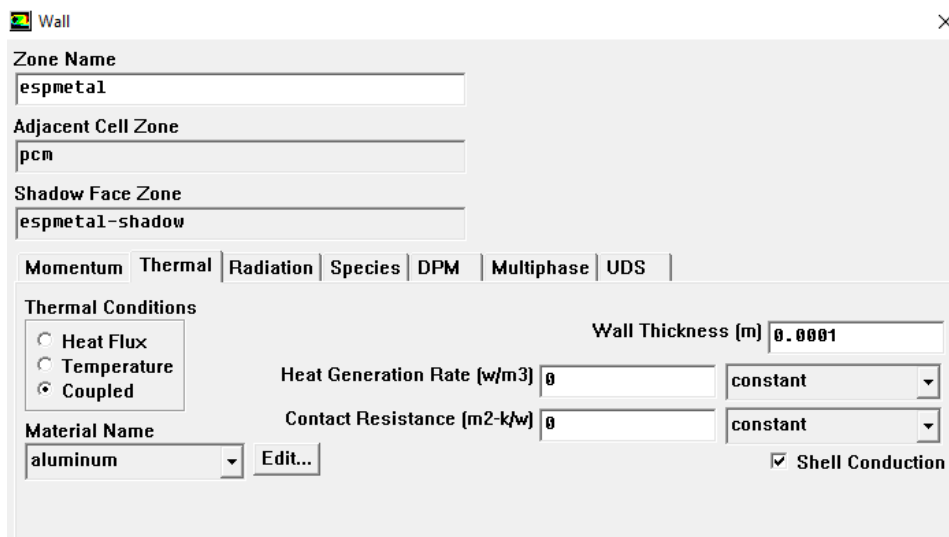


Figura 60. Condición de contorno espuma metálica en Modelo 1, Fluent.

- A la zona del PCM se le establece la misma condición que a la espuma metálica (véase Figura 60). Este también transmite el calor en dirección planar (a la pared interior de la carcasa durante la fusión, y a la espuma metálica durante la solidificación).
- A las tapas (parte superior e inferior del modelo), se les ha considerado adiabáticas al igual que la carcasa (véase Figura 58).

Para proceder a su solución, el solver que se ha utilizado es el “pressure-based solver”, y se marca la opción “unsteady”, pues es un problema transitorio (Figura 61).

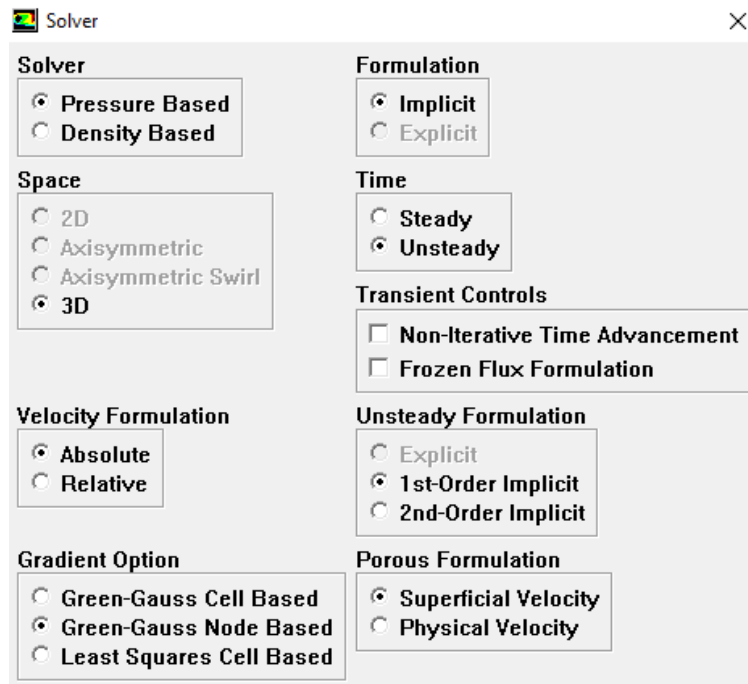


Figura 61. Solver utilizado en Modelo 1, Fluent.

Las opciones de solución definidas son de primer orden:

Solve/Controls/Solution

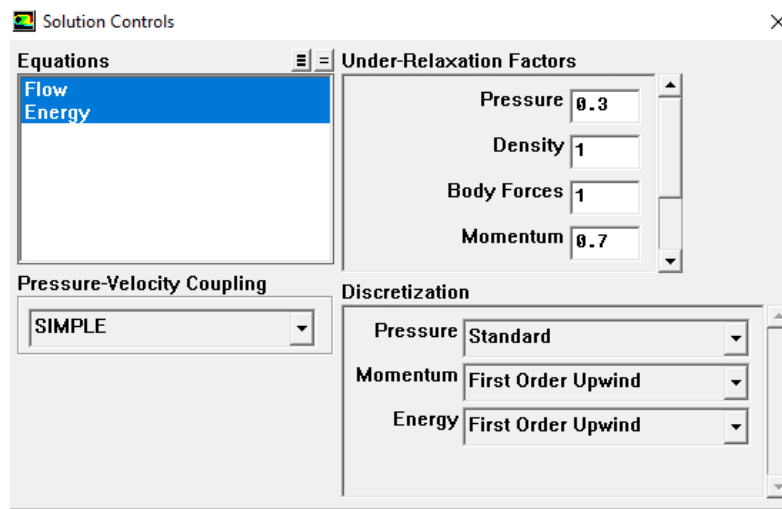


Figura 62. Controles de resolución utilizados en Modelo 1, Fluent.

Previamente a comenzar el proceso iterativo de resolución, se debe inicializar el problema, esto es, establecer unas condiciones iniciales. Para ello: *Solve/Initialize/Initialize*. En este caso, se ha establecido que la temperatura de todas las zonas es de 300 K (véase Figura 62). La temperatura del fluido entra a temperatura constante de 360 K, aunque se hayan inicializado todas las zonas a 300 K, ya que prima la condición de contorno.

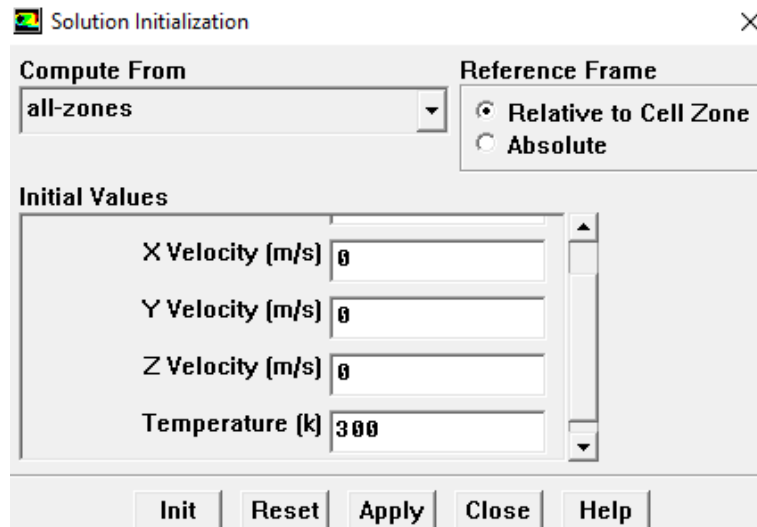


Figura 63. Condiciones iniciales en Modelo 1, Fluent.

Finalmente, al tratarse de un problema transitorio no se determinan un número de iteraciones, sino de pasos de tiempo (“Time Step”). Para comenzar el cálculo: *Solve/Iterate*.

Los parámetros establecidos son los que se muestran en la Figura 63.

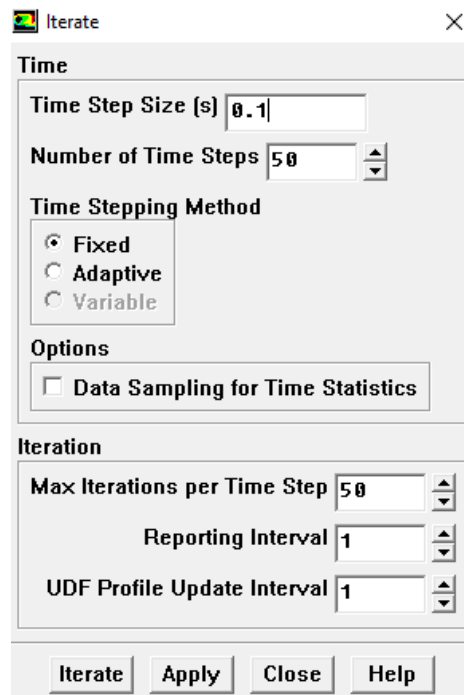


Figura 64. Parámetros de iteración en Modelo 1, Fluent.

Indica que el paso de tiempo es de 0,1 segundos (Time Step Size), y se van a realizar 50 pasos temporales (Number of Time Steps). En cada uno de los pasos se realizan 50 iteraciones (Max Iterations per Time Step). A medida que avance la simulación se aumentará el Time Step.

5.8.2. MODELO 2: LÓBULOS

En este modelo, además del modelo de Solidification&Melting, necesitamos activar el modelo multifásico VOF, pues tenemos dos fases coexistiendo (aire y PCM). El procedimiento para su simulación ha sido el siguiente:

1. Abir el archivo .msh en Fluent: *File/Read/Case*.

Al leerla, Fluent ha asignado las siguientes zonas:

```
zones,
  default-interior:025
  default-interior:024
  default-interior:023
  default-interior:022
  default-interior:021
  default-interior:020
  tapa_sup:019
  tapa_sup:018
  tapa_inf:017
  tapa_inf:016
  esp_metal:015
  esp_metal:013
  esp_metal:001
  default-interior
  pared_hot
  pared_ext
  bordes
  tapa_sup
  tapa_inf
  esp_metal
  espuma
  pcm1
  aire1
  pcm2
  aire2
  creating esp_metal:015-shadow
  creating esp_metal:013-shadow
  creating esp_metal:001-shadow
  creating esp_metal-shadow
shell conduction zones,
```

2. *Grid/Scale*, para poner las unidades de la malla en milímetros (ver Figura 54).
3. *Display/Grid*, para visualizar las zonas asignadas por Fuent y comprobar que el modelo es correcto.
4. Establecer las propiedades de los materiales. En el caso del PCM, al ser este también RT44HC, las propiedades son las mismas asignadas para el Modelo 1 (Figura 56). Para el aluminio también se usan las mismas propiedades (Figura 57). Para el aire, se ha considerado gas ideal, con el fin de obtener una mejor aproximación. Sus propiedades se presentan en la Figura 65.

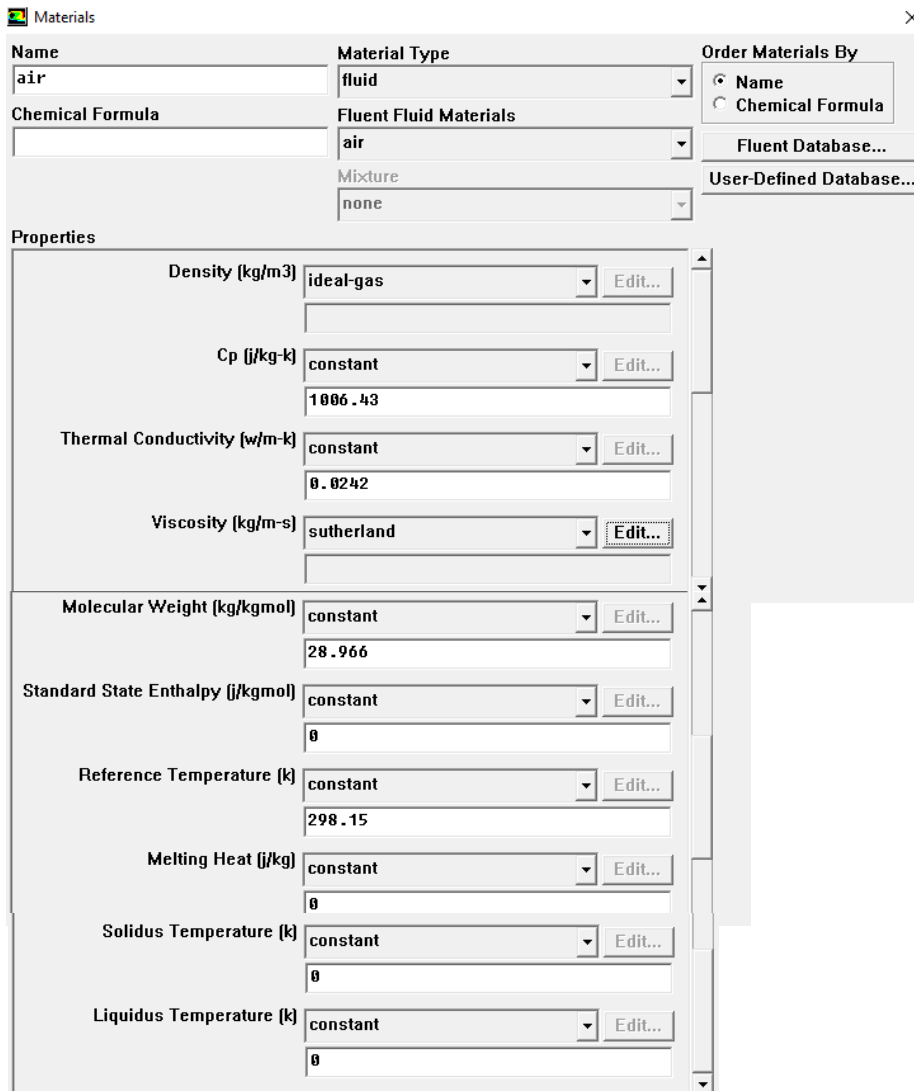


Figura 65. Propiedades del aire en Modelo 2, Fluent.

5. Definir las “Operating condition”. Como se va a simular la convección natural, se debe activar la gravedad, y densidad de operación se establece la menor de los materiales que intervienen, en este caso aire (1,225 kg/m³). Véase Figura 66.
6. Activar el modelo Solidification&Melting.
7. Activar el modelo multifásico VOF, pues es el único compatible con el modelo anterior. Se tienen 2 fases: Aire y PCM (Figura 67).

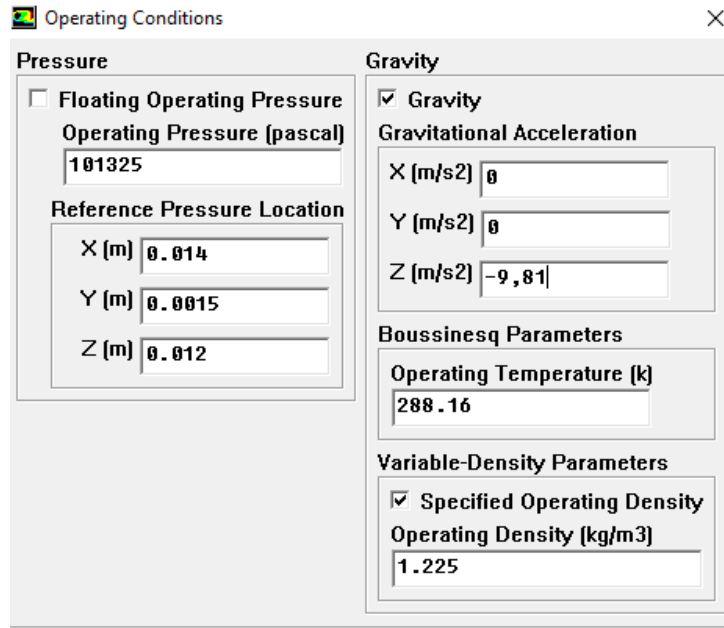


Figura 66. "Operating conditions" en Modelo 2,

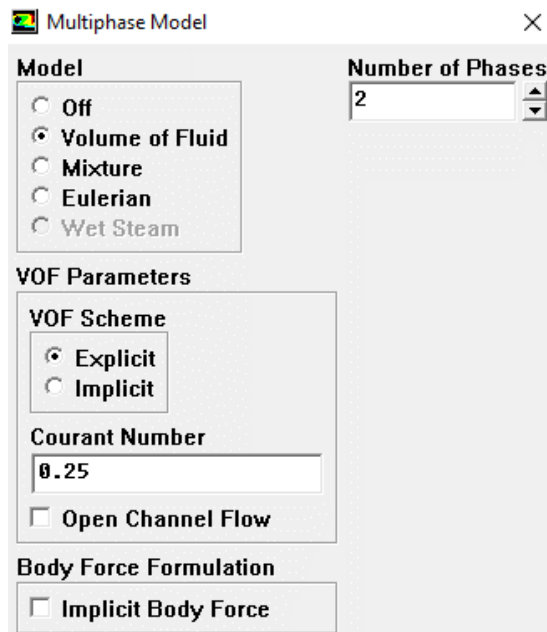


Figura 67. Activación VOF en Modelo 2, Fluent.

8. Establecer cuál es la fase primaria y cuál la secundaria. Como se ha considerado el aire como gas ideal, se define el aire como fase primaria, y el PCM como secundaria.
9. Al activar el VOF se crean más zonas, por lo que se han renombrado para facilitar su identificación. Estas son todas las zonas renombradas:

```

zones,
  aire2 (aire)
  pcm2 (aire)
  aire1 (aire)
  pcm1 (aire)
  espuma (aire)
  pared-esp_metal-pcm2-shadow (aire)
  pared-esp_metal-pcm1-shadow (aire)
  pared-esp_metal-aire1-shadow (aire)
  pared-esp_metal-aire2-shadow (aire)
  pared-esp_metal-pcm2 (aire)
  tapa_inf (aire)
  tapa_sup (aire)
  bordes (aire)
  pared_ext (aire)
  pared_hot (aire)
  default-interior (aire)
  pared-esp_metal-pcm1 (aire)
  pared-esp_metal-aire1 (aire)
  pared-esp_metal-aire2 (aire)
  tapa_inf-pcm2 (aire)
  tapa_inf-pcm1 (aire)
  tapa_sup-pcm1 (aire)
  tapa_sup-pcm2 (aire)
  default-interior:020 (aire)
  default-interior:021 (aire)
  default-interior:022 (aire)
  default-interior:023 (aire)
  default-interior:024 (aire)
  default-interior:025 (aire)
  aire2 (parafina)
  pcm2 (parafina)
  aire1 (parafina)
  pcm1 (parafina)
  espuma (parafina)
  pared-esp_metal-pcm2-shadow (parafina)
  pared-esp_metal-pcm1-shadow (parafina)
  pared-esp_metal-aire1-shadow (parafina)
  pared-esp_metal-aire2-shadow (parafina)
  pared-esp_metal-pcm2 (parafina)
  tapa_inf (parafina)
  tapa_sup (parafina)
  bordes (parafina)
  pared_ext (parafina)
  pared_hot (parafina)
  default-interior (parafina)
  pared-esp_metal-pcm1 (parafina)
  pared-esp_metal-aire1 (parafina)
  pared-esp_metal-aire2 (parafina)
  tapa_inf-pcm2 (parafina)
  tapa_inf-pcm1 (parafina)
  tapa_sup-pcm1 (parafina)
  tapa_sup-pcm2 (parafina)
  default-interior:020 (parafina)
  default-interior:021 (parafina)
  default-interior:022 (parafina)
  default-interior:023 (parafina)
  default-interior:024 (parafina)
  default-interior:025 (parafina)
  vol-espuma-metalica
  pcm2.1
  aire2.1
  pcm1.1
  aire1.1
  interface-aire2-pcm2

```

```

tapa_sup-pcm2
tapa_sup-pcm1
tapa_inf-pcm1
tapa_inf-pcm2
pared-esp_metal-aire2
pared-esp_metal-aire1
pared-esp_metal-pcm1
interface-aire1-pcm1
pared_hot
pared_ext
bordes
tapa_sup
tapa_inf
pared-esp_metal-pcm2
pared-esp_metal-aire2-shadow
pared-esp_metal-aire1-shadow
pared-esp_metal-pcm1-shadow
pared-esp_metal-pcm2-shadow
espuma
pcm1
aire1
pcm2
aire2
shell conduction zones,

```

10. Establecer las condiciones de contorno. Como no se posee ninguna entrada o salida de fluido, ni ninguna de las otras contenidas en la Figura 49, solo hay que definir las condiciones de contorno para la mezcla “mixture”. Las paredes de espuma metálica que embeben al PCM se les ha establecido la condición térmica “coupled” y se ha activado la conducción planar “Shell conduction”. Se ha realizado igual que como se presenta la Figura 60 del Modelo 1. La pared interna de la carcasa se ha establecido un flujo de calor de 0 W/m^2 (igual que Figura 58). La pared exterior del tubo, que es la que inicia la transmisión de calor, se le ha establecido una temperatura constante de 360 K (igual que el fluido caloportador del Modelo 1, Figura 59). Por último, las tapas se han considerado adiabáticas (flujo de calor nulo).
11. Establecer las condiciones del solver (igual que Modelo 1, Figura 61).
12. Establecer los controles de resolución. En este modelo, tenemos una ecuación más, que es la de “Volume Fraction” (véase Figura 68). Como esquemas de discretización se ha utilizado “First Order Upwind”, y para la ecuación de la fracción de volumen “Geo-reconstruct” ya que es más preciso.

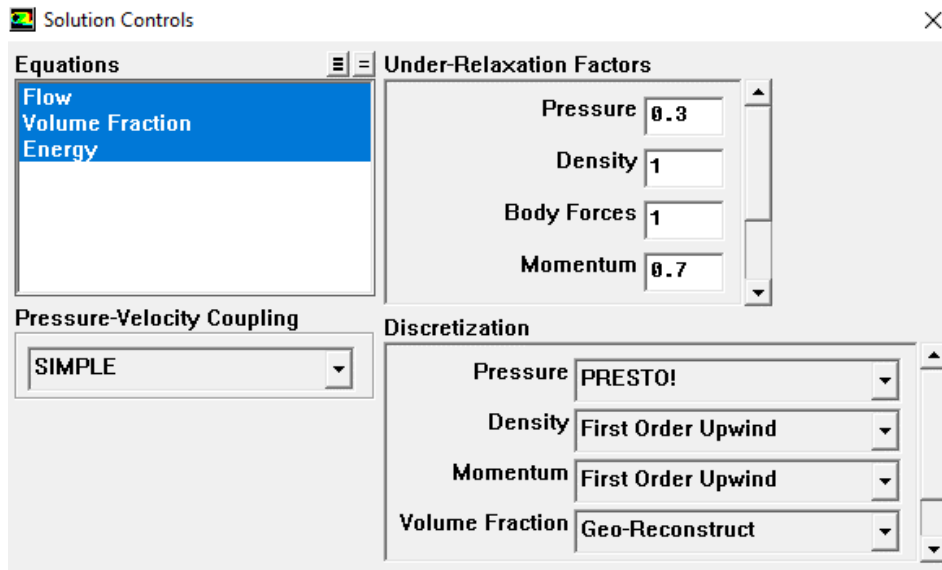


Figura 68. Controles de resolución utilizados en Modelo 2, Fluent.

13. Inicializar el problema, esto es, establecer las condiciones de contorno. En este caso, igual que en el Modelo 1, se establece una temperatura de 300 K a todas las zonas. Además, se establece un Volume Fraction de 1 para la fase 2 (el PCM), ya que inicialmente todo el volumen de PCM va a estar completo de PCM.
14. Comenzar la iteración temporal. Primero se han realizado unas cuantas iteraciones con un Time Step pequeño, de 0,01 segundos para favorecer la convergencia del problema. A medida que avanza el tiempo, se ha ido aumentando este Time Step hasta fijarlo finamente en 0,4 segundos.

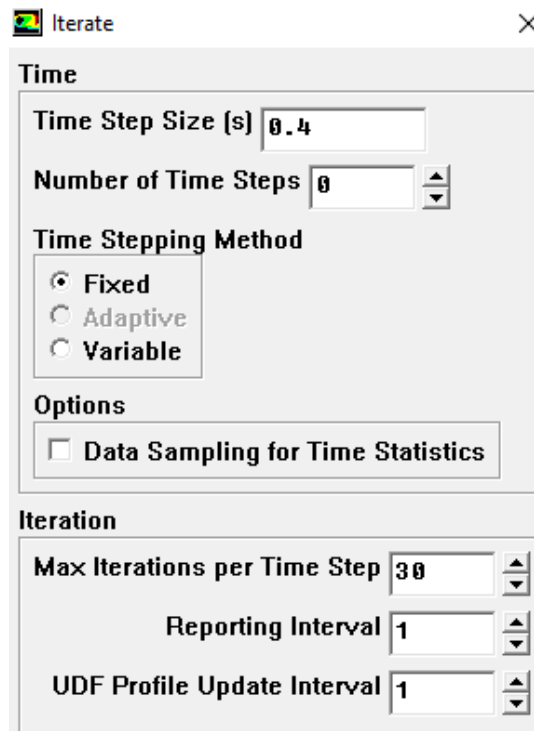


Figura 69. Parámetros de iteración en Modelo 2, Fluent.

6. RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos para las simulaciones numéricas realizadas. Distinguiremos, como hasta ahora entre los dos modelos estudiados.

Modelo 1: Espuma Metálica FCC

Este modelo requiere una gran laboriosidad de simulación, ya que la superficie de espuma metálica es bastante pequeña en comparación con el Modelo 2. Esto supone un enorme tiempo real de simulación, ya que para simular 75 segundos del problema se requieren aproximadamente 5 horas reales. A esto se le suma que el programa de Fluent se cierra inesperadamente en alguna ocasión durante todo ese tiempo, por lo que hay que ir autoguardando. Por lo tanto, este Modelo 1 se ha aprovechado para simular la fusión de un caso de menos superficie de intercambio de calor para compararlo con el Modelo 2 y verificar la teoría del ratio. No obstante, los resultados de la solidificación serían análogos a la fusión, pero a la inversa. La temperatura estática del PCM disminuirá progresivamente a medida que cede calor, y el PCM irá solidificando en lugar de fundiendo.

Velocidad de salida del fluido caloportador

En este caso, se posee una entrada de velocidad de agua a 1 m/s, por lo que se ha simulado cuál será la velocidad a la salida.

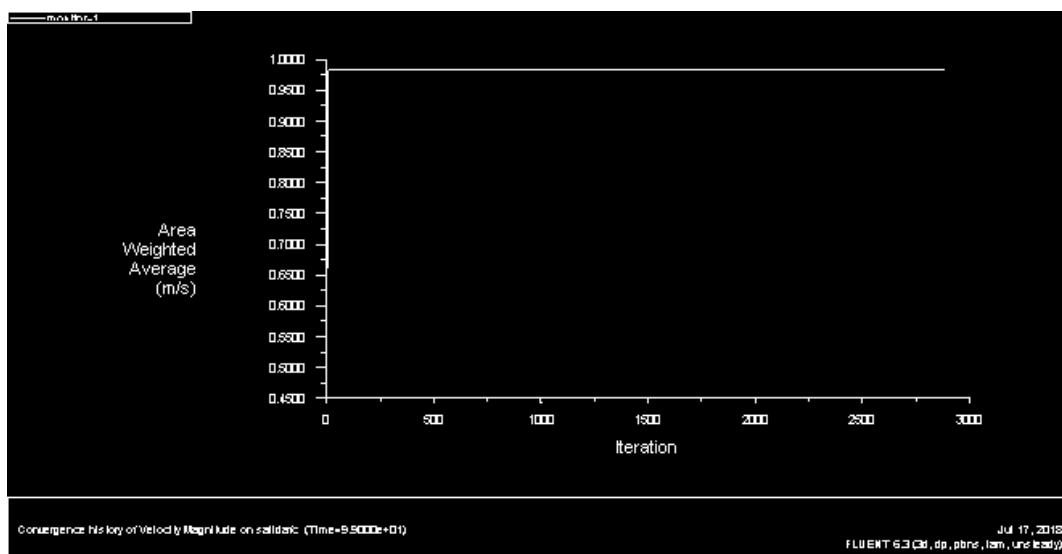


Figura 70. Velocidad de salida del fluido caloportador, Modelo 1.

Como se observa, inicialmente la velocidad de salida del fluido caloportador comienza sobre unos 0,5 m/s y aumenta de forma progresiva hasta casi alcanzar los 1 m/s.. A partir de que alcanza este valor, la velocidad de salida se mantiene constante en el tiempo.

Temperatura Estática en el PCM

Se ha simulado el aumento de temperatura estática que sufre el PCM, como consecuencia de la conducción de calor. Inicialmente el PCM se encuentra a 300 K, pero debido al gradiente térmico que origina el fluido caloportador que entra a 360 K, se produce la transferencia de calor.

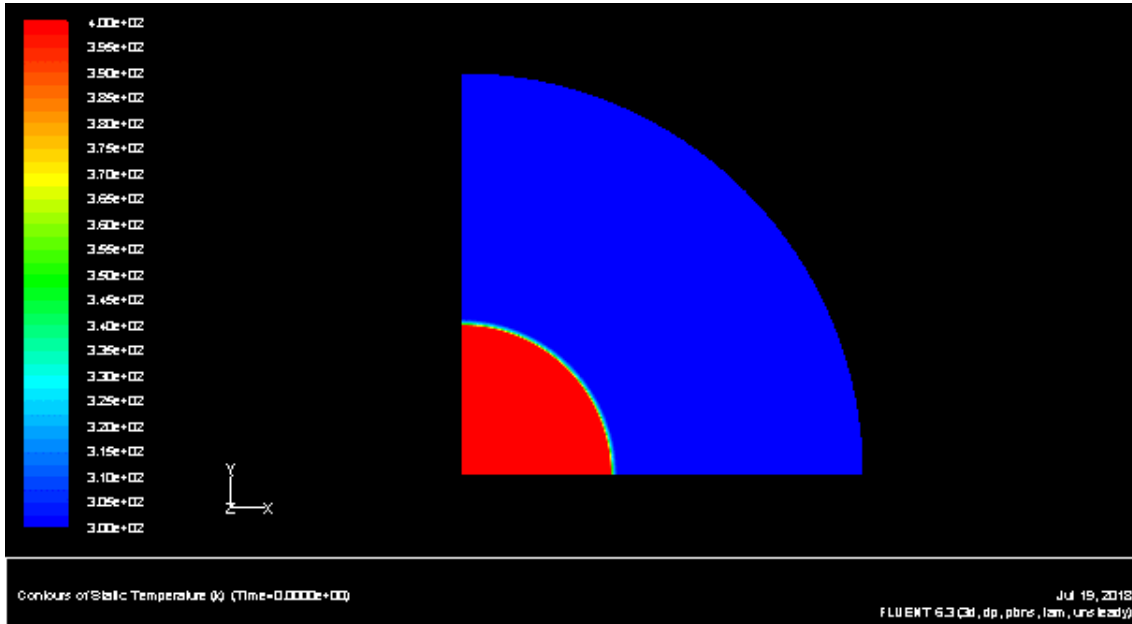


Figura 71. Temperatura estática para $t = 0$ s, Modelo 1.

Al inicio, el fluido caloportador se encuentra a 360 K (caliente), y el PCM y la espuma metálica a 300 K (fríos). Son las condiciones iniciales que se le han puesto al problema.

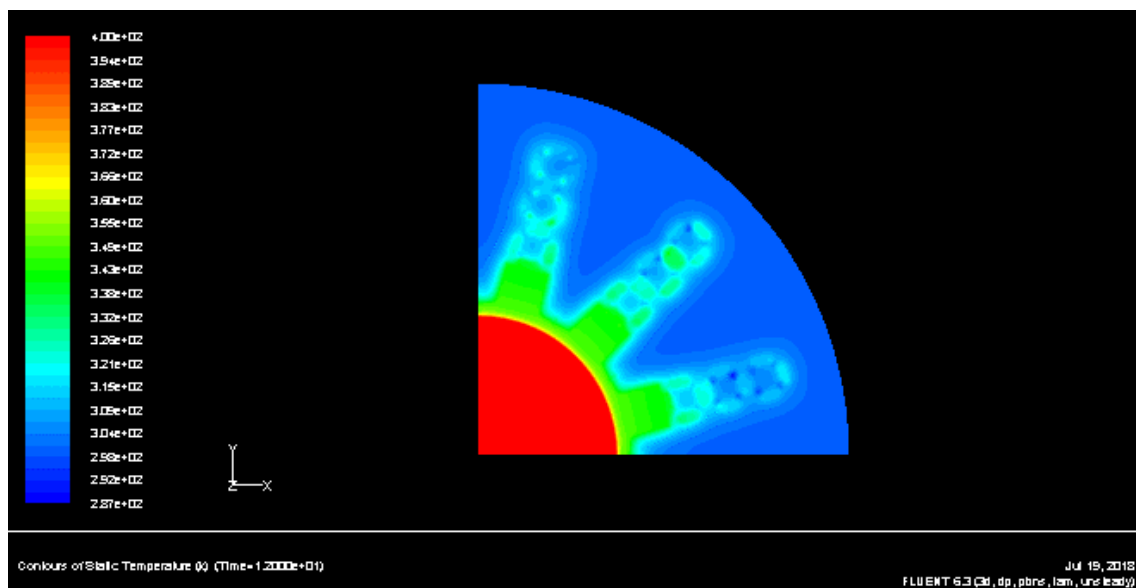


Figura 72. Temperatura estática para $t = 12$ s, Modelo 1.

A los 12 segundos de simulación ya se observa cómo la temperatura estática comienza a aumentar desde el tubo hacia la carcasa. Se debe a la transmisión de calor. La espuma metálica comienza a aumentar su temperatura y en consecuencia la del PCM.

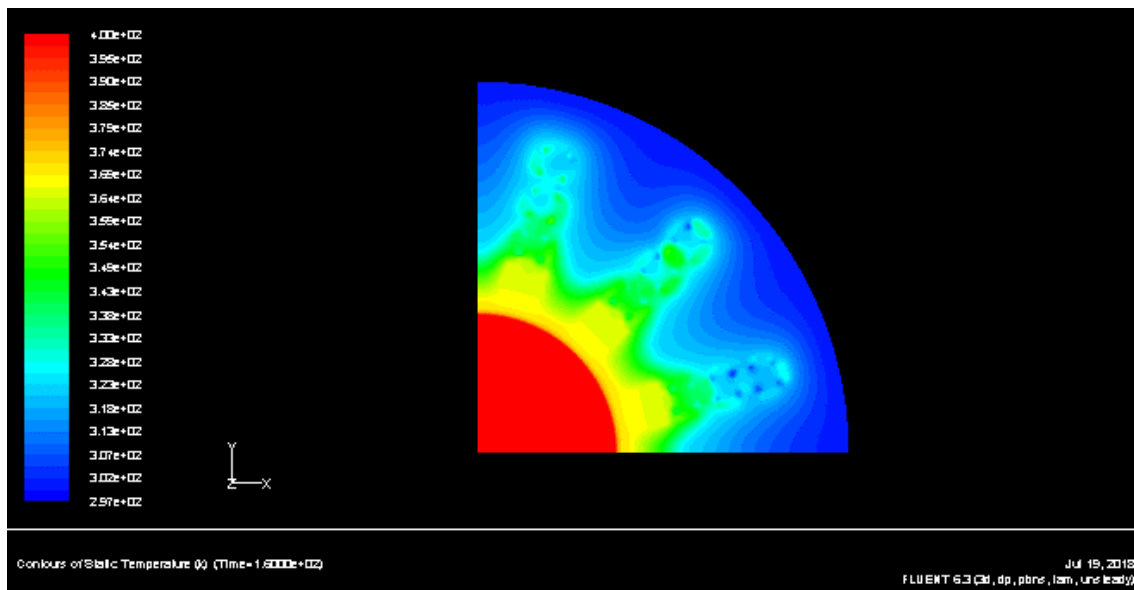


Figura 73. Temperatura estática para $t = 160$ s, Modelo 1.

Desde los 12 s hasta los 160 s, el aumento de temperatura estática es considerablemente más lento. Esto se debe a que una vez aumenta la temperatura del PCM próximo a la espuma metálica, el resto de zonas más separadas tardan en recibir el calor de la espuma metálica, y por tanto en aumentar su temperatura.

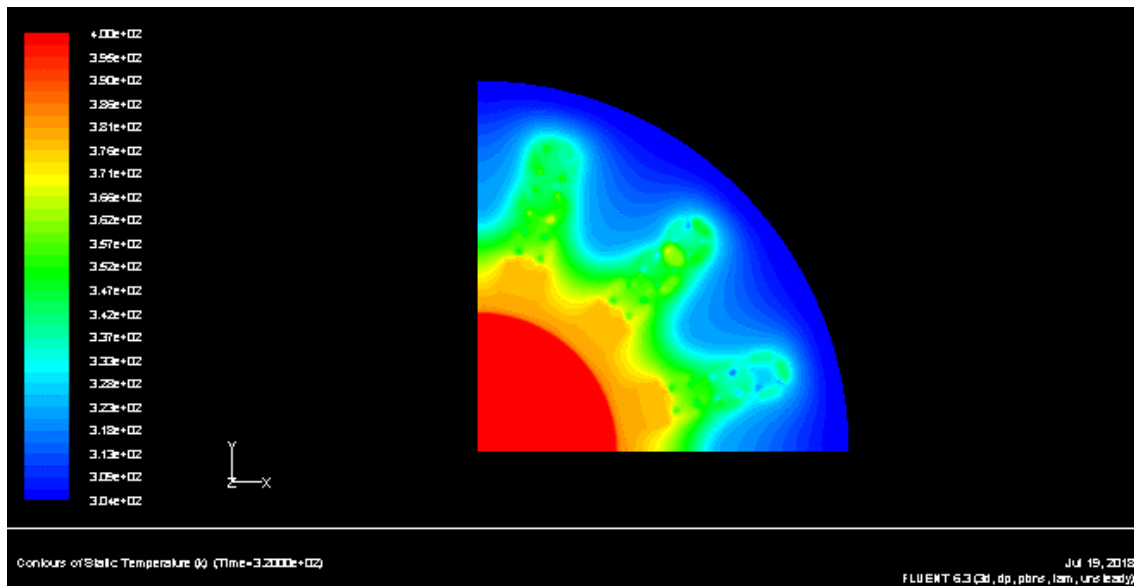


Figura 74. Temperatura estática para $t = 320$ s.

Se nota cómo el tubo y los primeros cubos de espuma metálica han aumentado su temperatura bastante. También la temperatura del PCM alrededor de la espuma metálica.

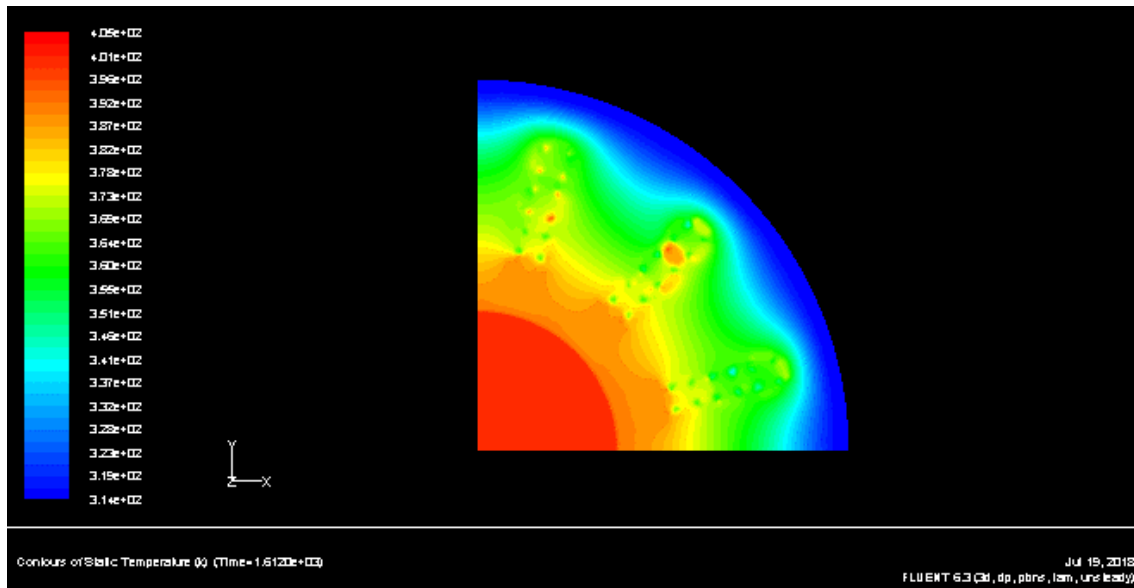


Figura 75. Temperatura estática para $t = 600$ s, Modelo 1.

A los 600 segundos, todo el PCM ha elevado su temperatura bastante, excepto la zona próxima a la carcasa, puesto que es la más alejada.

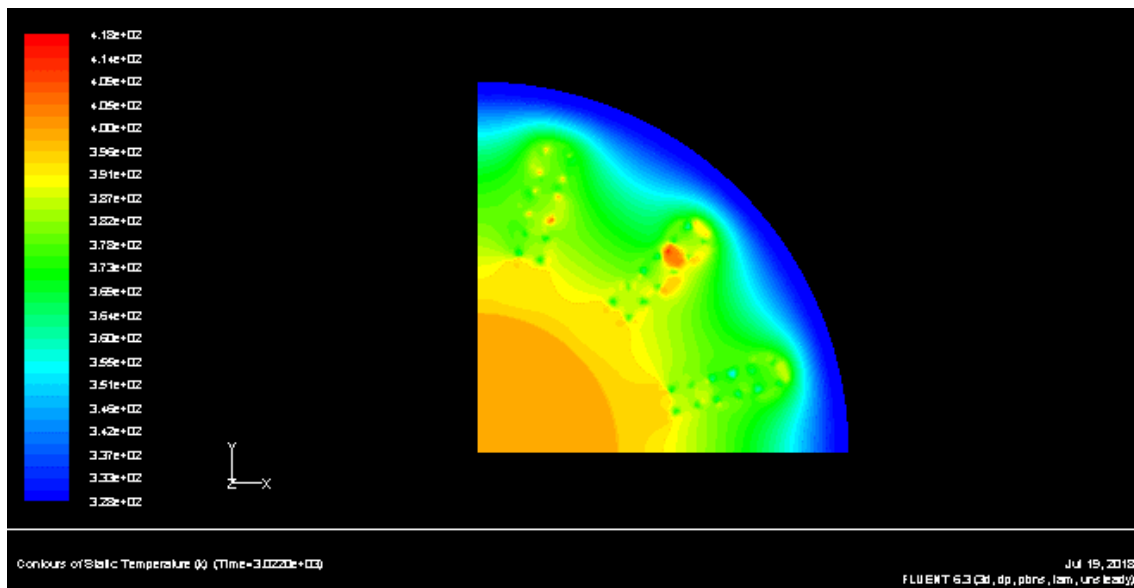


Figura 76. Temperatura estática para $t = 3022$ s, Modelo 1.

Si ya de los 12 a los 160 s la temperatura aumentaba lentamente, de los 600 s a los 3022 s tarda mucho más en observarse un aumento. Esto se debe a que haría falta más espuma metálica en contacto con el PCM en la zona próxima a la carcasa, de manera que este pudiera transmitirle el calor rápidamente.

De hecho, funde prácticamente todo el PCM, pero una pequeña parte del PCM próximo a la carcasa (más alejado de la espuma metálica) no llega a fundir durante la simulación. Después de 3 días reales simulando el problema (hasta llegar a los 3022 s de simulación) se ha concluido que es necesario aumentar la superficie de espuma metálica en la zona de

la carcasa, ya que si no ese PCM no termina de fundir. El ratio calculado para la geometría 1 era muy bueno, pero claro eso en cuanto al volumen ocupado en la geometría. Sin embargo fuera de ese ratio queda todo el PCM contenido en la carcasa, que contiene puntos lo suficientemente alejados como para que no funda ese PCM en las proximidades de la carcasa.

Como solución se propone añadir más espuma metálica en la medida de lo posible, o disminuir el radio interior de la carcasa, para que el PCM quede más próximo a la espuma metálica.

Fusión: Fracción Líquida

En el capítulo anterior, se ha definido la fracción líquida, siendo aquella que determina el estado de sólido o líquido que se encuentra el PCM, siendo 0 totalmente sólido, y 1 totalmente líquido. Mediante este parámetro se obtiene la fusión y la solidificación.

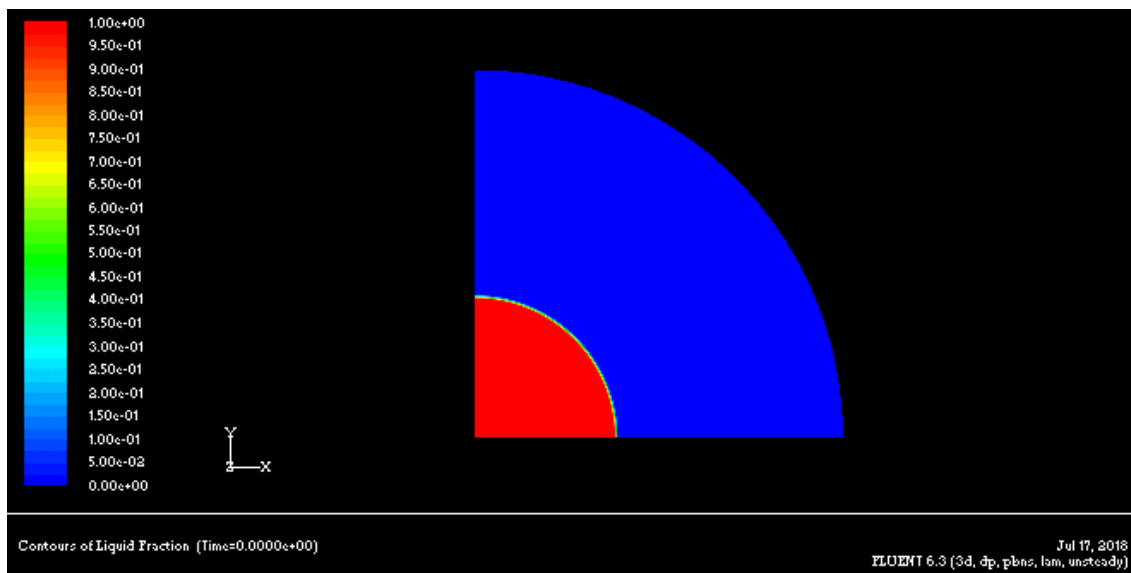


Figura 77. Fracción líquida para $t = 0$ s, Modelo 1.

Para $t = 0$ s, todo el PCM y espuma metálica se encuentran en estado sólido, mientras que el fluido caloportador está en estado líquido.

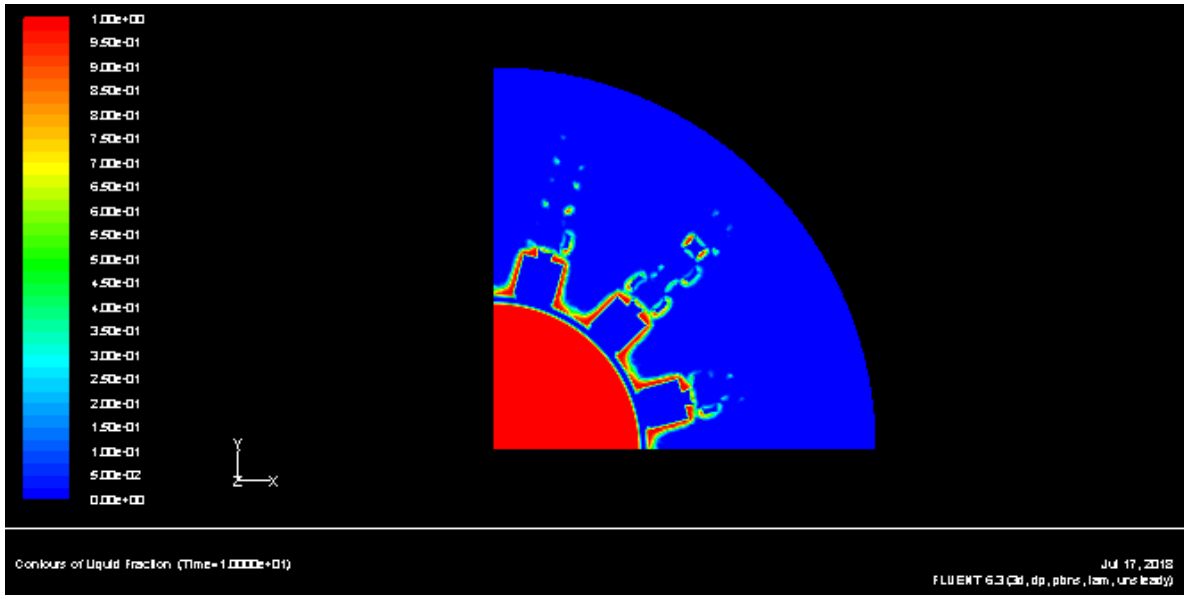


Figura 78. Fracción Líquida, para $t = 10$ s, Modelo 1.

Para $t = 10$ s, se observa cómo empieza a fundirse el PCM embebido en los contornos de los primeros cubos de espuma metálica FCC.

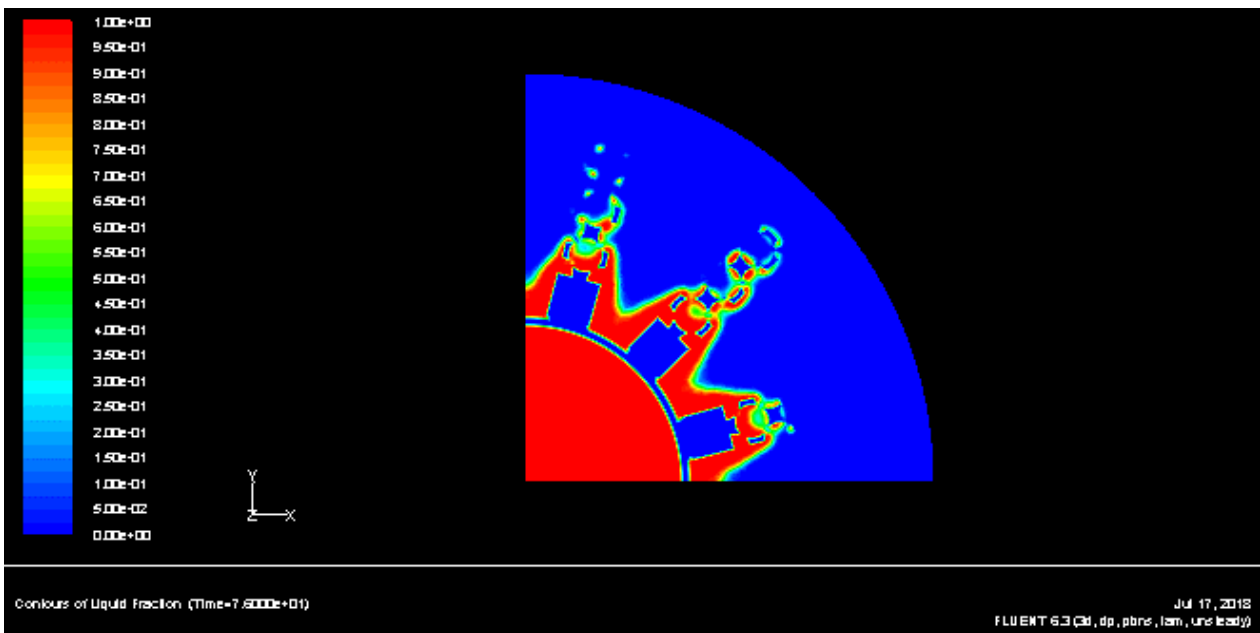


Figura 79. Fracción Líquida, para $t = 76$ s, Modelo 1.

Para $t = 76$ s, ya comienza a fundir gran parte del volumen de PCM.

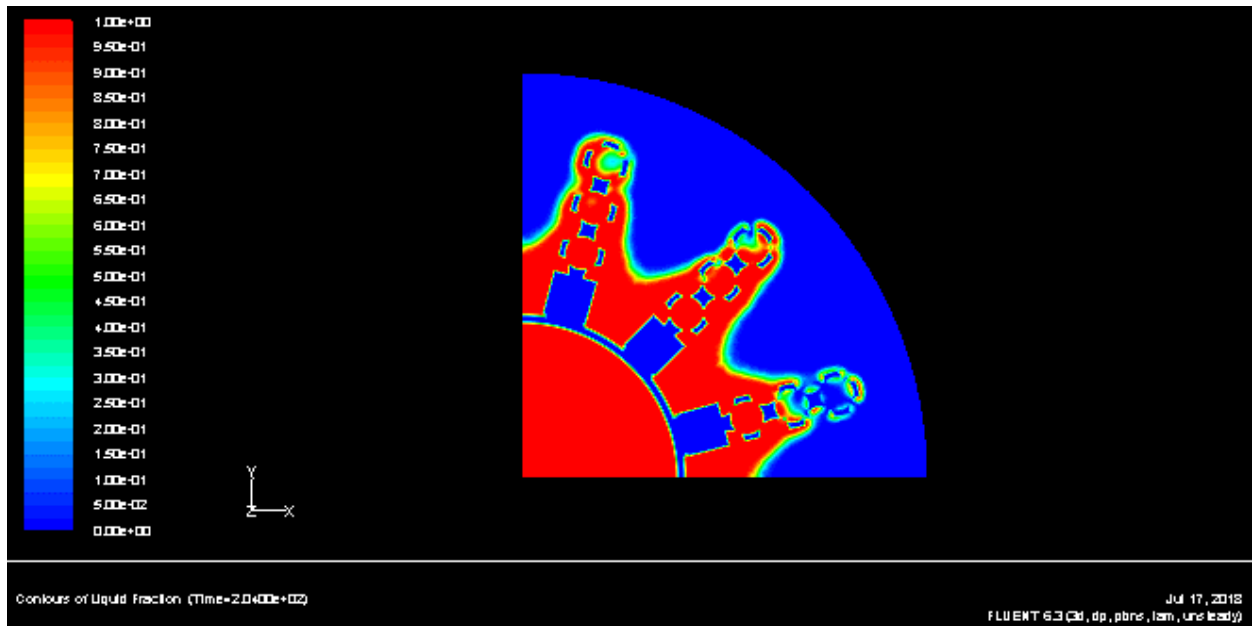


Figura 80. Fracción Líquida para $t = 204$ s, Modelo 1.

A los 204 s, ya comienza a observarse el PCM fundido con la forma de las esferas de la espuma metálica FCC.

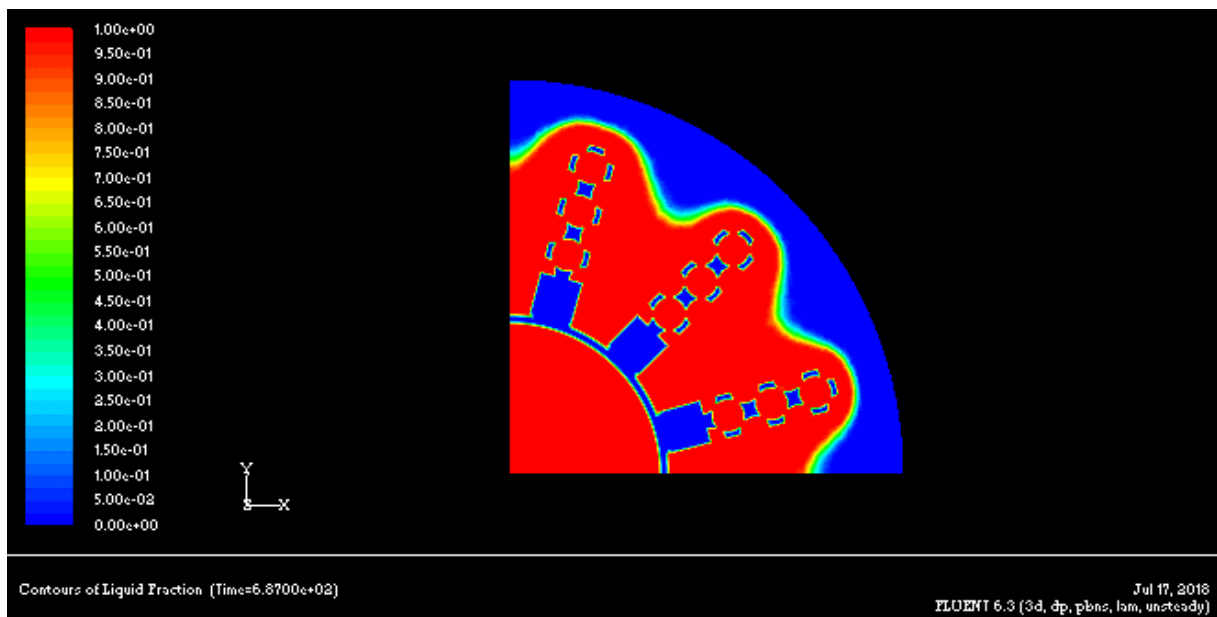


Figura 81. Fracción Líquida para $t = 687$ s, Modelo 1.

A los 687 s, gran cantidad de PCM aparece fundido, por lo que se verifica que se está cumpliendo el objetivo de acumulación de energía.

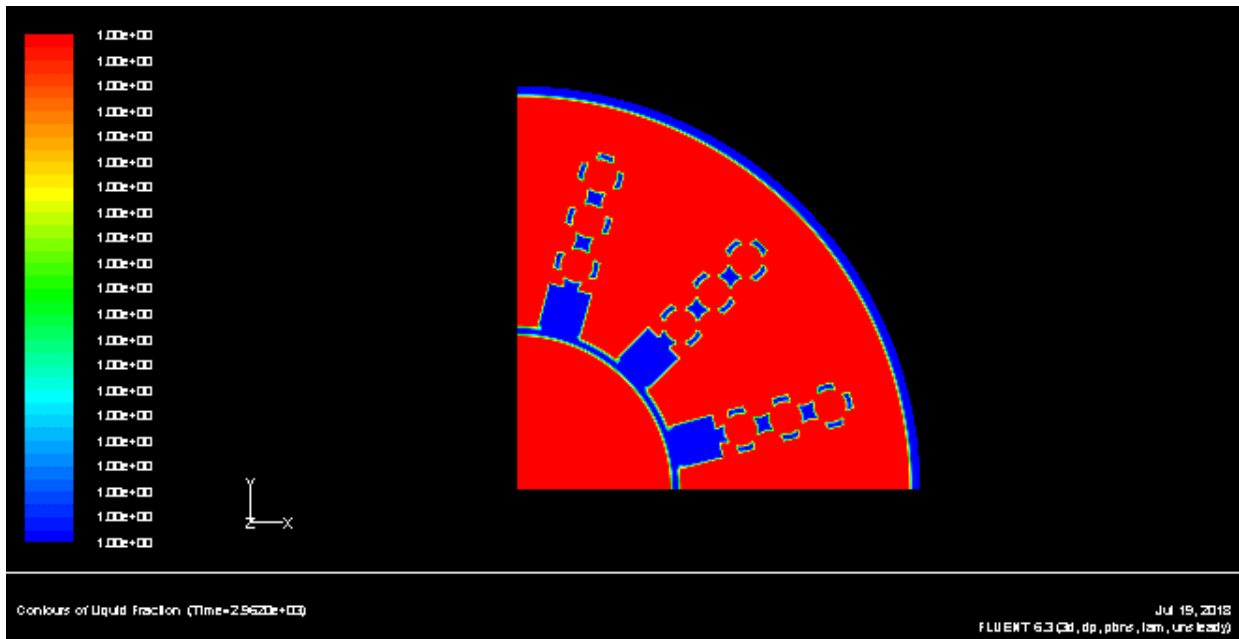


Figura 82. Fracción Líquida para $t = 2962$ s., Modelo 1.

A los 2962 s, ya se ha fundido casi el 100% del PCM, excepto un porcentaje pequeño en la zona próxima a la carcasa.

Convergencia de ecuaciones

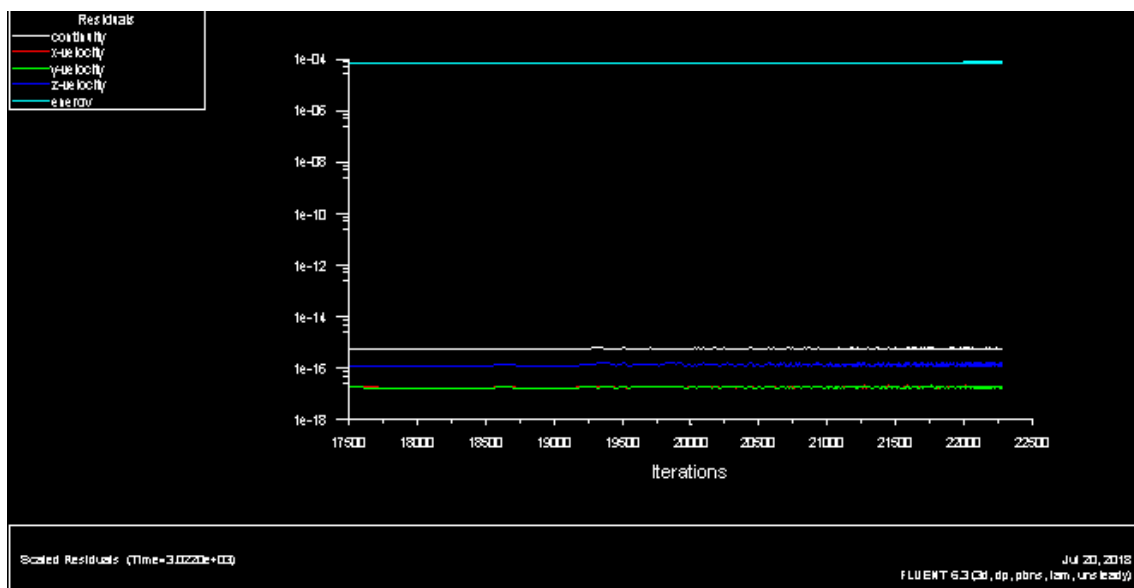


Figura 83. Convergencia de ecuaciones, Modelo 1.

Finalmente, se observa que todas las ecuaciones convergen: velocidad en x, y, z, energía y continuidad. En la Figura se muestran los valores (el eje y son los residuos), ya constantes, para todas ellas al final de la simulación. El valor residual de la ecuación de la energía es mayor que el de las velocidades y continuidad (que es prácticamente nulo). Aun así, un residuo de $10e-4$ es bueno para la ecuación de la energía.

MODELO 2: ESPUMA METÁLICA LOBULAR (CON GRAVEDAD)

El Modelo 2, gracias a su geometría lobular, permite formar una matriz de espuma metálica de gran superficie y de manera que todos los puntos del espacio ocupado por el PCM se encuentran a una distancia no muy alejada, de manera que la conducción de calor es rápida. El Modelo 2 se ha estudiado mediante planos. Se han introducido 2 planos para su estudio. Un plano horizontal que corta la zona del PCM, y otro plano horizontal que corta la zona del PCM. Los resultados que se muestran a continuación. En todas las capturas que se muestran del Modelo 2 la pared caliente a 360 K se encuentra a la derecha de las Figuras, y la carcasa a la izquierda.

Los resultados para la temperatura estática, presión estática, y fracción líquida de fusión y de solidificación son prácticamente los mismos tanto considerando la gravedad como sin considerarla. Esto se debe al activar la gravedad, tiene lugar la convección natural, sin embargo tiene muy pequeño efecto sobre la temperatura, presión y fracción líquida, ya que el volumen de PCM son mililitros.

Convección natural

Cuando se añade calor a un fluido y en consecuencia este disminuye su densidad, se puede inducir un flujo (convección natural) debido a la fuerza de la gravedad actuando sobre esa variación de volumen. Para observar la convección natural hay que observar el la velocidad en dirección z.

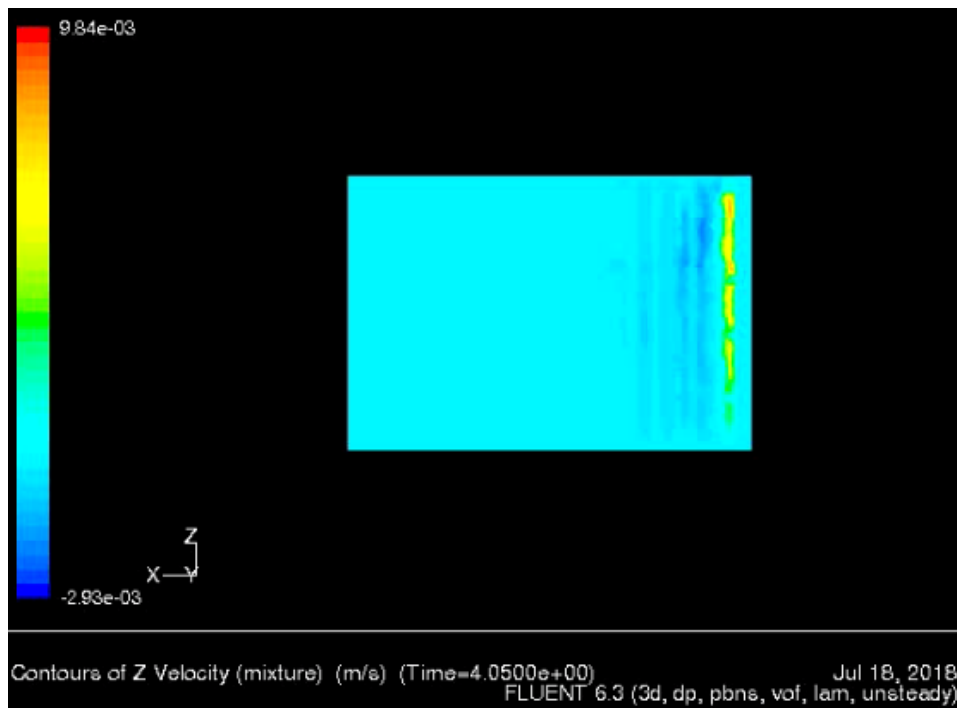


Figura 84. Velocidad en z, Modelo 2 con gravedad.

En la simulación se comprueba cómo efectivamente aparecen velocidades en el fluido solo cuando el PCM está fundido. Las velocidades son del orden de los 10^{-3} m/s, si bien

la máxima velocidad que se alcanza es de $3,42 \times 10^{-2}$, por lo que confirman que se producen recirculaciones y velocidades en la dirección vertical, en este caso el eje z. Las velocidades negativas, indican que van hacia abajo (dirección negativa eje z) y las velocidades positivas hacia arriba (dirección positiva eje z). Esto verifica esas recirculaciones de fluido.

Fracción Líquida

En el Modelo 2, la obtenemos tanto para la fusión como para la solidificación.

Para la **fusión**, obtenemos:

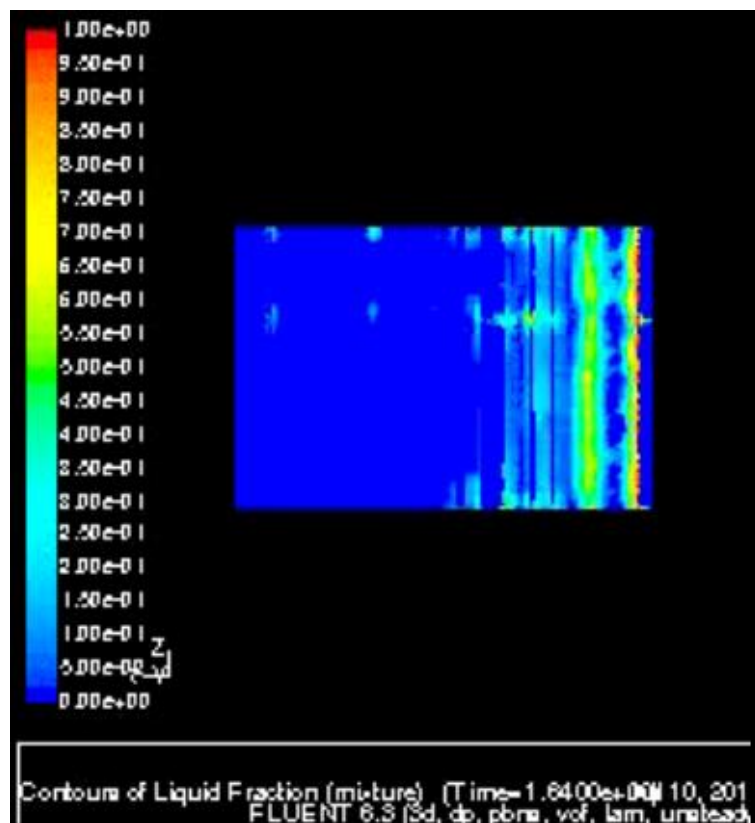


Figura 85. Fracción Líquida Fusión para $t = 1,64$ s, Modelo 2.

Comienza a fundir el PCM.

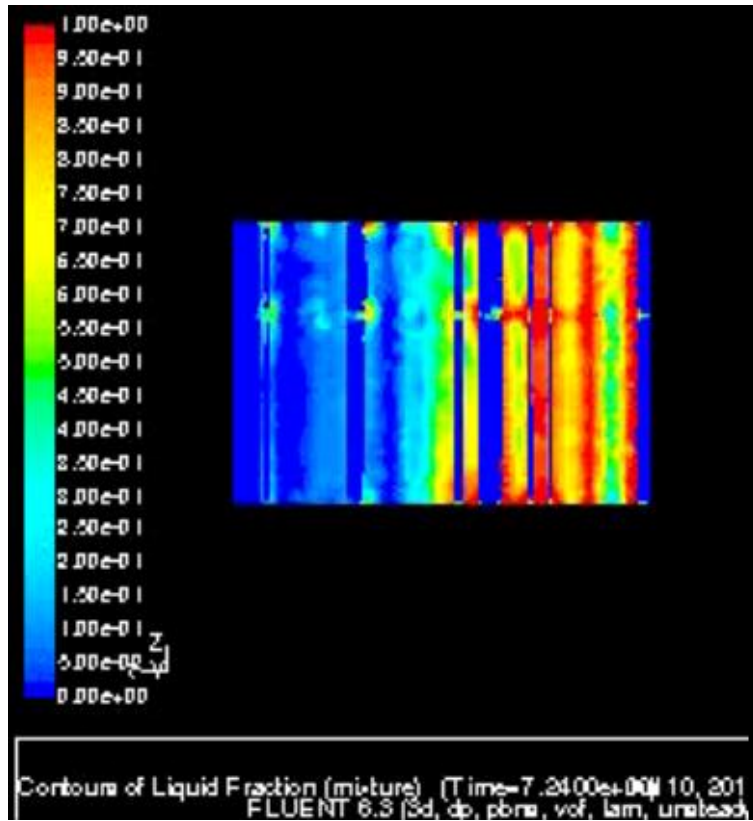


Figura 86. Fracción Líquida Fusión para $t = 7,24$ s, Modelo 2.

Continúa fundiendo cada vez más PCM, en sentido hacia la carcasa.

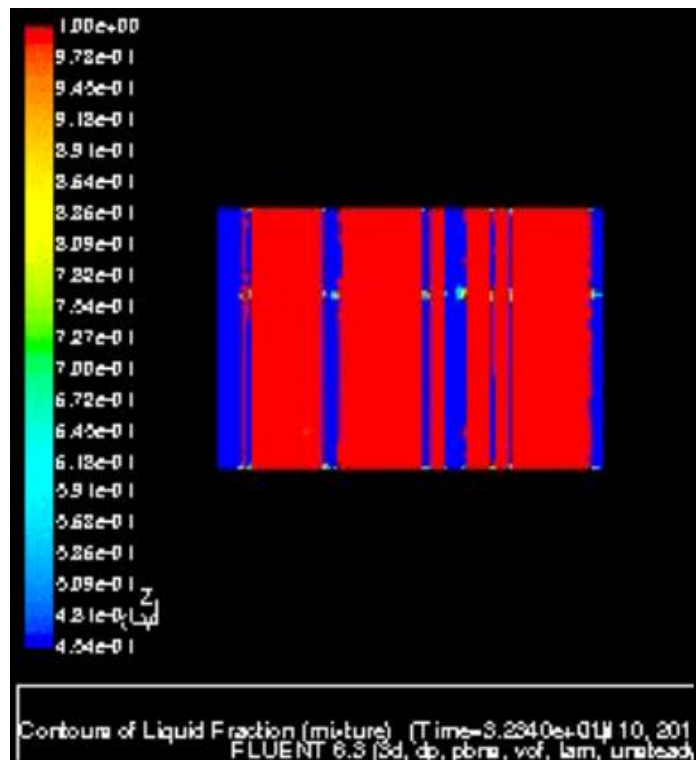


Figura 87. Fracción Líquida Fusión para $t = 32,34$ s, Modelo 2.

A los 32, 34 segundos, ya ha fundido todo el PCM. Como se aprecia, el tiempo de fusión total del Modelo 1 ha sido de 3022 segundos, mientras que la de este modelo tan solo 32,34. Esto se debe a que en el Modelo 2 todos los puntos del espacio ocupado por el PCM están próximos a la espuma metálica, siendo así el proceso de transmisión de calor muy rápido. Además, el ratio de la geometría 2 es bastante mayor que el de la geometría 1.

Para la **solidificación** se ha obtenido:

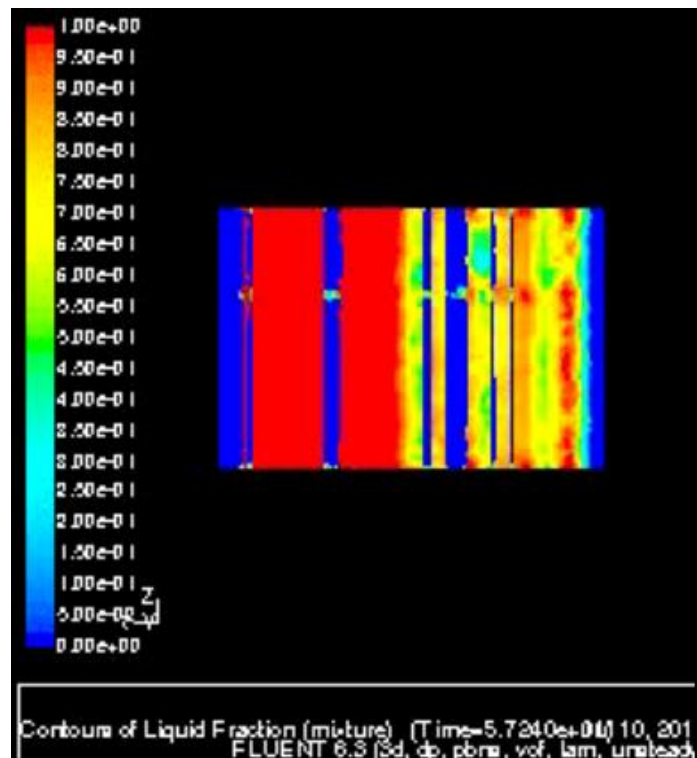


Figura 88. Fracción Líquida para Solidificación para $t = 57,24$ s, Modelo 2.

Comienza a enfriarse el tubo y la espuma metálica al cesar el aporte de energía solar. También empieza a disminuir su temperatura el PCM más próximo a la espuma metálica y al tubo.

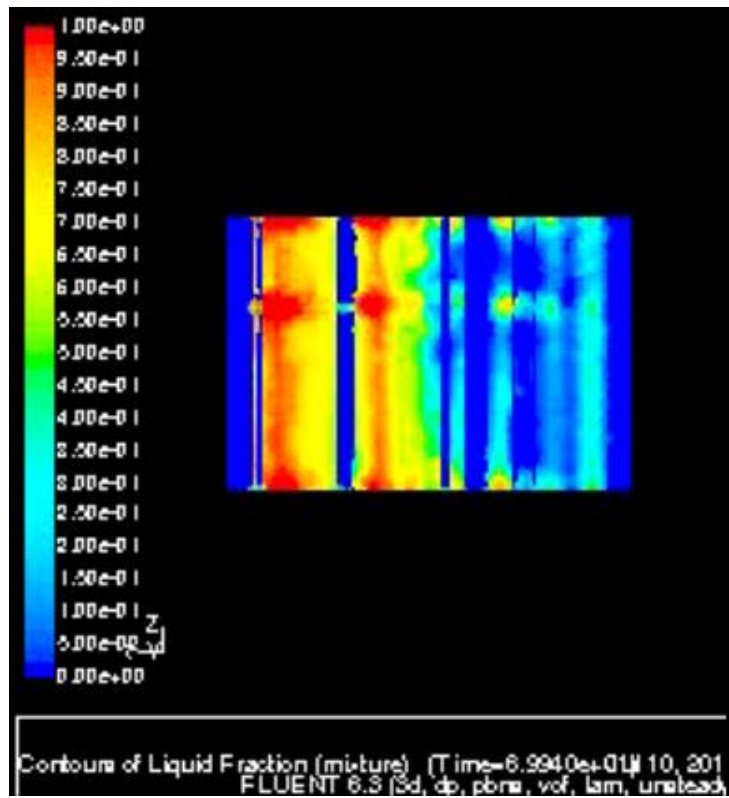


Figura 89. Fracción Líquida Solidificación para $t = 69,94$ s, Modelo 2.

Parte del PCM comienza a solidificar.

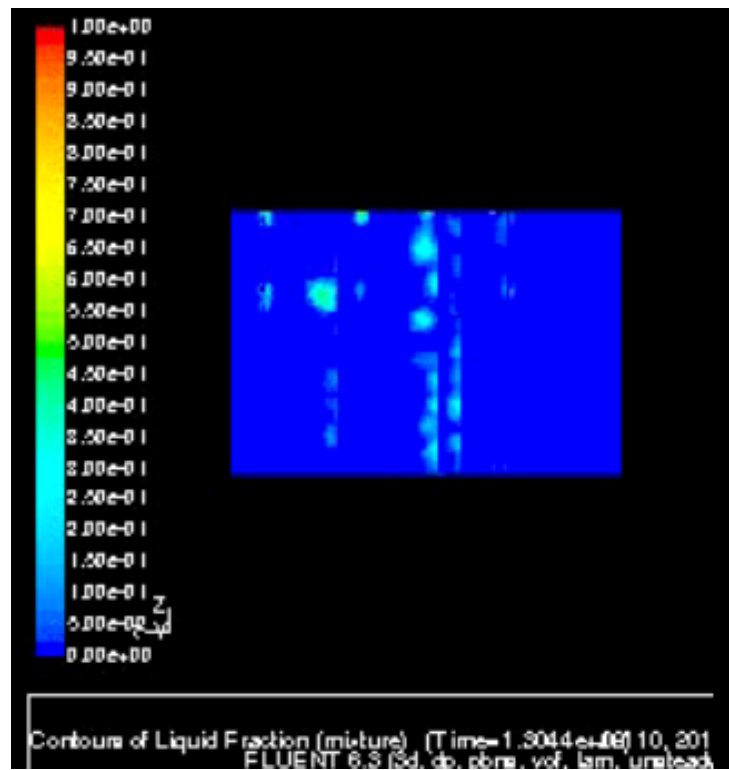


Figura 90. Fracción Líquida Solidificación para $t = 130,44$ s, Modelo 2.

La solidificación acaba a los 130,44 s, y como el tiempo de fusión era de 32,34 s, el tiempo de solidificación es de 98,1 s. Por lo tanto, tarda más tiempo en producirse la solidificación que la fusión. Este hecho se verifica con la Figura 4 del capítulo de revisión bibliográfica en la que de las simulaciones que hicieron sus autores, se extraía la misma conclusión: El proceso de fusión se produce de forma más rápida que el de solidificación.

Este hecho también se observa en la Figura de convergencia de la temperatura estática.

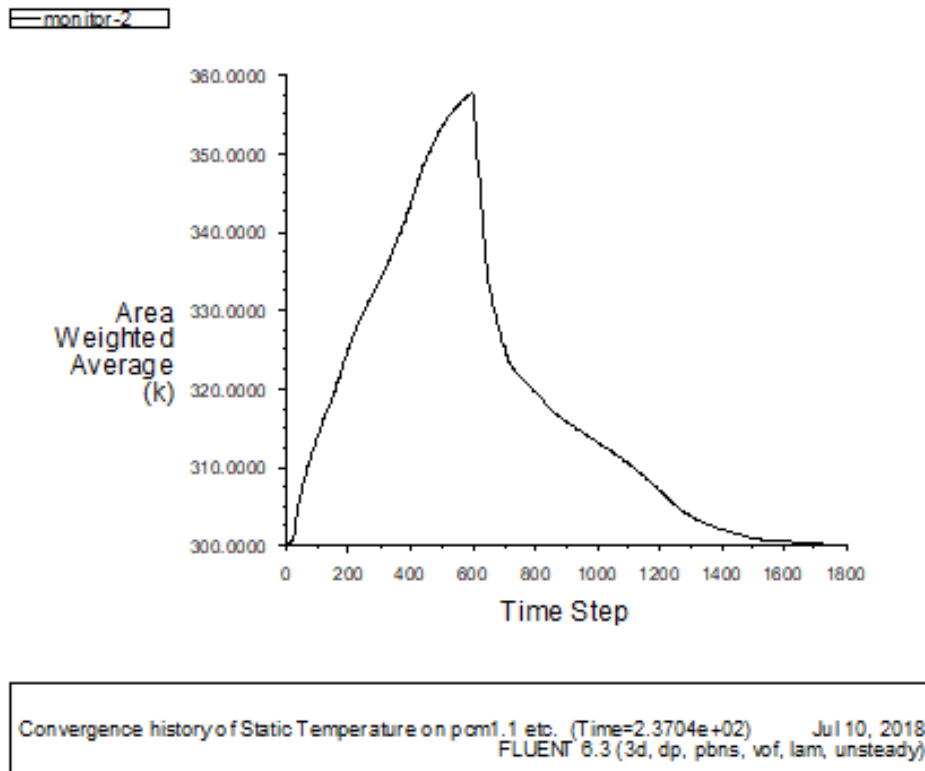


Figura 91. Convergencia de la Temperatura estática, Modelo 2.

Esta curva, verifica cómo la fusión se produce más rápido que la solidificación. Durante la solidificación se produce un valle en la curva.

Por último la Figura 92, muestra la convergencia de todas las ecuaciones: velocidades en x, y, z y energía.

Por último, se muestra la convergencia de las ecuaciones en el Modelo 2.

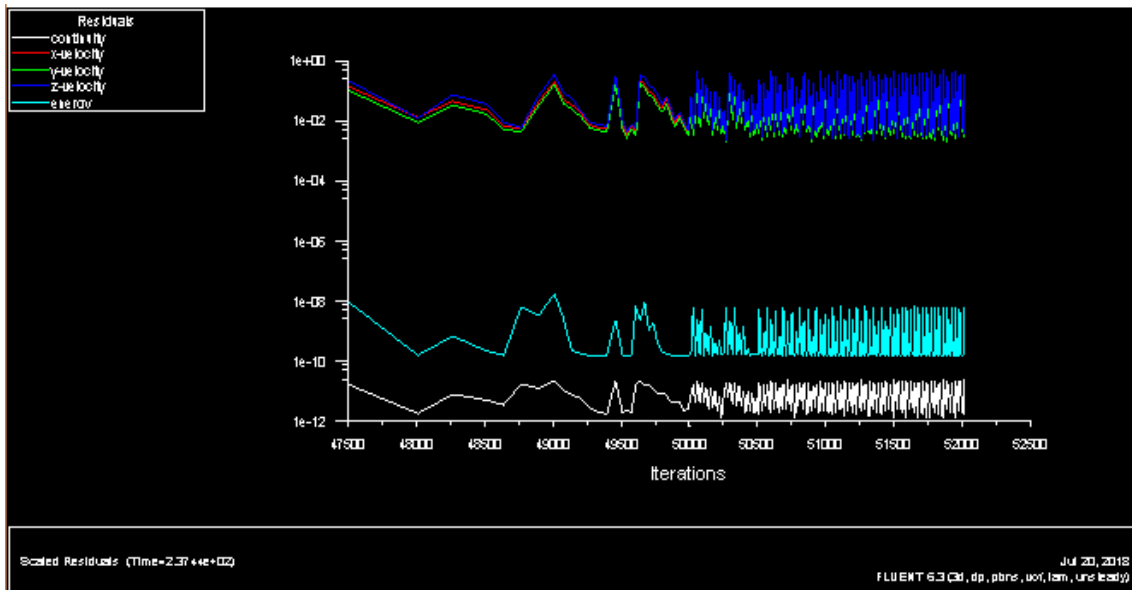


Figura 92. Convergencia de las ecuaciones, Modelo 2 sin gravedad.

Las ecuaciones de la energía y continuidad convergen con residuo muy pequeño. Para las velocidades se obtiene un residuo del orden de 10^{-2} , el cual es válido. El hecho de que fluctúe la convergencia un poco más al final se debe a que se le ha aumentado el Time Step cuando se ha llegado a las 5000 iteraciones.

MODELO 2: ESPUMA METÁLICA LOBULAR (SIN GRAVEDAD)

En este caso se han realizado las mismas simulaciones que para el Modelo 2 con gravedad. Se van a incluir solamente las diferencias respecto al simulado sin gravedad.

La única diferencia considerable con el anterior, es que al no considerar la gravedad, las velocidades que se producen son pequeñas, lo cual indica que no se está produciendo convección natural.

En cuanto a la temperatura estática, presión estática y fracción líquida de fusión y solidificación, los resultados son los mismos que los presentados en la simulación con gravedad. Si existe una pequeña variación no es apreciable.

Como ya se ha comentado, para observar el efecto de la convección natural se debe visualizar la velocidad en dirección vertical, en este caso en dirección z.

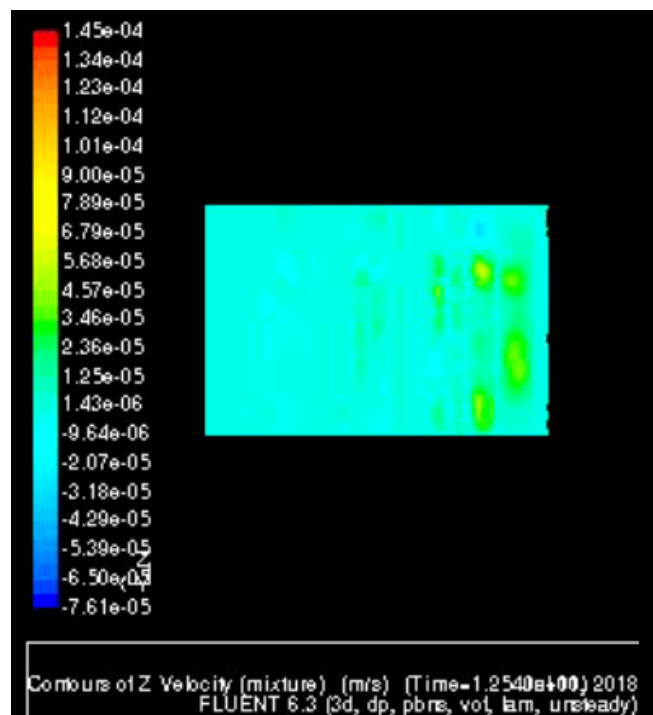


Figura 93. Velocidad en z, Modelo 2 sin gravedad.

A diferencia del modelo con gravedad, las velocidades que se obtienen son del orden de 10^{-5} . Lo que estas pequeñas velocidades confirman es que no se está produciendo convección natural, sino que son debidas a los residuos de velocidad. Por eso tienen un valor tan pequeño.

7. CONCLUSIONES

En este capítulo se resumen las principales conclusiones que se han obtenido.

1. Revisión bibliográfica

Se ha realizado una revisión bibliográfica centrada en dos aspectos: parámetros geométricos de las espumas metálicas y su modelado, y estrategias de simulación numérica de los procesos de transferencia de calor, fusión/solidificación, y convección natural, entre espumas metálicas, y materiales de cambio de fase (PCM) embebidos en dicha espuma metálica.

De esta revisión bibliográfica se puede concluir que a nivel microscópico los parámetros geométricos más significativos de las espumas metálicas son el tamaño de poro y la porosidad, y que a nivel macroscópico el parámetro más relevante es la relación entre la superficie de intercambio de calor y el volumen de PCM embebido. En cuanto a las formas de modelado, este también puede realizarse a nivel microscópico o macroscópico, así como en 2D o 3D.

En cuanto a las estrategias de simulación numérica, se puede concluir que para simular la convección natural en el seno del PCM durante el proceso de fusión y calentamiento sensible, debe: definirse propiedades variables con la temperatura, utilizar un modelo multifásico VOF, ya que es el único compatible con el modelo de fusión/solidificación, activar las fuerzas másicas debidas a la gravedad, y definir correctamente los parámetros del solver transitorio.

2. Modelado de la geometría

Se han definido dos tipos de modelos geométricos. En el primero de ellos se ha modelado la espuma metálica siguiendo la metodología FCC. En concreto se ha modelado un intercambiador de calor con aletas radiales, en el que estas aletas están formadas por cubos aligerados mediante la sustracción de esferas. Con este procedimiento se busca reproducir a base de elementos geométricos simples la estructura real de algunos tipos de espumas metálicas. En este modelo el PCM rodea y rellena el espacio entre dichas aletas y la carcasa del intercambiador formando un volumen continuo. La relación entre la superficie de espuma metálica y el volumen de PCM es del orden de 1000 m^{-1} , aunque depende del tamaño del cubo elemental o unitario y el diámetro de las esferas que se sustraen.

En el segundo se ha modelado la espuma metálica mediante una geometría lobular, quedando el PCM encapsulado en su interior constituyendo volúmenes separados. En este caso se han modelado adicionalmente dos variantes, añadiendo volúmenes de aire en su parte superior de diferentes tamaños para facilitar la expansión del PCM durante el proceso de fusión. Con este procedimiento se busca la facilidad constructiva de y mallado. En este modelo la relación entre la superficie de espuma metálica y el volumen de PCM es del orden de 2000 m^{-1} , aunque depende del tamaño y número de lóbulos que se definan.

3. Estrategia de simulación

En cuanto a la estrategia y metodología de simulación desarrollada, hay que destacar los siguientes aspectos:

- Se ha obviado el fluido caloportador y se ha aplicado una condición de contorno de temperatura constante en la pared interior del tubo por donde circula este. El resto de contornos externos se consideran adiabáticos, ya que el intercambiador estará aislado térmicamente
- Para reproducir los fenómenos de convección natural en el PCM debe incorporarse un volumen de aire adicional, y utilizarse un modelo multifásico VOF, que es el único compatible con la activación de la ecuación de la energía y el modelo de fusión/solidificación
- El solver utilizado es Pressure-Based, Implicit, Unsteady 1st order. La opción del gradiente se ha establecido en Green-Gauss Node Based
- En el modelo viscoso se ha seleccionado Laminar
- El aire se modela como gas ideal y se especifica como fase primaria, mientras que el PCM debe modelarse con propiedades variables con la temperatura y se especifica como fase secundaria. En este caso se ha utilizado como PCM la parafina RT44HC con propiedades variables para la densidad, calor específico y viscosidad dinámica
- Se ha ajustado la presión de operación al valor de la presión atmosférica, y se ha fijado la densidad de operación y el punto de referencia dentro del volumen de aire
- En las condiciones de contorno se han acoplado las diferentes interfaces con sus correspondientes shadows, y se ha definido un espesor mínimo para permitir la conducción de calor en dirección transversal
- En Solution Controls se establece SIMPLE para el acoplamiento presión-velocidad, PRESTO para la discretización de la presión, First order Upwind para densidad y velocidad y energía, y Geo-reconstruct para Volume Fraction
- Se ha realizado una inicialización híbrida, ya que se ha parcheado la región ocupada por el PCM para indicar que su fracción de volumen es 1
- Se han ajustado los parámetros del solver transitorio para asegurar la convergencia y que el número de Courant no se incremente respecto al valor recomendado

4. Resultados

Para la visualización de resultados se han definido dos planos: un plano vertical que intersecta longitudinalmente el volumen de PCM, y un plano horizontal que intersecta ambos volúmenes de PCM a la cota 5 mm.

Para el plano vertical se han visualizado los campos de presión estática, componente z (vertical) de la velocidad, temperatura estática, y fracción líquida, mientras que para el plano horizontal se han visualizado los campos de temperatura estática y fracción líquida.

Adicionalmente se han visualizado dos monitores uno para la presión estática y otro para la temperatura estática.

El análisis cualitativo de los diferentes campos, en ambos planos, permite concluir que:

- Se produce un incremento de la presión estática durante el proceso de fusión y una posterior disminución durante la solidificación, aunque en esta fase el gradiente es menor. Este hecho puede ser debido a la expansión/contracción del PCM durante la fusión/solidificación
- La evolución temporal y espacial de la temperatura estática y la fracción líquida en el PCM son coherentes
- Durante los intervalos de tiempo en los que el PCM está en fase líquida se observan recirculaciones y velocidades en dirección vertical compatibles con la existencia de fenómenos de convección natural. Estas recirculaciones varían espacial y temporalmente de forma coherente con el campo de temperaturas y fracción líquida

Referencias bibliográficas:**Estudios numéricos**

- [1] A.A. Al-Abidi, S. Mat, K. Sopian, M.Y. Sulaiman, A.Th. Mohammad, Numerical study of PCM solidification in a triplex tube heat exchanger with internal and external fins. *International journal of Heat and Mass Transfer* 61 (2013) 684-695.
- [2] S. Mat , A.A. Al-Abidi, K. Sopian, M.Y. Sulaiman, A.Th. Mohammad, Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal-externals fins. *Energy Conversion and Management* 74 (2013) 223-236.
- [3] L. Qiu, M. Yan, Numerical simulation and analysis of PCM on phase change process consider natural convection influence. *The 2nd International Conference on Computer Application and System Modeling* (2012).
- [4] G. Petrone, G. Cammarata, Simulation of PCM melting process in a differentially heated enclosure. *Consol Conference Milan* (2012).
- [5] S.S. Sundarram, L. Wei, The effect of pore size and porosity on thermal management performance of phase change material infiltrated microcellular metal foams. *Applied Thermal Engineering* 64 (2014) 147-154.
- [6] N. Das, M. Kohno, Y. Takata, D.V. Patil, S. Harish, Enhanced melting behaviour of carbon based on phase change nanocomposites in horizontally oriented latent heat thermal energy storage system. *Applied Thermal Engineering* 125 (2017) 880-890.
- [7] S. Feng, M. Shi, Y. Li, T.J. Lu, Pore-scale and volume-average numerical simulations of phase change heat transfer in finned metal foam. *International journal of Heat and Mass Transfer* 90 (2015) 838-847.
- [8] Z. Liu, Y. Yao, H. Wu, Numerical modelling for solid-liquid phase change phenomena in porous media: Shell-and-tube type latent heat thermal energy storage. *Applied Energy* 112 (2013) 1222-1232.
- [9] Y. Zhao, C.Y. Zhao, Z.G. Xu, H.J. Xu, Modeling metal foam enhanced phase change heat transfer in thermal energy storage by using phase field method. *International journal of Heat and Mass Transfer* 99 (2016) 170-181.
- [10] C. Benard, D. Gobin, A. Zanolli, Moving boundary problem: heat conduction in the solid phase of a phase-change material during melting driven by natural convection in the liquid. *International journal of Heat and Mass Transfer* Vol. 29 (1986) 11 1669-1681.
- [11] A. Erek, I. Dincer, Numerical heat transfer analysis of encapsulated ice thermal energy storage system with variable heat transfer coefficient in downstream. *International journal of Heat and Mass Transfer* 52 (2009) 851-859.
- [12] A. Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, An analysis of a packed bed latent heat thermal energy storage system using PCM capsules: Numerical investigation. *Renewable Energy* 34 (2009) 1765-1773.

[13] S. Wang, A. Faghri, T.L. Bergman, A comprehensive numerical model for melting with natural convection. *International journal of Heat and Mass Transfer* 53 (2010) 1986-2000.

[14] S. Tiari, S. Qiu, M. Mahdavi, Numerical study of finned heat pipe-assisted thermal energy storage system with high temperature phase change material. *Energy Conversion and Management* 89 (2015) 833-842.

[15] M.M. Joybari, F. Haghghat, S. Seddegh, A.A. Al-Abidi, Heat transfer enhancement of phase change materials by fins under simultaneous charging and discharging. *Energy Conversion and Management* 152 (2017) 136-156.

Estudios combinados numérico-experimentales

[16] S. Arena, G. Cau, C. Palomba, CFD Simulation of melting and solidification of PCM in thermal energy storage systems of different geometry. *Journal of Physics: Conference Series* 655 (2015) 012051.

[17] Z. Chen, D. Gao, J. Shi, Experimental and numerical study on melting of phase change materials in metal foams at pore scale. *International journal of Heat and Mass Transfer* 72 (2014) 646-655.

[12] W.Q. Li, Z.G. Qu, Y.L. He and W.Q. Tao, Experimental and numerical studies on melting phase change heat transfer in open-cell metallic foams filled with paraffin. *Applied Thermal Engineering* 37 (2012) 1-9.

[18] Z. Peng, Z. Menga, H. Zhua, Y. Wangb, S. Pengb, Experimental and numerical study of heat transfer characteristics of a paraffin/ metal foam composite PCM. *Energy Procedia* 75 (2015) 3091-3097.

[19] E. Assis, L. Katsman, G. Ziskind, R. Letan, Numerical and experimental study of melting in a spherical shell. *International journal of Heat and Mass Transfer* 50 (2007) 1790-1804.

[20] A.F. Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, Latent heat thermal energy storage using cylindrical capsule: Numerical and experimental investigations. *Renewable Energy* 31 (2006) 2025-2041.

[21] F.L. Tan, S.F. Hosseinizadeh, J.M. Khodadadi, L. Fan, Experimental and computational study of constrained melting of phase change materials (PCM) inside a spherical capsule. *International journal of Heat and Mass Transfer* 52 (2009) 3464-3472.

[22] A. Joulin, Z. Younsi, L. Zalewski, S. Lassue, D.R. Rousse, J.P. Cavrot, Experimental and numerical investigation of a phase change material: Thermal-energy storage and release. *Applied Energy* 88 (2011) 2454-2462.

[23] M. Longeon, A. Soupart, J.F. Fourmigué, A. Bruch, P. Marty, Experimental and numerical study of annular PCM storage in the presence of natural convection. *Applied Energy* 112 (2013) 175-184.

- [24] P. Lamberg, R. Lehtiniemi, A.M. Henell, Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage.
- [25] M. Lachheb, Z. Younsi, H. Naji, M. Karkri, S.B. Nasrallah, Thermal behaviour of a hybrid PCM/plaster: A numerical and experimental investigation. *Applied Thermal Engineering* 111 (2017) 49-59.
- [26] Francis Agyenim, Philip Eames and Mervyn Smyth, A comparison of heat transfer enhancement in a medium temperature thermal energy storage heat exchanger using fins. *Solar Energy* 83 (2009) 1509-1520.