



Universidad Politécnica de Cartagena
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación

Proyecto Fin de Carrera

**Análisis de la evolución del flujo de
metal fundido durante la fase de
inyección en máquinas de fundición a
alta presión y su relación con la
porosidad en la pieza.**

Titulación: Ingeniero Industrial
Alumno: Milan Martínez Navarro
Director: Juan José Hernández Ortega

Cartagena, Julio de 2016

Proyecto Fin de Carrera

**Análisis de la evolución del flujo de
metal fundido durante la fase de
inyección en máquinas de fundición a
alta presión y su relación con la
porosidad en la pieza.**

por
Milan Martínez Navarro

presentado en la
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

para la obtención del

Título de Ingeniero Industrial
por la
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Director del proyecto: Dr. Juan José Hernández Ortega

Planteamiento y objetivos

Planteamiento general

En la actualidad, los procesos de fundición por inyección a presión han adquirido una posición importante dentro de los procesos de fabricación en general, y en la industria de automoción en particular. Esto se ha debido fundamentalmente al elevado ritmo de producción y a los aspectos relacionados con la precisión dimensional, el acabado superficial, la capacidad para reproducir detalles y su bajo coste. Dentro de estos procesos se emplean, cada vez más, máquinas de cámara fría en posición horizontal en las que la fusión del metal se realiza fuera del sistema de inyección. Una de las limitaciones más importantes de estos procesos de fundición con respecto a otros procesos de fabricación se debe a la porosidad de las piezas fundidas, ya que reduce las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas y dificulta la posibilidad de que sean soldadas o tratadas térmicamente. La formación de porosidad en las piezas puede tener su origen en diversas causas, con importancia variable en las distintas etapas del proceso de fundición. Estas causas son básicamente la existencia de gases disueltos y atrapados en el metal fundido y la resistencia a la alimentación líquida necesaria, que se presenta en las zonas en solidificación, para compensar la contracción volumétrica que experimenta el metal al solidificarse (Kimio y Pehlke [61]; Poirier et al. [91]; Wang [114]). Por otro lado, la porosidad originada por cualquiera de las dos causas que se acaba de mencionar puede ser de dos tipos: macroporosidad y microporosidad (una extensa revisión sobre los distintos tipos de porosidad y las diferentes causas que la originan se puede encontrar en la referencia de Campbell [14]).

Para eliminar la macroporosidad producida por la ingestión y atrapamiento de aire en el metal fundido durante el proceso de inyección, lo ideal sería reducir la formación de burbujas de aire atrapado en el metal fundido, evacuar todo el aire de la cavidad y evitar solidificaciones prematuras del metal en las secciones más delgadas que impidan el completo llenado del molde. Esto último se podría evitar, por un lado,

retardando la solidificación del metal en el molde (por ejemplo precalentando el molde, colocando insertos aislantes en determinadas zonas o incrementando la temperatura del metal fundido) y por otro lado, aumentando la velocidad del metal fundido a la entrada de la cavidad. En cuanto a la evacuación del aire en estos procesos, normalmente, puede ser evacuado desde la cavidad del molde hacia el medio ambiente (evacuación atmosférica) o hacia un depósito de vacío (evacuación al vacío) a través de unos conductos de pequeña sección llamados vientos. Para que la evacuación sea óptima, los vientos deberían situarse en las zonas del molde que se llenan en último lugar, lo cual es imposible en numerosas ocasiones, y hace que en determinadas circunstancias pueda existir aire no evacuado que queda atrapado y contribuye a la formación de poros. Además de posibles actuaciones sobre el diseño de los vientos y su ubicación, para minimizar el atrapamiento de aire, el proceso de inyección de metal fundido se suele dividir en una fase lenta, en la que el pistón empuja el metal fundido hasta que la cámara de inyección esté completamente llena, y una fase rápida, en la que el pistón empuja el metal a gran velocidad para llenar la cavidad del molde. Una vez que el molde está completamente lleno, se eleva la presión que el pistón ejerce sobre el metal y se mantiene durante la solidificación de la pieza, favoreciendo así la reducción de la porosidad en la pieza debido a la disminución del volumen que ocupa el aire atrapado.

Es en este marco general en el que se inscribe el presente proyecto fin de carrera, que se centra principalmente en el estudio numérico del final de la fase lenta, principio de la fase rápida (llenado del molde) y solidificación que habitualmente se emplean en los procesos de fundición por inyección a presión en máquinas de cámara fría horizontal. Esto requerirá un análisis detallado de la transición del flujo a través del conducto que comunica la cámara de inyección, en donde tiene lugar la fase lenta, y la cavidad del molde, en donde el metal entra a gran velocidad durante la fase rápida. Este paso de la fase lenta a la fase rápida, en el que el fluido discurre fundamentalmente por el sistema de distribución, se denominará en este proyecto como fase de transición. En la mayoría de los trabajos publicados hasta la fecha, el comportamiento del flujo de metal durante el proceso de inyección se estudia de forma aislada y desacoplada, tanto espacial como temporalmente, en la cámara de inyección, durante la fase lenta, o en la cavidad del molde, durante la fase rápida, obviando el flujo a través del conducto de entrada y la fase de transición entre las fases lenta y rápida. Durante la fase de transición, se produce el cambio de velocidad del pistón para pasar de la fase lenta a la fase rápida. Los parámetros fundamentales que caracterizan a esta fase son la aceleración empleada para alcanzar la velocidad de la fase rápida y la fracción del conducto de entrada lleno de líquido justo en el instante en el que se inicia la fase de transición (este parámetro, será referido en lo que sigue como *pre-llenado* del conducto de entrada). De esta manera, el estudio llevado a cabo este proyecto se centrará

principalmente en la fase de transición, en los primeros instantes del llenado de la cavidad y en el estado semi-final de la pieza analizando la solidificación. No se contemplan, por tanto, simulaciones directas del proceso en las distintas escalas que traten de integrar los mecanismos de nucleación y crecimiento dendrítico para predecir la microestructura final de la pieza fabricada (Rappaz [93]; Zhu y Smith [121] o Rappaz et al. [94]), debido a la dificultad de llevar a cabo este tipo de simulaciones. Aún así, las dificultades para estudiar numéricamente el comportamiento del flujo en el proceso de inyección en cada una de las fases mencionadas y poder establecer reglas de diseño para el molde, así como para la selección de los parámetros de fabricación (ley de movimiento aplicada al pistón, longitud y pre-llenado inicial del conducto de entrada y velocidad del líquido al inicio de la fase rápida) que minimicen la cantidad de aire atrapado son varias.

En general, el flujo de metal fundido durante el llenado de un molde puede resultar extremadamente complejo de simular, incluso cuando la geometría de la cavidad es sencilla. En este tipo de flujos no estacionarios en los que existen distintas fases (metal fundido, metal solidificado, molde o gas, entre otras) que evolucionan con el tiempo durante el llenado del molde, se debe conocer la posición de las superficies de separación entre fases, lo que dificulta aún más la simulación numérica del proceso, sobre todo cuando es necesario tratar el problema en las tres dimensiones del espacio. Una dificultad adicional se debe a las elevadas velocidades del flujo, que en determinadas condiciones de operación puede llegar a alcanzar valores de hasta 100 m/s. En estos casos se suelen formar chorros y gotas de pequeño tamaño (Lefebvre [69]) que favorecen los fenómenos de oxidación del metal y dificultan aún más la simulación numérica del llenado del molde. Otro aspecto que dificulta la solución del problema es la influencia que las condiciones del aire pueden tener en la evolución de la superficie libre. Aunque la relación de densidades entre el metal y el aire es muy alta (pudiendo alcanzar valores superiores a 2000) las condiciones del aire en la cavidad (presión y temperatura principalmente), especialmente en el momento en el que se produce su ingestión en el metal fundido, pueden afectar significativamente a la evolución de las burbujas que se puedan formar y por tanto al metal fundido que las rodea. Estas condiciones dependerán fundamentalmente de las cantidades de aire evacuadas a través de los vientos.

Para llevar a cabo el estudio numérico, se tendrá en cuenta el efecto de la transferencia de calor.

Dado que no es objetivo del proyecto el estudio de piezas con una geometría específica, y para evitar problemas adicionales relacionados con la geometría del molde, se emplearán formas genéricas tanto para la cavidad como para el conducto de entrada y los vientos.

Las aproximaciones introducidas en los modelos numéricos hacen necesario verificar sus resultados de forma experimental. Aunque no es objeto de este proyecto fin de carrera, se realizan algunas comparaciones de los resultados obtenidos numéricamente, con resultados experimentales obtenidos en trabajos anteriores [41] en un banco de ensayos y una máquina de fundición a presión disponibles en el Dpto. de Ingeniería Mecánica de la UNED y el Dpto. de Ingeniería de Materiales y Fabricación de la UPCT, respectivamente. Los primeros permiten visualizar el fluido tanto en la cámara de inyección como durante el llenado del molde en condiciones similares a las reales de operación, y servirán para comparar la evolución de la superficie libre con la obtenida numéricamente. En los segundos, se obtendrán piezas fundidas de aleación de aluminio que servirán para identificar y evaluar la ubicación de la porosidad mediante el radiografiado de las mismas.

Resultando estrictamente necesario, quisiera mostrar mi más sincero agradecimiento al Dr. Juan José Hernández Ortega por brindarme la oportunidad de basar parte del Capítulo 1 y 2 del presente proyecto en su Tesis Doctoral *“Estudio Numérico y Experimental de los Procesos de Fundición a Presión. Mecanismos de Formación de Porosidad durante el Llenado del Molde”* de 2010.

Objetivos

El presente proyecto se centrará en el análisis numérico de la evolución del metal fundido durante la fase de inyección y su relación con la porosidad encontrada en piezas fabricadas en máquinas de fundición por inyección a presión. Esto requerirá un estudio detallado del movimiento del fluido tanto en la cámara de inyección como en el molde, y un análisis del proceso de solidificación y enfriamiento del metal en el molde. Así como el uso de modelos que permitan predecir la porosidad debida a atrapamiento de aire durante el llenado del molde y posibles rechupes o microrechupes producidos durante la contracción del metal. Para llevar a cabo el estudio se utilizarán el software comercial Flow3D basado en el método de las diferencias finitas.

El objetivo fundamental de este proyecto es, por tanto, conseguir una mejora sustancial en conocimiento de la fase de la inyección y su influencia en los mecanismos de atrapamiento de aire y formación de porosidad en piezas fundidas.

Los objetivos parciales son:

- Análisis de la evolución del metal fundido y transferencia de calor en la cámara de inyección.

- Análisis de la evolución del metal fundido y transferencia de calor durante el llenado del molde.
- Evaluación de los modelos que incorpora el software comercial utilizado (FLOW3D) para el análisis del atrapamiento de aire y del estudio de la porosidad por contracción.
- Estudio de la evolución de la presión del aire contenido en el molde a lo largo del proceso de inyección en función de diferentes geometrías de los vientos y condiciones de inyección del metal fundido.
- Análisis de la influencia de distintas geometrías del sistema de distribución en la formación de la porosidad por atrapamiento de aire.

Dado que no es objetivo del proyecto el estudio de piezas con geometría específica, y para evitar problemas adicionales relacionados con la geometría del molde, se emplearán formas genéricas tanto para la cavidad como para el conducto de entrada. El estudio numérico se realizará considerando los efectos de la tensión superficial y diferentes espesores de pared.

Índice general

CAPÍTULO 1

1. Introducción	17
1.1. Tecnologías de fundición	18
1.2. Formación de porosidad en procesos de fundición a presión	21
1.2.1. Gases procedentes de la lubricación y reacciones químicas.....	23
1.2.2. Gases no evacuados por sellado o dimensionamiento insuficiente de los sistemas de evacuación de aire	23
1.2.2.1. Área de la sección transversal de los vientos.....	25
1.2.3. Mecanismos de atrapamiento de aire	26
1.2.3.1. Etapas de inyección en máquinas con cámara fría horizontal	26
1.3. Técnicas alternativas empleadas para reducir la porosidad o minimizar sus efectos	33
1.3.1. Inyección al vacío.....	33
1.3.2. “Pore free”	34
1.3.3. “Squeeze casting”	34
1.3.4. Procesado de metales en estado semi-sólido	35
1.4. Llenado del molde en procesos de fundición por inyección a presión	36
1.4.1. Aplicación de códigos CFD al llenado del molde.....	39
1.5. Estructura del Proyecto Fin de Carrera	42
1.6. Fases del Proyecto Fin de Carrera.....	43

CAPITULO 2

2. Modelos numéricos	44
2.1. Código numérico utilizado	44
2.1.1. Modelado y resolución numérica mediante Flow3D	45
2.1.1.1. Ecuaciones de conservación y condiciones de contorno	45
2.1.1.2. Procedimiento de resolución numérica.....	46
2.2. Modelos CFD.....	47
2.2.1. Hipótesis consideradas	47
2.2.2. Modelo CFD para el estudio del patrón de flujo durante el llenado del molde	48
2.2.3. Modelo CFD para el estudio de la influencia de la fase de transición sobre el patrón de flujo del metal líquido durante los primeros instantes de llenado.....	50

<u>2.2.3.1. Análisis de sensibilidad del mallado</u>	<u>52</u>
<u>2.2.4. Modelo CFD para analizar la influencia de la distribución de velocidades al finalizar la primera fase</u>	<u>53</u>
<u>2.2.5. Modelo CFD para el estudio de la evacuación de aire</u>	<u>55</u>
<u>2.2.6. Modelo CFD para el estudio de los efectos de la presión del aire sobre el patrón de llenado.</u>	<u>56</u>
<u>2.2.7. Modelos CFD para la comparación de los resultados numéricos con resultados experimentales</u>	<u>58</u>
<u>2.2.7.1. Modelo CFD para comparar los resultados numéricos con resultados experimentales de visualización del patrón de flujo.....</u>	<u>58</u>
<u>2.2.7.2. Modelo CFD para comparar los resultados numéricos con resultados de visualización de los efectos de la presión del aire sobre el patrón de llenado.....</u>	<u>60</u>

CAPITULO 3

<u>3. Estudio del movimiento del metal y atrapamiento de aire en la cámara de inyección.</u>	<u>61</u>
<u>3.1. Introducción al problema.....</u>	<u>61</u>
<u>3.2. FLOW 3D. Configuración del modelo.....</u>	<u>62</u>
<u>3.2.1. General.....</u>	<u>62</u>
<u>3.2.2. Hipótesis consideraras en la simulación.</u>	<u>62</u>
<u>3.2.3. Descripción del fluido.</u>	<u>63</u>
<u>3.2.4. Geometría del mallado</u>	<u>64</u>
<u>3.2.5. Fronteras.</u>	<u>65</u>
<u>3.2.6. Condiciones iniciales.....</u>	<u>65</u>
<u>3.3. Ley Óptima de avance del pistón.....</u>	<u>66</u>
<u>3.4. Análisis de la simulación.</u>	<u>67</u>
<u>3.4.1. Caso A. ($U_{max} = 0,25$).....</u>	<u>68</u>
<u>3.4.2. Caso B. ($U_{max} = 0,42$).....</u>	<u>70</u>
<u>3.4.3. Caso C. ($U_{max} = 0,62$).....</u>	<u>72</u>
<u>3.4.4. Caso D. ($U_{max} = 0,88$).....</u>	<u>74</u>
<u>3.4.5. Caso E. ($U_{max} = 0,88$ variación 1).....</u>	<u>76</u>
<u>3.4.6. Caso F. ($U_{max} = 0,88$ variación 2)</u>	<u>78</u>
<u>3.4.7. Caso G. $U_{max} = 1$).....</u>	<u>80</u>
<u>3.5. Conclusión.</u>	<u>82</u>

CAPITULO 4

<u>4. Estudio del movimiento del metal y atrapamiento de aire durante el llenado del molde.....</u>	<u>83</u>
<u>4.1. Descripción del problema.....</u>	<u>83</u>
<u>4.2. Evolución del flujo en el interior del molde durante el llenado.....</u>	<u>84</u>
<u>4.2.1. Análisis del llenado de Molde 1.....</u>	<u>88</u>
<u>4.2.1.1. Geometría del molde 1.....</u>	<u>88</u>
<u>4.2.1.2. Análisis del llenado del molde 1 según el atrapamiento de aire y la distribución de temperaturas.</u>	<u>88</u>
<u>4.2.1.2. Caso A. Velocidad de llenado 1 m/s</u>	<u>89</u>
<u>4.2.1.2. Caso B. Velocidad de llenado 3 m/s.....</u>	<u>94</u>
<u>4.2.1.2. Caso C. Velocidad de llenado 0,5 m/s.....</u>	<u>99</u>
<u>4.2.2. Análisis del llenado de Molde 2.....</u>	<u>104</u>
<u>4.2.2.1. Geometría del molde 2.....</u>	<u>104</u>
<u>4.2.2.2. Análisis del llenado del molde 2 según el atrapamiento de aire y la distribución de temperaturas.</u>	<u>104</u>
<u>4.2.2.2. Caso D. Velocidad de llenado 1 m/s</u>	<u>105</u>
<u>4.2.2.2. Caso E. Velocidad de llenado 3 m/s.....</u>	<u>110</u>
<u>4.2.2.2. Caso F. Velocidad de llenado 0,5 m/s</u>	<u>115</u>
<u>4.2.3. Análisis del llenado de Molde 3.....</u>	<u>120</u>
<u>4.2.3.1. Geometría del molde 3.....</u>	<u>120</u>
<u>4.2.3.2. Análisis del llenado del molde 3 según el atrapamiento de aire y la distribución de temperaturas.</u>	<u>120</u>
<u>4.2.3.2. Caso G. Velocidad de llenado 1 m/s</u>	<u>121</u>
<u>4.2.3.2. Caso H. Velocidad de llenado 3 m/s</u>	<u>126</u>
<u>4.2.3.2. Caso I. Velocidad de llenado 0,5 m/s</u>	<u>131</u>
<u>4.3. Comparativa del estado final de la pieza entre los diferentes casos analizados. ...</u>	<u>136</u>
<u>4.4. Simulación óptima.</u>	<u>137</u>
<u>4.5. Simulación del proceso de Solidificación.</u>	<u>138</u>

CAPITULO 5

<u>5. Conclusiones y trabajos futuros.....</u>	<u>141</u>
<u>5.1. Conclusiones finales.....</u>	<u>141</u>
<u>5.2. Desarrollos futuros.....</u>	<u>143</u>

<u>Índice de figuras</u>	<u>12</u>
<u>Índice de tablas</u>	<u>16, 83</u>
<u>Índice general</u>	<u>10</u>

Índice de figuras

CAPÍTULO 1

Figura 1. 1: Esquemas sobre una máquina de fundición por inyección patentada por H.H. Doehler en 1910.....	21
Figura 1. 2: Esquema de una máquina de fundición por inyección a alta presión con cámara caliente (basado en Kalpakjian [56]).....	22
Figura 1. 3: Esquema de una máquina de fundición por inyección a baja presión (basado en Kalpakjian [56])......	23
Figura 1. 4: Esquema de una máquina de fundición por inyección a alta presión con cámara fría horizontal.....	24
Figura 1. 5: Fases de la etapa de inyección en el proceso de fundición por inyección a alta presión en cámara horizontal: (a) Etapa lenta, (b) Etapa rápida, (c) Intensificación de la presión.	30
Figura 1. 6: Condiciones que tienden a incrementar el atrapamiento de aire: (a) Velocidad del pistón superior a la velocidad crítica; (b) velocidad del pistón inferior a la velocidad crítica.	31
Figura 1. 7: Regla de cálculo utilizada para determinar los parámetros de llenado del molde.....	32
Figura 1. 8: Ilustración gráfica del llenado de un molde: (a) Frente de metal plano, (b) frente de metal no plano y (c) flujo de metal atomizado (basado en Vinarcik) [113])	33
Figura 1. 9: Ejemplo de diagrama de recorrido y presión en una inyección en máquina FIAP donde se aprecian las tres etapas de inyección	34
Figura 1. 10: (a) Representación esquemática de una máquina de fundición por inyección a presión: (1) cámara de inyección; (2) cavidad del molde; (3) conducto de entrada. (b) Fase lenta. (c) Fase rápida. (d) Fase de transición.	35
Figura 1. 11: Representación esquemática de la fase de transición del proceso de inyección. (a) Principales variables a estudiar. (b) Primeros instantes de llenado de la cavidad.....	36

CAPÍTULO 2

Figura 2. 1: Representación esquemática de (a) la geometría de la configuración 1 y (b) la malla utilizada para simular el problema	52
Figura 2. 2: Perfil de la superficie libre para diferentes mallados e instantes de tiempo. Caso con $Re = 50$	53
Figura 2. 3: Representación esquemática de la geometría para el estudio de los primeros instantes de llenado, con distintas longitudes para el canal de colada. (a) Le1. (b) Le2. (c) Le3, y (d) la malla y condiciones de contorno usadas para simular el problema	55
Figura 2. 4: Influencia de la densidad del mallado sobre el perfil de la superficie libre para el instante adimensional $t/t_f = 0,099$. Obsérvese que solo se ha representado la mitad del dominio físico, aplicando la condición de simetría.	56
Figura 2. 5: Representación esquemática de la geometría para simular el problema en 3D	57
Figura 2. 6: Representación esquemática de la geometría utilizada para el estudio de la evacuación de aire a través de los vientos. (a) Vista frontal. (b) Vista lateral. (c) Mallado y condiciones de contorno	58
Figura 2. 7: Representación esquemática de (a) la geometría y (b) la malla utilizada para simular el problema.....	60
Figura 2. 8: Representación esquemática de (a) la geometría y (b) la malla empleada para simular el llenado de la cavidad del molde.	61
Figura 2. 9: Influencia de la resolución de la malla en los perfiles de la superficie libre del fluido en diferentes instantes del llenado de la cavidad del molde.....	62
Figura 2. 10: Representación esquemática de (a) la geometría y (b) la malla utilizadas para comparar los resultados numéricos con resultados de visualización.....	63

CAPÍTULO 3

Figura 3. 1: Geometría de la pieza STL en Flow3D	65
Figura 3. 2: Model Setup. Physics	66
Figura 3. 3: Propiedades del fluido	67
Figura 3. 4: Mallado de la cámara de inyección.....	68
Figura 3. 5: Fronteras del mallado	68
Figura 3. 6: Ejemplo 2D de la fracción de volumen atrapado en la cámara de inyección	70

Figura 3. 7: Velocidad de avance del pistón para $U_{max} = 0,25$	71
Figura 3. 8: Caso A. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,18 s).....	72
Figura 3. 9: Caso A. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,37 s).....	72
Figura 3. 10: Caso A. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,55 s).....	72
Figura 3. 11: Caso A. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,72 s).....	72
Figura 3. 12: Caso A. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,91 s).....	72
Figura 3. 13: Caso A. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 1,08 s).....	72
Figura 3. 14: Caso A. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 1,27 s).....	72
Figura 3. 15: Caso A. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 1,44 s).....	72
Figura 3. 16: Caso A. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 1,62 s).....	72
Figura 3. 17: Caso A. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 1,80 s).....	72
Figura 3. 18: Velocidad de avance del pistón para $U_{max} = 0,42$	73
Figura 3. 19: Caso B. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,12 s).....	74
Figura 3. 20: Caso B. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,27 s).....	74
Figura 3. 21: Caso B. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,40 s).....	74
Figura 3. 22: Caso B. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,53 s).....	74
Figura 3. 23: Caso B. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,64 s).....	74
Figura 3. 24: Caso B. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,77 s).....	74
Figura 3. 25: Caso B. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,91 s).....	74
Figura 3. 26: Caso B. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 1,04 s).....	74
Figura 3. 27: Caso B. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 1,17 s).....	74
Figura 3. 28: Caso B. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 1,28 s).....	74
Figura 3. 29: Velocidad de avance del pistón para $U_{max} = 0,62$	75
Figura 3. 30: Caso C. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,08 s).....	76
Figura 3. 31: Caso C. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,18 s).....	76
Figura 3. 32: Caso C. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,27 s).....	76
Figura 3. 33: Caso C. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,37 s).....	76
Figura 3. 34: Caso C. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,46 s).....	76
Figura 3. 35: Caso C. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,55 s).....	76
Figura 3. 36: Caso C. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,63 s).....	76
Figura 3. 37: Caso C. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,73 s).....	76
Figura 3. 38: Caso C. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,81 s).....	76
Figura 3. 39: Caso C. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,91 s).....	76
Figura 3. 40: Velocidad de avance del pistón para $U_{max} = 0,88$	77
Figura 3. 41: Caso D. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,16 s).....	78
Figura 3. 42: Caso D. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,23 s).....	78
Figura 3. 43: Caso D. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,31 s).....	78
Figura 3. 44: Caso D. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,39 s).....	78
Figura 3. 45: Caso D. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,48 s).....	78

Figura 3. 46: Caso D. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,56 s).....	78
Figura 3. 47: Caso D. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,63 s).....	78
Figura 3. 48: Caso D. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,71 s).....	78
Figura 3. 49: Caso D. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,79 s).....	78
Figura 3. 50: Caso D. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,82 s).....	78
Figura 3. 51: Velocidad de avance del pistón para $U_{max} = 0,88$ variación 1	79
Figura 3. 52: Caso E. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,08 s)	80
Figura 3. 53: Caso E. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,18 s)	80
Figura 3. 54: Caso E. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,28 s)	80
Figura 3. 55: Caso E. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,39 s)	80
Figura 3. 56: Caso E. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,49 s)	80
Figura 3. 57: Caso E. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,59 s)	80
Figura 3. 58: Caso E. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,69 s)	80
Figura 3. 59: Caso E. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,79 s)	80
Figura 3. 60: Caso E. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,89 s)	80
Figura 3. 61: Caso E. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,95 s)	80
Figura 3. 62: Velocidad de avance del pistón para $U_{max} = 0,88$ variación 2	81
Figura 3. 63: Caso F. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,08 s)	82
Figura 3. 64: Caso F. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,17 s)	82
Figura 3. 65: Caso F. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,26 s)	82
Figura 3. 66: Caso F. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,35 s)	82
Figura 3. 67: Caso F. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,44 s)	82
Figura 3. 68: Caso F. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,53 s)	82
Figura 3. 69: Caso F. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,62 s)	82
Figura 3. 70: Caso F. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,71 s)	82
Figura 3. 71: Caso F. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,80 s)	82
Figura 3. 72: Caso F. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,88 s)	82
Figura 3. 73: Velocidad de avance del pistón para $U_{max} = 1$	83
Figura 3. 74: Caso G. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,16 s).....	84
Figura 3. 75: Caso G. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,24 s).....	84
Figura 3. 76: Caso G. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,32 s).....	84
Figura 3. 77: Caso G. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,40 s).....	84
Figura 3. 78: Caso G. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,49 s).....	84
Figura 3. 79: Caso G. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,57 s).....	84
Figura 3. 80: Caso G. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,64 s).....	84
Figura 3. 81: Caso G. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,72 s).....	84
Figura 3. 82: Caso G. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,79 s).....	84
Figura 3. 83: Caso G. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,85 s).....	84

CAPÍTULO 4

Figura 4. 1: Geometría del molde 1	88
Figura 4. 2: Geometría del molde 2	89
Figura 4. 3: Geometría del molde 3	89
Figura 4. 4: Geometría del molde 1	91
Figura 4. 5: Errores y nivel residual de la simulación caso A.....	92
Figura 4. 6: Número de iteraciones durante la simulación caso A.	92
Figura 4. 7: Evolución en la distribución del flujo en el caso A	93
Figura 4. 8: Distribución energética caso A	94
Figura 4. 9: Fracción de solidificación caso A.	94
Figura 4. 10: Evolución en la distribución de la temperatura en el caso A.....	95
Figura 4. 11: Errores y nivel residual de la simulación caso B.	97
Figura 4. 12: Número de iteraciones durante la simulación caso B.	97
Figura 4. 13: Evolución en la distribución del flujo en el caso B.....	98
Figura 4. 14: Distribución energética caso B.	99
Figura 4. 15: Fracción de solidificación caso B.	99
Figura 4. 16: Evolución en la distribución de la temperatura en el caso B.	100
Figura 4. 17: Errores y nivel residual de la simulación caso C.	102
Figura 4. 18: Número de iteraciones durante la simulación caso C.	102
Figura 4. 19: Evolución en la distribución del flujo en el caso C.....	103
Figura 4. 20: Distribución energética caso C.	104
Figura 4. 21: Fracción de solidificación caso C.	104
Figura 4. 22: Evolución en la distribución de la temperatura en el caso C.	105
Figura 4. 23: Geometría del molde 2	107
Figura 4. 24: Errores y nivel residual de la simulación caso D.	108
Figura 4. 25: Número de iteraciones durante la simulación caso D.	108
Figura 4. 26: Evolución en la distribución del flujo en el caso D.	109
Figura 4. 27: Distribución energética caso D.	110
Figura 4. 28: Fracción de solidificación caso D.	110
Figura 4. 29: Evolución en la distribución de la temperatura en el caso D.....	111
Figura 4. 30: Errores y nivel residual de la simulación caso E.	113
Figura 4. 31: Número de iteraciones durante la simulación caso E.....	113
Figura 4. 32: Evolución en la distribución del flujo en el caso E.....	114
Figura 4. 33: Distribución energética caso E.....	115
Figura 4. 34: Fracción de solidificación caso E.....	115
Figura 4. 35: Evolución en la distribución de la temperatura en el caso E.	116
Figura 4. 36: Errores y nivel residual de la simulación caso F.....	118
Figura 4. 37: Número de iteraciones durante la simulación caso F.....	118

Figura 4. 38: Evolución en la distribución del flujo en el caso F.	119
Figura 4. 39: Distribución energética caso F.	120
Figura 4. 40: Fracción de solidificación caso F.	120
Figura 4. 41: Evolución en la distribución de la temperatura en el caso F.	121
Figura 4. 42: Geometría del molde 3.	123
Figura 4. 43: Errores y nivel residual de la simulación caso G.	124
Figura 4. 44: Número de iteraciones durante la simulación caso G.	124
Figura 4. 45: Evolución en la distribución del flujo en el caso G.	125
Figura 4. 46: Distribución energética caso G.	126
Figura 4. 47: Fracción de solidificación caso G.	126
Figura 4. 48: Evolución en la distribución de la temperatura en el caso G.	127
Figura 4. 49: Errores y nivel residual de la simulación caso H.	129
Figura 4. 50: Número de iteraciones durante la simulación caso H.	129
Figura 4. 51: Evolución en la distribución del flujo en el caso H.	130
Figura 4. 52: Distribución energética caso H.	131
Figura 4. 53: Fracción de solidificación caso H.	131
Figura 4. 54: Evolución en la distribución de la temperatura en el caso H.	132
Figura 4. 55: Errores y nivel residual de la simulación caso I	134
Figura 4. 56: Número de iteraciones durante la simulación caso I.	134
Figura 4. 57: Evolución en la distribución del flujo en el caso I.	135
Figura 4. 58: Distribución energética caso I.	136
Figura 4. 59: Fracción de solidificación caso I.	136
Figura 4. 60: Evolución en la distribución de la temperatura en el caso I.	137
Figura 4. 61: Estado final de la pieza según las diferentes simulaciones.	139
Figura 4. 62: Evolución de la solidificación.	142
Figura 4. 63: Distribución de la solidificación.	143

Índice de tablas

Tabla 3. 1 Parámetros considerados en la ley óptima de llenado de la cámara de inyección	69
Tabla 3. 2: Posición, Velocidad y Aceleración del pistón para $U_{max} = 0,25$	71
Tabla 3. 3: Posición, Velocidad y Aceleración del pistón para $U_{max} = 0,42$	73
Tabla 3. 4: Posición, Velocidad y Aceleración del pistón para $U_{max} = 0,62$	75
Tabla 3. 5: Posición, Velocidad y Aceleración del pistón para $U_{max} = 0,88$	77
Tabla 3. 6: Posición, Velocidad y Aceleración del pistón para $U_{max} = 0,88$ variación 1	79
Tabla 3. 7: Posición, Velocidad y Aceleración del pistón para $U_{max} = 0,88$ variación 2	81
Tabla 3. 8: Posición, Velocidad y Aceleración del pistón para $U_{max} = 1$	83
Tabla 3. 9: Relación de velocidades de avance del pistón para diferentes U_{max}	85
Tabla 4. 1 Tipos de molde – velocidad de llenado.	90
Tabla 4. 2 Comparativa del estado final de la pieza.	140

Capítulo 1

Introducción

Los procesos de fundición se sitúan entre los procesos de fabricación más antiguos que se conocen (se tiene constancia de su utilización desde el año 4000 a.C. para fabricar piezas de ornamentación, puntas de flechas, etc.). Los procesos de fundición de metales consisten básicamente en la introducción de un metal fundido en el interior de un molde y la posterior solidificación del metal reproduciendo la geometría de la superficie interna del molde. Estos procesos de fabricación son, en general, capaces de reproducir geometrías muy complejas, permitiendo también generar cavidades o superficies internas en las piezas de cierta complejidad. Por otra parte, tienen una gran versatilidad, permitiendo fabricar a bajo coste piezas de una gran diversidad de tamaños y formas, que no puede conseguirse con otros procesos de fabricación, y procesar determinados materiales de difícil tratamiento mediante procesos de otros tipos.

Son diversas las tecnologías que hasta la fecha se han desarrollado en el ámbito de los procesos de fundición de metales. Aunque obviamente cada tecnología tiene sus propias características, aplicaciones, ventajas y limitaciones para garantizar un adecuado nivel de calidad en el producto, existen aspectos comunes a todas ellas cuyo conocimiento es indispensable para controlar el proceso. Estos aspectos son los relativos al flujo del metal fundido, la solidificación y la transferencia de calor, que a su vez están influenciados por otros factores tales como el material y el diseño del molde, el material de la pieza que se va a fabricar o la máquina empleada.

1.1. Tecnologías de fundición

Se puede realizar una primera clasificación de las tecnologías de fundición en función del tipo de molde que utilizan, distinguiendo de este modo entre fundición en molde desechable y en molde permanente. Así, los moldes denominados desechables se construyen con arena, yeso, cerámicas o materiales similares y deben romperse o disgregarse para facilitar la evacuación de la pieza solidificada. Mientras que los moldes denominados permanentes son construidos con materiales como el acero o el grafito que mantienen sus propiedades a altas temperaturas por lo que se pueden utilizar repetidamente para obtener un gran número de piezas. En sus orígenes, la fundición de metales se realizaba en moldes desechables, implicando esto, entre otros aspectos, una mayor lentitud en el proceso de fabricación de la pieza.

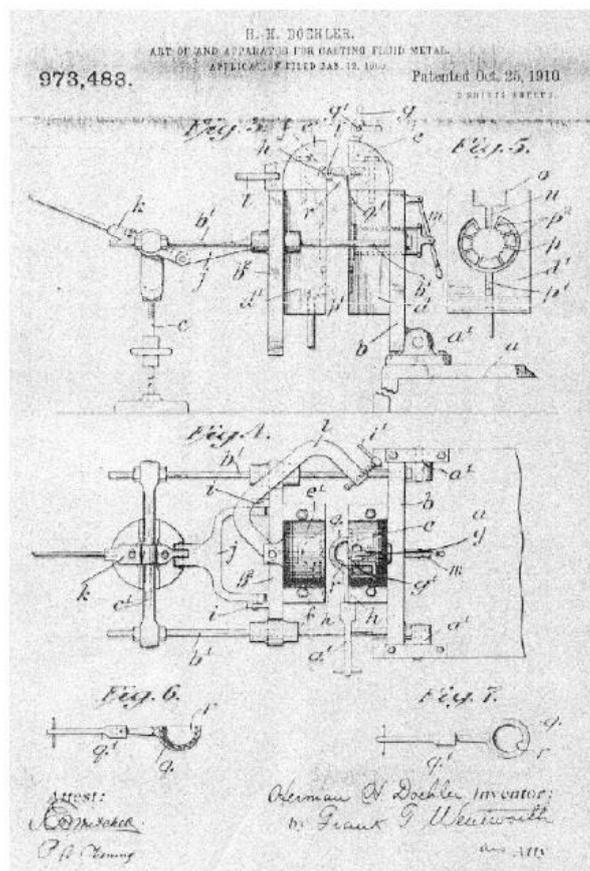


Figura 1. 1: Esquemas sobre una máquina de fundición por inyección patentada por H.H. Doehler en 1910

Es a principios del siglo XX cuando se comienzan a desarrollar nuevas tecnologías en molde permanente que permiten introducir a gran velocidad el metal líquido en el molde metálico reduciendo aún más los tiempos de producción. En 1910, H.H. Doehler desarrolló la primera patente [25] donde contempla el desarrollo de una

máquina de fundición por inyección a presión (en adelante máquina FIAP) para la producción de componentes metálicos en grandes lotes (véase la Fig. 1.1). Dentro de estos procesos de fundición a presión han cobrado una especial importancia los denominados procesos de fundición por inyección a alta presión caracterizados por ser capaces de producir piezas de diferentes tamaños y formas, con espesores de pared que pueden llegar a alcanzar valores mínimos del orden de 1 o 2 mm cuando se usan aleaciones de aluminio. El elevado coste del equipo necesario en estos procesos, en especial el de los moldes, que puede llegar a suponer aproximadamente el 10% del coste total de producción, hace que estos procesos estén recomendados únicamente para grandes volúmenes de producción. Los altos ritmos de producción junto con la creciente automatización aplicable a los sistemas empleados en estos procesos (alimentación, inyección, manipulación o engrase entre otros), permiten conseguir unos bajos costes unitarios de producción. Los materiales más empleados para fabricar piezas mediante estos procesos abarcan desde las aleaciones de bajo y medio punto de fusión, como las de estaño, plomo, zinc, aluminio o magnesio, hasta incluso aleaciones de hierro, tales como los aceros inoxidables.

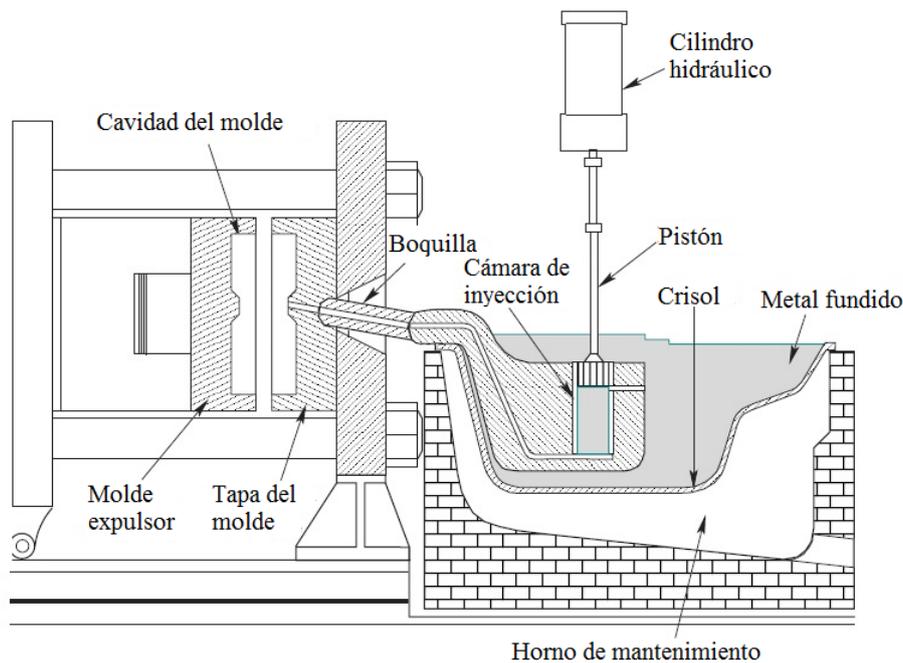


Figura 1. 2: Esquema de una máquina de fundición por inyección a alta presión con cámara caliente (basado en Kalpakjian [56])

Para obtener piezas de aleaciones de bajo punto de fusión suelen emplearse máquinas de cámara caliente, en las que el horno forma parte del sistema de inyección, quedando la cámara de inyección rodeada por el metal fundido. En la Fig. 1.2 se muestra un esquema típico de una máquina de inyección con cámara caliente. Cabe destacar que estas máquinas no pueden ser utilizadas para fabricar piezas con materiales

cuyo punto de fusión sea demasiado elevado, por ejemplo aleaciones de aluminio, cobre o magnesio, ya que los elementos férricos que componen el sistema de inyección se deterioran rápidamente al estar en contacto con estas aleaciones fundidas a altas temperaturas. En estos casos se pueden utilizar máquinas de fundición a baja presión (Fig. 1.3) en las que el metal fundido es inyectado en el molde mediante la presión de un gas o es succionado ejerciendo vacío en la parte superior del molde, lo que permite eliminar los gases que contiene el molde antes de la inyección y proporcionar piezas con menores niveles de porosidad. Con estos procesos a baja presión se pueden fabricar incluso piezas de acero.

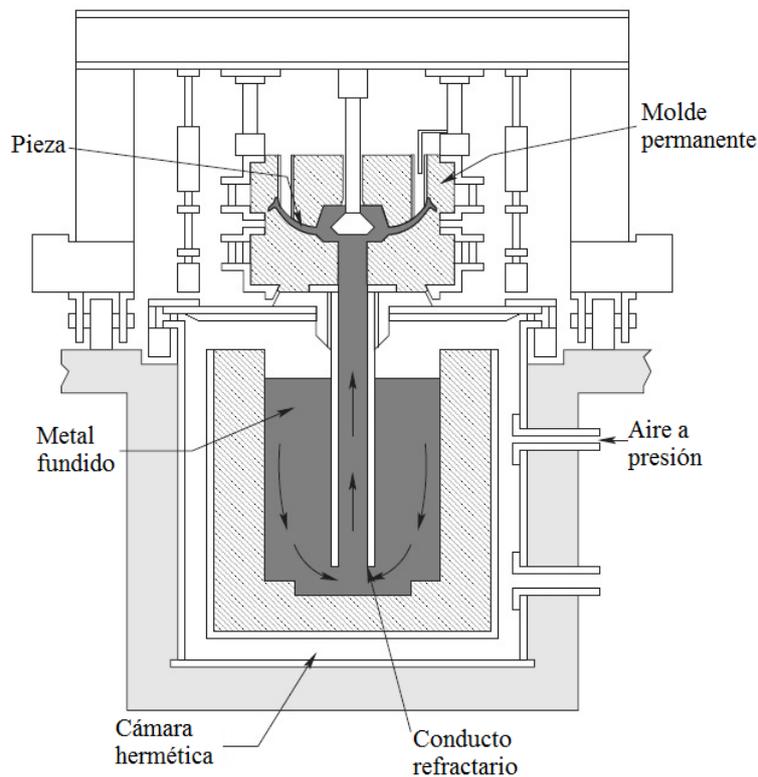


Figura 1. 3: Esquema de una máquina de fundición por inyección a baja presión (basado en Kalpakjian [56]).

Por otro lado se encuentran las máquinas de inyección con cámara fría. En estas, la fusión del metal se realiza de forma aislada del proceso de inyección. De este modo, la fusión se realiza en un horno independiente, y posteriormente es necesario verter el metal fundido manualmente en la cámara de inyección, utilizando habitualmente una cuchara. Esta fusión en horno independiente permite fabricar piezas con materiales de mayor punto de fusión que los que permiten las máquinas con cámara caliente, ya que se reduce el tiempo de contacto entre los elementos férricos que componen el sistema de inyección y la aleación fundida a alta temperatura, y se evita así el deterioro de los mismos. Este tipo de máquinas pueden presentar la cámara de inyección en posición vertical u horizontal. Las máquinas con cámara horizontal permiten ejercer presiones

más altas sobre el metal y conseguir tiempos de fabricación menores que las máquinas con cámara vertical. Debido a las ventajas comentadas, en la actualidad se están empleando, cada vez más, máquinas con cámara fría horizontal, en las que la fusión del metal se realiza fuera del sistema de inyección. En la Fig. 1.4. se muestra un esquema de una máquina con cámara fría horizontal.

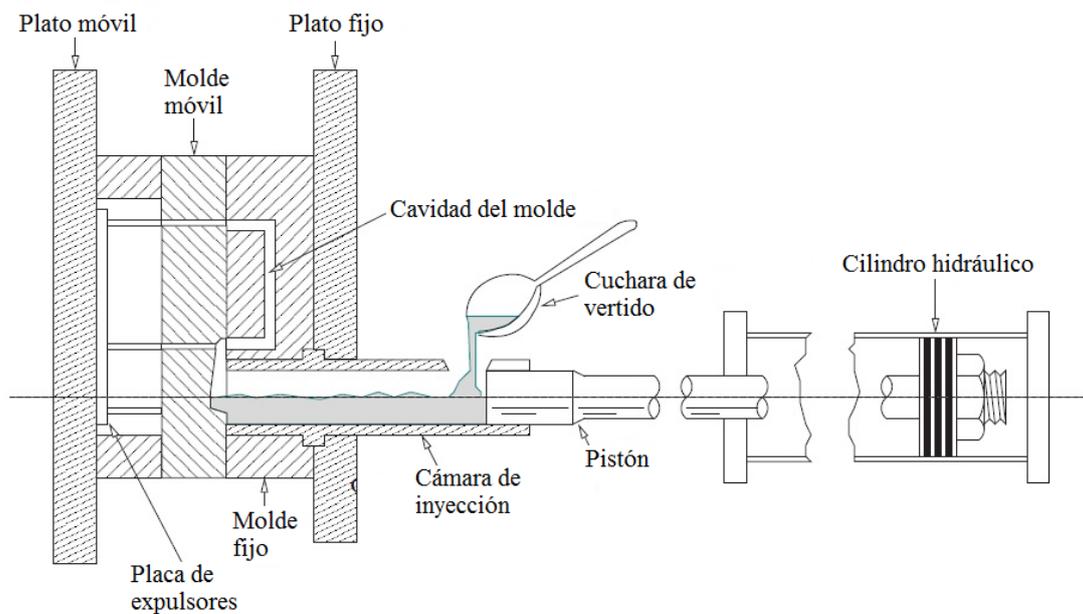


Figura 1. 4: Esquema de una máquina de fundición por inyección a alta presión con cámara fría horizontal

Frente a las ventajas mencionadas, los problemas más importantes en los procesos de fundición suelen ser la formación de porosidad en las piezas fabricadas, que será discutido con mayor detalle en lo que sigue, y la aparición de segregaciones durante la solidificación de aleaciones metálicas. Las segregaciones, o zonas de mayor concentración de elementos aleantes, suponen discontinuidades en la estructura de la pieza fundida que deben ser evitadas.

1.2. Formación de porosidad en procesos de fundición a presión

Un problema muy difícil de evitar en los procesos de fundición por inyección a presión es el debido a la aparición de niveles elevados de porosidad en las piezas. En piezas con exigencias de funcionamiento poco severas, la disminución de la calidad por porosidad se ve compensada por las grandes ventajas de estos procesos. Sin embargo, cuando los requerimientos de funcionamiento son mayores, la reducción a un límite admisible del nivel de porosidad es un objetivo esencial que requiere la utilización de

tecnología compleja y el conocimiento y control de los factores que determinan el nivel de porosidad de las piezas fabricadas.

En función de la causa básica que provoca la porosidad en procesos de fundición, ésta se puede dividir en dos categorías principales: porosidad por contracción debida a la resistencia a la alimentación líquida que se presenta en las zonas en solidificación para compensar la contracción volumétrica que experimenta el metal al solidificarse, y la porosidad por atrapamiento de gas/aire debida a la existencia de gases disueltos y atrapados en el metal fundido durante el proceso de fabricación que quedan ocluidos en el interior del metal solidificado formando poros.

Los primeros trabajos que se realizaron para tratar de predecir la aparición de porosidad en piezas fundidas en general partieron de planteamientos basados únicamente en el estudio de fenómenos de transferencia de calor durante la solidificación del metal líquido (una revisión de dichos trabajos puede verse en la referencia [30]). De esta forma se identificaron dos de los parámetros que, frecuentemente, controlan la aparición de porosidad: el tiempo de solidificación [15] y los gradientes de temperatura durante la solidificación del metal fundido [90, 84]. En otros trabajos más recientes sobre el tema se trata de acoplar las dos causas básicas de formación de porosidad, analizando sus efectos combinados [61, 91, 114].

Sin olvidar la importancia que la porosidad por contracción tiene en los procesos de fundición por inyección a alta presión [62], cabe destacar que la porosidad por atrapamiento de gas es probablemente la que con mayor frecuencia se presenta. La formación de este tipo de porosidad se puede atribuir al menos a las siguientes causas [6]:

- Precipitación de gases durante la solidificación del metal fundido (fundamentalmente hidrógeno), reacciones químicas y gases procedentes de los lubricantes utilizados en la cámara de inyección.
- Gases que quedan atrapados en las últimas zonas que se llenan del molde tras el sellado de los vientos
- Procesos en los que el aire o gas circundante queda atrapado en la fase líquida del metal fundido debido al movimiento del metal fundido durante el proceso de colada

1.2.1. Gases procedentes de la lubricación y reacciones químicas

Lewis et al. [72] y Lindsey y Wallace [73] demostraron que los gases procedentes de la evaporación del lubricante y de las sustancias desmoldeantes no desempeñaban un papel importante en la formación de porosidad. Los resultados obtenidos de sus experimentos [73] indicaban que la fracción inicial de llenado tiene una influencia significativa en la calidad de las piezas fabricadas, pero que sin embargo la influencia del lubricante que se utiliza, entre otras razones, para evitar que el metal de la pieza se sude a la superficie de la cavidad del molde, facilitar el desplazamiento de las partes móviles del molde o reducir el desgaste del pistón y de la cámara de inyección, era muy escasa. En lo que respecta a la precipitación de gases (inicialmente disueltos en el metal fundido) durante la solidificación del metal, tampoco son de excesiva importancia, a pesar de las diferencias entre la solubilidad de algunos de estos gases (principalmente del hidrógeno en el caso de aleaciones de aluminio) en el metal fundido y en el metal sólido [2]. La cantidad de hidrógeno liberado y atrapado durante la solidificación, es por tanto, muy inferior a la del gas que puede quedar atrapado por otros mecanismos. Por otro lado, y en cuanto a las reacciones químicas que pueden tener lugar, la más significativa se produce entre el oxígeno y el metal líquido. En esta reacción el oxígeno se reduce y la masa de gas que tiene que evacuarse del molde disminuye. Esta reacción no es instantánea, sino que debido a la resistencia a la transferencia de masa en la fase gaseosa, se requiere un tiempo para que se inicie. Únicamente reacciona parte del oxígeno, y la magnitud que reacciona depende del parámetro adimensional que representa la relación entre la velocidad de reacción y la resistencia del oxígeno a pasar a través de la interfase. De este modo, se puede suponer que las reacciones de oxidación y liberación de hidrógeno se cancelan la una a la otra [6].

1.2.2. Gases no evacuados por sellado o dimensionamiento insuficiente de los sistemas de evacuación de aire

En las máquinas de fundición a presión con cámara fría horizontal, una vez cerrado el molde, la cámara de inyección se llena parcialmente con un volumen de metal fundido (fracción inicial de llenado), comenzando el proceso de inyección. Durante este proceso, el pistón se desplaza a lo largo de la longitud de la cámara (carrera del pistón), que normalmente es fija, empujando al metal fluido en la cámara hasta lograr que éste se introduzca en el molde y complete el llenado del mismo. El aire inicial que ocupa la cavidad del molde y la parte de la cámara de inyección que no está ocupada por el metal fundido, debe ser evacuado para evitar que quede atrapado en la

pieza en forma de poros. Normalmente, en estos procesos el aire es evacuado desde la cavidad del molde hacia el medio ambiente a través de unos conductos de pequeña sección llamados vientos. Para que la evacuación sea óptima, los vientos deben situarse en las zonas del molde que se llenan en último lugar, lo cual es imposible en numerosas ocasiones, y hace que, en determinadas circunstancias, pueda existir aire no evacuado que quedará atrapado y contribuirá a la formación de poros.

Es importante indicar que el diseño y la localización de los vientos debe, por un lado, reducir la masa de gas residual en la cavidad del molde al final del proceso de inyección, y por otro, minimizar los trabajos de acabado posteriores y asegurar que el metal fundido se solidifique dentro del molde. La importancia de disponer de un sistema de evacuación de aire apropiado es mayor conforme el tamaño de la pieza aumenta. Con frecuencia, las piezas pequeñas no precisan de vientos, ya que la evacuación de aire producida a través de la superficie de unión de las partes del molde (línea de partición) suele ser suficiente. Además, en piezas relativamente grandes es habitual colocar junto a los vientos pequeños depósitos (rebosaderos) que permiten, entre otras cosas, retener elementos contaminantes como óxidos, escorias, pequeñas burbujas de aire, restos de lubricante, etc., o facilitar una mayor evacuación de calor en zonas donde pueda ser necesario. Barton [9] recomienda usar varios depósitos de este tipo, de pequeño tamaño, convenientemente situados en el molde. En la práctica, los sistemas de evacuación de aire están formados por varios vientos de sección rectangular y pequeño espesor para evitar que el metal fundido pueda ser expulsado fuera de la cavidad del molde. Los vientos, que como se ha dicho deben situarse en lugares estratégicos para facilitar la completa evacuación del aire, se suelen mecanizar a lo largo de la línea de partición del molde.

Los primeros estudios realizados sobre la localización de los vientos fueron realizados con un enfoque claramente experimental por Peikert [89] y Varaprasatham [109]. Actualmente, y gracias al desarrollo de los ordenadores y los programas de simulación numérica para estos procesos, se están utilizando estas herramientas ampliamente para determinar la ubicación de los vientos más idónea. Véase por ejemplo Minale et al. [80] y Hu et al. [49]. Aunque la velocidad exponencial de crecimiento de la potencia de cálculo y la aparición de técnicas numéricas para la simulación de estos procesos en estos últimos años es evidente, la amplia variedad de geometrías que pueden tener las piezas fabricadas con estos procesos dificultan el establecimiento de criterios claros para localización de estos vientos en función de las variables del proceso. Esta localización óptima de los vientos está también íntimamente relacionada con el tipo de patrón de flujo que adopta el fluido durante el llenado de la cavidad del

molde, y que se abordará en la sección 1.2.3, así como el dimensionamiento de los vientos abordado en la siguiente subsección.

1.2.2.1. Área de la sección transversal de los vientos

Algunos trabajos experimentales, como los de Draper [27] y Luis y Draper [77], para aleaciones de bajo punto de fusión, o los de Lindsey y Wallace [73], para aleaciones de aluminio, demuestran que los niveles de porosidad de las piezas fabricadas disminuyen hasta un límite a medida que el área del viento (o el tiempo de llenado) aumenta hacia un valor crítico. Estos resultados demuestran que la correcta determinación de este valor crítico del área de los vientos puede ser crucial para reducir los niveles de porosidad. Rearwin [95] sugiere que, para condiciones de evacuación atmosférica, el área de los vientos debe ser aproximadamente el 50% del área de la entrada hacia la cavidad del molde. Por otra parte, se han desarrollado diversos modelos teóricos para determinar el valor crítico del área del viento por encima del cual los niveles de porosidad no experimentan una reducción adicional apreciable. La mayoría de estos modelos no tienen en cuenta la resistencia que el viento ofrece al flujo de aire, como en los propuestos por [98] o Veinik [111], quienes además consideran que la presión en la cavidad del molde es constante.

Recientemente, Bar-Meir et al. [7, 18] propusieron un modelo, también quasi-estacionario, en el que se supone que el gas en la cavidad del molde y en la cámara de inyección evoluciona isentrópicamente durante el llenado del molde, y se trata el flujo de gas a través de los vientos como un flujo de Fanno. En los sistemas de evacuación atmosférica, en los que los vientos evacúan el aire directamente al ambiente, la presión del gas en la cavidad aumenta continuamente y en ocasiones el flujo puede llegar al bloqueo sónico. El análisis llevado a cabo por estos autores, para sistemas de evacuación atmosférica, muestra que existe un área del viento crítica, que depende de la geometría y del tiempo de llenado, por debajo de la cual la evacuación de aire es pobre y por encima de la cual la resistencia al flujo de gas es mínima. Para sistemas de evacuación al vacío, el modelo propuesto por Bar-Meir et al. [7] supone que el flujo está bloqueado a lo largo de todo el proceso de llenado, una hipótesis que está más justificada cuando la presión de vacío es suficientemente pequeña.

Todos estos modelos suponen que el proceso de evacuación de aire es quasi-estacionario. Sin embargo, este proceso de evacuación de aire tan rápido puede producir efectos no estacionarios muy importantes. En el trabajo publicado por Hernández et al. [42] se analizó y destacó la influencia de los efectos no estacionarios en la evacuación de aire a través de los vientos en procesos de llenado relativamente rápidos (fundición

por inyección a alta presión), proponiendo un modelo que consideraba el flujo de aire como unidimensional y adiabático, y que retiene los efectos de fricción. El estudio se llevó a cabo para vientos de sección constante.

1.2.3. Mecanismos de atrapamiento de aire

En las máquinas FIAP con cámara fría horizontal, una vez aplicado un fluido desmoldeante sobre las paredes del molde con el fin de evitar en lo posible la adherencia entre la pieza y el molde, cerrado el molde y configurados los parámetros del proceso, comienza el proceso de inyección. Como se indicó en la sección 1.2.2, el aire inicialmente contenido en el molde y en la cámara de inyección debe ser desalojado de la cámara y el molde durante el proceso de inyección, fundamentalmente a través de los vientos. Con frecuencia el volumen de aire en la cámara de inyección es mayor que el del molde (fracciones de llenado inferiores al 50%), debiendo pasar éste al molde para poder ser desalojado. Sin embargo, durante la inyección, el aire que inicialmente existe en el molde y en la cámara puede quedar atrapado en el metal fundido, generalmente formando pequeñas burbujas que pueden dar lugar a porosidad en la pieza cuando el metal solidifica en el molde. Este atrapamiento no es debido a un sellado prematuro del viento (deficiente localización del viento) o a una insuficiente área de evacuación del aire (mal diseño), sino que es debido a una ingestión del aire por la propia evolución de la superficie libre del fluido. Los procesos de mezcla de aire y metal fundido, entendiendo éstos como fenómenos de atrapamiento de aire que se puede producir por la evolución de la superficie libre del fluido, se pueden dividir según la localización en la que se producen: atrapamiento de aire en la cámara de inyección o en la cavidad principal del molde.

1.2.3.1. Etapas de inyección en máquinas con cámara fría horizontal

Para minimizar este atrapamiento de aire y sus efectos, el proceso de inyección de metal fundido se suele dividir en una etapa lenta (Fig. 1.5(a)), en la que el pistón empuja al metal fundido hasta que la cámara de inyección esté completamente llena, y una etapa rápida (Fig. 1.5(b)), en la que el pistón empuja al metal a gran velocidad para llenar la cavidad del molde. Una vez que el molde está completamente lleno, se eleva la presión que el pistón ejerce sobre el metal y se mantiene durante la solidificación de la pieza (Fig. 1.5(c)). Cada etapa, por tanto, se caracteriza por la velocidad del pistón que empuja al metal desde la cámara de inyección horizontal y por la presión que el sistema de inyección ejerce sobre el metal.

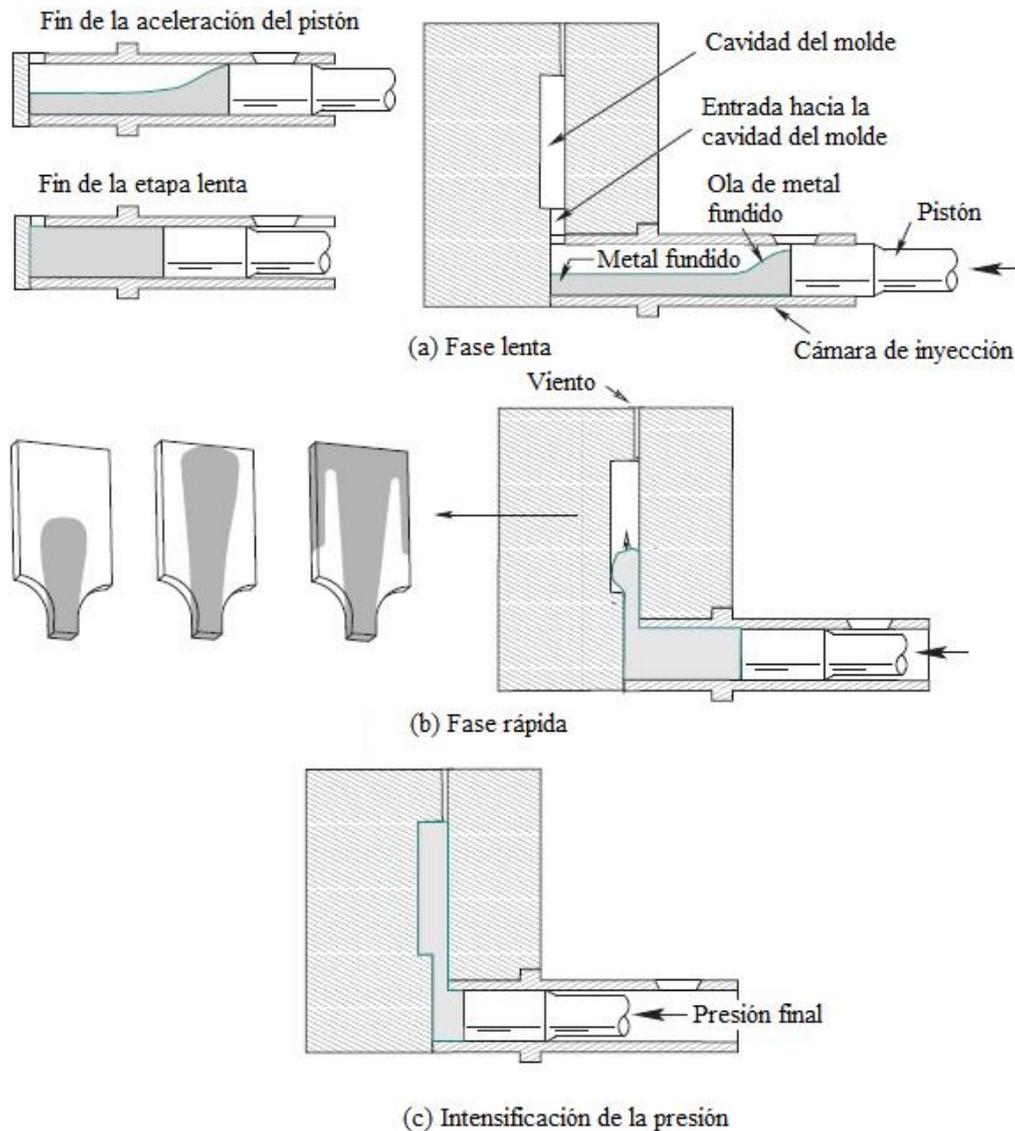


Figura 1. 5: Fases de la etapa de inyección en el proceso de fundición por inyección a alta presión en cámara horizontal: (a) Etapa lenta, (b) Etapa rápida, (c) Intensificación de la presión.

Fase lenta. Para minimizar la cantidad de aire atrapado durante el movimiento del fluido en la cámara de inyección (primera fase o fase lenta) el pistón se acelera inicialmente para hacer que la ola de metal fundido formada junto a la cara del pistón se eleve hasta cubrir toda la sección de la cámara de inyección, manteniéndose a continuación la velocidad constante hasta que el metal fundido llene completamente la cámara de inyección. La incorrecta selección de la ley de movimiento del pistón puede provocar el impacto de la ola de metal fundido contra el techo de la cámara causando su rotura y haciendo que el aire pueda ser atrapado (Fig. 1.6(a)) o que la ola se refleje contra la pared final de la cámara y atrape aire frente al pistón y a lo largo del techo de la cámara (Fig. 1.6(b)). Se pueden encontrar diferentes estudios tanto experimentales como numéricos relativos a la ley de aceleración que debe seguir el pistón y la velocidad máxima a alcanzar para conseguir minimizar el aire atrapado en la cámara.

Entre los trabajos teóricos y numéricos que han contribuido a un mejor entendimiento del comportamiento del metal fundido en la cámara de inyección cabe mencionar los trabajos de Thome y Brevick [106, 107], Tszeng y Chu [108], López et al. [76, 75], Kuo y Hwang [65], Faura et al. [29] y Hernández et al. [43]. Entre los estudios experimentales relacionados con la fase lenta cabe destacar los trabajos de Lindsey y Wallace [73], Karni [58], Duran et al. [28], Brevick et al. [12] y Zamora et al. [119].

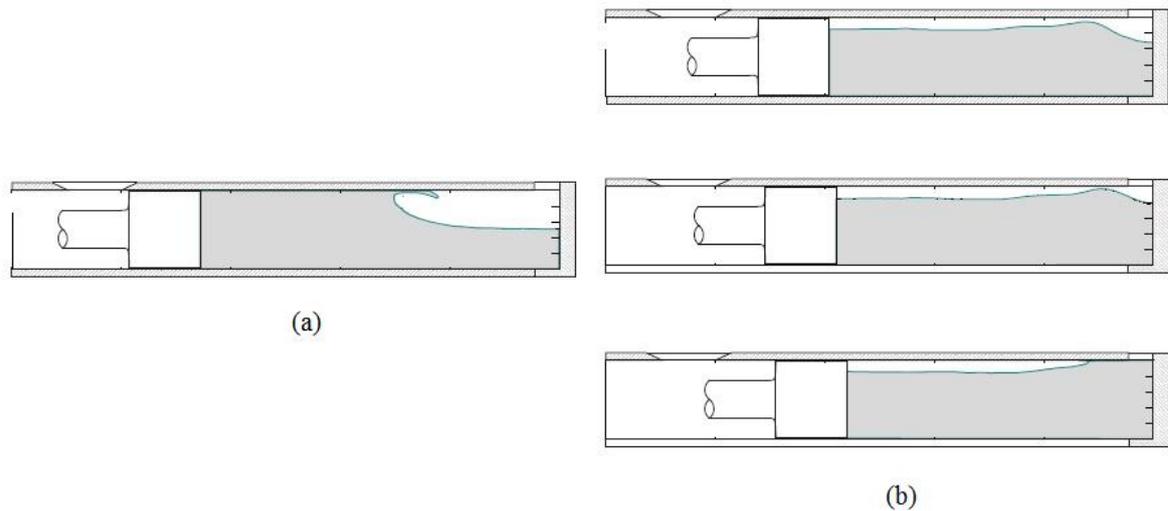


Figura 1. 6: Condiciones que tienden a incrementar el atrapamiento de aire: (a) Velocidad del pistón superior a la velocidad crítica; (b) velocidad del pistón inferior a la velocidad crítica.

Una parte importante de la porosidad en las piezas obtenidas por fundición a presión se debe a los fenómenos de atrapamiento de aire que se producen durante la primera etapa del proceso de inyección, y éstos dependen principalmente de la ley de movimiento del pistón utilizada y los parámetros a ella asociados (velocidad crítica, etc.). Tradicionalmente la configuración de los parámetros de inyección en las máquinas de fundición por inyección a presión se realizaba mediante ensayos de prueba y error basados en la experiencia previa. Era común el uso de reglas de cálculo diseñadas por el fabricante de la máquina, como la mostrada en la Fig. 1.7, para la obtención de los parámetros de llenado del molde.

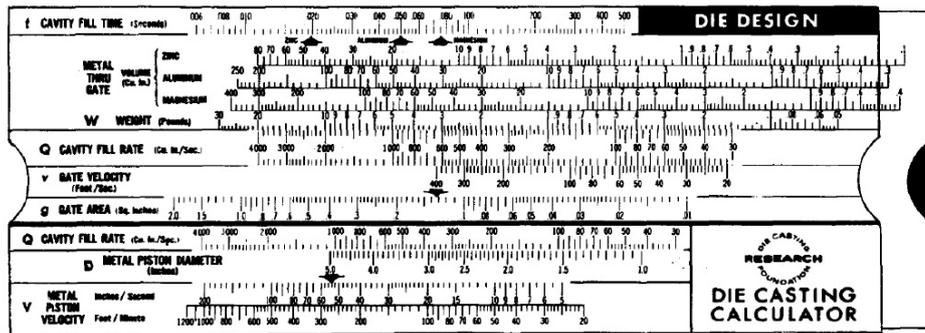


Figura 1. 7: Regla de cálculo utilizada para determinar los parámetros de llenado del molde

Las opciones de parametrización que presentan las máquinas de fundición por inyección a presión han ido creciendo conforme ha evolucionado la automatización industrial, aunque cabe destacar que hoy en día existe una gran cantidad de máquinas instaladas en las que, por ejemplo, el único parámetro a configurar en la primera etapa de inyección se reduce al establecimiento de un cierto porcentaje de apertura de válvula, lo que provocará una mayor o menor velocidad máxima del pistón durante esta etapa, siendo totalmente imposible regular la aceleración del pistón.

Las mejoras introducidas en los últimos años en dispositivos de control del movimiento del pistón durante el proceso de inyección parecen permitir la instalación en máquinas convencionales de sistemas de control de inyección en bucle cerrado incorporando servoválvulas capaces de actuar en tiempo real y asegurar una alta repetibilidad de las condiciones de inyección programadas.

Fase rápida. En lo que respecta al atrapamiento de aire que se puede producir durante el llenado del molde éste está relacionado, principalmente, con la evolución del flujo de metal fundido y la evacuación del aire contenido en el molde a través de los vientos. A su vez, la evolución del flujo de metal durante el llenado del molde se puede ver modificada por distintas variables entre las que se pueden destacar: las condiciones del flujo a la salida de la cámara de inyección, el diseño del sistema de distribución, la velocidad de inyección, la geometría de la cavidad principal del molde, la geometría y ubicación del sistema de evacuación de aire y finalmente las propiedades del metal fundido durante el llenado del molde.

En la Fig. 1.8. se ha representado el llenado de una cavidad con forma rectangular y posición vertical para diferentes velocidades de entrada del metal. Obsérvese que, según cómo se produzca el llenado y dónde se ubique el sistema de evacuación de aire, se podrían producir bolsas de aire que quedaría atrapado formando porosidad. En la Fig. 1.8(a), por ejemplo, se observa un frente de llenado uniforme. En este tipo de flujo, característico de velocidades de metal fundido lentas, la localización

de los vientos en los puntos más alejados de la puerta de entrada podría eliminar el atrapamiento de gas. Aunque esta forma de llenado se produce en algunas tecnologías de fundición, en fundición a presión ocurre solo bajo condiciones muy concretas. En procesos de fundición a presión, la transición del metal fundido de la cámara de inyección al molde, la geometría del sistema de distribución y del propio molde y las velocidades empleadas suelen provocar la rotura del frente de metal líquido durante el llenado. A menudo, el frente de metal converge y rodea bolsas de aire, provocando el atrapamiento de gases en la pieza que se está fabricando. Este mecanismo de atrapamiento de aire se muestra en la Fig. 1.8(b). En tales circunstancias, incluso con la ubicación adecuada de los vientos, el atrapamiento de aire sería inevitable. Cuando el metal líquido viaja a grandes velocidades a través de puertas muy pequeñas, el frente de metal puede llegar a descomponerse, dando lugar a una atomización del fluido (véase la Fig. 1.8(c)). En estas condiciones el metal se convierte, en realidad, en un aerosol rociado en la cavidad principal, dando lugar a otro tipo de mecanismo de atrapamiento de aire.

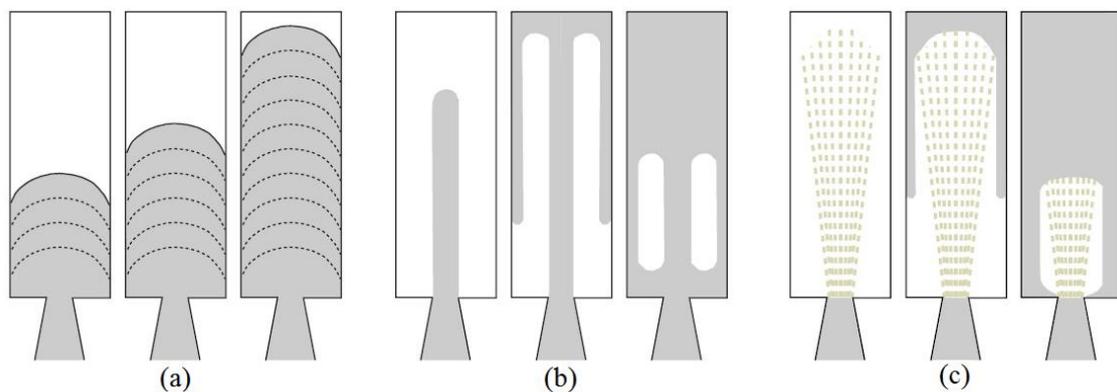


Figura 1. 8: Ilustración gráfica del llenado de un molde: (a) Frente de metal plano, (b) frente de metal no plano y (c) flujo de metal atomizado (basado en Vinarcik) [113])

Intensificación de la presión. Dada la complejidad que presenta el estudio de los métodos y condiciones de operación que permitan disminuir los niveles de aire atrapado, la solución que tradicionalmente se ha utilizado en la práctica para resolver algunos de los efectos y problemas que presenta la porosidad en los procesos fundición a alta presión consiste básicamente en la utilización de una tercera etapa en el proceso de inyección (etapa de intensificación), durante la cual se aplica una elevada presión (presión de multiplicación) sobre el metal mientras se solidifica con el fin de reducir el volumen de las burbujas de gas atrapadas en el metal fundido (véase la Fig. 1.9). Esta técnica, evidentemente, no disminuye la cantidad de gas o aire atrapado, sino que disminuye el tamaño de los poros, reduciendo la porosidad y aumentando la presión del aire ocluido en alguno de estos poros. Existen numerosos estudios de tipo experimental

[105, 52, 57, 53] que demuestran como la porosidad medida descende conforme se incrementa el valor de la presión de multiplicación ejercida.

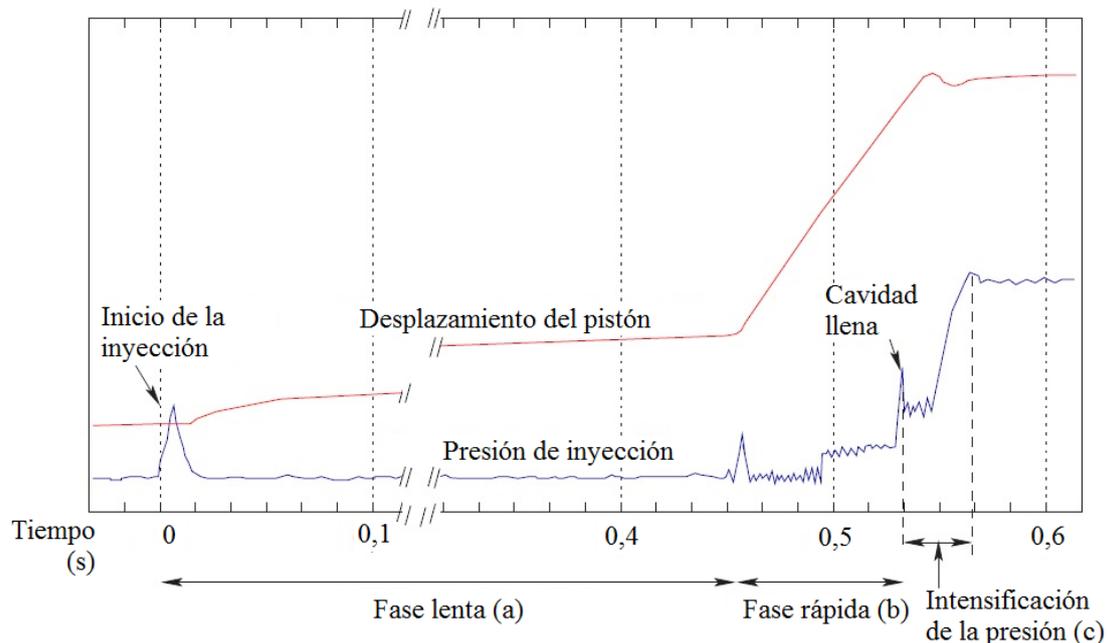


Figura 1. 9: Ejemplo de diagrama de recorrido y presión en una inyección en máquina FIAP donde se aprecian las tres etapas de inyección

Este procedimiento es eficaz debido a la relación geométrica que existe entre la presión y el tamaño de las burbujas, aunque debido a la relación exponencial que afecta al radio de la burbuja hay que tener en cuenta que a partir de un factor de aumento de la presión determinado, el efecto que tendrá sobre el tamaño de la burbuja puede ser mínimo. Por ejemplo, a temperatura constante, el aumento de la presión inicial de la burbuja a una presión 500 veces mayor provocaría que la burbuja tuviera un radio aproximadamente 8 veces menor. Por ello es necesario aplicar la presión de multiplicación con un cierto criterio ya que el uso de presiones demasiado elevadas podría acarrear otros problemas como la apertura del molde y la salida del metal por la línea de partición (“flashing”), entre otros.

Debe mencionarse que si el molde o el metal fundido no tienen una temperatura suficientemente elevada durante el proceso de inyección, o la velocidad de inyección es relativamente baja, se pueden producir solidificaciones prematuras del metal en determinadas secciones que impedirían, por un lado, el completo llenado del molde, y por otro reducir lo suficiente el volumen de las burbujas de gas atrapado.

Esta solución de reducir el tamaño de los poros comprimiendo el aire o gas atrapado en ellos no es eficaz cuando los requerimientos funcionales o de fabricación del pieza obligan a efectuar tratamientos térmicos o soldaduras sobre las piezas

fabricadas. En estos casos, el gas comprimido a presión supondrá un verdadero problema provocando la formación de “ampollas” en la superficie de la pieza o deformaciones, haciendo inviable su procesado. En esos casos es necesario recurrir a otras técnicas alternativas como la inyección al vacío, la técnica “pore-free”, el proceso “squeeze casting” o los procesos con material en estado semisólido.

Fase de transición: En este proyecto se ha definido una fase más a la que se ha denominado fase de transición y que tiene lugar entre las fases lenta y rápida del proceso de inyección. Los parámetros más importantes de esta fase son la longitud del canal de colada, el pre-llenado inicial del canal, la ley de movimiento aplicada al pistón para alcanzar la velocidad de la fase rápida, y la distribución de velocidades en el conducto de entrada al finalizar la fase lenta, cuya influencia sobre el patrón de flujo durante el llenado del molde se analizará en este proyecto. En la Fig. 1.10 se muestra de forma esquemática una máquina de fundición a presión por inyección en cámara fría horizontal, en la que se aprecian las fases lenta, rápida y de transición. En la Fig. 1.11 aparecen con más detalle las principales variables de la fase de transición que serán objeto de estudio en el presente proyecto fin de carrera.

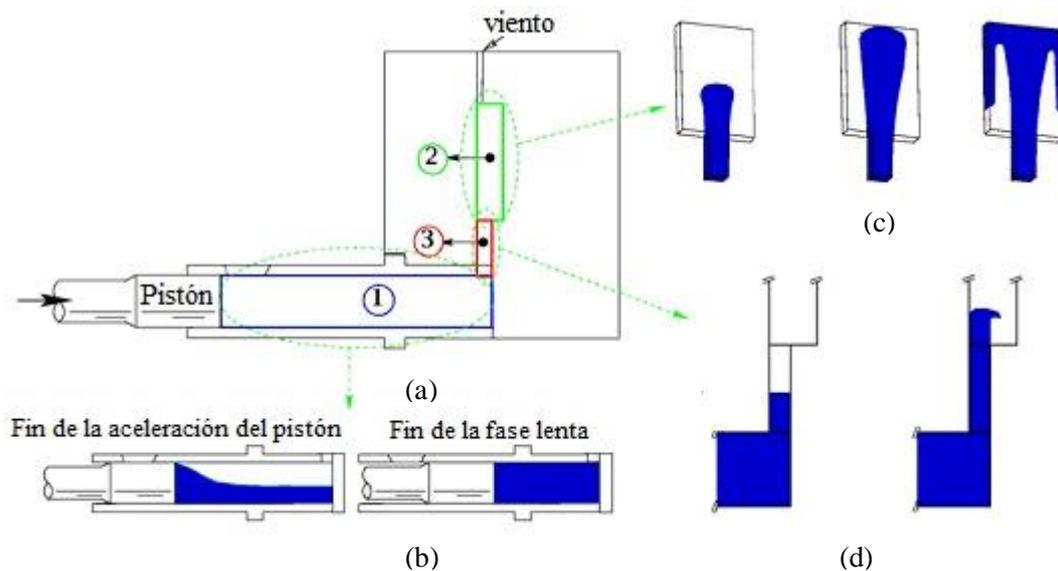


Figura 1. 10: (a) Representación esquemática de una máquina de fundición por inyección a presión: (1) cámara de inyección; (2) cavidad del molde; (3) conducto de entrada. (b) Fase lenta. (c) Fase rápida. (d) Fase de transición.

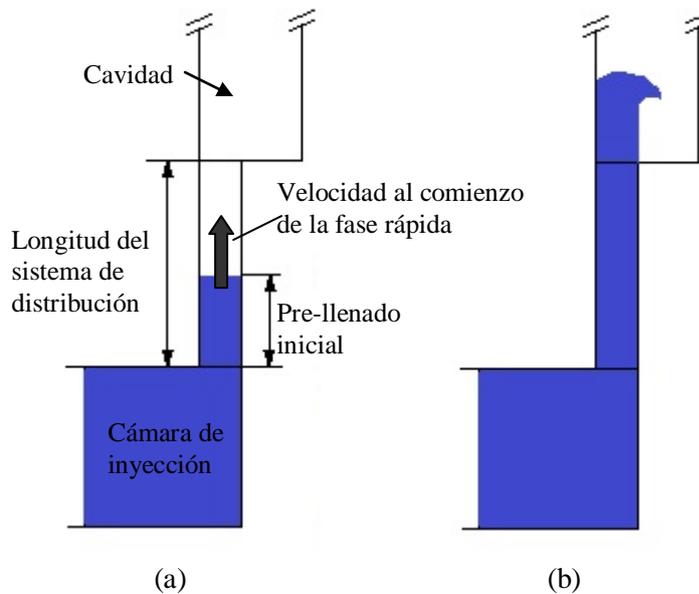


Figura 1. 11: Representación esquemática de la fase de transición del proceso de inyección. (a) Principales variables a estudiar. (b) Primeros instantes de llenado de la cavidad.

1.3. Técnicas alternativas empleadas para reducir la porosidad o minimizar sus efectos

1.3.1. Inyección al vacío

Esta técnica utiliza una bomba para extraer los gases existentes en el molde y en la cámara de inyección durante la inyección del metal fundido. Para conseguir que esta técnica sea eficiente, los vientos deben ser suficientemente grandes ya que de lo contrario el bloqueo sónico del flujo de aire a través del viento impedirá que la reducción de la presión en la cavidad del molde sea suficientemente efectiva. Desde la mitad del siglo XX se han desarrollado muchos sistemas, en especial para máquinas de fundición por inyección a alta presión en cámaras frías, para mantener la acción de la presión de vacío durante el llenado de la cavidad del molde. En la década de los sesenta la “Die Casting Research Foundation” desarrolló un sistema de vientos corrugados y refrigerados que permite la evacuación masiva de aire sin riesgo de que el metal fundido salga fuera del molde. Pocos años antes, la compañía suiza F. Hodler & Cie (Fondarex) desarrolló un sistema de vacío que en la actualidad se está utilizando en muchas máquinas de fundición a presión. Con este sistema, la acción del vacío se activa mediante una válvula que se abre después de que el pistón que empuja al metal fundido en la cámara de inyección haya cerrado el orificio de colada. El aire se evacúa a continuación hasta que la válvula se cierra por la acción de la fuerza hidráulica que el metal ejerce sobre ella. A este sistema se le conoce como “Optivac”. Para que el sistema

de vacío realice correctamente su función es conveniente sellar el molde para evitar que el aire exterior, succionado por la diferencia de presión, pueda entrar a través de la línea de partición.

Otro problema que se presenta en los sistemas de evacuación al vacío es el debido al periodo de tiempo tan pequeño en el que se produce el llenado de la cavidad del molde. Para que el aire pueda ser evacuado, en principio sería necesaria una bomba de vacío excesivamente grande y costosa que se usaría únicamente durante el periodo de inyección de metal fundido, no siendo utilizada durante el tiempo restante del ciclo productivo de una pieza. Para evitar estos inconvenientes, la bomba generalmente se conecta al viento a través de un tanque de vacío suficientemente grande, de forma que la presión permanezca prácticamente constante en éste durante el proceso de inyección. Bar-Meir et al. [7] determinaron, por ejemplo, que para que la presión en el tanque de vacío no supere el 25% de la presión atmosférica durante el llenado de la cavidad del molde, el volumen del tanque debe ser aproximadamente, como mínimo, 7 veces superior al volumen de aire que debe ser evacuado.

Aunque, como ya se ha mencionado, con los sistemas de vacío se obtienen piezas de mejor calidad que con los sistemas de evacuación convencionales, el proceso de fundición es entre un 10% y un 15% más caro.

1.3.2. “Pore free”

Existe otra técnica alternativa para minimizar la cantidad de aire atrapado en el metal fundido, llamada “pore free”, en la que, antes del llenado, se introduce un gas reactivo que tras desplazar el aire inicial del molde reaccionará con el metal líquido formando compuestos como los óxidos dispersos por todo el metal, lo que reducirá la formación de burbujas de aire atrapado. En el caso del aluminio se obtiene aproximadamente un 0,24% de óxido de aluminio, lo que no afecta a las propiedades de los productos fabricados. En principio esta técnica se puede aplicar a todo tipo de aleaciones usando diferentes gases reactivos, aunque el uso de oxígeno para fabricar piezas de aluminio es el caso más extendido y que ofrece mejores resultados.

1.3.3. “Squeeze casting”

El proceso “squeeze casting” se caracteriza por el uso de puertas de entrada de gran sección y un llenado con un frente de metal plano dentro del molde. El llenado planar permite a los gases escapar del molde, mientras los vientos permanezcan abiertos

durante la inyección del metal [113]. Además, el elevado área que tiene la sección de las puertas de entrada permite que la presión de intensificación del metal se mantenga a lo largo de la solidificación aumentando el flujo interdendrítico y minimizando la porosidad por contracción. Su implementación en fundición por inyección puede ser llevada a cabo localmente por medio de puntos de presión o globalmente por medio del pistón, controlando el llenado y la solidificación direccional. Los puntos de presión son presurizadores localizados que son activados para comprimir ciertas zonas de la pieza en que la eliminación de la porosidad es más crítica. El mantenimiento de una alta presión a lo largo del molde por medio del pistón fue introducido con el sistema ACCURAD. En esta máquina el final de la cámara de inyección está formado por dos pistones concéntricos que activan dos émbolos concéntricos. Ambos se mueven juntos durante el llenado para obtener altas velocidades de flujo. Después el pistón interno es empleado para intensificar la presión. Este concepto no fue bien aceptado por la industria debido a su complejidad y a que no contempla el atrapamiento de aire como una fuente de porosidad adicional e igualmente importante. El empleo de una cámara de inyección vertical es una solución mejorada para reducir el atrapamiento de aire. De esta forma en la cámara de inyección el aire permanece delante del metal fundido conforme es empujado hacia arriba. La turbulencia sólo se produce a muy altas velocidades, en rangos fuera de lo común en fundición por inyección. Además estas cámaras de inyección tienen una mayor relación volumen-superficie que minimiza las pérdidas de calor. Este concepto fue introducido tanto para máquinas verticales como horizontales. Las máquinas con cámara de inyección vertical son empleadas en la actualidad para piezas que requieren altas propiedades mecánicas. La filosofía de este diseño procede del sistema ACCURAD: 1) entrada de mayor sección que da lugar a una solidificación más lenta y permite una aplicación de presión por parte del pistón más prolongada, 2) velocidad de entrada baja que minimiza la turbulencia y expulsa el aire de la cavidad del molde con mayor eficiencia y 3) lubricantes especiales para el molde que reducen la transferencia de calor para hacer posible un tiempo de llenado mayor. El volumen de gas mediante “Squeeze Casting” es menor o igual que el obtenido mediante “Pore-Free”. La resistencia y ductilidad son también mejores.

1.3.4. Procesado de metales en estado semi-sólido

El conformado de metal semisólido es un proceso en el cual una mezcla de metal parcialmente sólido y parcialmente líquido es inyectado en un molde. Aunque los orígenes del procesado de metal semi-sólido se pueden remontar a más de treinta años atrás, no es hasta mediados de la década de 1990 cuando comienza a comercializarse con altos volúmenes de producción. Existen numerosas variantes del procesado de metales en estado semi-sólido. Sin embargo, todos ellos se pueden agrupar en dos

categorías según el producto resultante del proceso sea un componente final o un producto intermedio. A diferencia de los productos fabricados usando métodos tradicionales de fundición la microestructura de las piezas fabricadas usando estos procesos no es dendrítica. Durante el procesado, la estructura dendrítica se rompe y se transforma en una estructura casi esférica. Las propiedades mecánicas de la estructura esferoidal son superiores a las encontradas en piezas fundidas con microestructura dendrítica. En muchos casos, la resistencia de los productos obtenidos rivaliza con la de la forja. La aleación exhibe un comportamiento “tixotrópico”, es decir, su viscosidad se reduce al ser agitado. El procesado de metal semi-sólido en molde exhibe un flujo de metal plano debido a la elevada viscosidad del fluido combinado con elevadas áreas de la sección transversal de las puertas de entrada y bajas velocidades de inyección. Tanto el flujo de metal plano como las bajas velocidades de inyección permiten a los vientos permanecer abiertos durante más tiempo y una mejor evacuación del aire. Además, la porosidad por contracción también se reduce sustancialmente, puesto que una parte significativa del metal inyectado en el molde está ya en estado sólido.

1.4. Llenado del molde en procesos de fundición por inyección a presión

En lo concerniente a la fase rápida del proceso de inyección, el interés fundamental de los estudios realizados se ha centrado en establecer aquellos patrones de flujo que permitan minimizar la formación de porosidad por atrapamiento de aire, lo que es particularmente relevante para el control de la calidad de este tipo de piezas. Dada la gran cantidad de factores que influyen en la evolución del flujo de metal fundido durante el llenado del molde y la gran diversidad de geometrías que se pueden fabricar, es difícil encontrar en la literatura, a diferencia de la primera fase, criterios generales de diseño, tanto de los sistemas de distribución del molde como de los sistemas de evacuación de aire, o leyes de movimiento para el pistón que eviten la formación de porosidad por atrapamiento de aire. Son también escasos los trabajos que abordan, de forma general, la relación existente entre los patrones de flujo generados durante el llenado del molde y el atrapamiento de aire que pueden producir. Sí existe un cierto acuerdo en que por encima de una cierta velocidad límite se tiende a producir la atomización del flujo [78]. Algunos investigadores recomiendan que la atomización del flujo se utilice para piezas complejas y espesores delgados [10]. Hao et al. [40] centraron su atención en el estudio experimental, con agua como fluido de trabajo, de la velocidad crítica del líquido necesaria a la entrada de la cavidad para iniciar el proceso de atomización. En este mismo trabajo, los autores estiman la velocidad crítica de atomización del aluminio fundido, a partir de la del agua, empleando para ello leyes de semejanza física. Para velocidades por debajo de las necesarias para la atomización del

flujo, se han encontrado algunos trabajos que estudian el comportamiento del flujo fluido durante el llenado del molde en función de algunas variables del proceso. Por ejemplo, Smith y Wallace [102] realizaron experimentos usando agua como fluido de trabajo y metales de bajo punto de fusión para estudiar el patrón de flujo en una placa rectangular usando diferentes diseños del sistema de inyección. Lindsey y Wallace [73] estudiaron los efectos de numerosas variables, tales como el tamaño y diseño de los vientos, la lubricación del molde y del pistón y los procedimientos para la desgasificación del metal fundido, con el fin de suministrar métodos de mejora de las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas por fundición a presión. Lee et al. [68] estudiaron la influencia del espesor de la cavidad del molde sobre el patrón de flujo en fundición a presión (estos autores también llevaron a cabo experimentos de visualización del flujo para validar sus simulaciones numéricas). Lee et al. [67] investigaron los efectos de la velocidad de inyección y geometría de las puertas sobre el comportamiento del flujo de metal de una aleación de aluminio. Los experimentos fueron llevados a cabo mediante observación directa utilizando una cámara de alta velocidad, y los resultados fueron comparados con los obtenidos previamente de forma numérica. Brevick et al. [13] evaluaron diferentes patrones de flujo durante el llenado de la cavidad del molde usando una técnica de radiografiado de alta velocidad.

Existen numerosos trabajos centrados en el estudio numérico del llenado del molde para la fabricación de piezas con distintas geometrías [4, 19, 21, 22, 38, 59, 60, 67, 88, 116, 117, 120]. En estos trabajos se estudian, entre otros aspectos, diferentes defectos que pueden originarse en la pieza durante el proceso de llenado del molde. Por ejemplo, en las simulaciones del llenado del molde llevadas a cabo por Kimatsuka et al. [60] se incluyeron los efectos de la presión del aire durante el llenado del molde y la evacuación del gas a través del sistema de evacuación para predecir la porosidad de la pieza. Yan et al. [117] realizaron simulaciones numéricas para predecir defectos de las piezas fundidas tales como falta de llenado del molde, unión fría, grietas o contracciones para una pieza de automóvil fabricada con una aleación de magnesio. En la mayoría de estos trabajos, si bien se simula la evolución de la superficie libre del fluido durante el llenado del molde y se analizan los defectos que pueden aparecer en la pieza, el análisis está más orientado a la validación y exposición de las bondades del código numérico empleado que a la mejora del proceso de fabricación de la pieza. En la mayoría de trabajos anteriores, el llenado del molde (fase rápida) se estudia de forma aislada y desacoplada del flujo de metal fundido en la cámara de inyección o se ignora la etapa de transición entre la fase lenta y la fase rápida. No se han encontrado estudios sistemáticos similares a los realizados por [1], acerca de la influencia de las principales variables de la etapa de transición (aceleración del pistón, geometría del conducto de entrada o pre-llenado, fundamentalmente) sobre el patrón de flujo de metal fundido

durante el llenado del molde y su relación con los mecanismos de atrapamiento de aire para un amplio rango de condiciones de operación. Por ello, en este proyecto se realizará un estudio sistemático, mediante un modelo CFD, de los principales patrones de flujo que pueden presentarse durante los primeros instantes del llenado del molde y su relación con el atrapamiento de aire que se puede producir en el seno del flujo fluido para un amplio rango de velocidades de inyección.

En la mayoría de los trabajos publicados hasta la fecha, el comportamiento del flujo de metal durante el proceso de inyección se estudia de forma aislada y desacoplada, tanto espacial como temporalmente, en la cámara de inyección, durante la fase lenta, o en la cavidad del molde, durante la fase rápida, obviando el flujo a través del conducto de entrada (fase de transición). Durante la fase de transición, se produce el cambio de velocidad del pistón para pasar de la fase lenta a la fase rápida. Los parámetros fundamentales que caracterizan esta fase son la fracción del conducto de entrada lleno de líquido justo en el instante en el que se inicia la fase rápida (pre-llenado del conducto de entrada), la longitud del conducto de entrada, la ley de movimiento empleada para alcanzar la velocidad de la fase rápida y la distribución de velocidades en el conducto de entrada al finalizar la fase lenta. Gran parte del estudio del presente proyecto se centrará en la fase de transición y en los primeros instantes del llenado de la cavidad.

Otro aspecto importante que suele ser obviado en la mayoría de trabajos teóricos relacionados es la influencia que el aire ejerce sobre el metal fundido durante el llenado del molde, que en determinadas circunstancias puede ser significativa (Bar-Meir [6]). Dependiendo de la velocidad de inyección y de las condiciones iniciales del aire en la cavidad (atmosféricas o al vacío, según sea el tipo de tecnología empleada en los sistemas de evacuación), la evolución del flujo en la entrada a la cavidad puede verse afectada sustancialmente. A modo de ejemplo, para velocidades de inyección elevadas, pueden formarse gotas y chorros de pequeño tamaño (Lefebvre [69]) que favorecen los fenómenos de oxidación del metal y dificultan aún más la simulación numérica del llenado del molde. Téngase en cuenta que cuando es inevitable atrapar grandes cantidades de aire durante el llenado del molde, la atomización del metal fundido tiende a favorecer los fenómenos de oxidación y homogeneización de todo el aire atrapado en forma de pequeños poros, en ocasiones imperceptible a simple vista, uniformemente distribuido en toda la pieza (Hao et al. [40]). En lo que respecta al estudio de los mecanismos de atrapamiento de aire durante el llenado del molde, algunos trabajos experimentales, como los de Draper [27] y Luis y Draper [77], para aleaciones de bajo punto de fusión, o los de Lindsey y Wallace [73], para aleaciones de aluminio, realizados en máquinas de fundición por inyección a presión con cámara fría,

demuestran que los niveles de porosidad de las piezas fabricadas disminuyen hasta un límite a medida que el área del viento (o el tiempo de llenado) aumenta hacia un valor crítico, lo que prueba la importancia de una correcta evacuación del aire de la cavidad durante el llenado del molde. Se han desarrollado diversos modelos teóricos para estudiar el flujo de aire a través de los vientos (Sachs [98]; Veinik [111]; Bennet [11]; Veinik [112]; Karni [58]; Bar-Meir et al. [7]; Bar-Meir et al. [8]). La mayoría de estos modelos no tienen en cuenta la resistencia que el viento ofrece al flujo de aire (a pesar de que la rugosidad y la geometría de los vientos que forman el sistema de evacuación de aire hacen que dicha resistencia pueda tener una influencia importante en el proceso de evacuación), suponiendo que el flujo presenta bloqueo sónico en todo momento, o que el proceso de evacuación se puede suponer quasi-estacionario. En el trabajo de Hernández et al. [42] se puede encontrar una revisión detallada de cada modelo, y el desarrolló de un modelo numérico que tiene en cuenta la fricción del aire para el cálculo de evacuación del aire a través de los vientos. En este proyecto se realizará un estudio de la presión que el gas contenido en la cavidad principal del molde puede alcanzar durante el llenado del molde y la influencia que puede tener sobre el patrón del flujo líquido.

1.4.1. Aplicación de códigos CFD al llenado del molde

Las dificultades del análisis numérico del llenado del molde en procesos de fundición por inyección son varias. En general, el flujo de metal fundido durante el llenado de un molde puede resultar extremadamente complejo de simular, incluso cuando la geometría de la cavidad es sencilla. En este tipo de flujos no estacionarios en los que existen distintas fases (metal fundido, metal solidificado, molde o gas, entre otras) que evolucionan con el tiempo durante el llenado del molde, se debe conocer la posición de las superficies de separación entre fases, lo que dificulta aún más la simulación numérica del proceso, sobre todo cuando es necesario tratar el problema en las tres dimensiones del espacio. Una dificultad adicional se debe a las elevadas velocidades del flujo, que en determinadas condiciones de operación puede llegar a alcanzar valores de hasta 100 m/s y que, como ya se ha mencionado, suelen causar la formación de chorros y gotas de pequeño tamaño [69] que favorecen los fenómenos de oxidación del metal y dificultan aún más la simulación numérica del llenado del molde. En general, cuando el flujo es turbulento y existe interacción del movimiento turbulento de metal fundido con la superficie libre, la aplicación de métodos de simulación directa no resulta asequible [32] y debería recurrirse a métodos de simulación de otro tipo [101, 118].

Otro aspecto que dificulta la solución del problema numérico es la influencia que las condiciones del aire pueden tener en la evolución de la superficie libre. Aunque la relación de densidades entre el metal y el aire es muy alta (pudiendo alcanzar valores superiores a 2000) las condiciones del aire en la cavidad (presión y temperatura principalmente), especialmente en el momento en el que se produce su ingestión en el metal fundido, pueden afectar significativamente a la evolución de las burbujas que se puedan formar y por tanto al metal fundido que las rodea. Estas condiciones dependerán fundamentalmente de las cantidades de aire evacuadas a través de los vientos.

Como último aspecto, destacar que, aunque la porosidad por atrapamiento de aire reduce drásticamente las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas, para llegar a predecir el comportamiento mecánico de las piezas fabricadas en procesos de fundición, especialmente en lo que se refiere a la resistencia a tensiones y fatiga, se deberían considerar también los aspectos microestructurales relativos a nucleación y crecimiento dendrítico así como los complejos mecanismos de formación de segregaciones que a su vez pueden tener lugar a escalas micro y macrogeométricas [30]. Sin embargo, aunque actualmente se están desarrollando métodos (alguno de ellos basados en leyes de tipo empírico) que tratan de integrar los mecanismos de nucleación y crecimiento dendrítico para predecir la microestructura final de la pieza fabricada [93, 121, 94], la simulación directa de todas las escalas en su conjunto resulta hoy en día prácticamente imposible de realizar con la mayoría de los códigos comerciales. Por ello, el estudio llevado a cabo en este proyecto se centrará en los mecanismos de ingestión y atrapamiento de aire que pueden tener lugar a nivel macrogeométrico.

Desde la mitad de la década de los 80, la simulación numérica del flujo de metal y la solidificación se ha ido haciendo cada vez más asequible para la industria de la fundición [55]. Entre los trabajos publicados en las últimas décadas dedicados al desarrollo o perfeccionamiento de las diferentes técnicas de simulación para analizar el comportamiento de flujo fluido durante el llenado de la cavidad del molde en procesos de fundición en general, se pueden citar los siguientes [3, 16, 17, 18, 20, 23, 26, 36, 50, 51, 53, 54, 64, 70, 71, 83]. Los códigos usados para simular el proceso de llenado son generalmente evaluados usando geometrías sencillas para la cavidad del molde y resultados experimentales. Por ejemplo, Ginzburg y Steiner [36] y Ilinea y Hetu [53] usaron formas rectangulares de la cavidad del molde, y Ha y Cleary [37], Kulasegaram et al. [64] y Cleary et al. [21] usaron experimentos con agua como fluido de trabajo.

En Cross et al. [24] se puede encontrar un revisión bastante completa de los avances en el modelado computacional de flujos de superficie libre en procesos de fundición. La mayor parte de los códigos de investigación o comerciales están basados

en combinaciones de métodos como el de los elementos finitos, diferencias finitas o volúmenes finitos con tecnologías de mallado estructuradas por bloques o completamente desestructuradas. Los métodos numéricos para analizar flujos no estacionarios con superficie de separación entre fases más utilizados en problemas similares a los del llenado de moldes son los de tipo Euleriano. Estos métodos emplean una malla fija para resolver las ecuaciones evitando los problemas asociados al cálculo de mallas móviles adaptadas a las formas altamente distorsionadas que puedan adoptar las superficies de separación entre fases. Entre ellos se pueden citar, fundamentalmente, los métodos VOF (“Volume Of Fluid”), “front tracking” o de partículas marcadoras, “level set” o “phase field” (en el trabajo de Kothe et al. [63] se puede encontrar una revisión bibliográfica más completa y una descripción detallada de estos y otros métodos que habitualmente se utilizan para la simulación del llenado de moldes). Quizá, uno de los métodos más utilizados en el ámbito del llenado de moldes es el método VOF, que utiliza una función escalar para representar la superficie de separación entre fases. Algunos ejemplos de la aplicación de este método en el llenado de moldes se pueden encontrar en las referencias de Alexandrou et al. [1], Barkhudarov et al. [5], Hirt [46] o Lipinski [74] utilizando mallas regulares y de Gao [34], Mosso et al. [81, 82] o Price et al. [92] para mallas no estructuradas. Entre los códigos comerciales más empleados para la simulación del llenado de moldes en fundición que usan el método VOF, se pueden citar, por ejemplo, los códigos Magmasoft (Hansen et al. [39]), Procast (Hines y Tu [45]), Flow3D (Hirt [46]), Simulor (Laty et al. [66]) y Cast-Flow (Sturn et al. [104]), o el código Wrafts (Sant y Backer [99]). Las principales razones por las que los métodos de tipo VOF se han impuesto en el ámbito de la fundición de metales se deben a la excelente conservación local del volumen manteniendo una interfaz compacta y a que no requieren métodos especiales, al igual que los métodos “level set”, para tratar cambios topológicos de la interfaz tales como coalescencia o rotura de la superficie de separación entre metal fundido y aire, lo que ocurre con frecuencia durante el llenado del molde.

La elección de un código de simulación de entre los distintos existentes resulta una tarea ciertamente compleja, ya que normalmente el usuario no tiene la posibilidad de probar distintos códigos resolviendo un mismo problema y además existen muy pocas referencias en la literatura al respecto [31]. El código elegido para implementar los modelos CFD utilizados en este proyecto ha sido Flow3D (Flow Science Inc.). Este código es descrito más detalladamente en el Capítulo 2. En la literatura se pueden encontrar diversas referencias de aplicación de este código a problemas similares a los que se pretende abordar en este trabajo (véanse, por ejemplo, los trabajos de Park et al. [87], Wang et al. [115], Park y Brevick [85, 86], Righi et al. [97], Mao [79] o Van Tol [110]).

1.5. Estructura del Proyecto Fin de Carrera

El presente proyecto fin de carrera está dividido en 6 capítulos. A continuación se resume brevemente el contenido de cada uno de ellos.

En el Capítulo 1 [*Introducción*] se realiza una introducción a las tecnologías de fundición y a la problemática de la formación de porosidad en procesos de fundición por inyección a presión, elaborándose el correspondiente análisis del estado del arte utilizado como base para llevar a cabo el estudio propuesto.

En el Capítulo 2 [*Modelos numéricos*] se presentará la modelización numérica de las dos etapas en las que se dividirá el proceso de inyección del metal fundido: movimiento del metal en la cámara de inyección y llenado del molde. También se realizará una breve descripción de los modelos de transferencia de calor, atrapamiento de aire y porosidad por contracción usados por el programa. Se incluye también en este un análisis de sensibilidad de las mallas utilizadas en cada etapa del proceso de inyección.

El Capítulo 3 [*Estudio del movimiento del metal y atrapamiento de aire en la cámara de inyección*] estará centrado en el estudio de la evolución de la superficie libre del metal fundido en la cámara de inyección y en el atrapamiento de aire producido en ella. Los parámetros a analizar serán:

- Fracción de llenado
- Ley de movimiento del pistón
- Geometría de la cámara de inyección.

En este capítulo se analizará también la influencia de la transmisión del calor en los resultados obtenidos (temperatura de sobrecalentamiento).

El Capítulo 4 [*Estudio del movimiento del metal y atrapamiento de aire durante el llenado del molde*] estará dedicado al estudio de la evolución de la superficie libre del metal fundido durante el llenado del molde y en el atrapamiento de aire producido. Se analizarán la influencia en los resultados de tres tipos de sistemas de distribución, de las velocidades de llenado y del inicio de la segunda fase del proceso de inyección. El estudio se realizará teniendo en cuenta la transferencia de calor y solidificación del metal fundido. Se evaluarán también los modelos de atrapamiento de aire y porosidad por contracción.

En el Capítulo 5 se resumen las conclusiones más destacadas del presente proyecto y se expondrán posibles estudios futuros que sería interesante desarrollar como complemento o extensión del estudio realizado en este proyecto.

1.6. Fases del Proyecto Fin de Carrera

- a) Búsqueda bibliográfica.
- b) Aprendizaje y validación del código numérico FLOW3D utilizado para estudiar numéricamente el proceso de fundición por inyección a presión.
- c) Modelización numérica de las dos etapas en las que se dividirá el proceso de inyección del metal fundido y de la transferencia de calor.
- d) Estudio del movimiento del metal y atrapamiento de aire en la cámara de inyección.
- e) Estudio del movimiento del metal y atrapamiento de aire durante el llenado del molde.
- f) Comparación de los resultados numéricos con resultados de visualización obtenidos en un banco de ensayos previos y radiografías de piezas de aleación de aluminio obtenidas con una máquina industrial de fundición por inyección a presión.
- g) Conclusiones principales del estudio.

CAPÍTULO 2

Modelos numéricos

En el presente capítulo se describe el software utilizado, los modelos CFD (“*Computational fluid dynamics*”) empleados y las hipótesis consideradas para la resolución numérica de cada una de las etapas del proceso de inyección que son objeto de estudio en este proyecto.

2.1. Código numérico utilizado

Los modelos utilizados en este proyecto para simular el proceso de inyección están basados en el código Flow3D [33], Versión 9.3., de Flow Science Inc. Los principales algoritmos que incorpora el código Flow3D para la simulación de flujos fluidos en tres dimensiones están basados en una combinación de los métodos de diferencias finitas y volúmenes finitos. Entre los aspectos que se han tenido en cuenta para su elección cabe destacar que se trata de un código de propósito general capaz de resolver una amplia variedad de problemas con superficie libre. Para el seguimiento de la superficie libre del flujo líquido el código dispone de diferentes modelos basados todos ellos en el método VOF (“Volume of Fluid”).

Otro aspecto importante es que utiliza un algoritmo denominado FAVOR (Fractional Area/Volumen Representation) [48] para representar, fácilmente y con precisión, geometrías complejas como las que se pueden presentar en estos procesos. Además, Flow3D incorpora distintos esquemas que permiten una buena caracterización de todas las fases y aspectos del proceso de fundición por inyección en máquinas con cámara fría horizontal, permitiendo la simulación y optimización, por separado o de forma conjunta, de todas las fases del proceso. Entre los modelos u opciones que incorpora el código, las que han resultado de utilidad para alcanzar los objetivos de este proyecto son las que se indican a continuación:

- Seguimiento de la superficie libre mediante un método de tipo PLIC-VOF (“Piecewise Linear Interface Calculation”) (Barkhudarov et al.[5]).
- Modelización de la contrapresión del aire durante el llenado del molde.

- Consideración de los efectos turbulentos del flujo mediante un modelo de tipo $k-\varepsilon$
- Modelización de los efectos de tensión superficial o la adhesión del fluido a las paredes del molde.
- Simulación del movimiento de sólidos (pistón) para evaluar el aumento de presión del aire en la cavidad al ser comprimido por el metal fundido.
- Facilidad de mallado para geometrías complejas mediante el método FAVOR de Hirt y Sicilian [48].

2.1.1. Modelado y resolución numérica mediante Flow3D

2.1.1.1. Ecuaciones de conservación y condiciones de contorno

A continuación se exponen las ecuaciones de conservación del problema tridimensional que son resueltas con el código Flow3D.

Ecuación de conservación de la masa

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

Donde u , v y w son las componentes del vector velocidad en las direcciones (x,y,z) .

Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \rho g \quad (2.2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

donde ρ es la densidad del fluido, p es la presión del fluido, g es la aceleración de la gravedad y μ la viscosidad dinámica del fluido.

Ecuación de advección de la interfaz.

La posición de la superficie libre del fluido se define mediante un función discretizada F que representa la fracción de fluido por unidad de volumen en cada celda computacional y que establece las fases del siguiente modo: $F = 1$ en el metal fundido y $F = 0$ en el aire. La ecuación de evolución de la fracción volumétrica F que se resuelve se puede expresar del siguiente modo:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uF) + \frac{\partial}{\partial y}(vF) + \frac{\partial}{\partial z}(wF) = 0 \quad (2.3)$$

Para resolver la ecuación anterior se emplea un método VOF con reconstrucción de la interfaz de tipo PLIC [5].

Para resolver las ecuaciones anteriores se ha utilizado, en la mayoría de los casos simulados, la condición de no deslizamiento en las paredes de la cámara de inyección y del molde, y se ha fijado la presión en la superficie del fluido.

2.1.1.2. Procedimiento de resolución numérica

La región de cálculo se divide en una malla fija con celdas hexaédricas. En cada celda se definen los valores medios locales de las variables y se almacenan en el centro de las celdas, excepto las velocidades que se almacenan en las caras. Para resolver el acoplamiento de las ecuaciones de conservación de la masa y la cantidad de movimiento y tratar la superficie libre, el programa utiliza el método SOLA-VOF [47]. Las condiciones de pared, obstáculos u otras características geométricas se incorporan a la malla mediante el método FAVOR (Fractional Area/Volume Representation) [48].

Este último algoritmo calcula la fracción de volumen de cada celda de la malla y la fracción del área de la cara de la celda perpendicular al eje x , y y z (según corresponda) no ocupada por un obstáculo u objeto, es decir, abierta al paso de fluido. Estas fracciones se integran en las ecuaciones de conservación descritas anteriormente permitiendo el cálculo del flujo de fluido que atraviesa o llena las celdas. Con este método, las celdas no se ajustan a la geometría de los obstáculos u objetos que definen el problema, sino que pueden cortarlos, lo que facilita enormemente el mallado del problema. Los obstáculos curvos, los contornos de pared u otras características

geométricas están, por tanto, ligadas a la malla mediante estas fracciones de área o volumen de cada celda no ocupada por un obstáculo y abierta al paso del fluido.

La mayoría de los términos de las ecuaciones se evalúan de una forma explícita, aunque existen también varias opciones implícitas en el código. Esto produce un esquema computacional eficiente y sencillo para la mayoría de los propósitos, pero que requiere el uso de un tamaño de escalón de tiempo limitado para mantener los resultados computacionalmente estables y precisos. Una excepción importante a esta formulación explícita está en el tratamiento de la presión. Las presiones y las velocidades están acopladas de forma implícita mediante el uso de presiones avanzadas en el tiempo en las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento y velocidades avanzadas en el tiempo en la ecuación de continuidad. Para resolver esta formulación semi-implícita, se usa el método iterativo SOR (“successive over-relaxation”) que ofrece el código.

Los términos viscoso y convectivo se han tratado explícitamente en el tiempo y el sistema de ecuaciones que resulta se resuelve también mediante el método iterativo SOR (“successive over-relaxation”) para la presión.

2.2. Modelos CFD

En esta sección se describen los distintos modelos CFD que se han utilizado para llevar a cabo cada uno de los diferentes estudios descritos en este proyecto.

2.2.1. Hipótesis consideradas

Las simulaciones realizadas para el estudio de la fase de transición del proceso de inyección y del llenado de la cavidad del molde se han realizado teniendo en cuenta las siguientes hipótesis:

- Dado que la relación de densidades entre el flujo líquido (aluminio fundido) y el aire es muy alta (pudiendo alcanzar valores superiores a 2000) y el alto coste computacional que presenta la simulación acoplada del líquido y gas en tres dimensiones, se ha resuelto solamente la dinámica del líquido fijando la presión en la superficie libre.

- Tal y como se desprende de la anterior hipótesis, únicamente se ha considerado el efecto de la posible variación de la presión de aire contenido en el molde sobre la evolución de la superficie libre durante el llenado en la sección 4.3.

2.2.2. Modelo CFD para el estudio del patrón de flujo durante el llenado del molde

El modelo CFD expuesto a continuación ha sido el utilizado en el Capítulo 3 para el estudio de los diferentes patrones de flujo que pueden formarse durante el llenado del molde en función de los números de Froude y Reynolds, y que fueron determinados por Hernández-Ortega [41].

El estudio llevado a cabo con este modelo se centra fundamentalmente en la simulación de los primeros instantes de llenado de la cavidad del molde, y se realiza de forma aislada y desacoplada de la primera fase del proceso de inyección, y utilizando un modelo bidimensional. En todas las simulaciones se ha hecho uso de la simetría que presenta el problema, imponiendo las adecuadas condiciones de contorno en la línea de simetría y simulando únicamente la mitad del dominio físico. Se ha considerado un solo fluido (agua), y se ha fijado la presión atmosférica en la superficie libre del líquido. Se ha considerado flujo turbulento con un modelo de turbulencia de tipo $k-\varepsilon$ para valores del número de Reynolds mayores que 10000.

En todos los obstáculos se definió una condición de no deslizamiento. El líquido se inyectó hacia arriba se sentido contrario a la gravedad imponiendo una velocidad dada a la entrada del canal de colada. Los efectos de la tensión superficial y transferencia de calor han sido despreciados en estas simulaciones.

En la Fig. 2.1(a) se muestra la geometría empleada. Se trata de una placa rectangular empleada en análisis similares por autores como Alexandrou et al. [1] ó Ginzburg y Steiner [36]. El sistema de distribución está localizado simétricamente a lo largo de la línea central del molde y está formado por un canal de colada con longitud, L_i , y anchura, W_i , iguales a 0,078 m y 0,020 m, respectivamente. La longitud L_c y la anchura W_c de la cavidad son 0,20 m y 0,10 m, respectivamente. El número de Reynolds se define en este caso como $Re = \rho W_i v / \mu$ siendo v , la velocidad de entrada en el sistema de distribución, y ρ y μ la densidad y viscosidad dinámica del líquido, respectivamente.

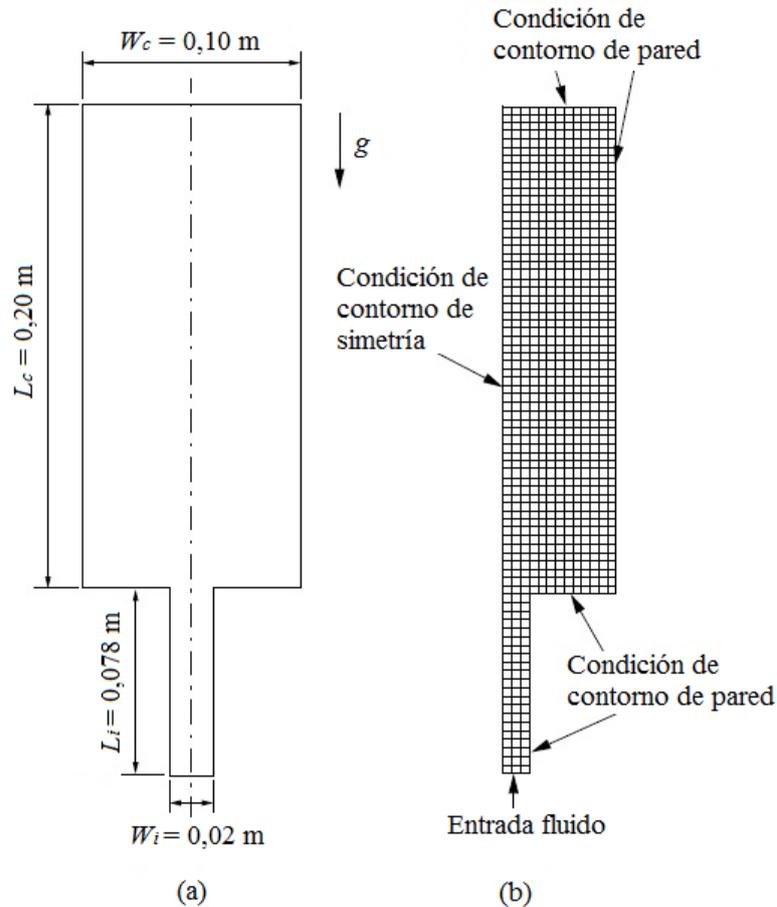


Figura 2. 1: Representación esquemática de (a) la geometría de la configuración 1 y (b) la malla utilizada para simular el problema

Para comprobar la influencia de la malla en la solución numérica se simuló un caso con $Re = 50$ y diferentes resoluciones de malla. En este caso no se han tenido en cuenta los efectos de la gravedad ($g = 0$). En la Fig. 2.2 se presentan los resultados del perfil de la superficie libre obtenidos para tres resoluciones de malla distintas. Se puede observar que para tamaños de celda inferiores o iguales a $h = 0,0005$ m, existe una clara independencia de los resultados en la malla utilizada, incluso en los instantes más avanzados. Por lo tanto, en todas las simulaciones llevadas a cabo en el Capítulo 3 con este modelo se utiliza esta resolución de malla.

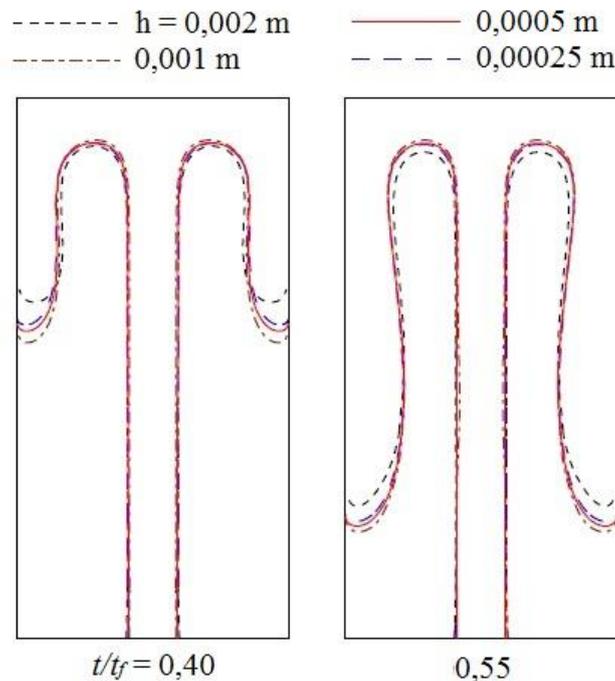


Figura 2. 2: Perfil de la superficie libre para diferentes mallados e instantes de tiempo. Caso con $Re = 50$

2.2.3. Modelo CFD para el estudio de la influencia de la fase de transición sobre el patrón de flujo del metal líquido durante los primeros instantes de llenado

El modelo CFD expuesto a continuación ha sido el utilizado para realizar el análisis de la influencia de distintas variables del proceso de inyección relativas a la fase de transición sobre los patrones de flujo deducidos con el modelo anterior en los primeros instantes de llenado. Dicho análisis queda expuesto en el Capítulo 3.

Las variables de la fase de transición analizadas con este modelo han sido:

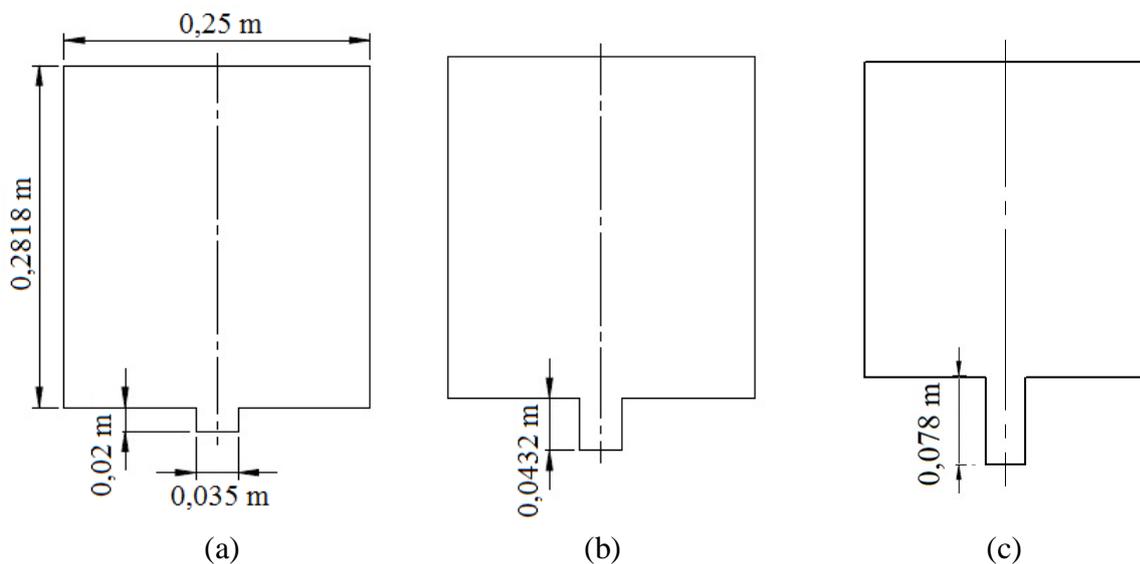
- Longitud del sistema de distribución (conducto de entrada).
- Pre-llenado inicial del sistema de distribución (conducto de entrada).
- La influencia del modelo de tensión superficial.

La simulación de los primeros instantes de llenado de la cavidad del molde se ha realizado también de forma aislada y desacoplada de la primera fase del proceso de inyección. El estudio realizado sobre el llenado de la cavidad del molde se ha realizado con un modelo tridimensional. En todas las simulaciones se ha hecho uso de la simetría que presenta el problema, imponiendo las adecuadas condiciones de contorno en la línea de simetría y simulando únicamente la mitad del dominio físico. Tal y como se ha indicado en las hipótesis consideradas en la sección 2.2.1, se ha considerado un solo

fluido (aluminio fundido), y se ha fijado la presión en la superficie libre del líquido, considerándose flujo turbulento con un modelo de turbulencia de tipo $k - \varepsilon$.

La posición del molde es tal, que el fluido es inyectado en sentido contrario al de la gravedad. Las distintas velocidades de inyección se han impuesto con una condición de contorno a la entrada del sistema de distribución del molde.

En la Fig. 2.3 se muestra la geometría empleada. Se trata de una placa rectangular similar a la utilizada en la sección anterior, pero en la que se modifica la anchura y longitud de la cavidad del molde. La longitud y la anchura de la cavidad son 0,2818 m y 0,25 m, respectivamente. Para poder realizar el estudio de la influencia de la longitud del canal de colada sobre el patrón de llenado se han utilizado para dicho canal tres longitudes Le_1 , Le_2 y Le_3 , iguales a 0,02 m, 0,0432 m y 0,078 m, respectivamente. La anchura del canal se mantiene constante e igual a 0,035 m. Esta geometría con $Le_2 = 0,0432$ m se ha utilizado para evaluar la influencia del pre-llenado inicial y de la tensión superficial en el Capítulo 3.



Condición de contorno de pared

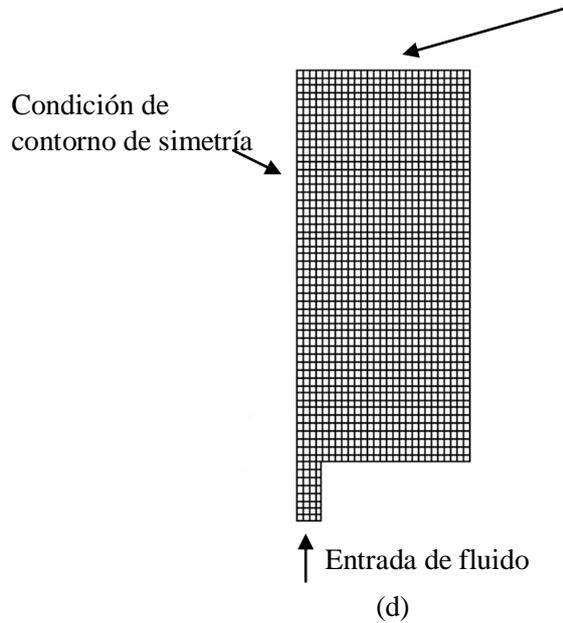


Figura 2. 3: Representación esquemática de la geometría para el estudio de los primeros instantes de llenado, con distintas longitudes para el canal de colada. (a) Le_1 . (b) Le_2 . (c) Le_3 , y (d) la malla y condiciones de contorno usadas para simular el problema

2.2.3.1. Análisis de sensibilidad del mallado

Para comprobar la influencia de la malla en la solución numérica y elegir el tamaño de celda a utilizar, se simuló un caso con longitud del canal de colada Le_2 y sin prellenado inicial, con una velocidad constante impuesta a la entrada del sistema de distribución del molde de 1.37 m/s. Se impuso una presión atmosférica en la superficie libre del líquido y no se consideraron los efectos de la tensión superficial.

En la Fig. 2.4 se presentan los resultados del perfil de la superficie libre obtenidos en el instante adimensional $t/t_f = 0.099$, siendo t el instante de tiempo considerado ($t = 0.177s$) y t_f el tiempo de llenado de la cavidad. Los resultados se obtuvieron con tres mallados distintos no uniformes, todos ellos compuestos por celdas rectangulares. El tamaño de celda varía suavemente, aumentando su tamaño desde el eje central del canal de colada hasta la pared lateral de la cavidad, para evitar una pérdida de resolución en el canal de colada. Se puede observar que para mallados más densos que 432 x 1832 celdas en eje x y z respectivamente, existe una clara independencia de los resultados respecto a la malla utilizada.

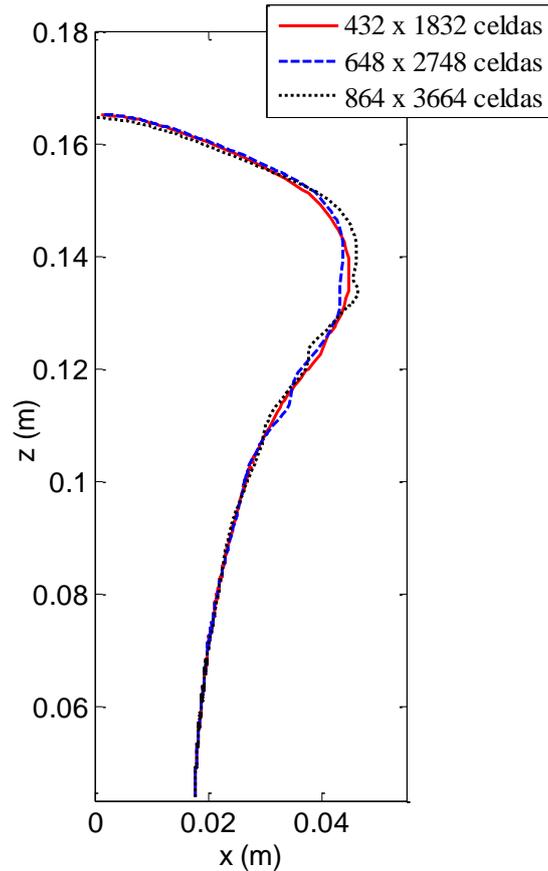


Figura 2. 4: Influencia de la densidad del mallado sobre el perfil de la superficie libre para el instante adimensional $t/t_f = 0,099$. Obsérvese que solo se ha representado la mitad del dominio físico, aplicando la condición de simetría.

Por lo tanto, la mayor parte de resultados presentados en el Capítulo 3 sobre el estudio del perfil de la superficie libre en los primeros instantes de llenado se han obtenido utilizando un mallado no uniforme de 432 x 1832 celdas rectangulares, con un tamaño de celda medio en el canal de colada $h_1 = 0,00012 \times 0,00017$ m y un tamaño de celda medio en la cavidad $h_2 = 0,00039 \times 0,00017$ m.

2.2.4. Modelo CFD para analizar la influencia de la distribución de velocidades al finalizar la primera fase

El modelo CFD expuesto a continuación ha sido el utilizado para evaluar de forma cualitativa el efecto que puede tener la transición del flujo entre la primera y segunda fase de inyección (paso del flujo de la cámara de inyección al sistema de distribución vertical del molde) sobre la distribución de velocidades a la entrada de la cavidad. Este análisis queda expuesto en el Capítulo 3.

Para este estudio se ha utilizado un modelo CFD tridimensional con el que se simula tanto la parte final de la primera fase de la inyección como el inicio del llenado de la cavidad del molde. En el modelo solo se considera la fase líquida, con aluminio fundido como fluido de trabajo. En la Fig. 2.5 pueden verse, respectivamente, (a) una representación esquemática de la geometría del problema, y (b) un esquema del modelo CFD empleado.

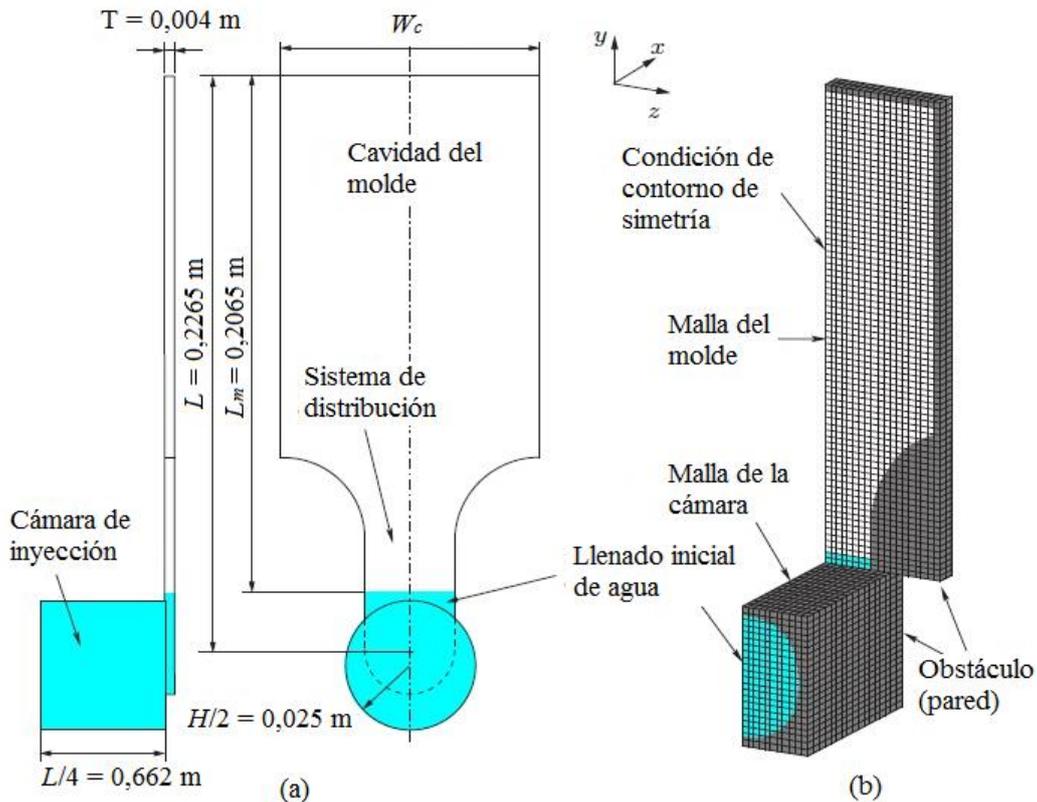


Figura 2. 5: Representación esquemática de la geometría para simular el problema en 3D

El modelo CFD consta de dos mallas adyacentes, una adaptada a la geometría del trozo de cámara de inyección considerada y otra que abarca el molde. Para las simulaciones realizadas se ha utilizado un tamaño de celda de $4 \times 10^{-4} \text{ m}$ para la cámara, y de $1,8 \times 10^{-4} \text{ m}$ para el molde. En la Fig. 2.5 se indica el pre-llenado considerado en las simulaciones. Para simular el llenado de la cavidad, se imponen las velocidades del pistón necesarias para alcanzar velocidades de líquido a la entrada de la cavidad similares a las consideradas en las simulaciones con geometría bidimensional.

Tal y como se ha indicado en las hipótesis mencionadas en la sección 2.2.1, se ha fijado la presión en la superficie libre del líquido, considerándose flujo turbulento con un modelo de turbulencia de tipo $k - \varepsilon$. En las paredes del molde y de la cámara se han establecido condiciones de no deslizamiento.

2.2.5. Modelo CFD para el estudio de la evacuación de aire

En esta sección se describirá el modelo numérico de la evacuación de aire a través de un viento basado en el código Flow3D, y utilizado para analizar las variaciones de presión en la cavidad que se originan durante el proceso de inyección.

El modelo CFD expuesto a continuación ha sido el utilizado para realizar el análisis de las variaciones de presión que se originan en el aire contenido en el molde durante el proceso de inyección, para diferentes velocidades del metal fundido. Dicho análisis queda expuesto en el Capítulo 4

Para la simulación numérica de la evacuación de aire a través del viento, el avance del metal fundido se ha representado mediante un pistón que empuja dicho aire contenido en el molde obligándolo a salir al exterior a través del viento. Se ha utilizado para ello un modelo tridimensional. En la Fig. 2.8 se muestra la geometría empleada. El sistema de distribución y la cavidad del molde se han considerado como una única cavidad, cuyo viento está localizado simétricamente a lo largo de la línea central de la geometría. Se ha supuesto una cavidad, con forma de placa, con una anchura de 0,1016 m, una longitud de 0,15 m y un espesor de 0,004 m.

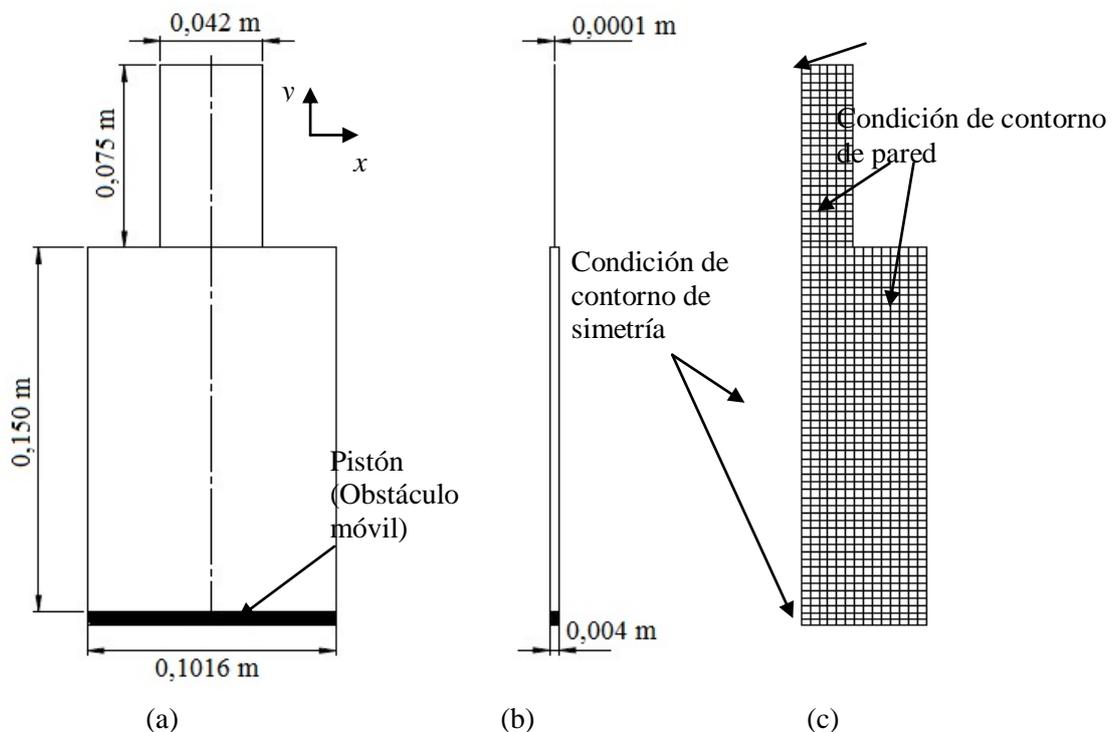


Figura 2. 6: Representación esquemática de la geometría utilizada para el estudio de la evacuación de aire a través de los vientos. (a) Vista frontal. (b) Vista lateral. (c) Mallado y condiciones de contorno

En todas las simulaciones se ha hecho uso de la simetría que presenta el problema, imponiendo las adecuadas condiciones de contorno en la línea de simetría y simulando únicamente la mitad del dominio físico. Las distintas velocidades para el metal líquido se han representado imponiendo distintas velocidades constantes en el pistón. Se ha considerado que el aire está inicialmente en reposo a una presión atmosférica y uniformemente distribuido en la cavidad y el viento. Además, como condición de contorno, se ha fijado presión atmosférica en la sección de salida del viento. No se ha considerado modelo de turbulencia ni tampoco se ha tenido en cuenta la gravedad.

Para la simulación del problema se ha utilizado una malla tridimensional no uniforme de $50 \times 224 \times 7$ celdas en ejes x , y , z respectivamente. El tamaño de celda en el eje central de la pieza es menor para evitar una pérdida de exactitud en el viento debido a la pequeña sección del mismo. Por este motivo, el tamaño de celda varía a lo largo del espesor de la pieza (eje z), siendo el tamaño mínimo $0,001 \times 0,001 \times 0,000098$ m en el viento y el tamaño máximo $0,001 \times 0,001 \times 0,0009$ m en las paredes de la cavidad.

2.2.6. Modelo CFD para el estudio de los efectos de la presión del aire sobre el patrón de llenado.

El modelo CFD expuesto a continuación ha sido el utilizado para realizar el estudio de los efectos de la presión del aire sobre el patrón de flujo de metal líquido en los primeros instantes de llenado. Dicho análisis queda expuesto en el Capítulo 4.

La geometría usada en este caso es básicamente la misma que la descrita en la sección 2.2.3 (véase Fig. 2.3), concerniente al estudio del patrón de flujo de metal líquido durante los primeros instantes de llenado del molde. Se trata de una placa bidimensional, que tiene una anchura de 0,25 m y una longitud de 0,282 m. Para este estudio en particular, se ha añadido un viento a cada lado del eje de simetría en la pared superior de la cavidad, y se ha eliminado el canal de colada, que se ha sustituido por una entrada a la cavidad de 0,035 m de anchura, tal y como se muestra en la Fig. 2.9(a).

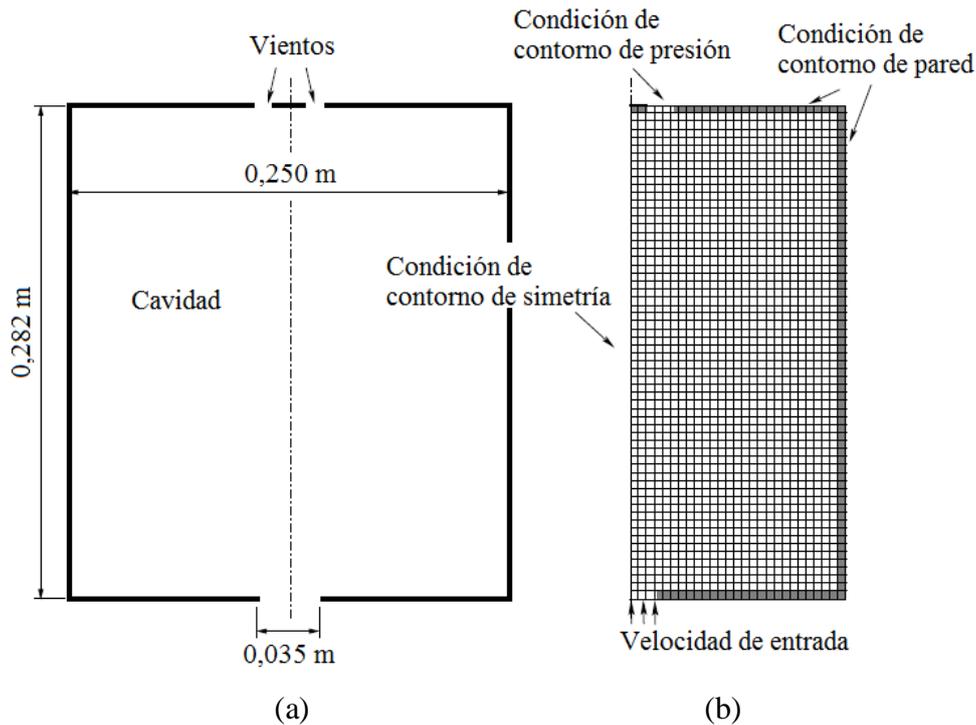


Figura 2. 7: Representación esquemática de (a) la geometría y (b) la malla utilizada para simular el problema.

En este caso, se evalúan cualitativamente los efectos de la presión del aire en la evolución del flujo líquido durante el llenado de una cavidad de sección rectangular. Para ello, se consideraron tanto la fase líquida como la fase gaseosa en el interior de la misma. El aire ha sido considerado en el modelo CFD como un fluido incompresible a temperatura ambiente y diferentes presiones. Se ha considerado flujo turbulento con un modelo de turbulencia de tipo $k - \varepsilon$, y también se han tenido en cuenta los efectos de la gravedad. Las distintas velocidades verticales de inyección se han impuesto con una condición de contorno a la entrada de la cavidad del molde.

En todas las simulaciones se ha utilizado una malla uniforme bidimensional con un tamaño de celda h igual a 0.0005 m. Para este tamaño de celda, los resultados obtenidos son independientes del mallado utilizado. En todas las paredes se ha impuesto la condición de no deslizamiento, y en la entrada del viento se ha impuesto una presión constante. Se ha tenido en cuenta el modelo de tensión superficial y el de transferencia de calor.

2.2.7. Modelos CFD para la comparación de los resultados numéricos con resultados experimentales

2.2.7.1. Modelo CFD para comparar los resultados numéricos con resultados experimentales de visualización del patrón de flujo

Este modelo CFD es el utilizado en el Capítulo 5 para validar los resultados numéricos comparándolos con resultados experimentales de visualización. El sistema de distribución está situado simétricamente a lo largo de la línea central del molde y está formado por un canal de colada de anchura $W_i = 0,035$ m y una puerta de entrada curva, tal y como se muestra en la Fig. 2.10. La longitud y la anchura de la cavidad del molde son 0,150 m y 0,1016 m, respectivamente.

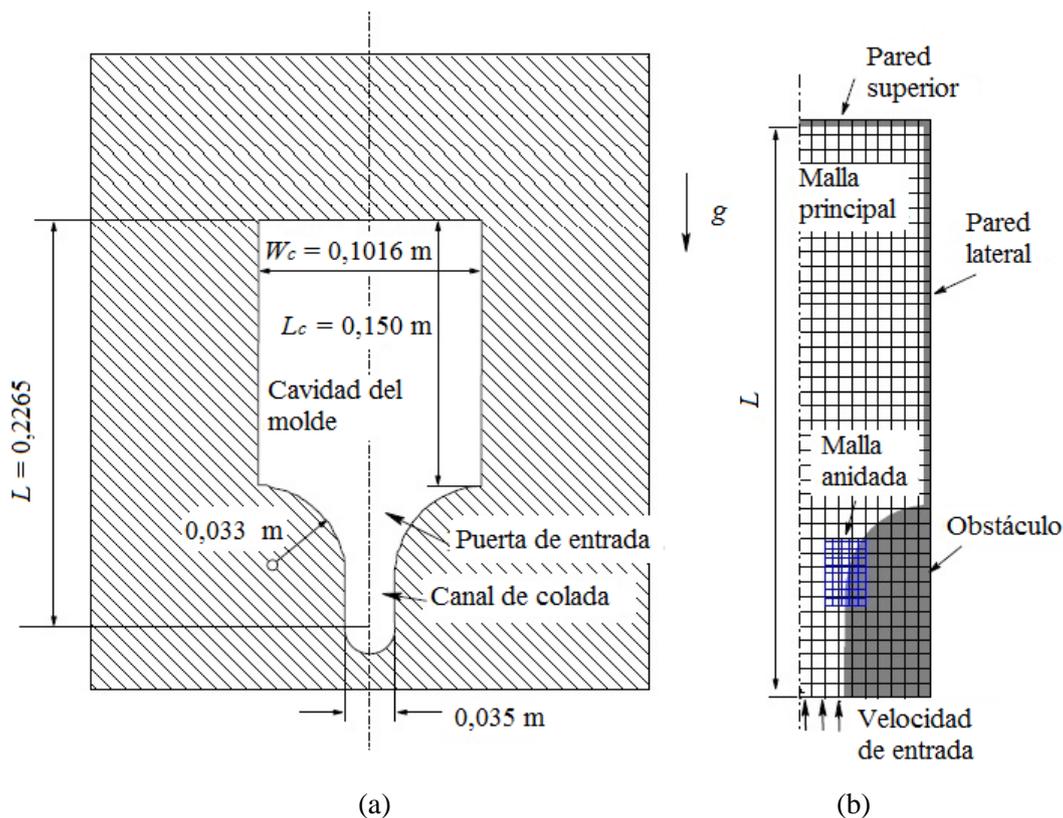


Figura 2. 8: Representación esquemática de (a) la geometría y (b) la malla empleada para simular el llenado de la cavidad del molde.

En el estudio numérico llevado a cabo para esta geometría se han utilizado dos mallas uniformes y superpuestas (malla principal y malla anidada de la Fig. 2.10(b)). La malla principal se extiende por todo el dominio de cálculo, mientras que la malla anidada, con un tamaño de $18,5 \times 35$ mm² se sitúa en el sistema de entrada a la cavidad

del molde donde el canal de colada es curvo. Este tipo de malla se usa en el código Flow3D para incrementar la resolución en determinadas zonas del dominio de cálculo que así lo requieran sin ocasionar un coste computacional elevado. Se ha comprobado que, en este caso, es necesario incrementar la resolución de la malla en la zona curva del canal de colada para evitar inestabilidades numéricas y conseguir resultados independientes de la malla. En la Fig. 2.11 se muestran los perfiles de la superficie libre en distintos instantes y con diferentes malla para un caso con velocidad de entrada igual a $v/(gL)^{1/2} = 1,68$ escogiéndose los valores de densidad y viscosidad dinámica del agua (1000 kg/m^3 y $0,001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, respectivamente). Puede observarse que, en general, los resultados son casi independientes de la malla usando 283×1219 celdas ($h = 0,1875 \times 10^{-3}$), para la malla principal, y 132×249 celdas ($h = 0,14 \times 10^{-3}$) para la malla anidada. Por lo tanto, los resultados presentados en el Capítulo 5 con esta configuración se han obtenido con esta resolución de malla.

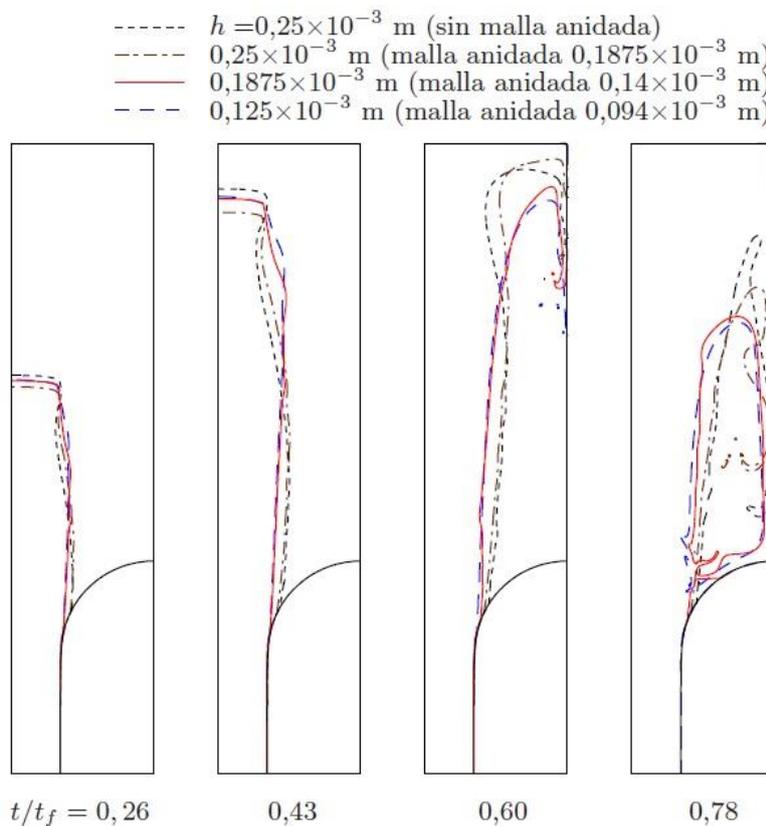


Figura 2. 9: Influencia de la resolución de la malla en los perfiles de la superficie libre del fluido en diferentes instantes del llenado de la cavidad del molde.

2.2.7.2. Modelo CFD para comparar los resultados numéricos con resultados de visualización de los efectos de la presión del aire sobre el patrón de llenado

El modelo CFD expuesto a continuación ha sido el utilizado en el Capítulo 5 para realizar la comparación de los resultados numéricos con resultados experimentales de visualización de los efectos de la presión del aire sobre el patrón de flujo de metal líquido en los primeros instantes de llenado.

Las simulaciones numéricas se han realizado con la geometría representada en la Fig. 2.10. La cavidad, con forma de placa bidimensional, tiene una anchura de 0,1016 m y una longitud de 0,183 m. Los vientos se encuentran en la parte superior de la cavidad, uno a cada lado del eje de simetría de la pieza. Se ha añadido un canal de colada de longitud 0,0435 m y anchura 0,035 m. Para llevar a cabo las simulaciones en condiciones similares a las usadas en los experimentos de visualización, se utilizó un pre-llenado del canal de colada de 0,02 m de altura, y una aceleración exponencial impuesta a la entrada del canal de forma que se obtuviese la velocidad requerida al final del mismo. Esta velocidad de inyección se mantuvo constante durante el llenado de la cavidad del molde.

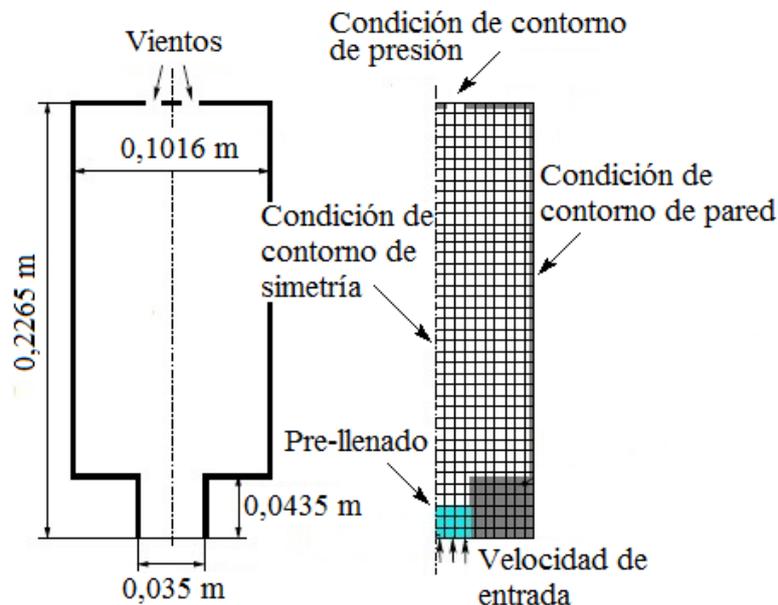


Figura 2. 10: Representación esquemática de (a) la geometría y (b) la malla utilizadas para comparar los resultados numéricos con resultados de visualización.

Tanto las condiciones iniciales y de frontera del problema, como el mallado de la geometría son exactamente las mismas que las utilizadas para el estudio teórico del problema

CAPÍTULO 3

Estudio del movimiento del metal y atrapamiento de aire en la cámara de inyección.

3.1. Introducción al problema.

En este capítulo se lleva a cabo un estudio numérico de la evolución de la superficie libre del metal fundido en la cámara de inyección y en el atrapamiento de aire producido en ella. En el estudio se presta especial atención al análisis de la influencia de la fuerza de la gravedad sobre el patrón de flujo. Las simulaciones numéricas del flujo de la fase líquida se realizan usando el código comercial Flow3D descrito en el Capítulo 2. Las principales características del flujo de líquido en los primeros instantes del llenado de la cavidad del molde se analizan para diferentes condiciones de operación, clasificando los distintos patrones de llenado que se pueden producir.

Los resultados numéricos y experimentales obtenidos para la evolución del perfil de la superficie libre se comparan para diferentes velocidades de entrada del fluido en la cavidad principal del molde. Se analiza también, de forma numérica, la influencia que la transición del fluido desde la cámara de inyección al molde puede tener sobre el patrón de flujo. Las variables a analizar en este caso serán la longitud del sistema de distribución, el pre-llenado del conducto de entrada en el momento de inicio de la fase rápida, el efecto de la tensión superficial sobre los resultados numéricos, la ley de movimiento empleada para alcanzar la velocidad de la fase rápida (momento de inicio de la fase rápida) y la distribución de velocidades al finalizar la fase lenta, todo ello considerando la transferencia de calor.

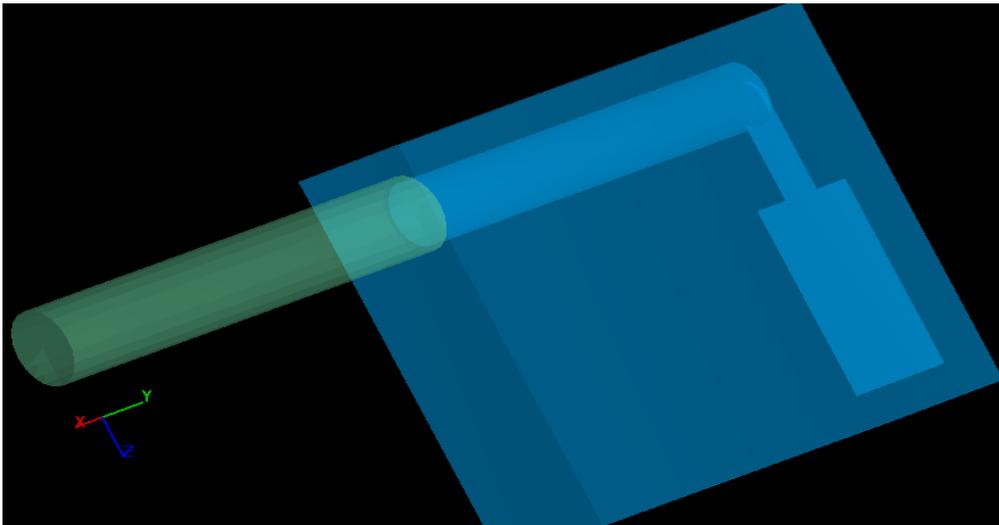


Figura 3. 1: Geometría de la pieza STL en Flow3D

3.2. FLOW 3D. Configuración del modelo

A continuación, se detalla la configuración utilizada en el apartado “Model Setup” del software comercial FLOW3D.

3.2.1. General.

- Finish Condition:
 - o En la simulación de llenado de la cámara de inyección se ha utilizado la siguiente condición de finalización de simulación: *Finish time*. (De esta manera la simulación se considera terminada en el tiempo fijado por el usuario).
Para cada simulación, se ha escogido un tiempo de finalización acorde a la velocidad de avance del pistón. Este tiempo está comprendido entre 3 segundos para el caso más lento hasta 0,88 en el caso más rápido.
- Interface tracking: free Surface or Sharp interface
- Number of fluids: One fluid
- Simulation units: SI
- Flow Mode: Incompressible.
- Mentor options: offer suggestions
- Versioni options: double precision

3.2.2. Hipótesis consideraras en la simulación.

Las hipótesis utilizadas durante las simulaciones de llenado en la cámara de inyección son las siguientes:

3. Estudio del movimiento del metal y atrapamiento de aire en la cámara de inyección 66

- Air Entrainment
- Gravity
- Heat Transfer
- Solidification (Shrinkage)
- Defect Tracking
- Moving and deforming objects
- Viscosity and turbulence

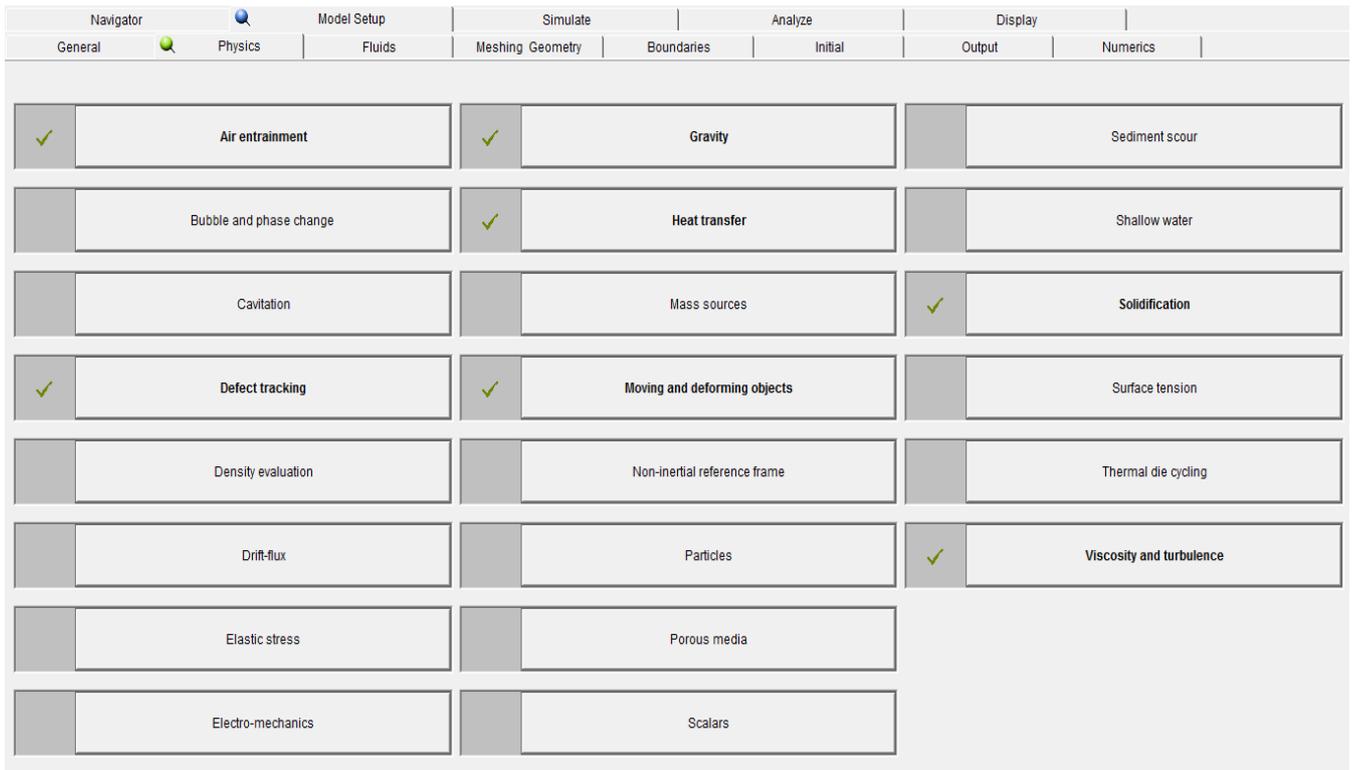


Figura 3. 2: Model Setup. Physics

3.2.3. Descripción del fluido.

El fluido considerado para realizar las simulaciones ha sido: Al 380 Alloy

Propiedades:

- Viscosidad: 0.00119 Pa.s
- Densidad: 2420 Kg/m³
- Temperatura liquidus: 884 K
- Temperatura solidus: 828 K

3. Estudio del movimiento del metal y atrapamiento de aire en la cámara de inyección 67

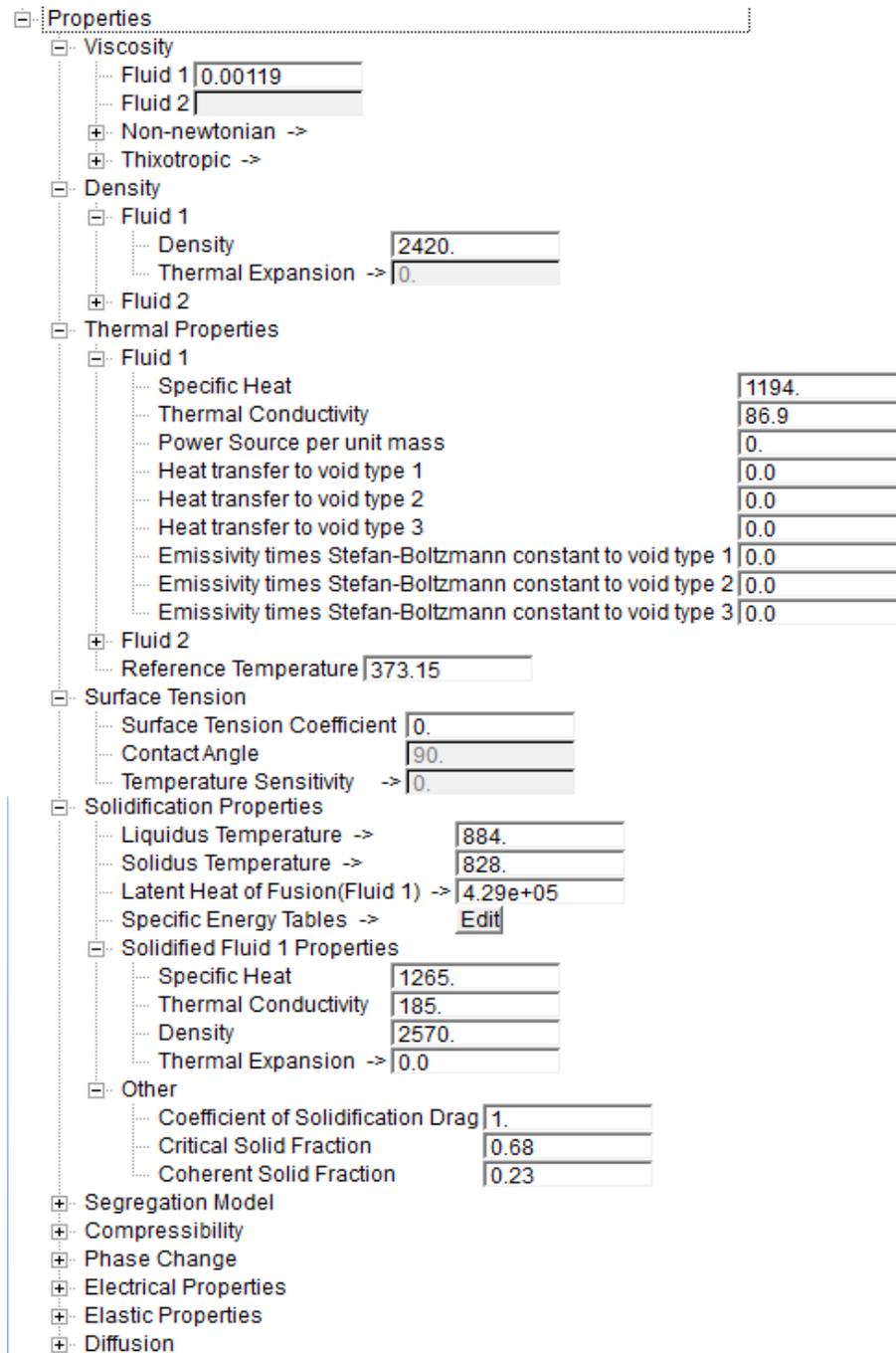


Figura 3. 3: Propiedades del fluido

3.2.4. Geometría del mallado.

El mallado aplicado en la simulación de la cámara de inyección consta de un solo bloque rectangular de las siguientes dimensiones:

Dirección X: 0,06 m
Dirección Y: 0,270 m
Dirección Z: 0,06 m

Celda: cuadrada
Tamaño de celda: 0,002 m

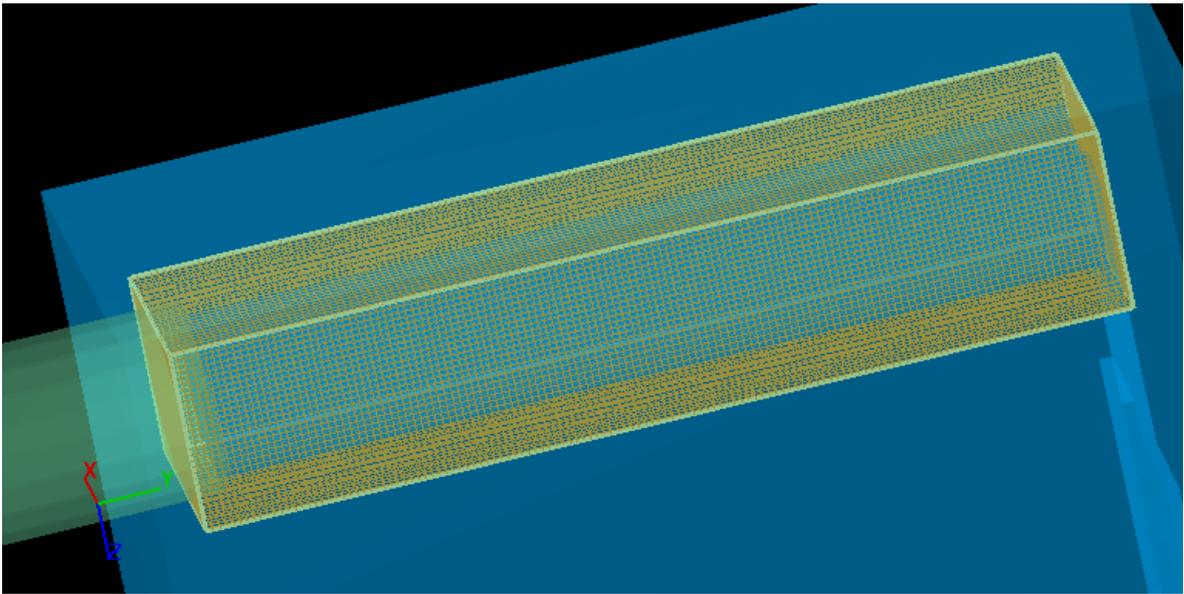


Figura 3. 4: Mallado de la cámara de inyección

3.2.5. Fronteras.

Las fronteras en los 6 lados del bloque de mallado han sido consideradas como: WALL

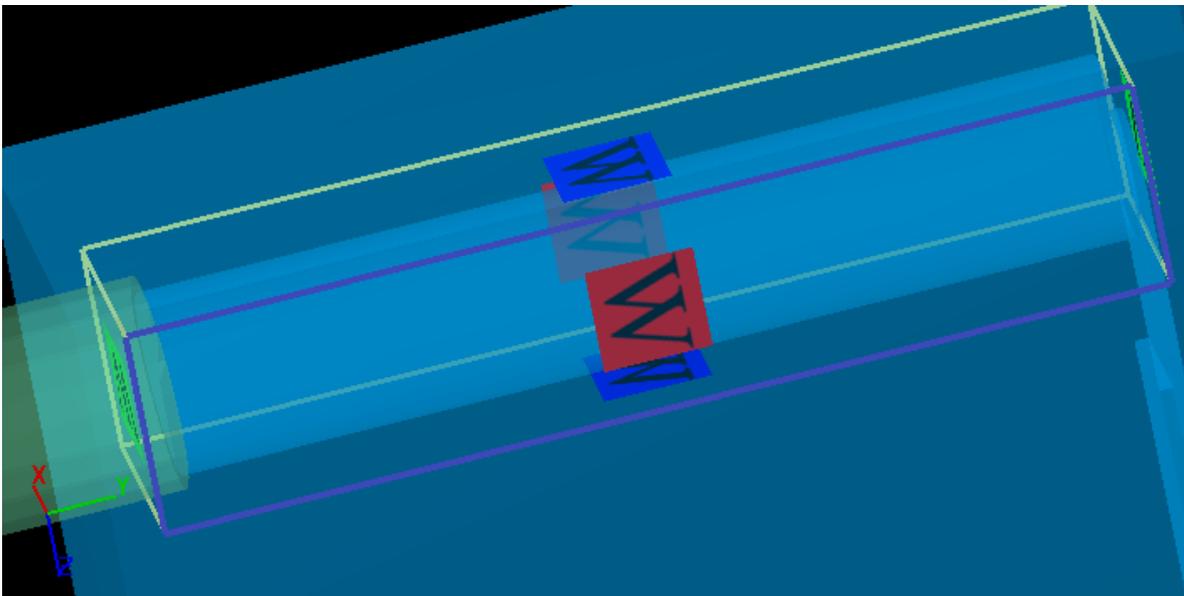


Figura 3. 5: Fronteras del mallado

3.2.6. Condiciones iniciales.

Estado inicial del fluido:

- Temperatura: 1073 K
- Altura del fluido estático (eje Z): 0,015 m

3.3. Ley Óptima de avance del pistón.

Con ayuda de la ley óptima de llenado de la cámara de inyección se ha calculado la aceleración óptima del pistón con el fin de alcanzar las condiciones más favorables a lo largo de la primera etapa de llenado del molde y así conseguir la finalidad deseada que es evitar atrapamientos de aire y porosidades en la pieza.

La ley óptima de llenado tiene en cuenta los siguientes parámetros:

1. Geometría de la cámara de inyección:
 - H: 0,05 m
 - L: 0,265 m
2. Fracción de llenado: es la relación entre la altura del fluido en reposo frente a la altura total de la cámara. En nuestro caso, $h_0/H = 0,3$.
3. Velocidad máxima de avance del pistón previo al llenado de la cámara.
 $U_h/(gH)^{0.5} = U_{max}$

La velocidad es exponencial hasta alcanzar la velocidad considerada como máxima, siendo ésta cuando cesa la aceleración. Ésta velocidad se mantiene mientras el pistón no se haya llenado por completo. El llenado del molde que contendrá a la pieza se hace incrementando la velocidad bruscamente al valor deseado (Capítulo 4).

datos	
H	0,05
L	0,265
h ₀ /H	0,3
Al/(DT)	0,216219403
Al/A	0,252315788
Al	0,000495421
HT/A	1,166943318
T	0,045825757
f	0,252315788
x _c	0,265
c ₀	0,325661814
t _c	0,81372758
U _h /(gH) ^{0.5}	0,88
U _h	0,616314206
t _h	0,703349215
t _f	0,931781912
Max.recorr.	0,198136316
x(t _h)	0,05735

Tabla 3. 1 Parámetros considerados en la ley óptima de llenado de la cámara de inyección

3.4. Análisis de la simulación.

Las simulaciones realizadas con la ayuda de FLOW3D nos ayudan a relacionar de manera directa el comportamiento del fluido durante el llenado de la cámara de inyección con la aceleración del pistón. Con el fin de obtener la ley de aceleración más favorable para nuestro caso, hemos simulado 7 casos diferentes. La finalidad de dicho análisis es encontrar la ley de avance del pistón que nos proporcione un llenado homogéneo, sin atrapamientos de aire y con un fluido contenido en la cámara totalmente compacto y preparado para ser impulsado en la etapa final a alta presión sin desencadenar defectos en la pieza final.

Flow3D nos permite visualizar el resultado de la simulación de numerosas formas. Para analizar el avance del pistón en la cámara de inyección, la relación con el movimiento del fluido y el nivel de atrapamiento de aire en el instante previo a la segunda etapa de llenado utilizamos el modelo 2D, seleccionando el gradiente de colores asociado a la fracción de volumen de aire atrapado en la cámara de inyección para poder establecer conclusiones al final del capítulo sobre que relación de velocidades es la que proporcionará el resultado más satisfactorio en la pieza.

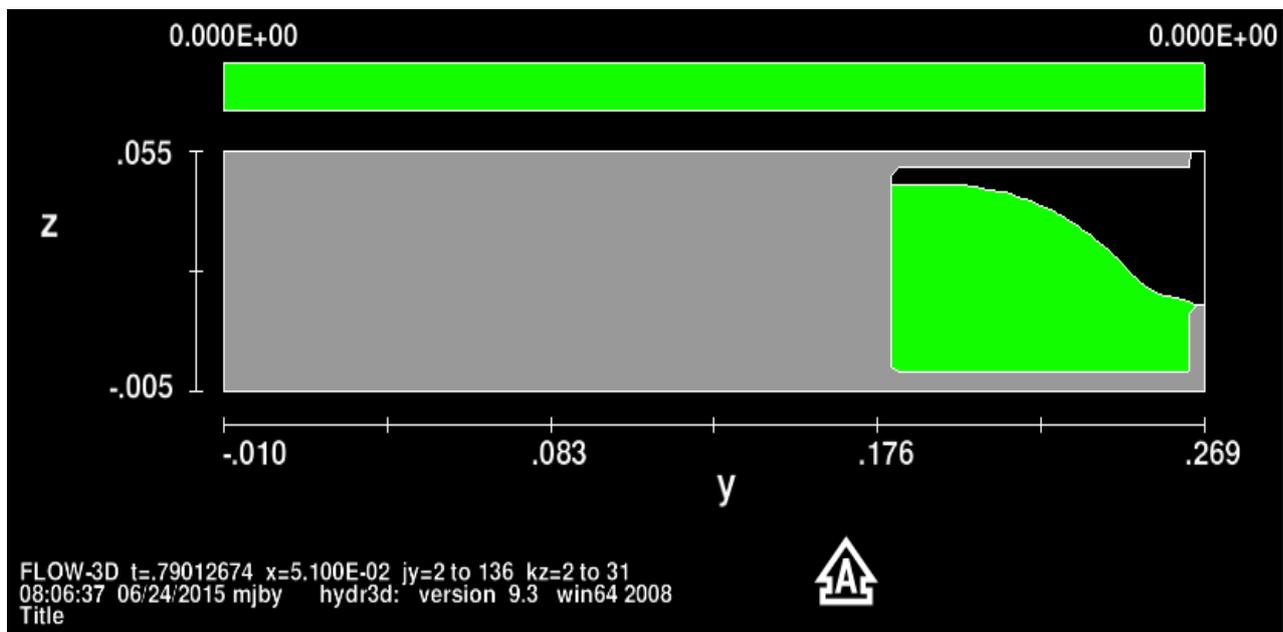


Figura 3. 6: Ejemplo 2D de la fracción de volumen atrapado en la cámara de inyección

A continuación se detallan de los diferentes casos analizados:

3.4.1. Caso A. ($U_{max} = 0,25$)

Para dicha U_{max} (adimensional), la ley óptima de avance del pistón muestra la siguiente relación de posición, velocidad y aceleración en función del tiempo:

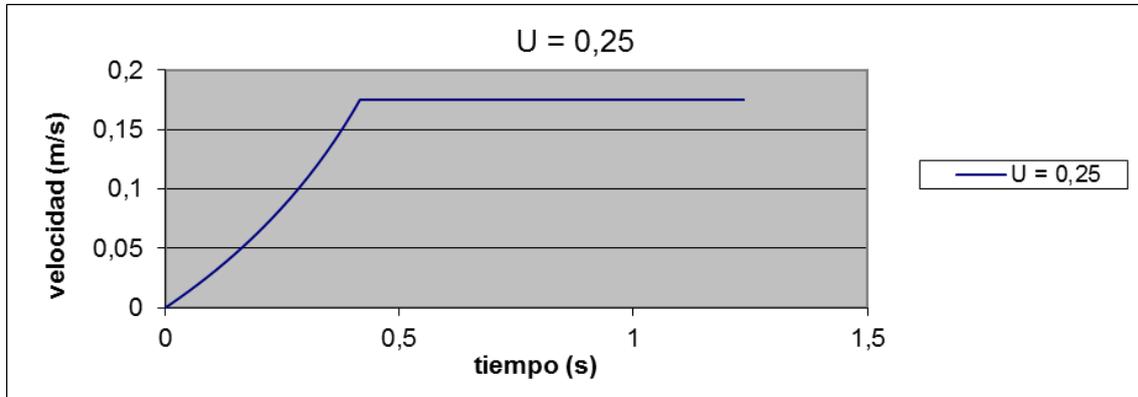


Figura 3. 7: Velocidad de avance del pistón para $U_{max} = 0,25$

	Tiempo (s)	Posición (m)	Velocidad (m/s)	Aceleración (m/s ²)
n	t	x	x'	x''
1	0,0360	0,0002	0,0099	0,2834
2	0,0860	0,0010	0,0247	0,3097
3	0,1360	0,0027	0,0409	0,3405
4	0,1860	0,0052	0,0589	0,3771
5	0,2360	0,0086	0,0788	0,4212
6	0,2860	0,0131	0,1011	0,4753
7	0,3360	0,0188	0,1265	0,5427
8	0,3860	0,0258	0,1557	0,6289
9	0,4360	0,0343	0,1751	0,0000
10	0,4860	0,0430	0,1751	0,0000
11	0,5360	0,0518	0,1751	0,0000
12	0,5860	0,0605	0,1751	0,0000
13	0,6360	0,0693	0,1751	0,0000
14	0,6860	0,0780	0,1751	0,0000
15	0,7360	0,0868	0,1751	0,0000
16	0,7860	0,0955	0,1751	0,0000
17	0,8360	0,1043	0,1751	0,0000
18	0,8860	0,1130	0,1751	0,0000
19	0,9360	0,1218	0,1751	0,0000
20	0,9860	0,1306	0,1751	0,0000
21	1,0360	0,1393	0,1751	0,0000
22	1,0860	0,1481	0,1751	0,0000
23	1,1360	0,1568	0,1751	0,0000
24	1,1860	0,1656	0,1751	0,0000
25	1,2360	0,1743	0,1751	0,0000

Tabla 3. 2: Posición, Velocidad y Aceleración del pistón para $U_{max} = 0,25$

3. Estudio del movimiento del metal y atrapamiento de aire en la cámara de inyección 72

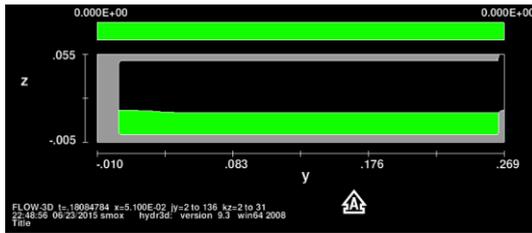


Figura 3. 8: Caso A. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,18 s)

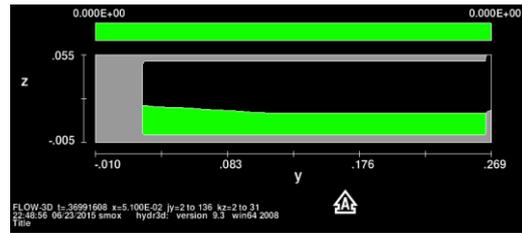


Figura 3. 9: Caso A. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,37 s)

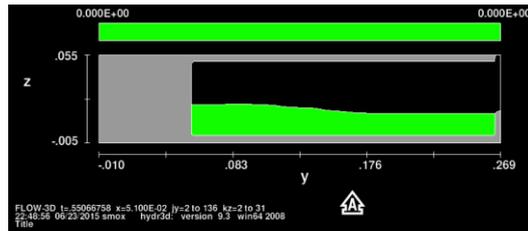


Figura 3. 10: Caso A. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,55 s)

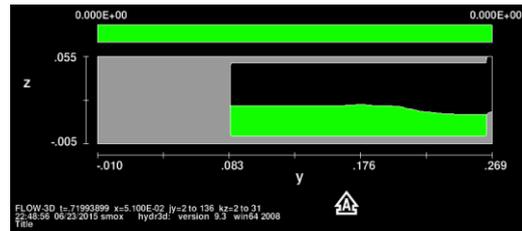


Figura 3. 11: Caso A. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,72 s)

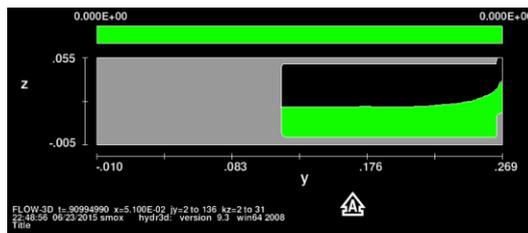


Figura 3. 12: Caso A. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0.91 s)

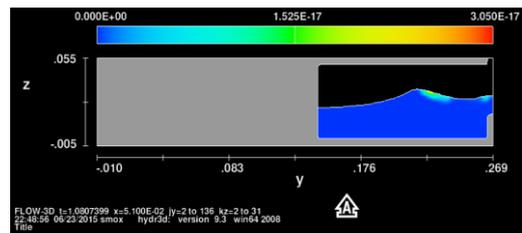


Figura 3. 13: Caso A. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 1.08 s)

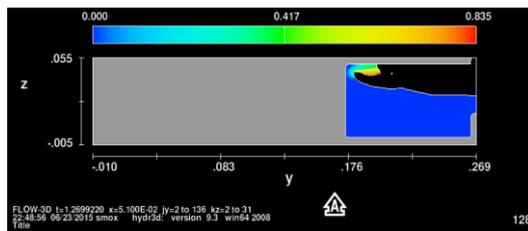


Figura 3. 14: Caso A. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 1.27 s)

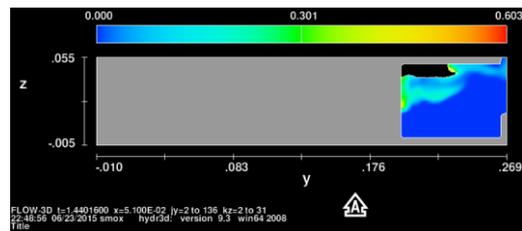


Figura 3. 15: Caso A. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 1.44 s)

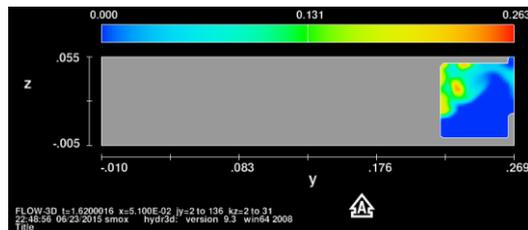


Figura 3. 16: Caso A. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 1.62 s)

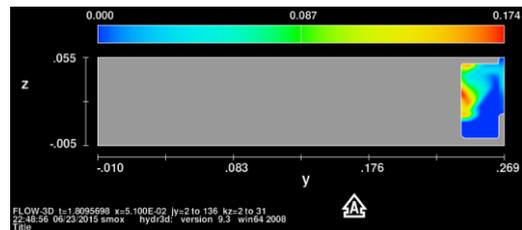


Figura 3. 17: Caso A. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 1.80 s)

3.4.2. Caso B. ($U_{max} = 0,42$)

Para dicha U_{max} (adimensional), la ley óptima de avance del pistón muestra la siguiente relación de posición, velocidad y aceleración en función del tiempo:

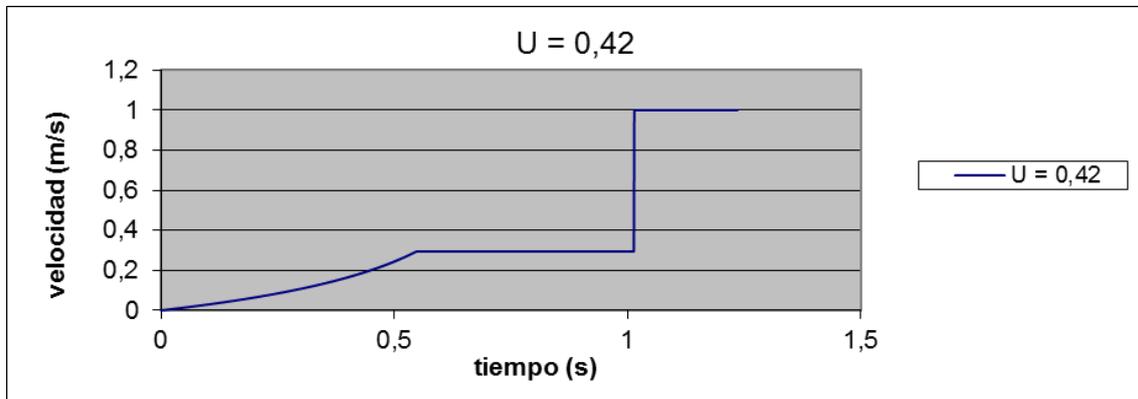


Figura 3. 18: Velocidad de avance del pistón para $U_{max} = 0,42$

	Tiempo (s)	Posición (m)	Velocidad (m/s)	Aceleración (m/s ²)
n	t	x	x'	x''
1	0,0360	0,0002	0,0099	0,2834
2	0,0860	0,0010	0,0247	0,3097
3	0,1360	0,0027	0,0409	0,3405
4	0,1860	0,0052	0,0589	0,3771
5	0,2360	0,0086	0,0788	0,4212
6	0,2860	0,0131	0,1011	0,4753
7	0,3360	0,0188	0,1265	0,5427
8	0,3860	0,0258	0,1557	0,6289
9	0,4360	0,0344	0,1899	0,7423
10	0,4860	0,0449	0,2306	0,8971
11	0,5360	0,0576	0,2807	1,1186
12	0,5860	0,0723	0,2941	0,0000
13	0,6360	0,0870	0,2941	0,0000
14	0,6860	0,1017	0,2941	0,0000
15	0,7360	0,1164	0,2941	0,0000
16	0,7860	0,1311	0,2941	0,0000
17	0,8360	0,1458	0,2941	0,0000
18	0,8860	0,1605	0,2941	0,0000
19	0,9360	0,1752	0,2941	0,0000
20	0,9860	0,1899	0,2941	0,0000
21	1,0360	0,2046	1,0000	0,0000
22	1,0860	0,2193	1,0000	0,0000
23	1,1360	0,2340	1,0000	0,0000
24	1,1860	0,2487	1,0000	0,0000
25	1,2360	0,2635	1,0000	0,0000

Tabla 3. 3: Posición, Velocidad y Aceleración del pistón para $U_{max} = 0,42$

3. Estudio del movimiento del metal y atrapamiento de aire en la cámara de inyección 74

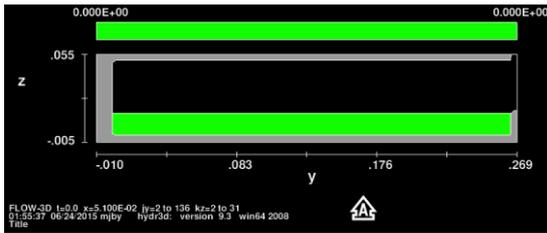


Figura 3. 19: Caso B. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,12 s)

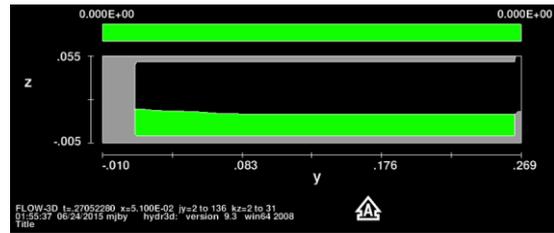


Figura 3. 20: Caso B. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,27 s)

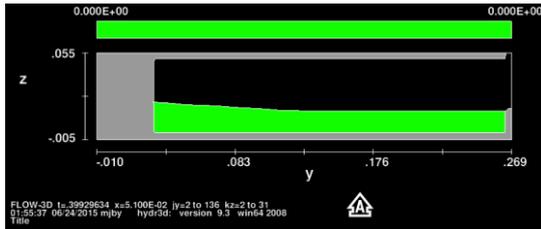


Figura 3. 21: Caso B. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,40 s)

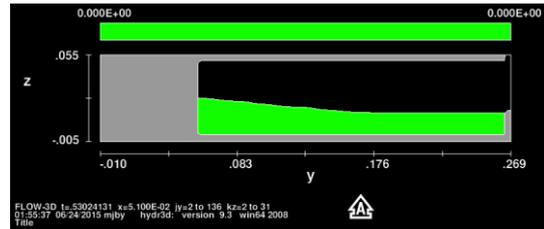


Figura 3. 22: Caso B. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,53 s)

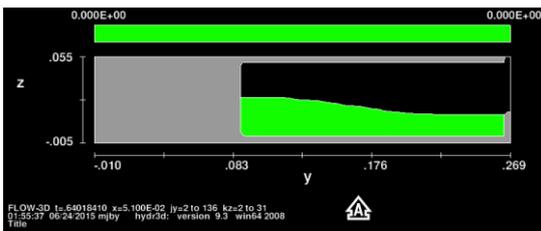


Figura 3. 23: Caso B. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,64 s)

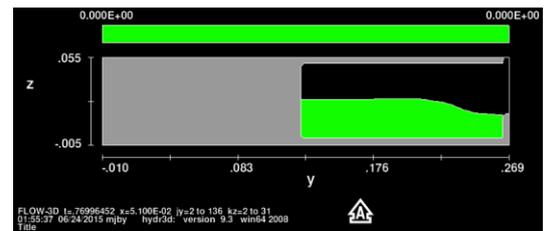


Figura 3. 24: Caso B. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,77 s)

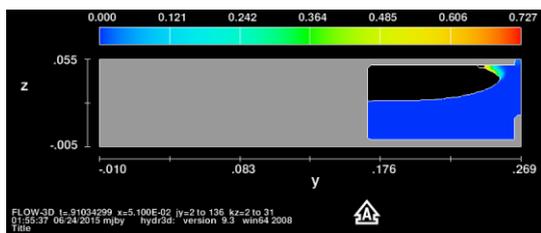


Figura 3. 25: Caso B. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,91 s)

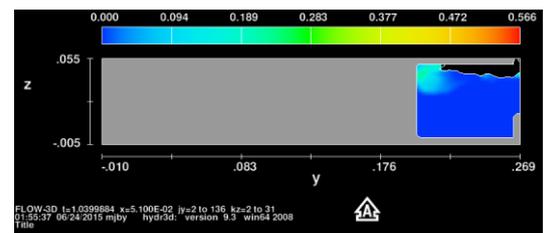


Figura 3. 26: Caso B. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 1,04 s)

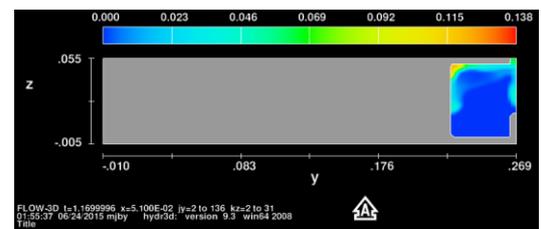


Figura 3. 27: Caso B. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 1,17 s)

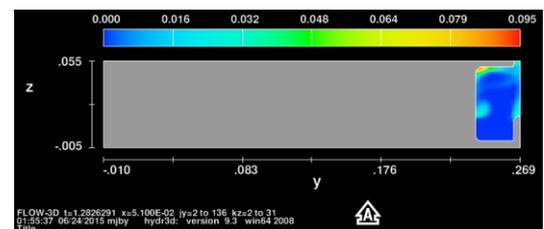


Figura 3. 28: Caso B. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 1,28 s)

3.4.3. Caso C. ($U_{max} = 0,62$)

Para dicha U_{max} (adimensional), la ley óptima de avance del pistón muestra la siguiente relación de posición, velocidad y aceleración en función del tiempo:

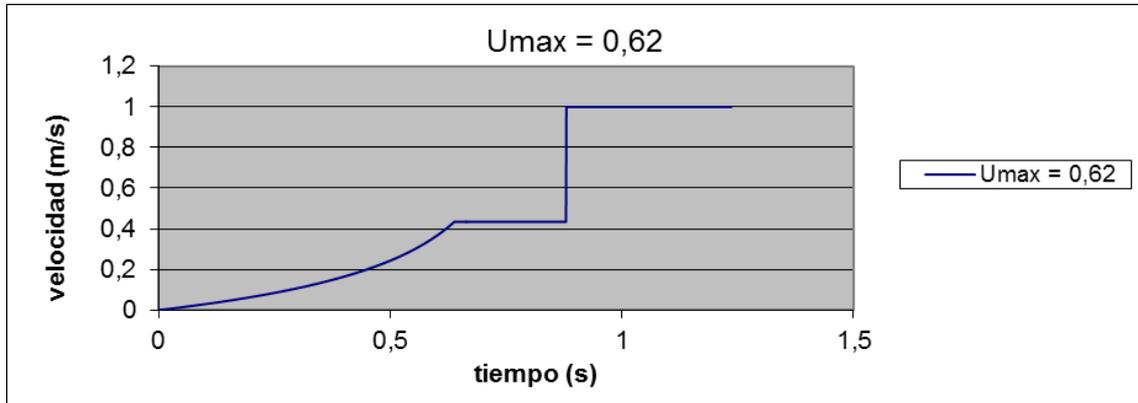


Figura 3. 29: Velocidad de avance del pistón para $U_{max} = 0,62$

	Tiempo (s)	Posición (m)	Velocidad (m/s)	Aceleración (m/s ²)
n	t	x	x'	x''
1	0,0360	0,0002	0,0099	0,2834
2	0,0860	0,0010	0,0247	0,3097
3	0,1360	0,0027	0,0409	0,3405
4	0,1860	0,0052	0,0589	0,3771
5	0,2360	0,0086	0,0788	0,4212
6	0,2860	0,0131	0,1011	0,4753
7	0,3360	0,0188	0,1265	0,5427
8	0,3860	0,0258	0,1557	0,6289
9	0,4360	0,0344	0,1899	0,7423
10	0,4860	0,0449	0,2306	0,8971
11	0,5360	0,0576	0,2807	1,1186
12	0,5860	0,0732	0,3444	1,4575
13	0,6360	0,0924	0,4302	2,0284
14	0,6860	0,1141	0,4342	0,0000
15	0,7360	0,1359	0,4342	0,0000
16	0,7860	0,1576	0,4342	0,0000
17	0,8360	0,1793	0,4342	0,0000
18	0,8860	0,2010	1,0000	0,0000
19	0,9360	0,2227	1,0000	0,0000
20	0,9860	0,2444	1,0000	0,0000
21	1,0360	0,2661	1,0000	0,0000
22	1,0860	0,2878	1,0000	0,0000
23	1,1360	0,3095	1,0000	0,0000
24	1,1860	0,3312	1,0000	0,0000
25	1,2360	0,3530	1,0000	0,0000

Tabla 3. 4: Posición, Velocidad y Aceleración del pistón para $U_{max} = 0,62$

3. Estudio del movimiento del metal y atrapamiento de aire en la cámara de inyección 76

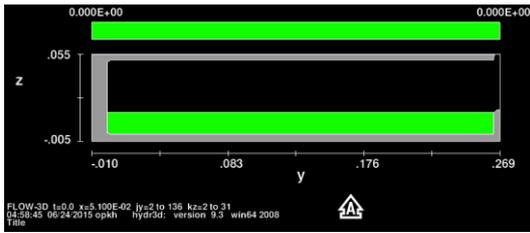


Figura 3. 30: Caso C. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,08$ s)

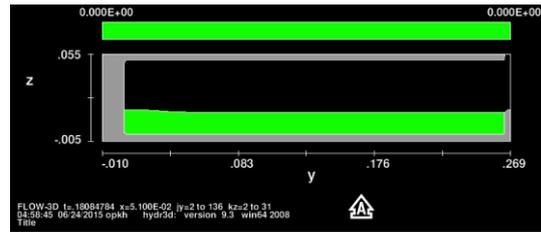


Figura 3. 31: Caso C. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,18$ s)

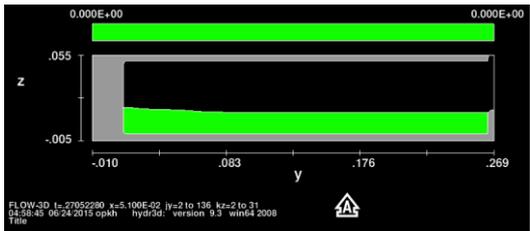


Figura 3. 32: Caso C. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,27$ s)

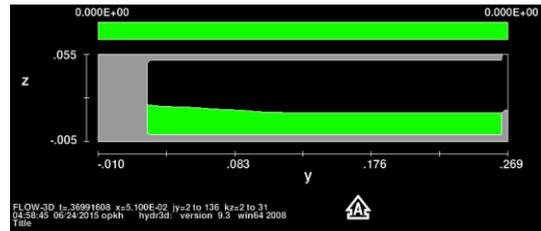


Figura 3. 33: Caso C. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,37$ s)

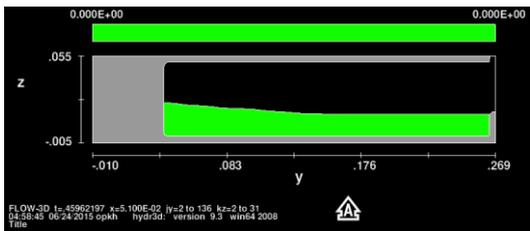


Figura 3. 34: Caso C. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,46$ s)

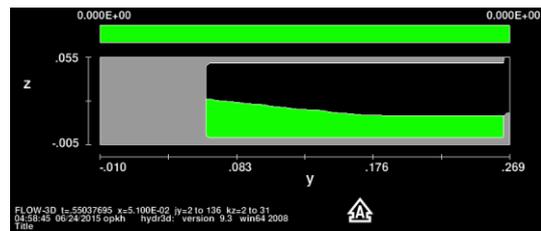


Figura 3. 35: Caso C. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,55$ s)

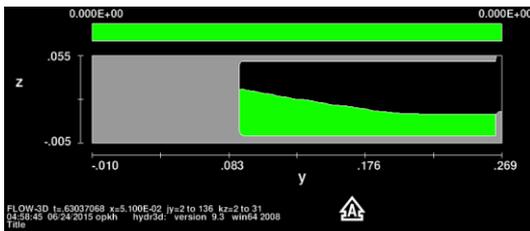


Figura 3. 36: Caso C. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,63$ s)

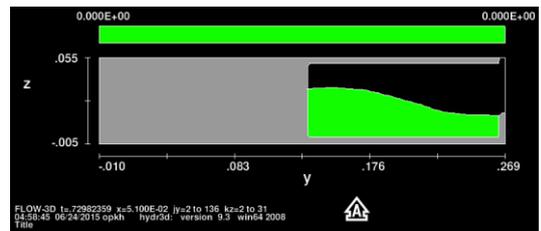


Figura 3. 37: Caso C. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,73$ s)

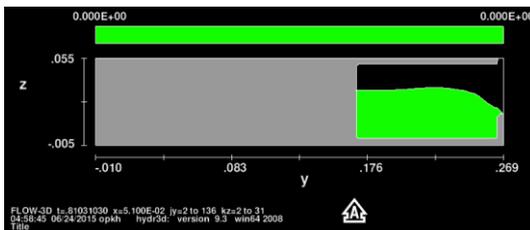


Figura 3. 38: Caso C. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,81$ s)

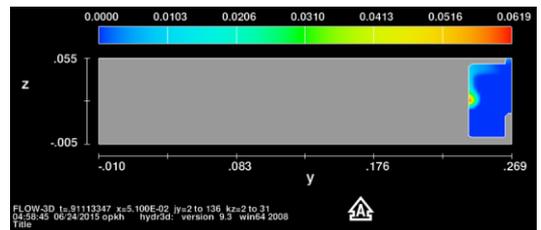


Figura 3. 39: Caso C. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,91$ s)

3.4.4. Caso D. ($U_{max} = 0,88$)

Para dicha U_{max} (adimensional), la ley óptima de avance del pistón muestra la siguiente relación de posición, velocidad y aceleración en función del tiempo:

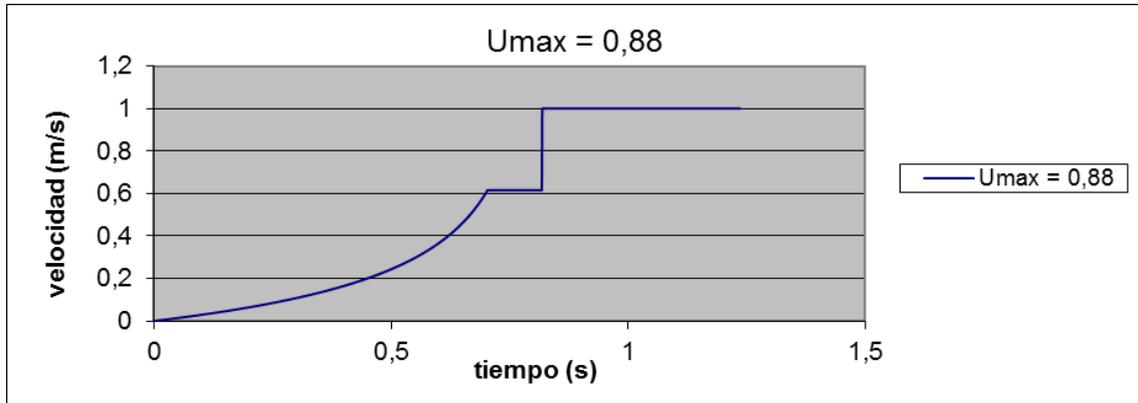


Figura 3. 40: Velocidad de avance del pistón para $U_{max} = 0,88$

	Tiempo (s)	Posición (m)	Velocidad (m/s)	Aceleración (m/s ²)
n	t	x	x'	x''
1	0,0360	0,0002	0,0099	0,2834
2	0,0860	0,0010	0,0247	0,3097
3	0,1360	0,0027	0,0409	0,3405
4	0,1860	0,0052	0,0589	0,3771
5	0,2360	0,0086	0,0788	0,4212
6	0,2860	0,0131	0,1011	0,4753
7	0,3360	0,0188	0,1265	0,5427
8	0,3860	0,0258	0,1557	0,6289
9	0,4360	0,0344	0,1899	0,7423
10	0,4860	0,0449	0,2306	0,8971
11	0,5360	0,0576	0,2807	1,1186
12	0,5860	0,0732	0,3444	1,4575
13	0,6360	0,0924	0,4302	2,0284
14	0,6860	0,1169	0,5561	3,1511
15	0,7360	0,1471	0,6163	0,0000
16	0,7860	0,1780	0,6163	0,0000
17	0,8360	0,2088	1,0000	0,0000
18	0,8860	0,2396	1,0000	0,0000
19	0,9360	0,2704	1,0000	0,0000
20	0,9860	0,3012	1,0000	0,0000
21	1,0360	0,3320	1,0000	0,0000
22	1,0860	0,3628	1,0000	0,0000
23	1,1360	0,3937	1,0000	0,0000
24	1,1860	0,4245	1,0000	0,0000
25	1,2360	0,4553	1,0000	0,0000

Tabla 3. 5: Posición, Velocidad y Aceleración del pistón para $U_{max} = 0,88$

3. Estudio del movimiento del metal y atrapamiento de aire en la cámara de inyección 78

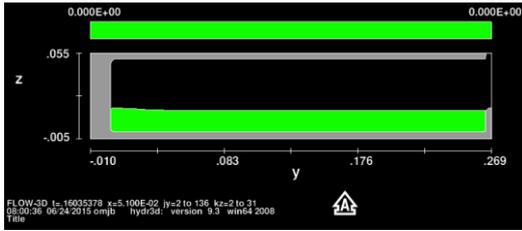


Figura 3. 41: Caso D. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,16$ s)

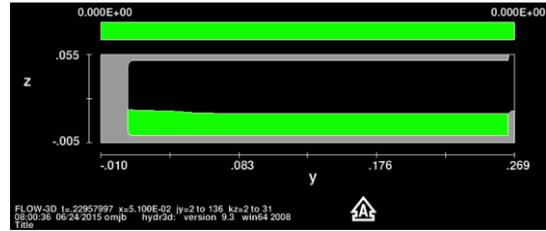


Figura 3. 42: Caso D. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,23$ s)

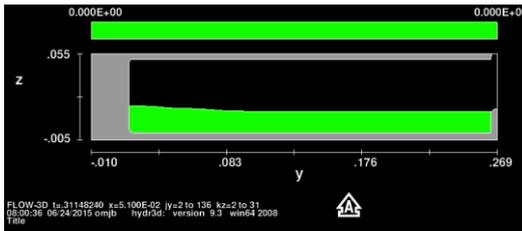


Figura 3. 43: Caso D. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,31$ s)

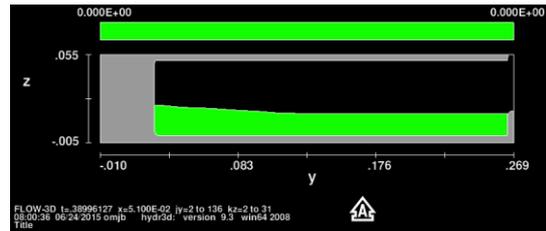


Figura 3. 44: Caso D. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,39$ s)

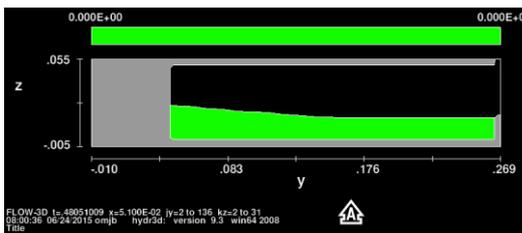


Figura 3. 45: Caso D. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,48$ s)

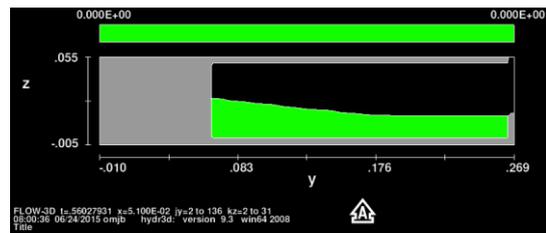


Figura 3. 46: Caso D. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,56$ s)

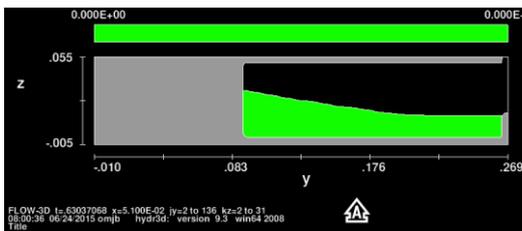


Figura 3. 47: Caso D. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,63$ s)

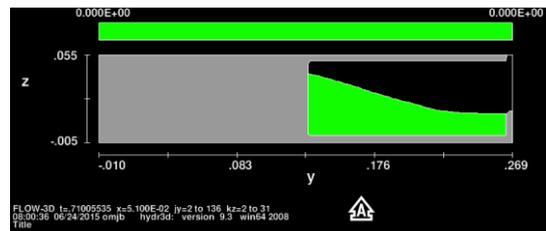


Figura 3. 48: Caso D. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,71$ s)

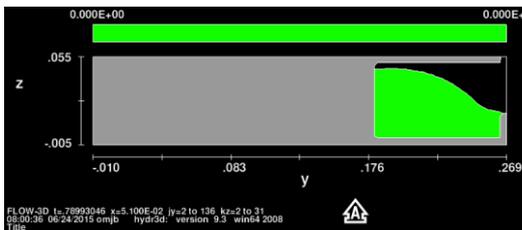


Figura 3. 49: Caso D. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,79$ s)

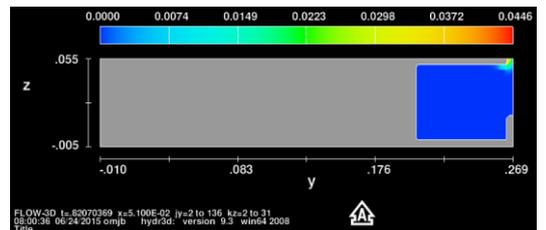


Figura 3. 50: Caso D. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,82$ s)

3.4.5. Caso E. ($U_{max} = 0,88$ variación 1)

Para dicha U_{max} (adimensional), la ley óptima de avance del pistón muestra la siguiente relación de posición, velocidad y aceleración en función del tiempo:

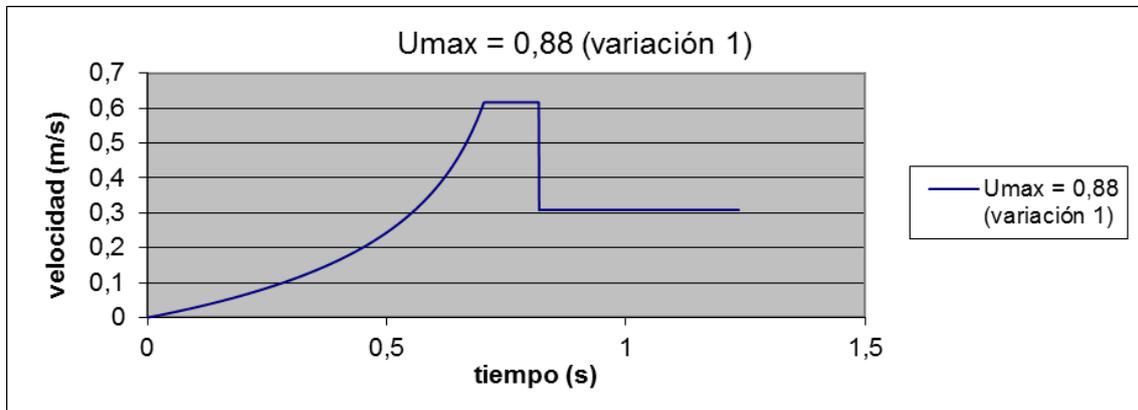


Figura 3. 51: Velocidad de avance del pistón para $U_{max} = 0,88$ variación 1

	Tiempo (s)	Posición (m)	Velocidad (m/s)	Aceleración (m/s ²)
n	t	x	x'	x''
1	0,0360	0,0002	0,0099	0,2834
2	0,0860	0,0010	0,0247	0,3097
3	0,1360	0,0027	0,0409	0,3405
4	0,1860	0,0052	0,0589	0,3771
5	0,2360	0,0086	0,0788	0,4212
6	0,2860	0,0131	0,1011	0,4753
7	0,3360	0,0188	0,1265	0,5427
8	0,3860	0,0258	0,1557	0,6289
9	0,4360	0,0344	0,1899	0,7423
10	0,4860	0,0449	0,2306	0,8971
11	0,5360	0,0576	0,2807	1,1186
12	0,5860	0,0732	0,3444	1,4575
13	0,6360	0,0924	0,4302	2,0284
14	0,6860	0,1169	0,5561	3,1511
15	0,7360	0,1471	0,6163	0,0000
16	0,7860	0,1780	0,6163	0,0000
17	0,8360	0,2088	0,3082	0,0000
18	0,8860	0,2396	0,3082	0,0000
19	0,9360	0,2704	0,3082	0,0000
20	0,9860	0,3012	0,3082	0,0000
21	1,0360	0,3320	0,3082	0,0000
22	1,0860	0,3628	0,3082	0,0000
23	1,1360	0,3937	0,3082	0,0000
24	1,1860	0,4245	0,3082	0,0000
25	1,2360	0,4553	0,3082	0,0000

Tabla 3. 6: Posición, Velocidad y Aceleración del pistón para $U_{max} = 0,88$ variación 1

3. Estudio del movimiento del metal y atrapamiento de aire en la cámara de inyección 80

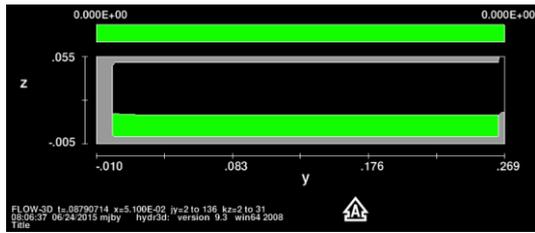


Figura 3. 52: Caso E. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,08 s)

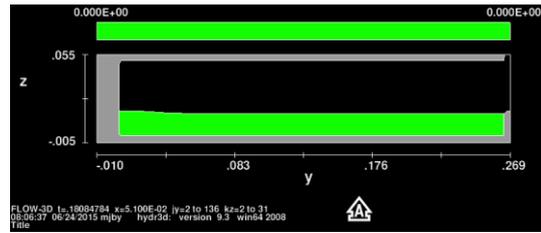


Figura 3. 53: Caso E. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,18 s)

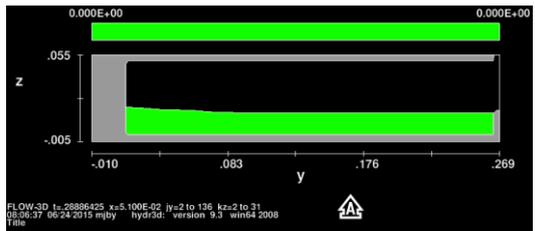


Figura 3. 54: Caso E. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,28 s)

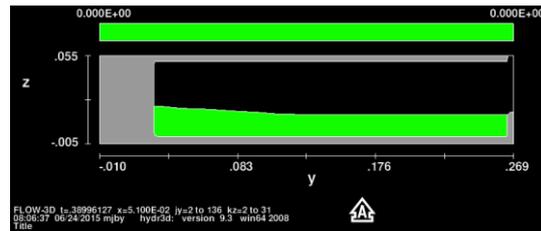


Figura 3. 55: Caso E. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,39 s)

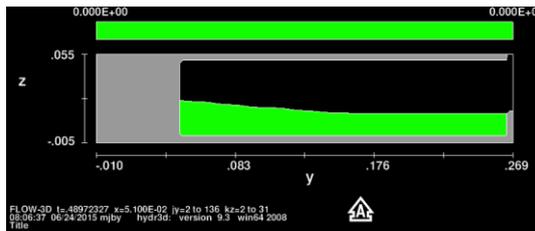


Figura 3. 56: Caso E. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,49 s)

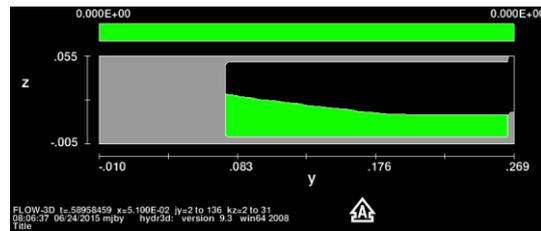


Figura 3. 57: Caso E. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,59 s)

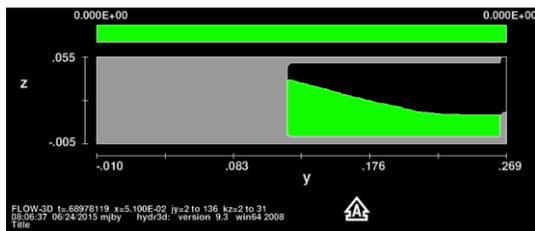


Figura 3. 58: Caso E. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,69 s)

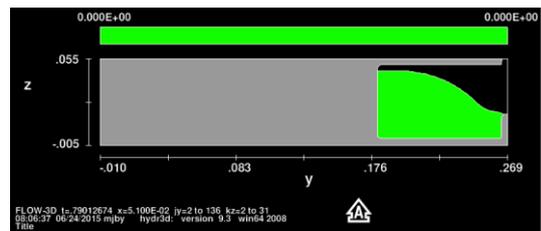


Figura 3. 59: Caso E. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,79 s)

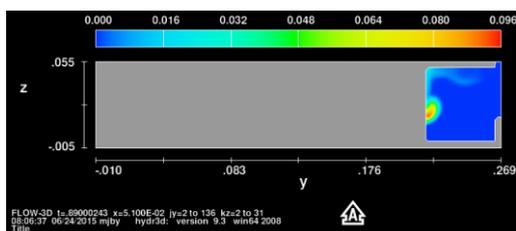


Figura 3. 60: Caso E. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,89 s)

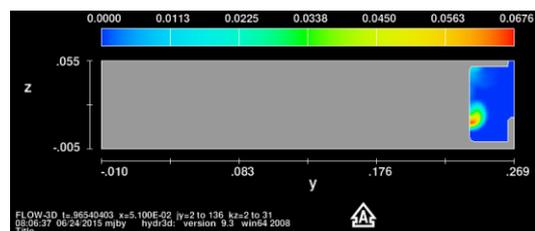


Figura 3. 61: Caso E. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,95 s)

3.4.6. Caso F. ($U_{max} = 0,88$ variación 2)

Para dicha U_{max} (adimensional), la ley óptima de avance del pistón muestra la siguiente relación de posición, velocidad y aceleración en función del tiempo:

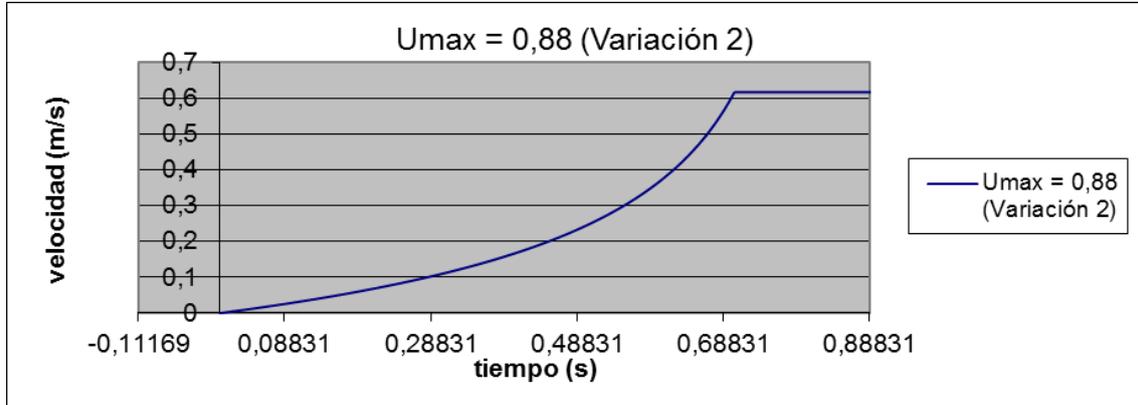


Figura 3. 62: Velocidad de avance del pistón para $U_{max} = 0,88$ variación 2

	Tiempo (s)	Posición (m)	Velocidad (m/s)	Aceleración (m/s ²)
n	t	x	x'	x''
1	0,0360	0,0002	0,0099	0,2834
2	0,0860	0,0010	0,0247	0,3097
3	0,1360	0,0027	0,0409	0,3405
4	0,1860	0,0052	0,0589	0,3771
5	0,2360	0,0086	0,0788	0,4212
6	0,2860	0,0131	0,1011	0,4753
7	0,3360	0,0188	0,1265	0,5427
8	0,3860	0,0258	0,1557	0,6289
9	0,4360	0,0344	0,1899	0,7423
10	0,4860	0,0449	0,2306	0,8971
11	0,5360	0,0576	0,2807	1,1186
12	0,5860	0,0732	0,3444	1,4575
13	0,6360	0,0924	0,4302	2,0284
14	0,6860	0,1169	0,5561	3,1511
15	0,7360	0,1471	0,6163	0,0000
16	0,7860	0,1780	0,6163	0,0000
17	0,8360	0,2088	0,6163	0,0000
18	0,8860	0,2396	0,6163	0,0000
19	0,9360	0,2704	0,6163	0,0000
20	0,9860	0,3012	0,6163	0,0000
21	1,0360	0,3320	0,6163	0,0000
22	1,0860	0,3628	0,6163	0,0000
23	1,1360	0,3937	0,6163	0,0000
24	1,1860	0,4245	0,6163	0,0000
25	1,2360	0,4553	0,6163	0,0000

Tabla 3. 7: Posición, Velocidad y Aceleración del pistón para $U_{max} = 0,88$ variación 2

3. Estudio del movimiento del metal y atrapamiento de aire en la cámara de inyección 82

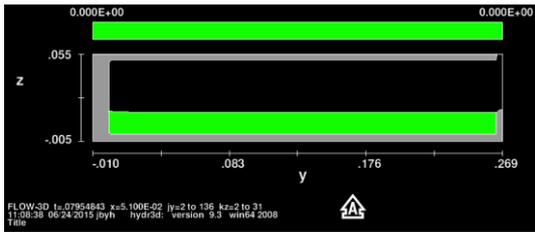


Figura 3. 63: Caso F. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,08 s)

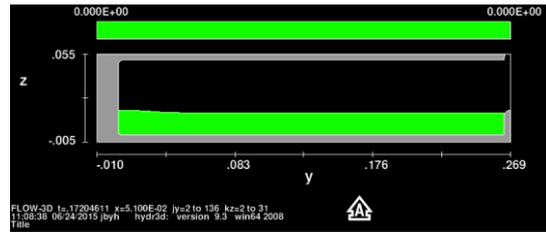


Figura 3. 64: Caso F. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,17 s)

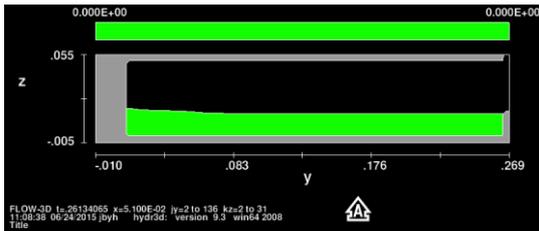


Figura 3. 65: Caso F. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,26 s)

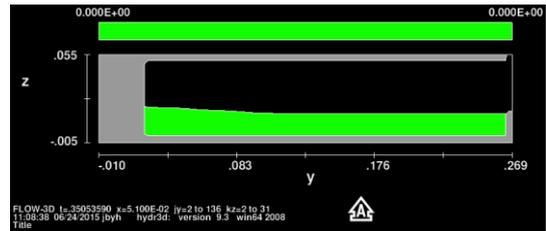


Figura 3. 66: Caso F. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,35 s)

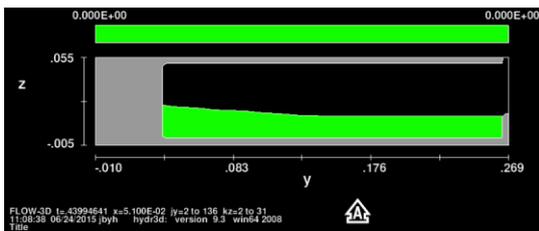


Figura 3. 67: Caso F. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,44 s)

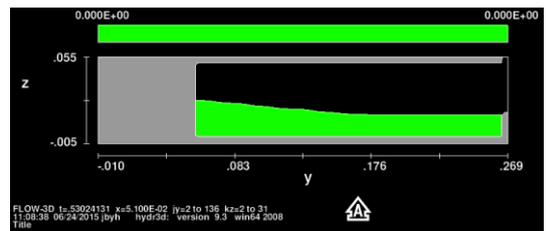


Figura 3. 68: Caso F. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,53 s)

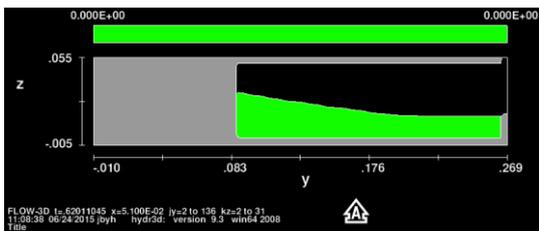


Figura 3. 69: Caso F. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,62 s)

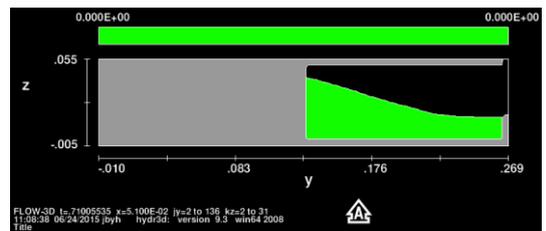


Figura 3. 70: Caso F. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,71 s)

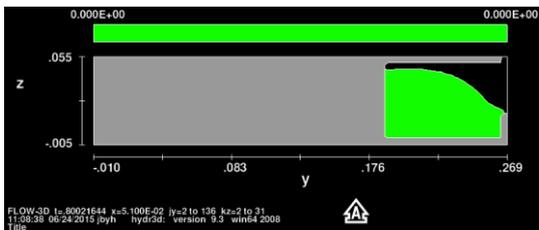


Figura 3. 71: Caso F. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,80 s)

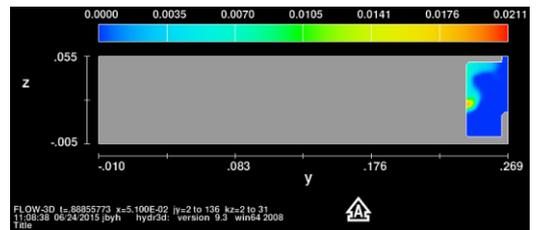


Figura 3. 72: Caso F. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire (t = 0,88 s)

3.4.7. Caso G. $U_{max} = 1$

Para dicha U_{max} (adimensional), la ley óptima de avance del pistón muestra la siguiente relación de posición, velocidad y aceleración en función del tiempo:

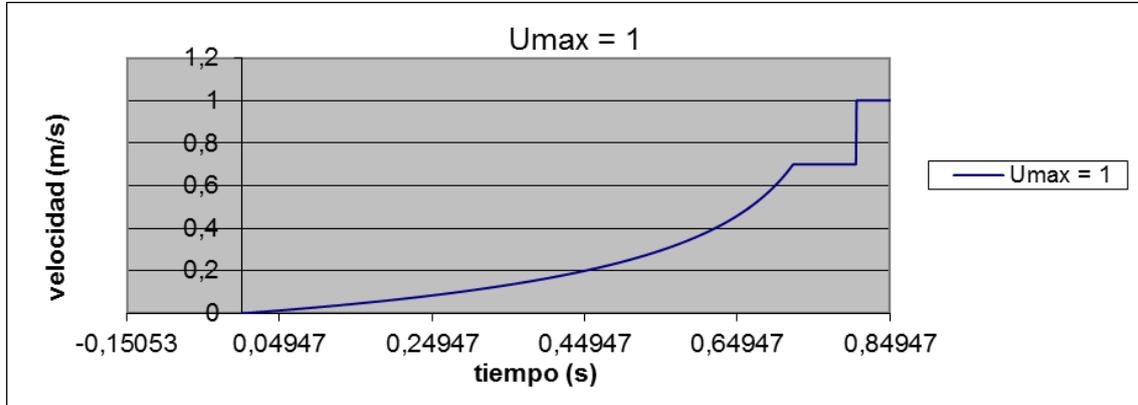


Figura 3. 73: Velocidad de avance del pistón para $U_{max} = 1$

	Tiempo (s)	Posición (m)	Velocidad (m/s)	Aceleración (m/s ²)
n	t	x	x'	x''
1	0,0360	0,0002	0,0099	0,2834
2	0,0860	0,0010	0,0247	0,3097
3	0,1360	0,0027	0,0409	0,3405
4	0,1860	0,0052	0,0589	0,3771
5	0,2360	0,0086	0,0788	0,4212
6	0,2860	0,0131	0,1011	0,4753
7	0,3360	0,0188	0,1265	0,5427
8	0,3860	0,0258	0,1557	0,6289
9	0,4360	0,0344	0,1899	0,7423
10	0,4860	0,0449	0,2306	0,8971
11	0,5360	0,0576	0,2807	1,1186
12	0,5860	0,0732	0,3444	1,4575
13	0,6360	0,0924	0,4302	2,0284
14	0,6860	0,1169	0,5561	3,1511
15	0,7360	0,1490	0,7004	0,0000
16	0,7860	0,1841	0,7004	0,0000
17	0,8360	0,2191	1,0000	0,0000
18	0,8860	0,2541	1,0000	0,0000
19	0,9360	0,2891	1,0000	0,0000
20	0,9860	0,3241	1,0000	0,0000
21	1,0360	0,3591	1,0000	0,0000
22	1,0860	0,3942	1,0000	0,0000
23	1,1360	0,4292	1,0000	0,0000
24	1,1860	0,4642	1,0000	0,0000
25	1,2360	0,4992	1,0000	0,0000

Tabla 3. 8: Posición, Velocidad y Aceleración del pistón para $U_{max} = 1$

3. Estudio del movimiento del metal y atrapamiento de aire en la cámara de inyección 84

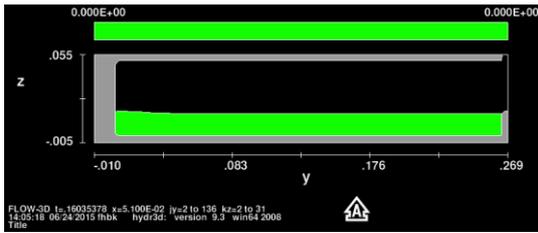


Figura 3. 74: Caso G. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,16$ s)

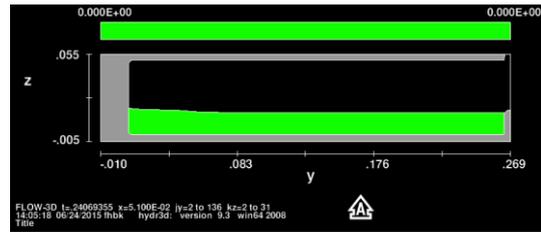


Figura 3. 75: Caso G. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,24$ s)

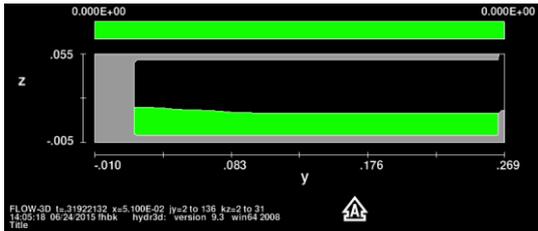


Figura 3. 76: Caso G. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,32$ s)

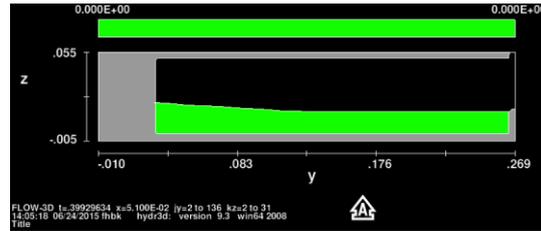


Figura 3. 77: Caso G. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,40$ s)

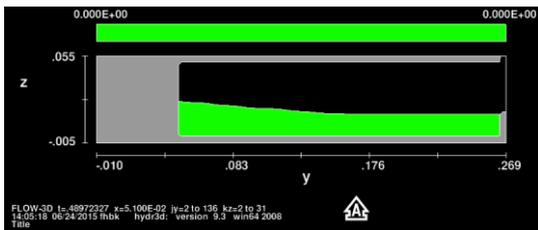


Figura 3. 78: Caso G. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,49$ s)

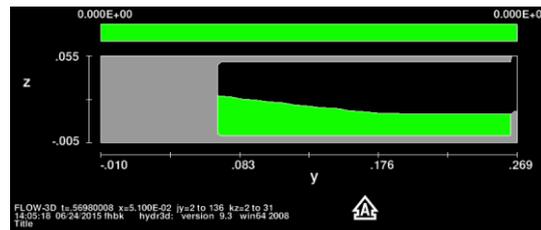


Figura 3. 79: Caso G. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,57$ s)

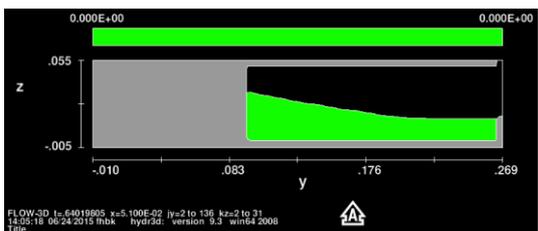


Figura 3. 80: Caso G. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,64$ s)

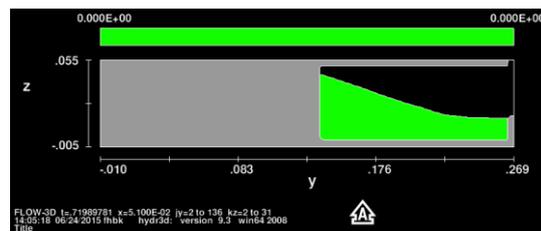


Figura 3. 81: Caso G. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,72$ s)

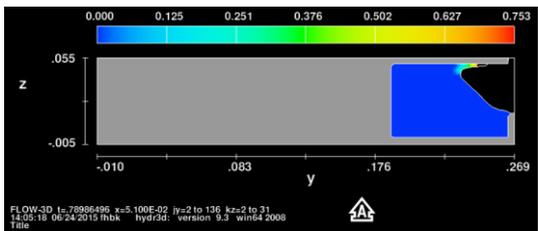


Figura 3. 82: Caso G. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,79$ s)

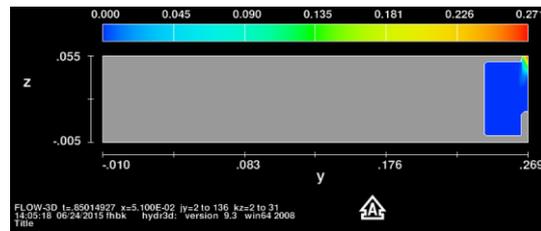


Figura 3. 83: Caso G. Fracción volumétrica de atrapamiento de aire ($t = 0,85$ s)

3.5. Conclusión.

	A	B	C	D	E	F	G
$Uh/(gH)^{0.5}$	0,25	0,42	0,62	0,88	0,88 (1/2)	0,88 (fin)	1

n	Tiempo (s)	Velocidad						
1	0,036	0,009898	0,009898	0,009898	0,009898	0,009898	0,009898	0,009898
2	0,086	0,024708	0,024708	0,024708	0,024708	0,024708	0,024708	0,024708
3	0,136	0,040940	0,040940	0,040940	0,040940	0,040940	0,040940	0,040940
4	0,186	0,058853	0,058853	0,058853	0,058853	0,058853	0,058853	0,058853
5	0,236	0,078776	0,078776	0,078776	0,078776	0,078776	0,078776	0,078776
6	0,286	0,101142	0,101142	0,101142	0,101142	0,101142	0,101142	0,101142
7	0,336	0,126527	0,126527	0,126527	0,126527	0,126527	0,126527	0,126527
8	0,386	0,155727	0,155727	0,155727	0,155727	0,155727	0,155727	0,155727
9	0,436	0,175089	0,189872	0,189872	0,189872	0,189872	0,189872	0,189872
10	0,486	0,175089	0,230643	0,230643	0,230643	0,230643	0,230643	0,230643
11	0,536	0,175089	0,280678	0,280678	0,280678	0,280678	0,280678	0,280678
12	0,586	0,175089	0,294150	0,344429	0,344429	0,344429	0,344429	0,344429
13	0,636	0,175089	0,294150	0,430206	0,430206	0,430206	0,430206	0,430206
14	0,686	0,175089	0,294150	0,434221	0,556105	0,556105	0,556105	0,556105
15	0,736	0,175089	0,294150	0,434221	0,616314	0,616314	0,616314	0,700357
16	0,786	0,175089	0,294150	0,434221	0,616314	0,616314	0,616314	0,700357
17	0,836	0,175089	0,294150	0,434221	1,000000	0,308157	0,616314	1,000000
18	0,886	0,175089	0,294150	1,000000	1,000000	0,308157	0,616314	1,000000
19	0,936	0,175089	0,294150	1,000000	1,000000	0,308157	0,616314	1,000000
20	0,986	0,175089	0,294150	1,000000	1,000000	0,308157	0,616314	1,000000
21	1,036	0,175089	1,000000	1,000000	1,000000	0,308157	0,616314	1,000000
22	1,086	0,175089	1,000000	1,000000	1,000000	0,308157	0,616314	1,000000
23	1,136	0,175089	1,000000	1,000000	1,000000	0,308157	0,616314	1,000000
24	1,186	0,175089	1,000000	1,000000	1,000000	0,308157	0,616314	1,000000
25	1,236	0,175089	1,000000	1,000000	1,000000	0,308157	0,308157	1,000000

Tabla 3. 9: Relación de velocidades de avance del pistón para diferentes U_{max}

Tras la comparativa realizada en Flow3D con los 7 diferentes casos propuestos, se ha demostrado que la relación de velocidades de avance del pistón en la cámara de inyección es óptima para la velocidad adimensional $U_{max} = 0,88$.

Con este planteamiento llegamos al final de la primera etapa con un volumen de aire atrapado en la cámara mínimo. Esto supone el inicio de la segunda etapa de llenado (alta velocidad) con un fluido sin acumulación de defectos. Resulta totalmente necesario iniciar la segunda etapa de esta manera para favorecer un reparto de material por la cámara de distribución de forma homogénea para obtener el resultado deseado, es decir, una pieza con la mínima porosidad.

CAPÍTULO 4

Estudio del movimiento del metal y atrapamiento de aire durante el llenado del molde.

En este capítulo se lleva a cabo un estudio numérico de la evolución de la superficie libre del metal fundido durante el llenado del molde analizando en detalle el atrapamiento de aire producido. Se analizarán la influencia en los resultados de:

- Tres sistemas de distribución de geometría diferente
- Velocidad del pistón durante el llenado del molde.
- Inicio de la segunda fase del proceso de inyección.

Las simulaciones que se analizan en este capítulo se han realizado teniendo en cuenta la transferencia de calor, la solidificación del metal fundido los modelos de atrapamiento de aire y la porosidad por contracción.

4.1. Descripción del problema

Los mecanismos de atrapamiento de aire en el molde están relacionados principalmente con la evolución del flujo de metal fundido y la evacuación de aire a través de los vientos durante el llenado de la cavidad del molde.

Por otro lado, el comportamiento del flujo de metal fundido está condicionado por diferentes variables entre las que cabe destacar la velocidad de inyección, el diseño del sistema de distribución, las condiciones del flujo de metal fundido a la salida de la cámara de inyección y la geometría de la cavidad del molde y de los vientos. Aunque las principales variables sobre las que se puede actuar en la segunda fase del proceso de inyección para reducir la cantidad de aire atrapado durante el llenado del molde son la selección de una velocidad de inyección adecuada y el correcto diseño del sistema de distribución del molde y del sistema de evacuación de aire, **la elevada complejidad de la evolución del flujo hace difícil establecer criterios generales o reglas de diseño de estos sistemas.**

Con el objetivo de establecer los principales patrones de flujo, y su relación con el mecanismo que puede dar lugar a la formación de porosidad, en este Capítulo se estudiará, numéricamente el llenado de la cavidad del molde para diferentes condiciones de inyección. En concreto se estudiará la influencia de la fase de transición sobre el patrón de flujo del metal líquido durante los primeros instantes de llenado.

Los parámetros a analizar en este último caso serán:

- La longitud del sistema de distribución (conducto de entrada)
- El pre-llenado del conducto de entrada en el momento de inicio de la fase rápida
- La influencia de la tensión superficial en el análisis numérico,
- La ley de movimiento del pistón aplicada.
- La distribución de velocidades al finalizar la fase lenta.

Tal y como se describió en el Capítulo 2, en las simulaciones numéricas se han utilizado distintas geometrías para los problemas numéricos de este Capítulo.

4.2. Evolución del flujo en el interior del molde durante el llenado.

El estudio del movimiento del metal en el interior del molde se hace con la intención de obtener las conclusiones de diseño y requisitos de fabricación para elaborar la pieza final sin fallos, un mínimo porcentaje de atrapamiento de aire y la mínima porosidad. Con el mencionado fin, se han realizado las simulaciones en el software Flow3D teniendo en cuenta todos los parámetros que poseen influencia en la temperatura y el atrapamiento de aire.

El análisis muestra, para cada una de las 3 geometrías del molde, la evolución del metal fundido en el interior. Se ha dividido dicha evolución en 9 instantes de tiempo distintos y se han analizado los resultados en función del porcentaje de **atrapamiento de aire** y la **distribución de temperaturas**.

Con el fin de hallar la combinación óptima entre geometría de molde y velocidad de llenado para obtener un resultado de pieza final con mínimo porcentaje de atrapamiento de aire, se han simulado 9 casos diferentes.

- Los casos (A, B, y C) simulan el llenado de un molde que posee la cámara de distribución más sencilla, rectangular y sin variación en el espesor.

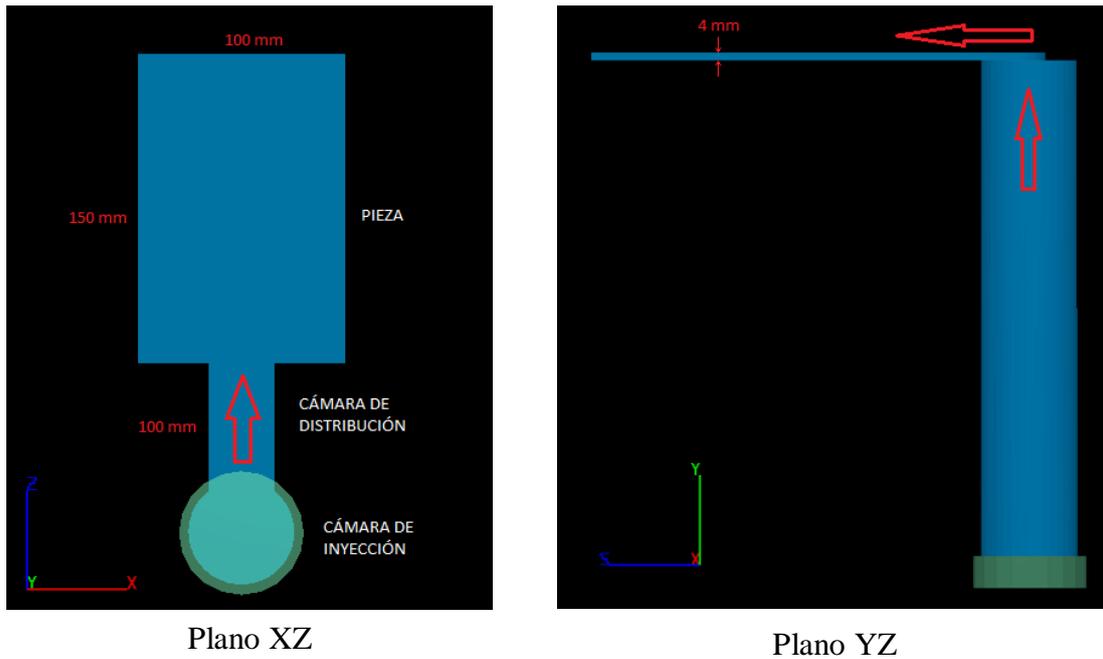


Figura 4. 1: Geometría del molde 1

- Los casos (D, E, y F) simulan el llenado de un molde que posee la cámara de distribución de complejidad media, con la entrada curvada para fomentar la homogeneidad durante la distribución y sin variación en el espesor.

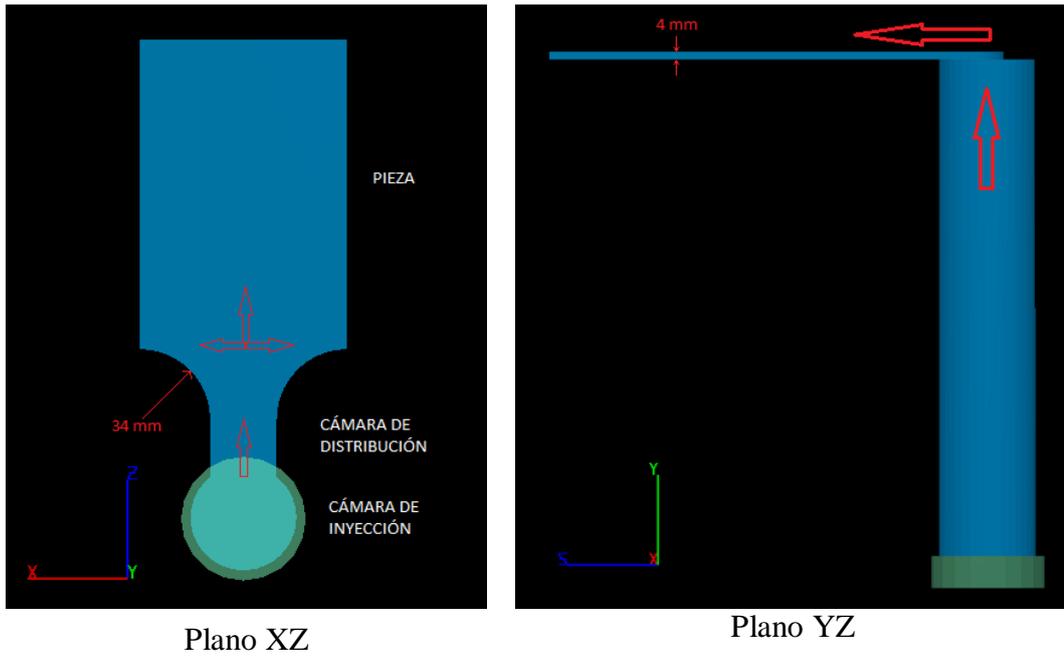


Figura 4. 2: Geometría del molde 2

- Los casos (G, H, y I) simulan el llenado de un molde que posee la cámara de distribución más compleja, con la entrada curvada para fomentar la homogeneidad durante la distribución y con variación en el espesor para la estabilización del flujo de entrada

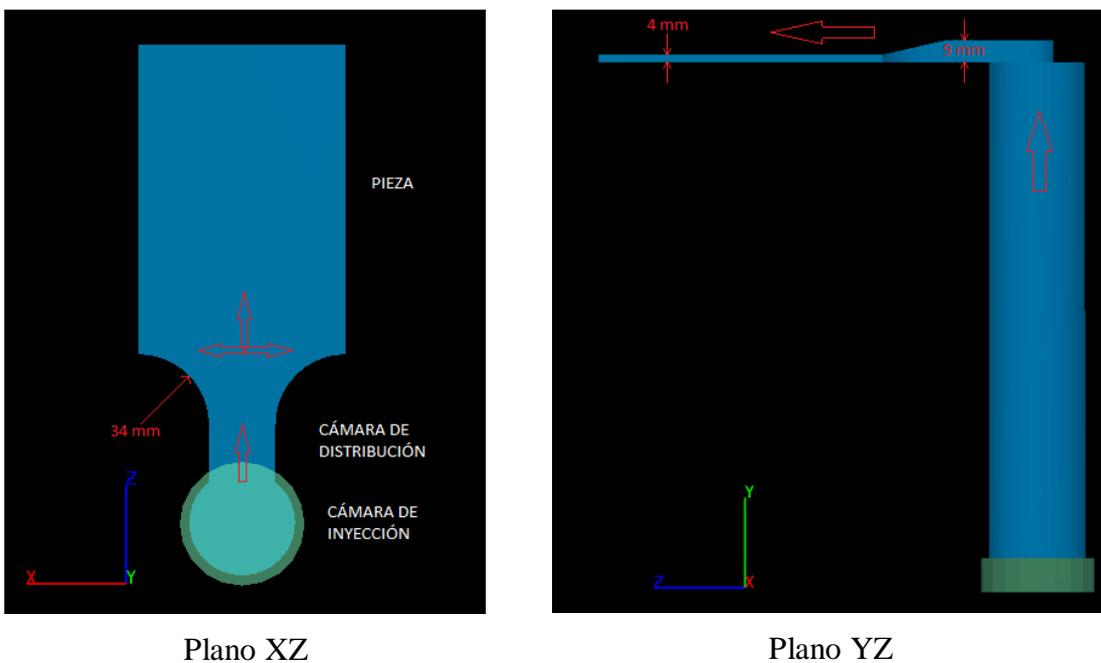


Figura 4. 3: Geometría del molde 3

Para las 3 tipologías de molde, se ha simulado el llenado a 3 velocidades de avance del pistón diferentes.

- Velocidad de llenado 1: 1 m/s
- Velocidad de llenado 2: 3 m/s
- Velocidad de llenado 3: 0,5 m/s

CASO	GEOMETRÍA MOLDE	VELOCIDAD DE LLENADO
A	1	1
B	1	3
C	1	0,5
D	2	1
E	2	3
F	2	0,5
G	3	1
H	3	3
I	3	0,5

Tabla 4. 1 Tipos de molde – velocidad de llenado.

4.2.1. Análisis del llenado de Molde 1.

4.2.1.1. Geometría del molde 1.

El molde 1 presenta la geometría más sencilla. Principalmente destaca por una cámara de distribución en forma rectangular, de 100x32 mm, con espesor constante de 4mm.

Antes de simular el llenado, se puede presuponer que la geometría de la cámara de distribución no favorece el homogéneo llenado, la minimización de atrapamiento de aire ni la disminución de defectos finales en la pieza tales como micro-porosidades ya que al entrar el fluido a alta presión empujado por el pistón a diferentes velocidades el flujo no será redirigido hacia las paredes laterales, sino que chocará con el extremo final de la pieza y retornará de nuevo llenando por último las dos esquinas de la entrada.

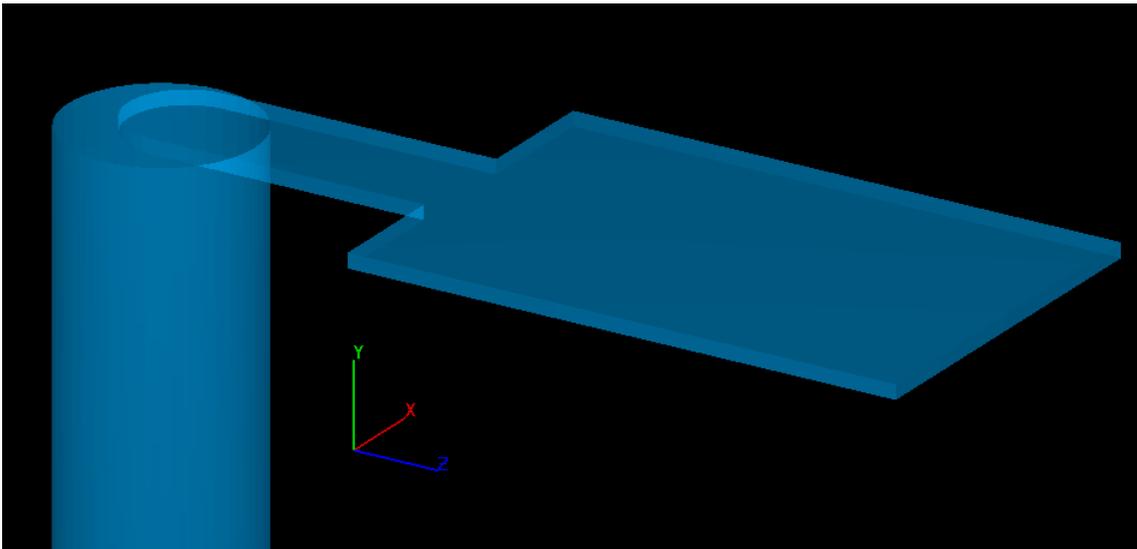


Figura 4. 4: Geometría del molde 1

4.2.1.2. Análisis del llenado del molde 1 según el atrapamiento de aire y la distribución de temperaturas.

4.2.1.2. Caso A. Velocidad de llenado 1 m/s

- Simulación FLOW3D.

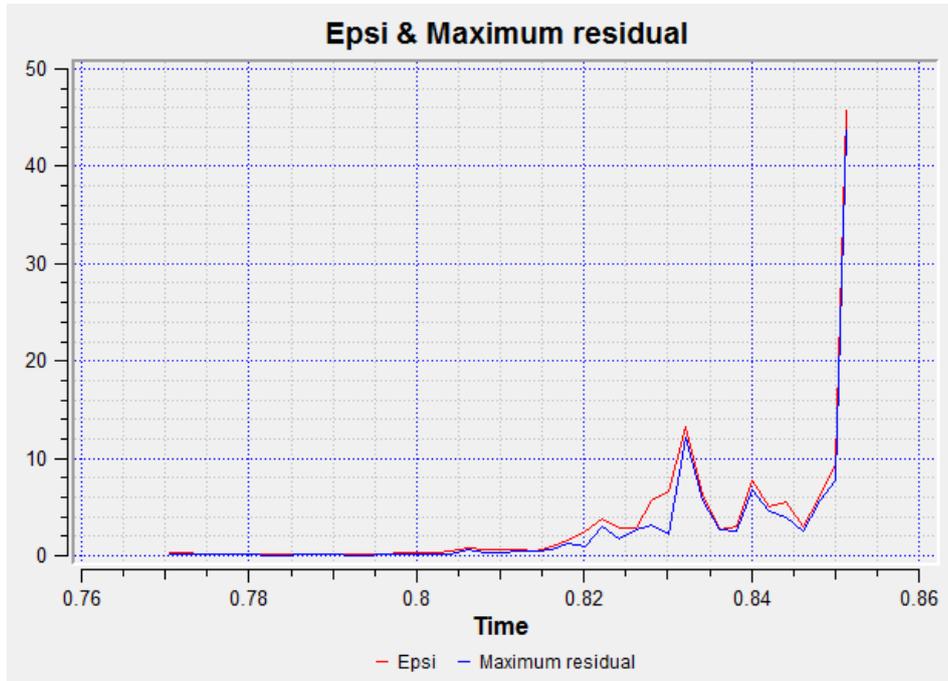


Figura 4. 5: Errores y nivel residual de la simulación caso A.

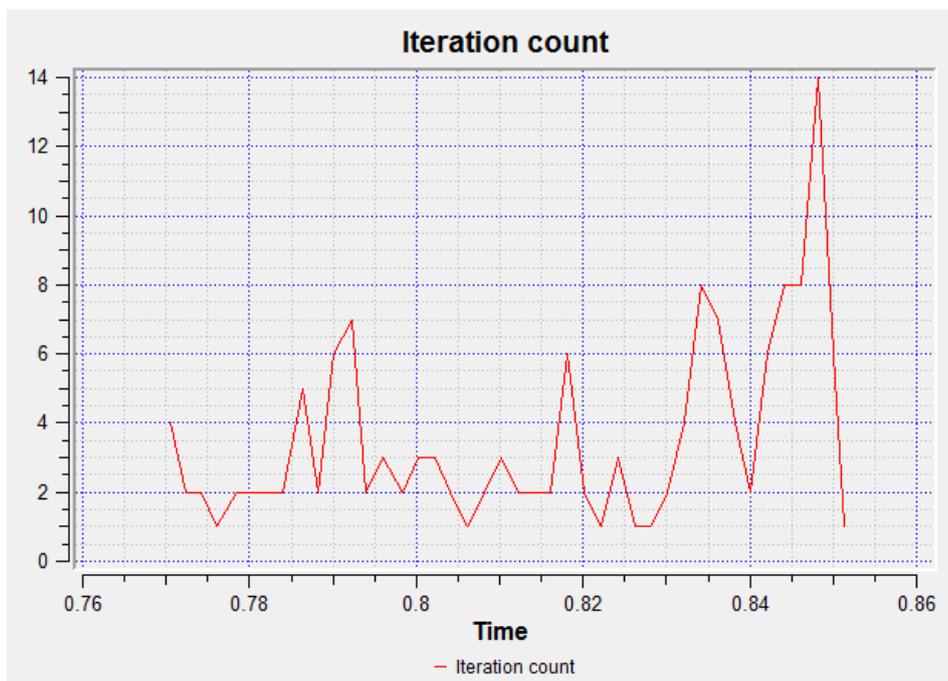


Figura 4. 6: Número de iteraciones durante la simulación caso A.

- Atrapamiento de aire

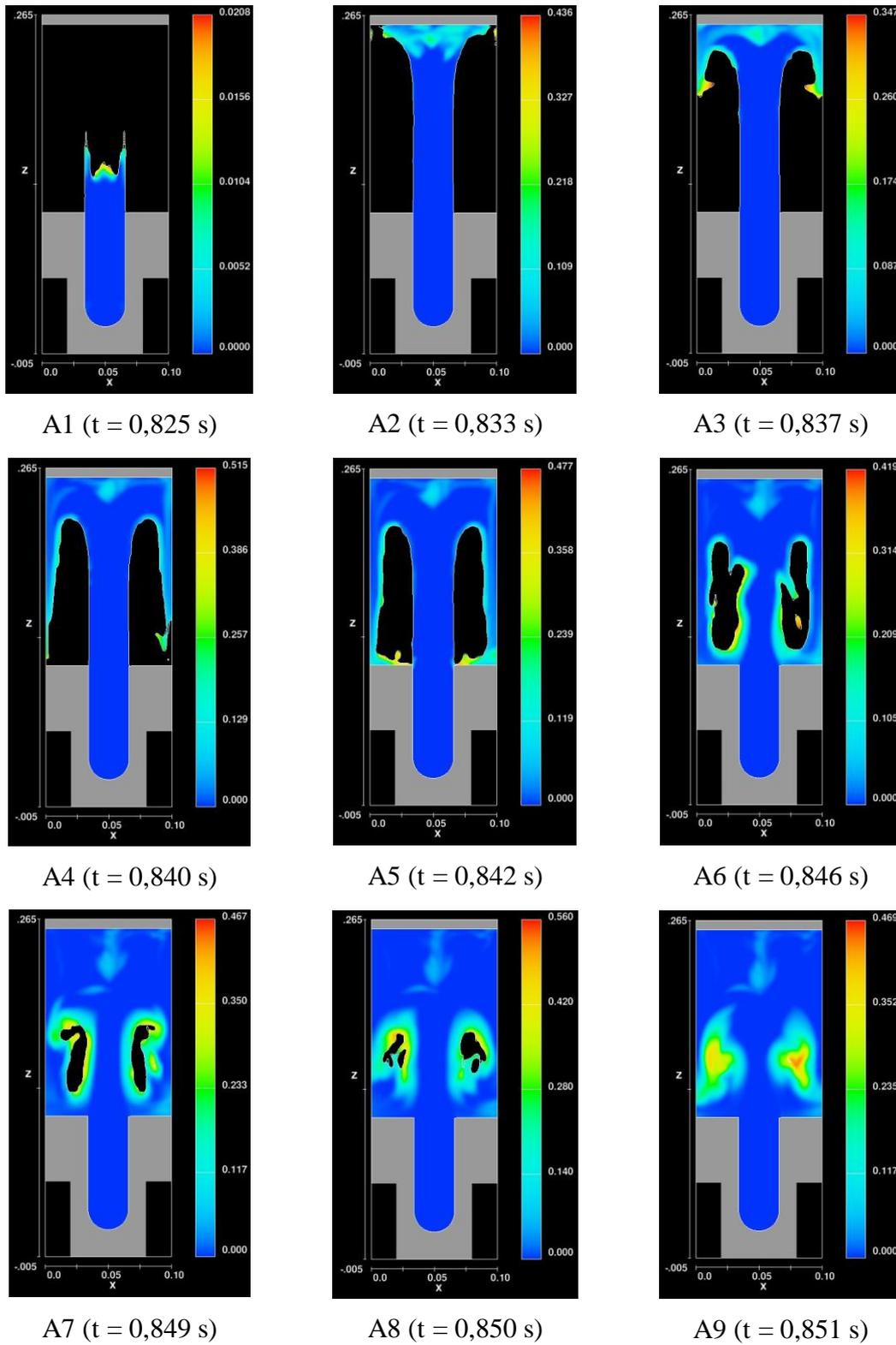


Figura 4. 7: Evolución en la distribución del flujo en el caso A

- **Energía y Solidificación.**

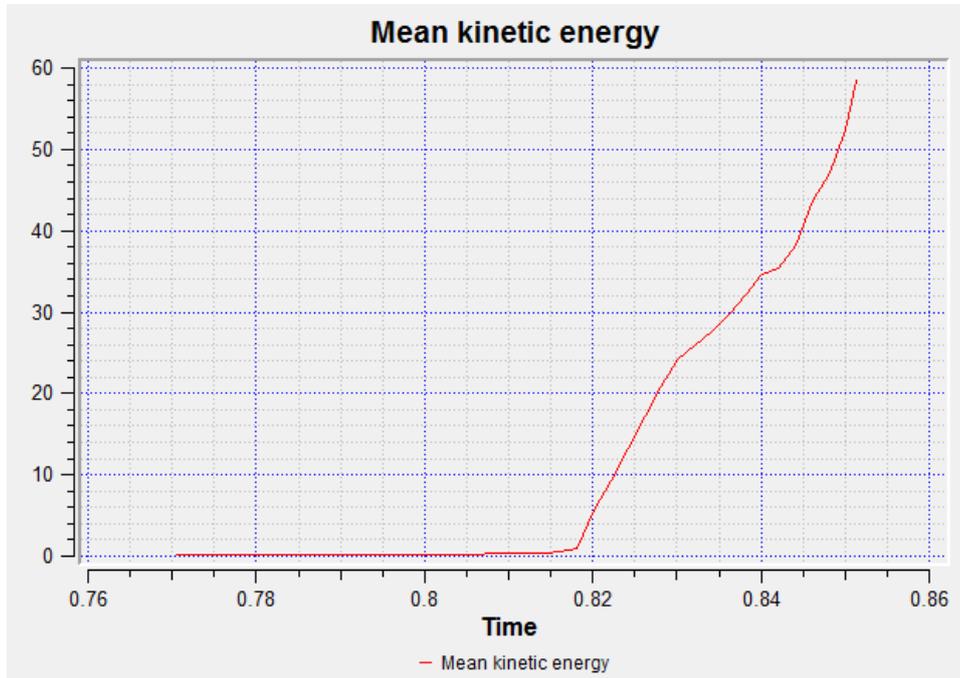


Figura 4. 8: Distribución energética caso A



Figura 4. 9: Fracción de solidificación caso A.

- **Distribución de Temperaturas.**

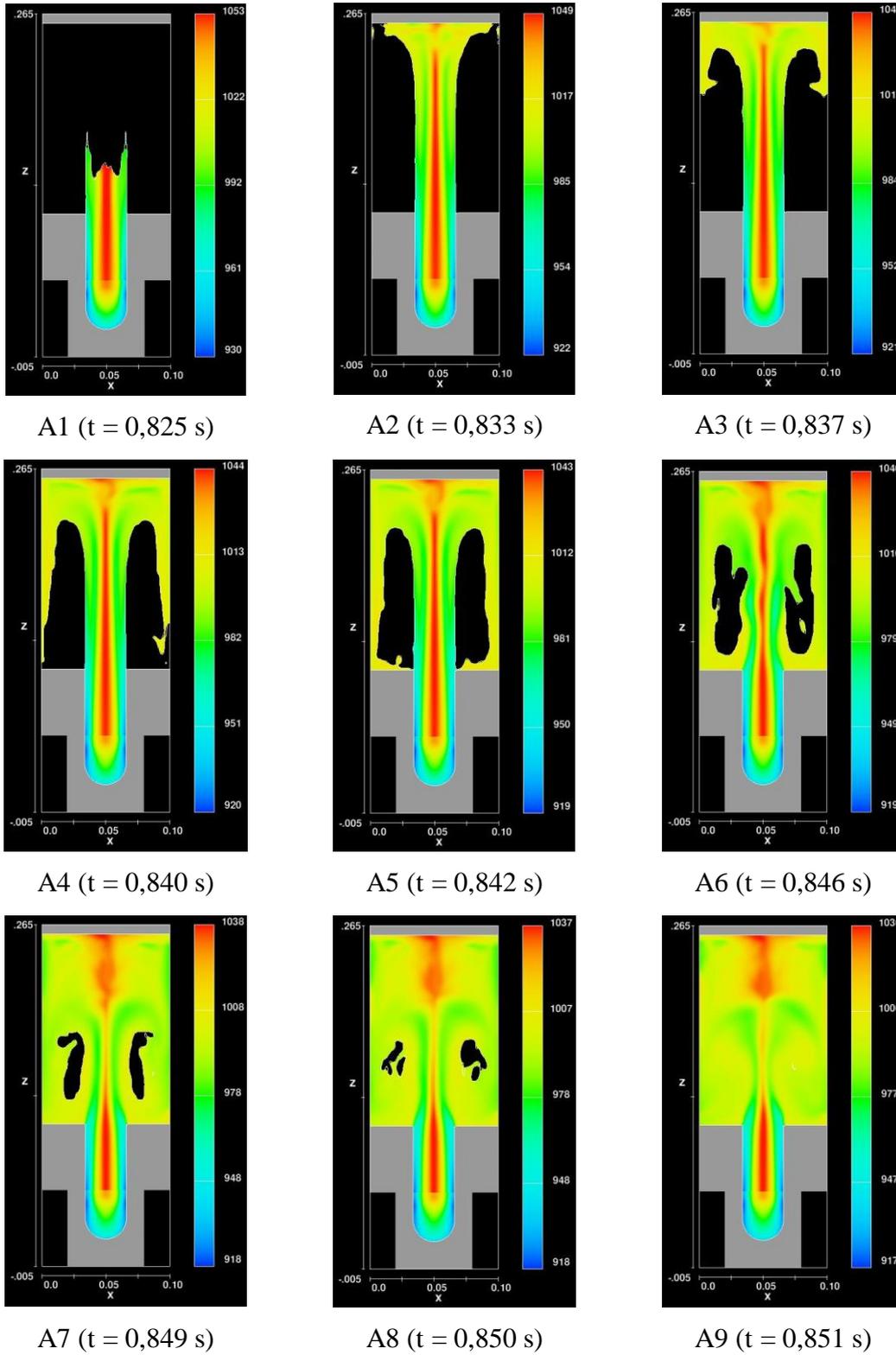


Figura 4. 10: Evolución en la distribución de la temperatura en el caso A.

- **Simulación:**

- a) Inicio llenado pieza: 0.821s
- b) Finalización simulación: 0.851s
- c) Duración: 0.03s
- d) Nivel de Errores y Residuos: bajo
- e) Grado de iteraciones máximas necesarias: 14

- **Llenado del molde:**

- a) Distribución: la entrada al molde se realiza de forma brusca. El fluido se introduce a alta velocidad y presión hasta llegar a la pared superior donde choca y se redistribuye dando lugar a la creación de una zona vacía en el centro de la pieza donde el volumen de defectos será alto.
- b) Atrapamiento de aire máximo: 0.469

- **Energía y Solidificación:**

- a) Mean Kinetic Energy (max): 60 **Kg-m²/s²**
- b) Nivel de turbulencia: medio.
- c) Fracción de solidificación
 - a. (max): 0.0032
 - b. Final: 0.0021

4.2.1.2. Caso B. Velocidad de llenado 3 m/s

- Simulación FLOW3D.

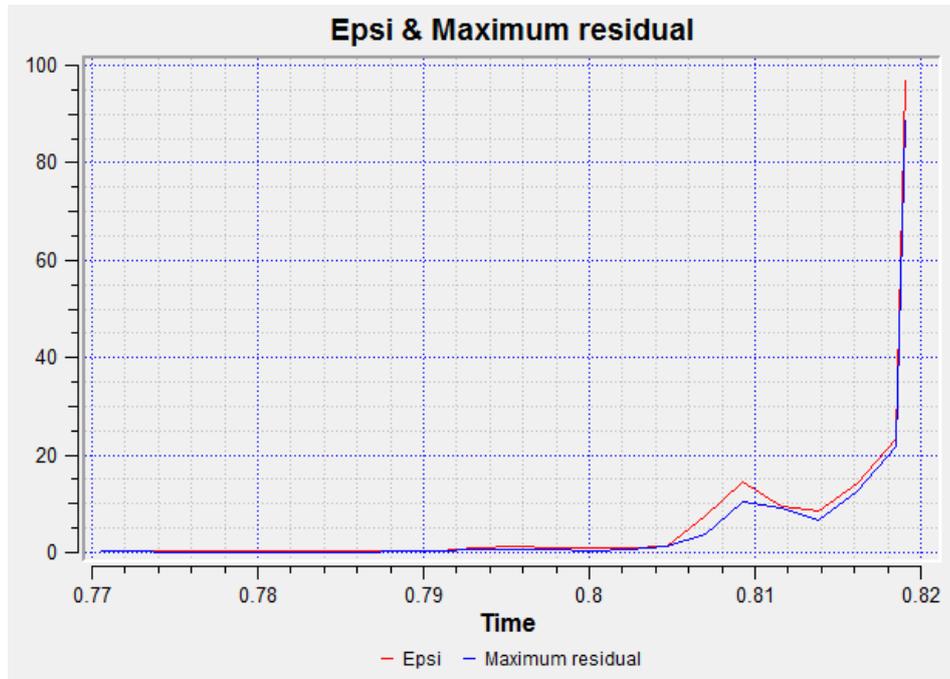


Figura 4. 11: Errores y nivel residual de la simulación caso B.

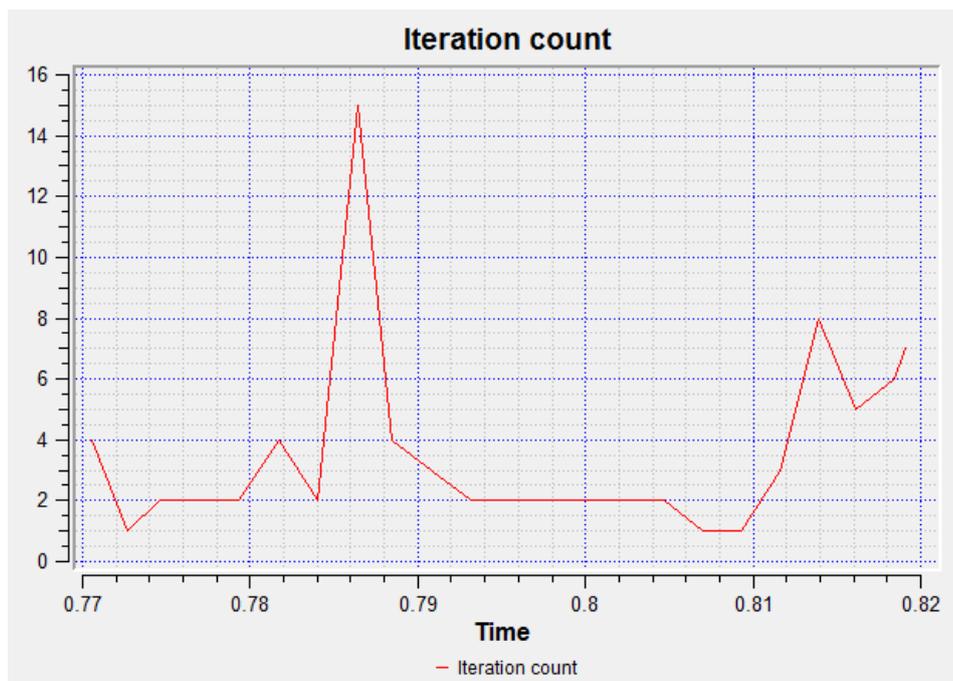


Figura 4. 12: Número de iteraciones durante la simulación caso B.

- Atrapamiento de aire

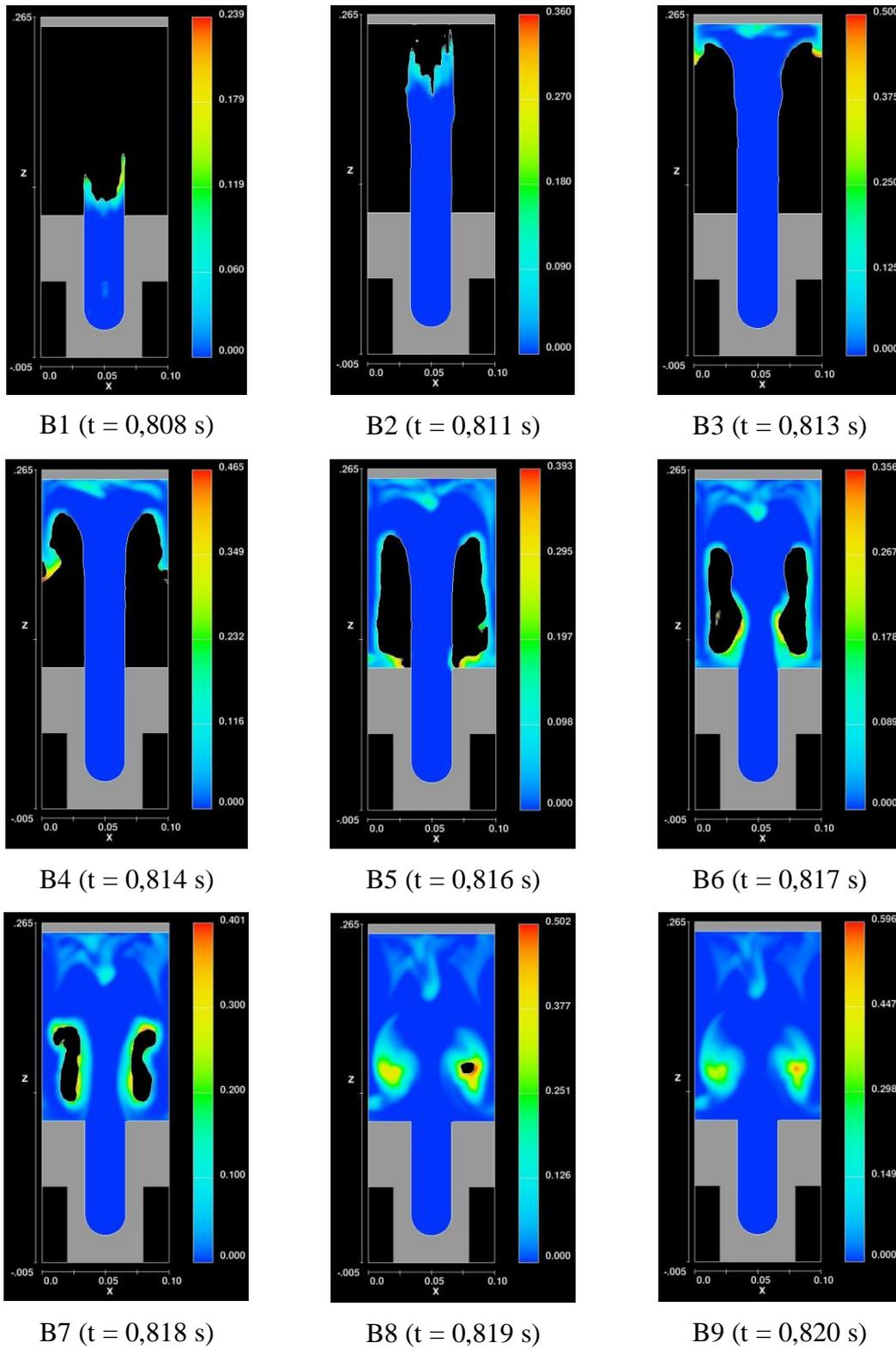


Figura 4. 13: Evolución en la distribución del flujo en el caso B.

- **Energía y Solidificación.**

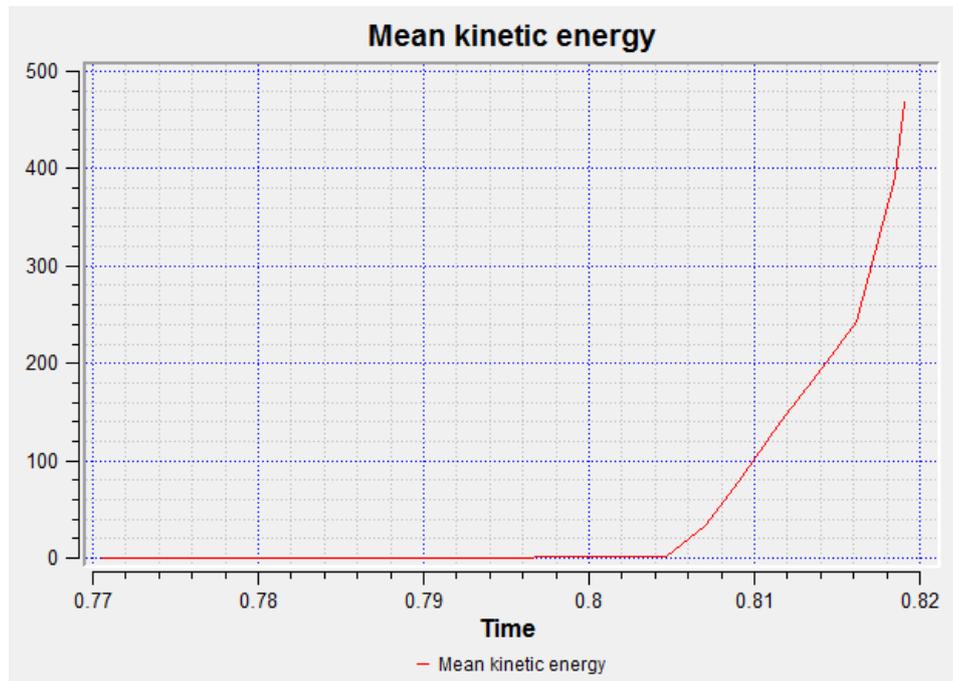


Figura 4. 14: Distribución energética caso B.

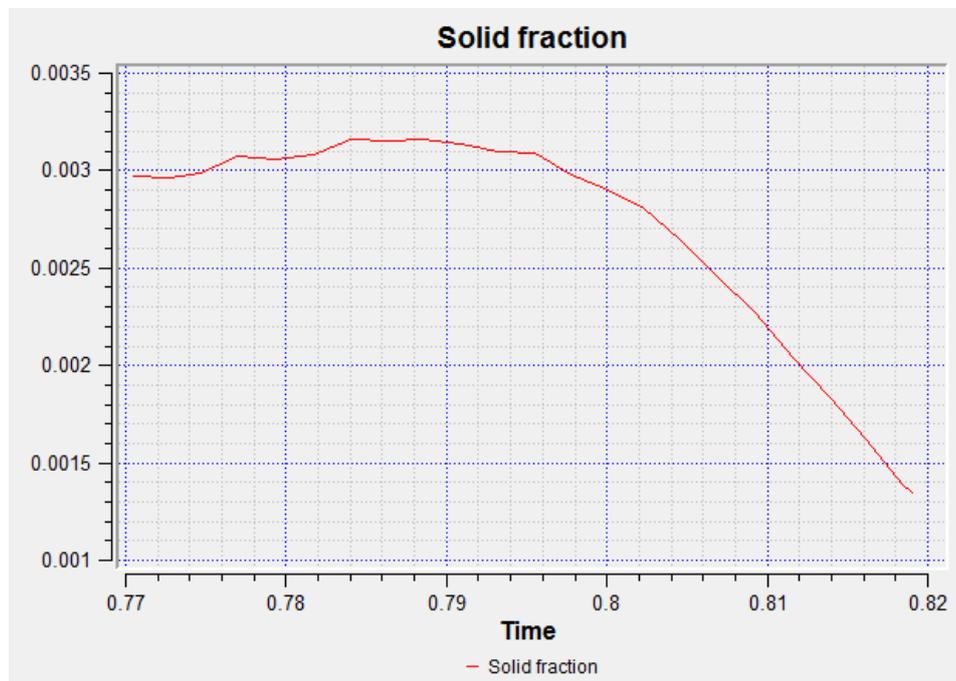


Figura 4. 15: Fracción de solidificación caso B.

- Distribución de Temperaturas.

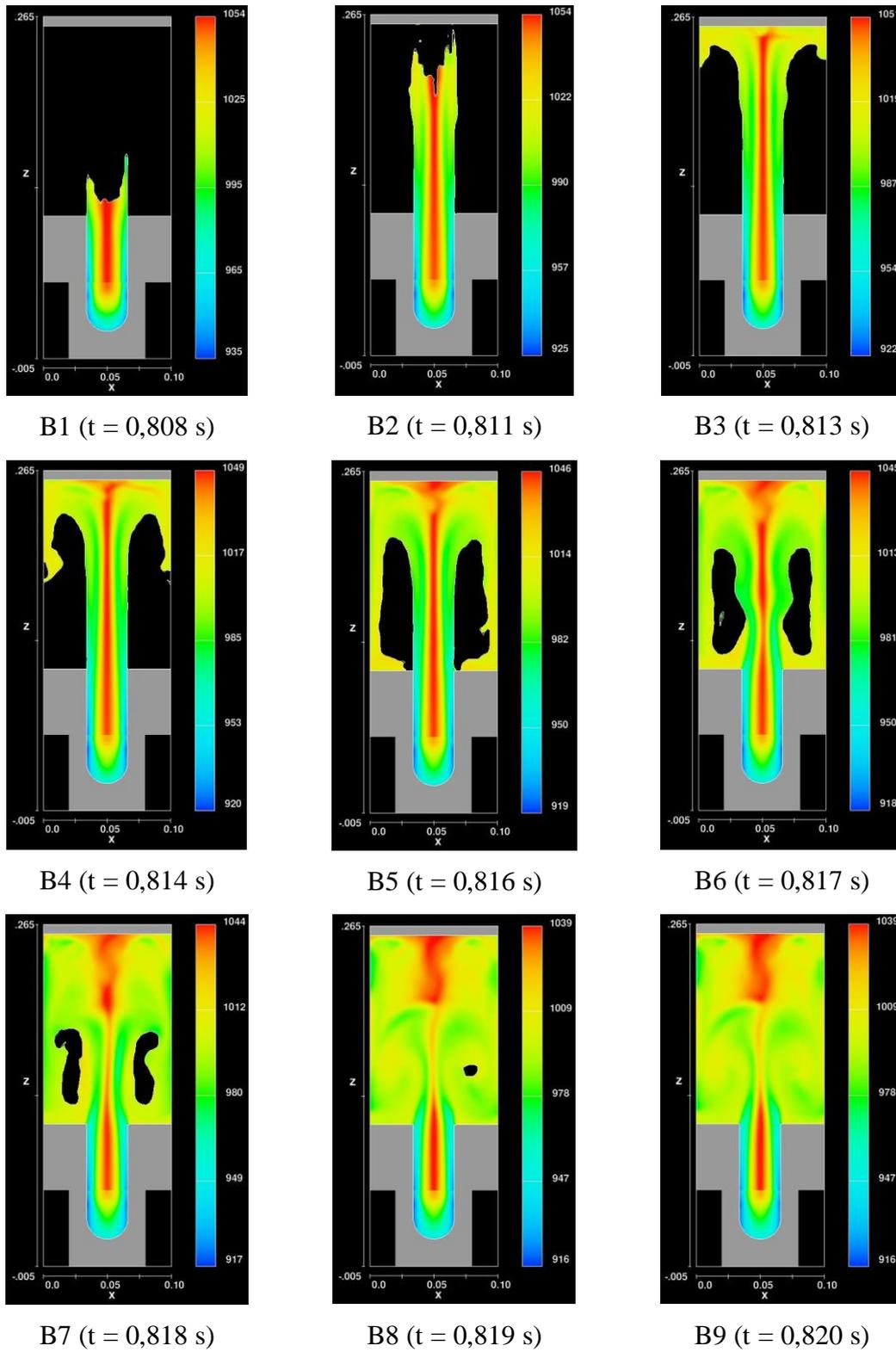


Figura 4. 16: Evolución en la distribución de la temperatura en el caso B.

- **Simulación:**

- a) Inicio llenado pieza: 0.807 s
- b) Finalización simulación: 0.820 s
- c) Duración: 0.013 s
- d) Nivel de Errores y Residuos: bajo
- e) Grado de iteraciones máximas necesarias: 15

- **Llenado del molde:**

- a) Distribución: la entrada al molde se realiza de forma muy brusca. El fluido se introduce a alta velocidad y presión hasta llegar a la pared superior donde choca y se redistribuye dando lugar a la creación de una zona vacía en el centro de la pieza donde el volumen de defectos será alto. Además, el grado de turbulencia fomenta la creación de burbujas que se transformarán en micro porosidades durante la solidificación.
- b) Atrapamiento de aire máximo: 0.596

- **Energía y Solidificación:**

- a) Mean Kinetic Energy (max): 470 **Kg-m²/s²**
- b) Nivel de turbulencia: Alto
- c) Fracción de solidificación
 - a. (max): 0.0032
 - b. Final: 0.0013

4.2.1.2. Caso C. Velocidad de llenado 0,5 m/s

- Simulación FLOW3D.

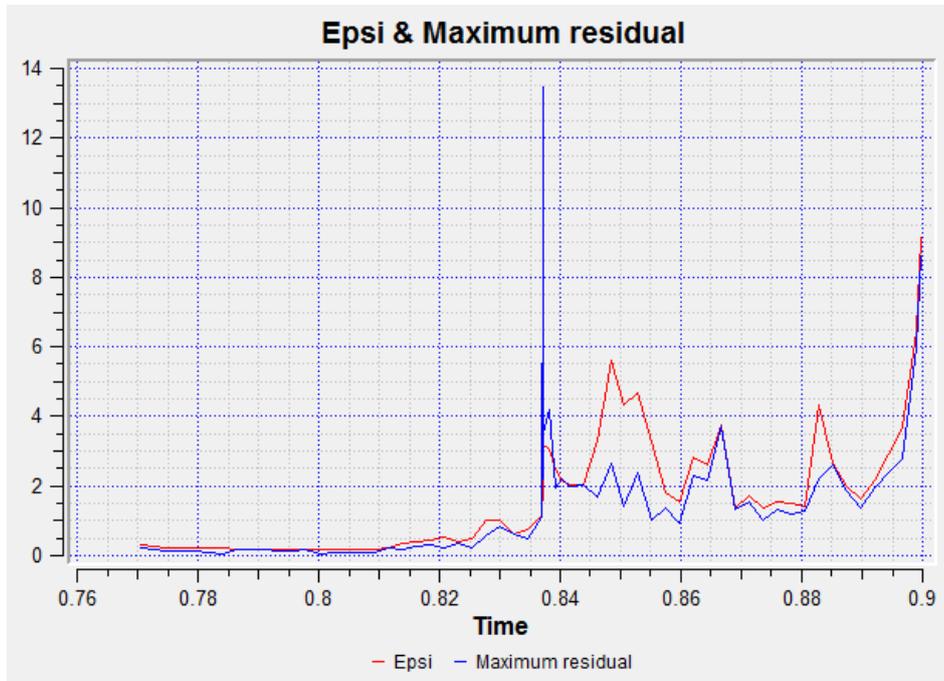


Figura 4. 17: Errores y nivel residual de la simulación caso C.

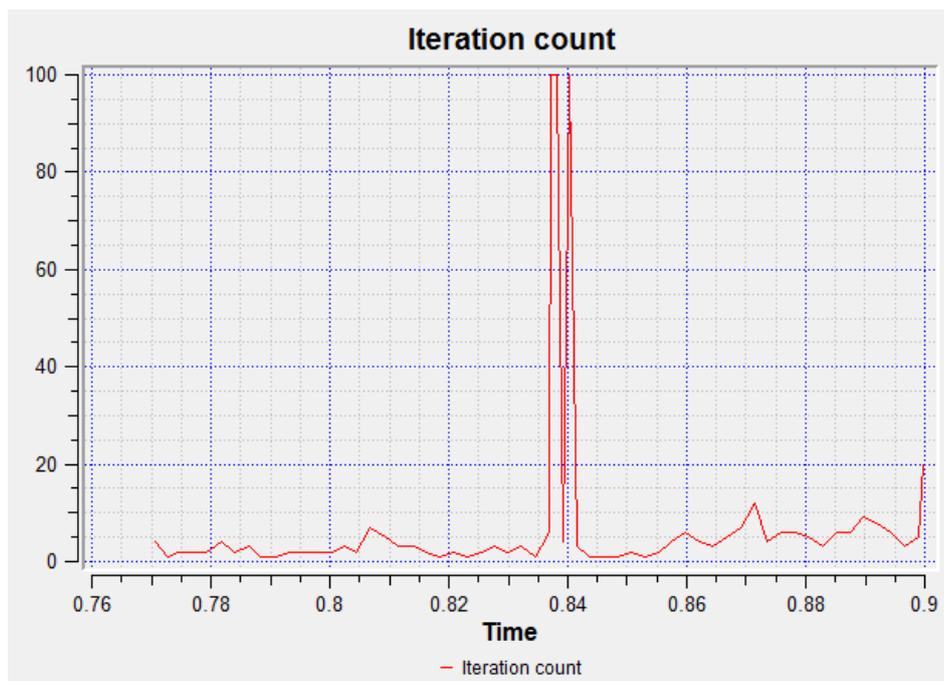


Figura 4. 18: Número de iteraciones durante la simulación caso C.

- Llenado del molde.

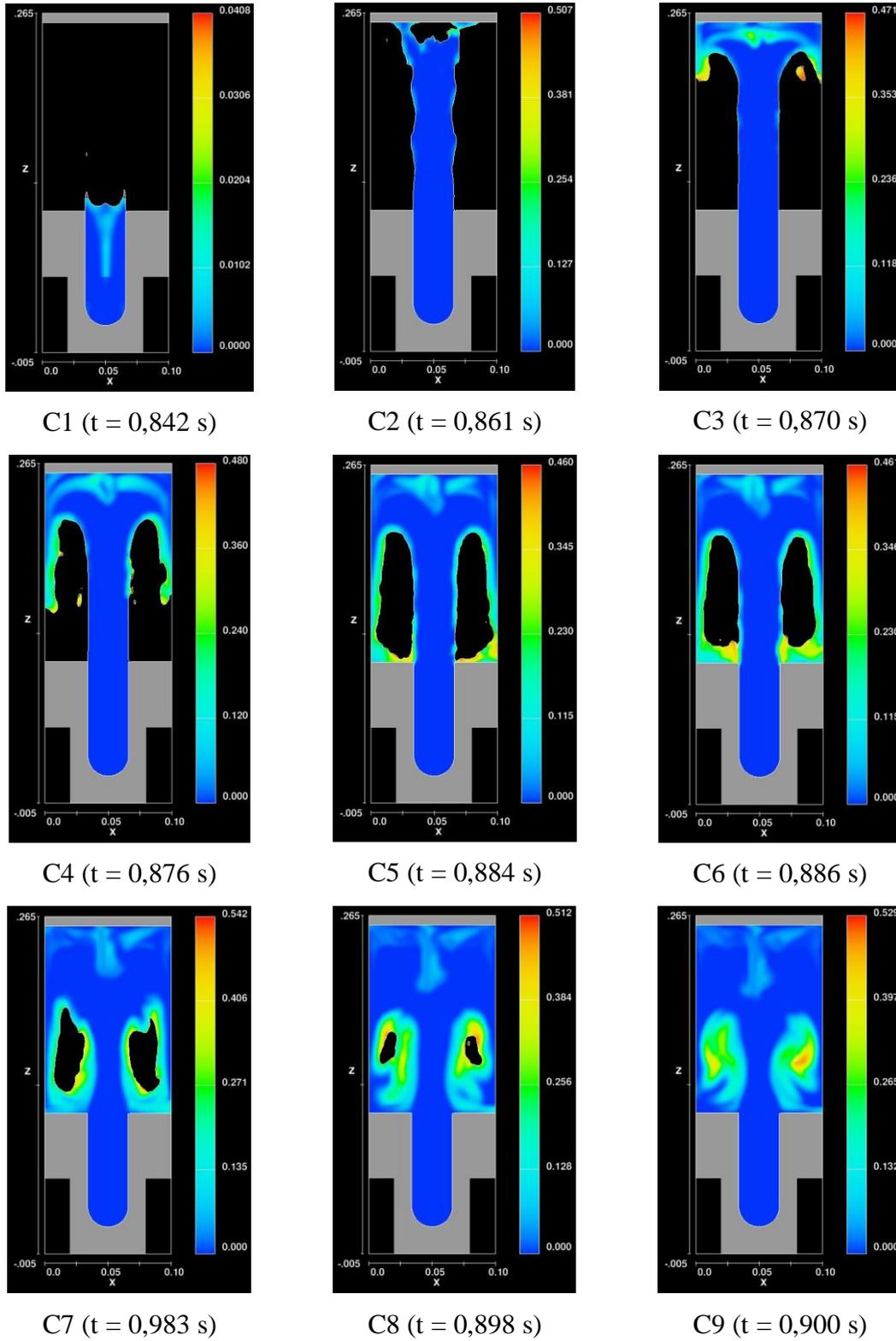


Figura 4. 19: Evolución en la distribución del flujo en el caso C.

- **Energía y Solidificación.**

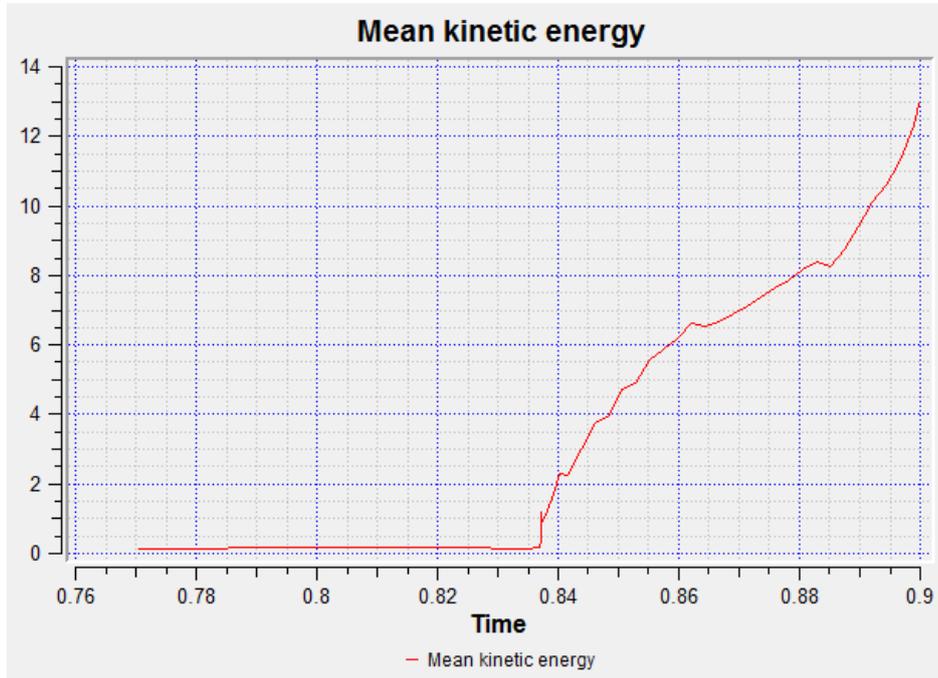


Figura 4. 20: Distribución energética caso C.

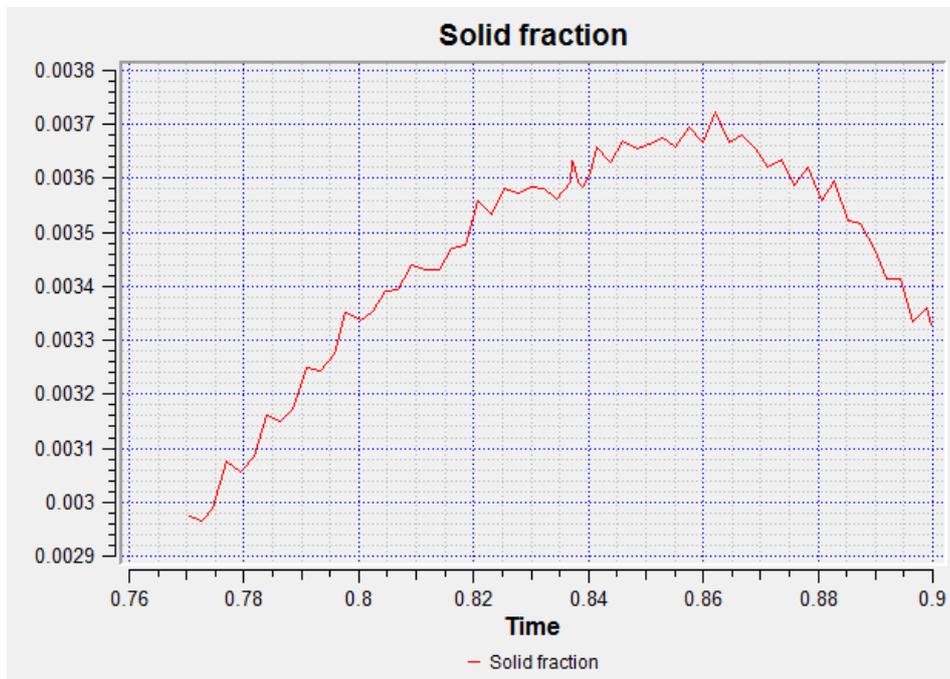


Figura 4. 21: Fracción de solidificación caso C.

- Distribución de Temperaturas.

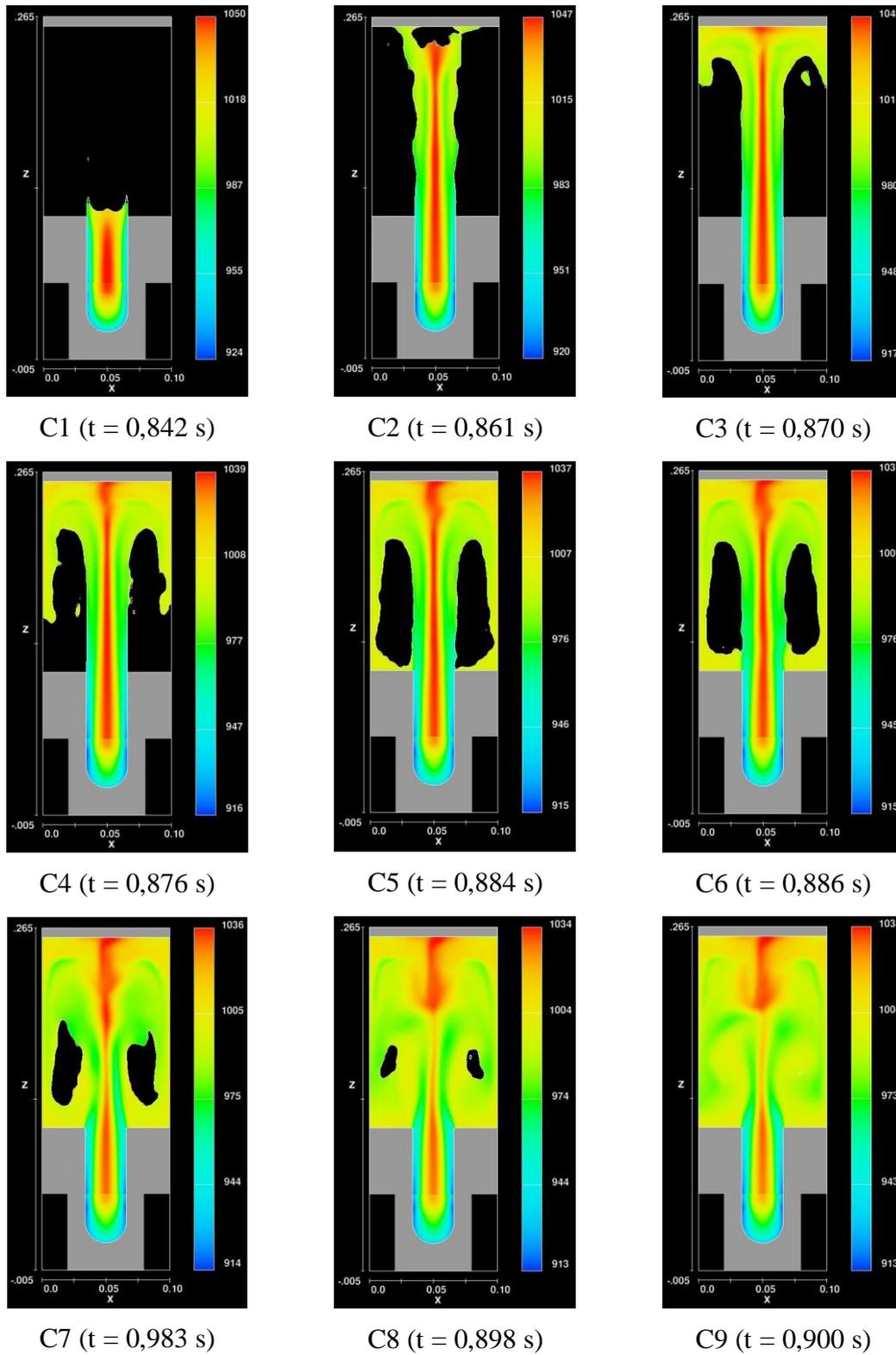


Figura 4. 22: Evolución en la distribución de la temperatura en el caso C.

- **Simulación:**

- a) Inicio llenado pieza: 0.842 s
- b) Finalización simulación: 0.900 s
- c) Duración: 0.058 s
- d) Nivel de Errores y Residuos: medio
- e) Grado de iteraciones máximas necesarias: >100

- **Llenado del molde:**

- a) Distribución: la entrada al molde se realiza de forma brusca. El fluido se introduce a velocidad baja hasta llegar a la pared superior donde choca y se redistribuye dando lugar a la creación de una zona vacía en el centro de la pieza donde el volumen de defectos será alto. La entrada de flujo a menor velocidad que las otras simulaciones provoca micro solidificaciones que se convertirán en defectos.
- b) Atrapamiento de aire máximo: 0.529

- **Energía y Solidificación:**

- a) Mean Kinetic Energy (max): 13 **Kg-m²/s²**
- b) Nivel de turbulencia: Muy Bajo
- c) Fracción de solidificación
 - a. (max): 0.0037
 - b. Final: 0.0033

4.2.2. Análisis del llenado de Molde 2.

4.2.2.1. Geometría del molde 2.

El molde 2 presenta una mejora geométrica esencial frente al molde 1. Concretamente se puede apreciar un cambio en la cámara de distribución la cual ya no es totalmente rectangular. El molde 2 une la pieza con la cámara de distribución abriéndose con un radio de curvatura de 34 mm.

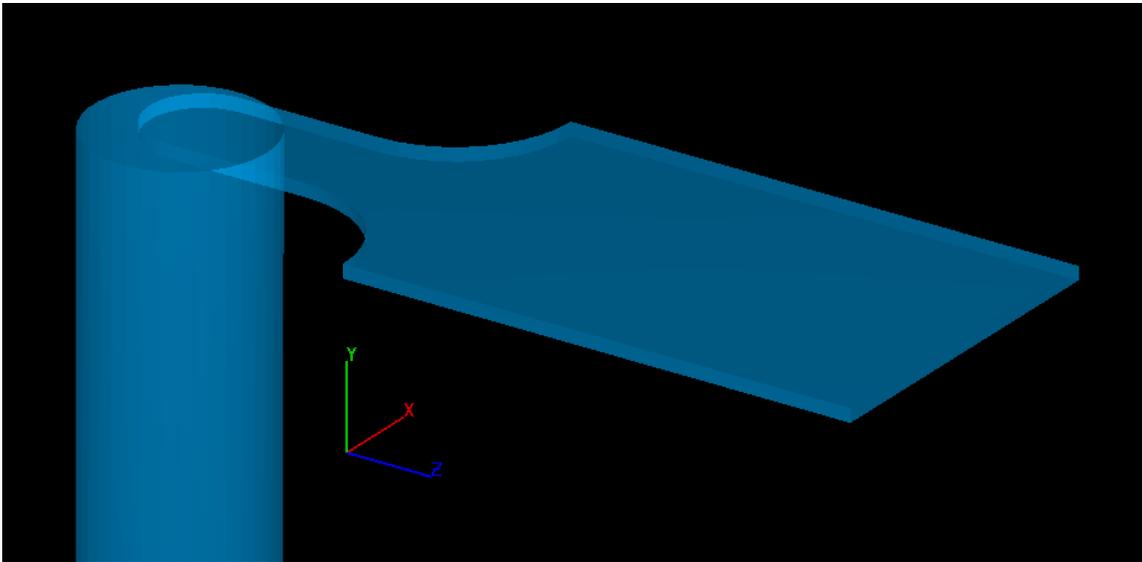


Figura 4. 23: Geometría del molde 2

Esta disposición geométrica fomenta la distribución homogénea, elimina las turbulencias internas y en definitiva promueve un menor porcentaje de atrapamiento de aire.

4.2.2.2. Análisis del llenado del molde 2 según el atrapamiento de aire y la distribución de temperaturas.

4.2.2.2. Caso D. Velocidad de llenado 1 m/s

- Simulación FLOW3D.

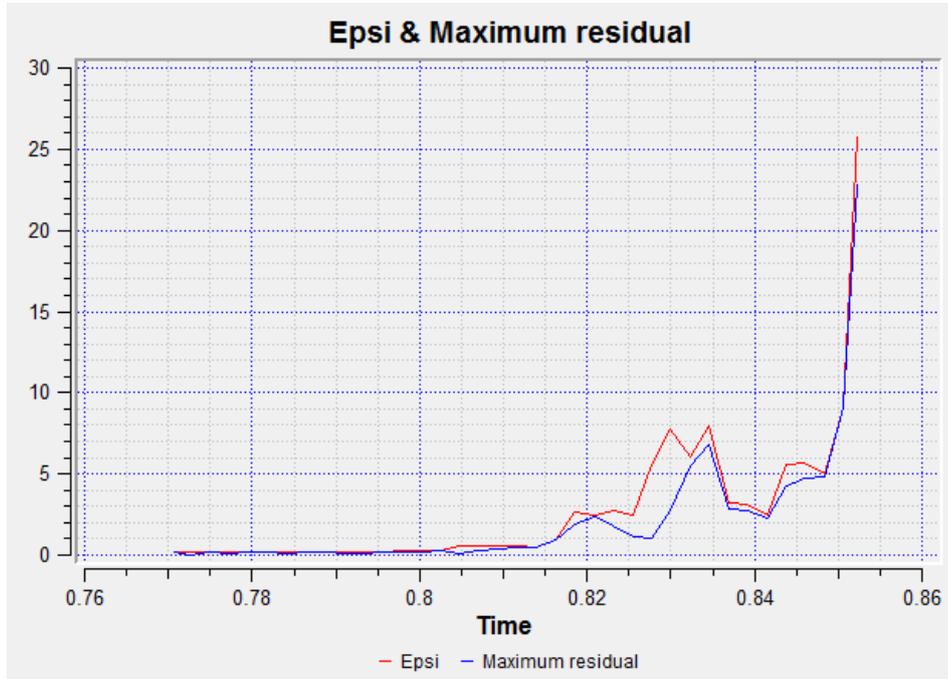


Figura 4. 24: Errores y nivel residual de la simulación caso D.

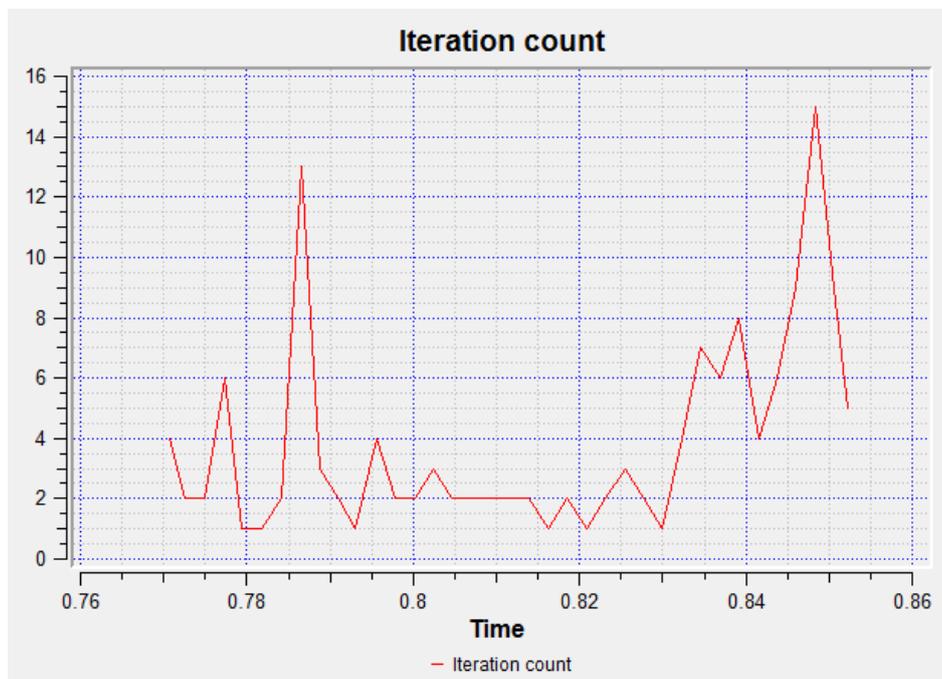


Figura 4. 25: Número de iteraciones durante la simulación caso D.

- Atrapamiento de aire

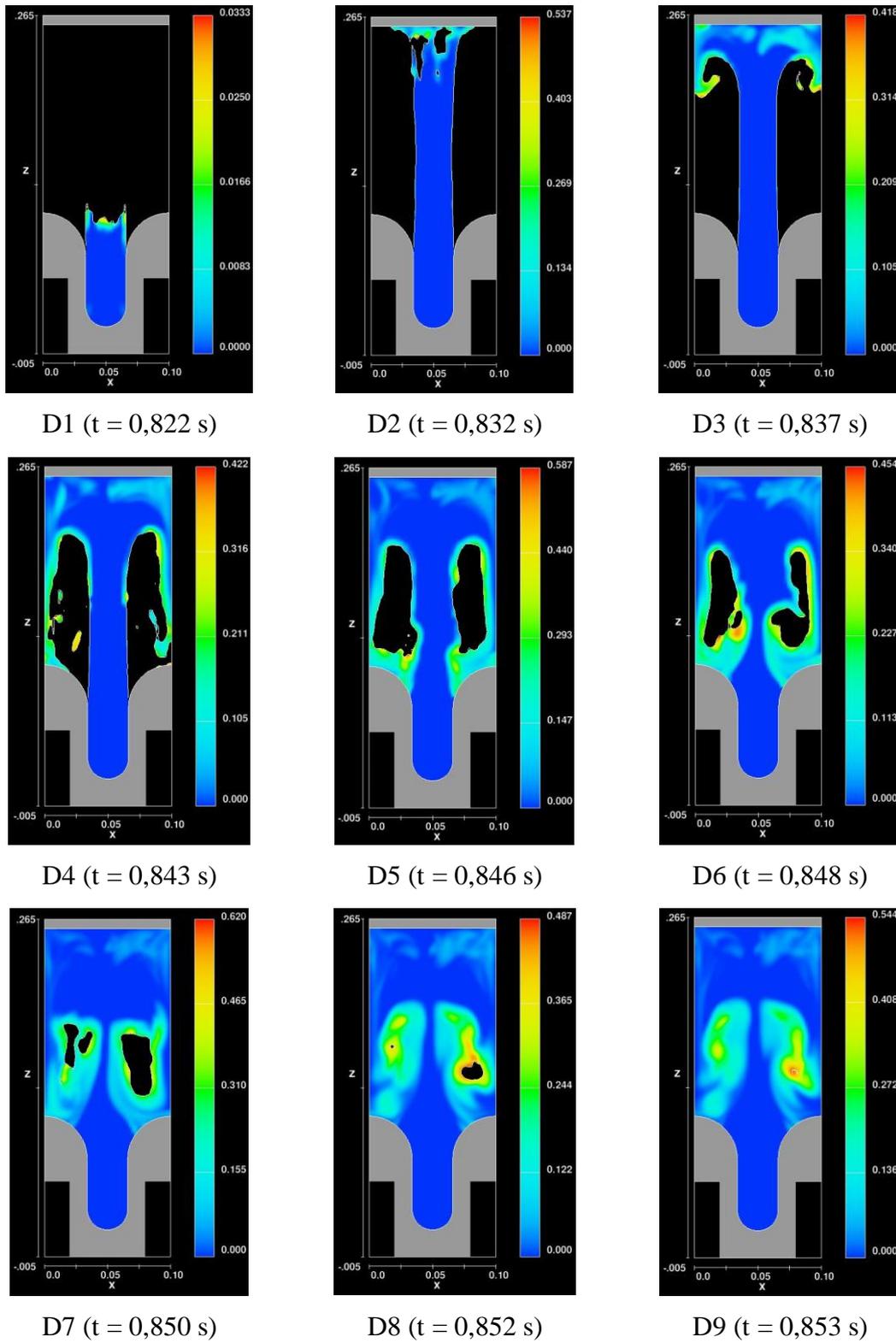


Figura 4. 26: Evolución en la distribución del flujo en el caso D.

- **Energía y Solidificación.**

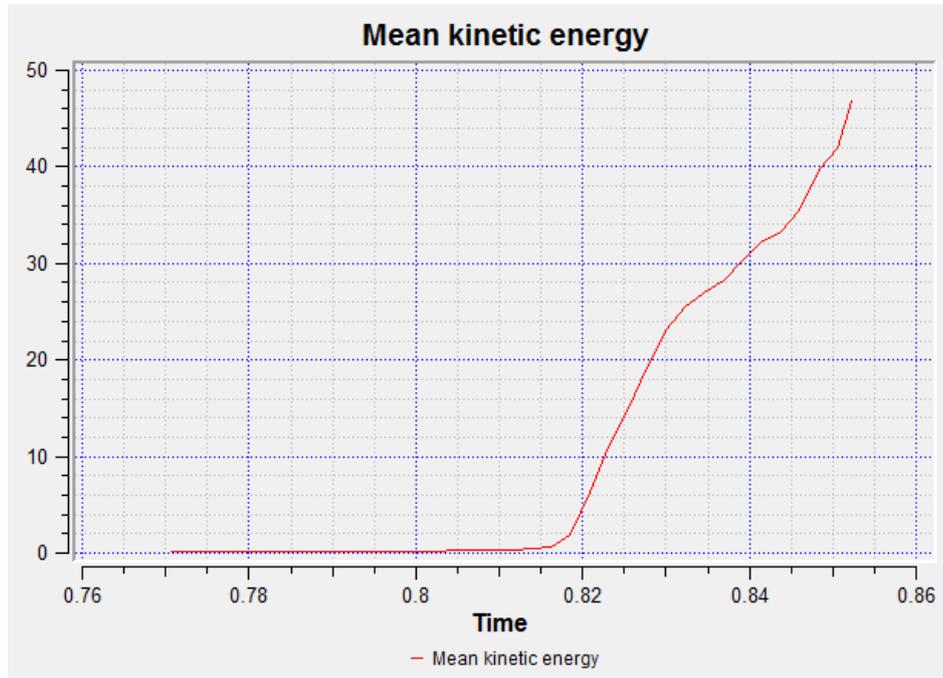


Figura 4. 27: Distribución energética caso D.



Figura 4. 28: Fracción de solidificación caso D.

➤ **Distribución de Temperaturas.**

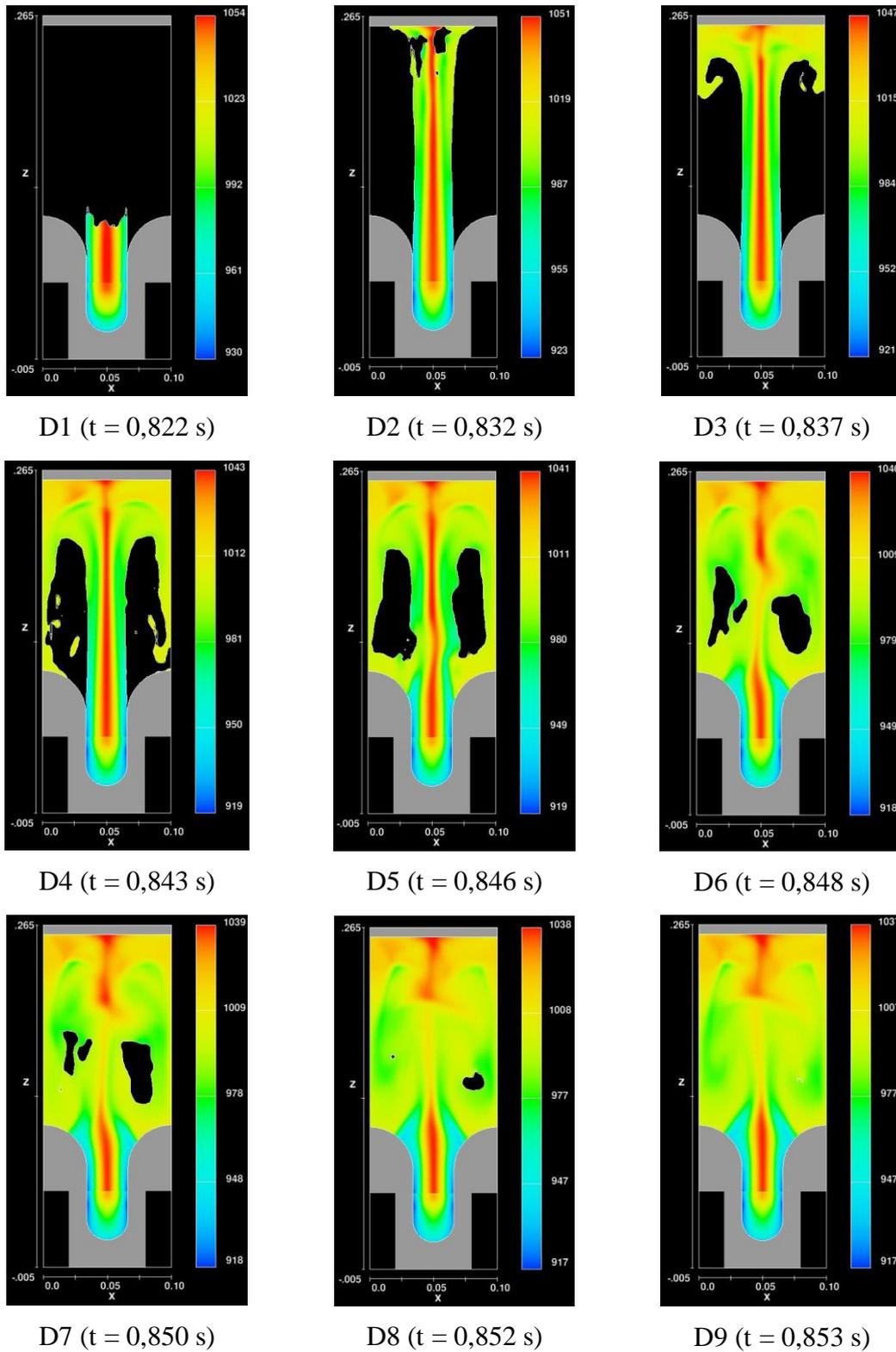


Figura 4. 29: Evolución en la distribución de la temperatura en el caso D.

- **Simulación:**

- a) Inicio llenado molde: 0.822s
- b) Finalización simulación: 0.853s
- c) Duración: 0.031 s
- d) Nivel de Errores y Residuos: Bajo
- e) Grado de iteraciones máximas necesarias: 15

- **Llenado del molde:**

- a) Distribución: la entrada al molde se realiza de forma más homogénea que en los casos anteriores.. El fluido se introduce a alta velocidad y presión hasta llegar a la pared superior donde choca y se redistribuye dando lugar a la creación de una zona vacía en el centro de la pieza donde el volumen de defectos será alto. Sin embargo la cámara de distribución hace su trabajo y permite un mayor grado de reparto durante la última etapa.
- b) Atrapamiento de aire máximo: 0.544

- **Energía y Solidificación:**

- a) Mean Kinetic Energy (max): 47 **Kg-m²/s²**
- b) Nivel de Turbulencia: Medio.
- c) Fracción de Solidificación:
 - a. (max): 0.0032
 - b. Final: < 0.002

4.2.2.2. Caso E. Velocidad de llenado 3 m/s

- Simulación FLOW3D.

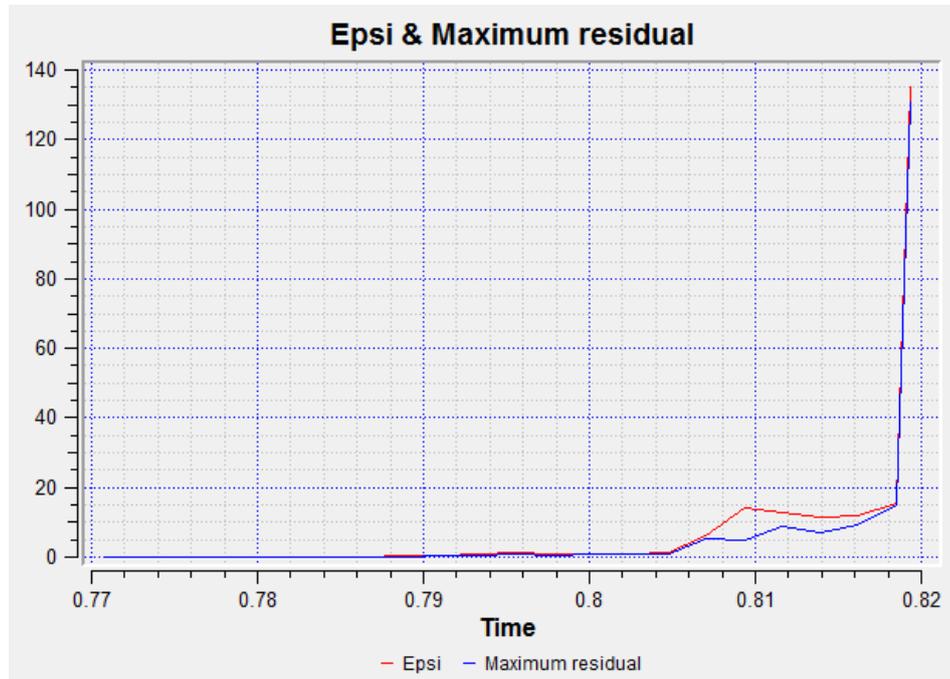


Figura 4. 30: Errores y nivel residual de la simulación caso E.

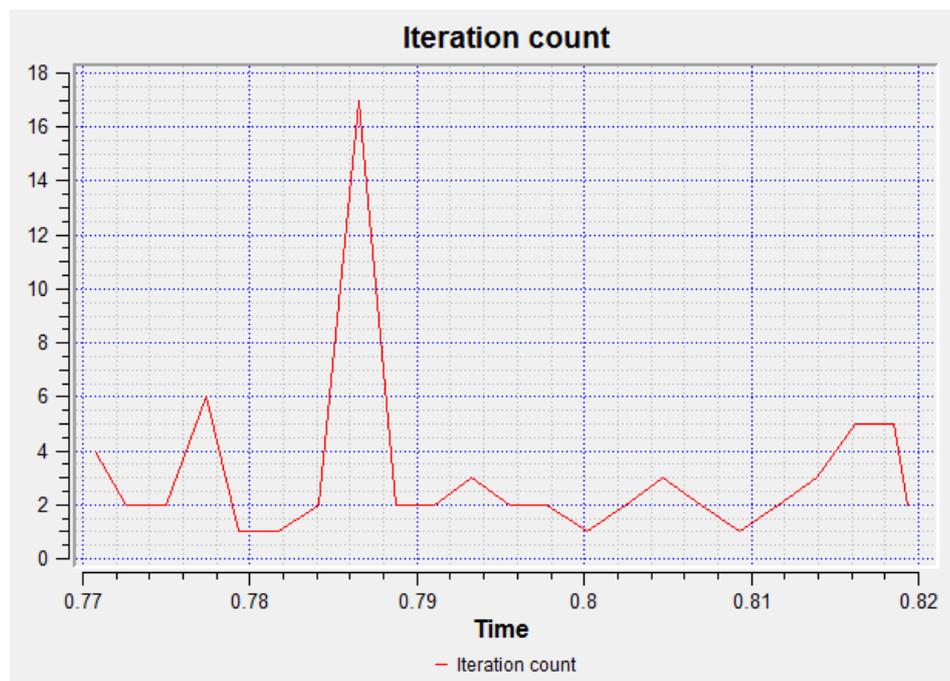


Figura 4. 31: Número de iteraciones durante la simulación caso E.

- Atrapamiento de aire

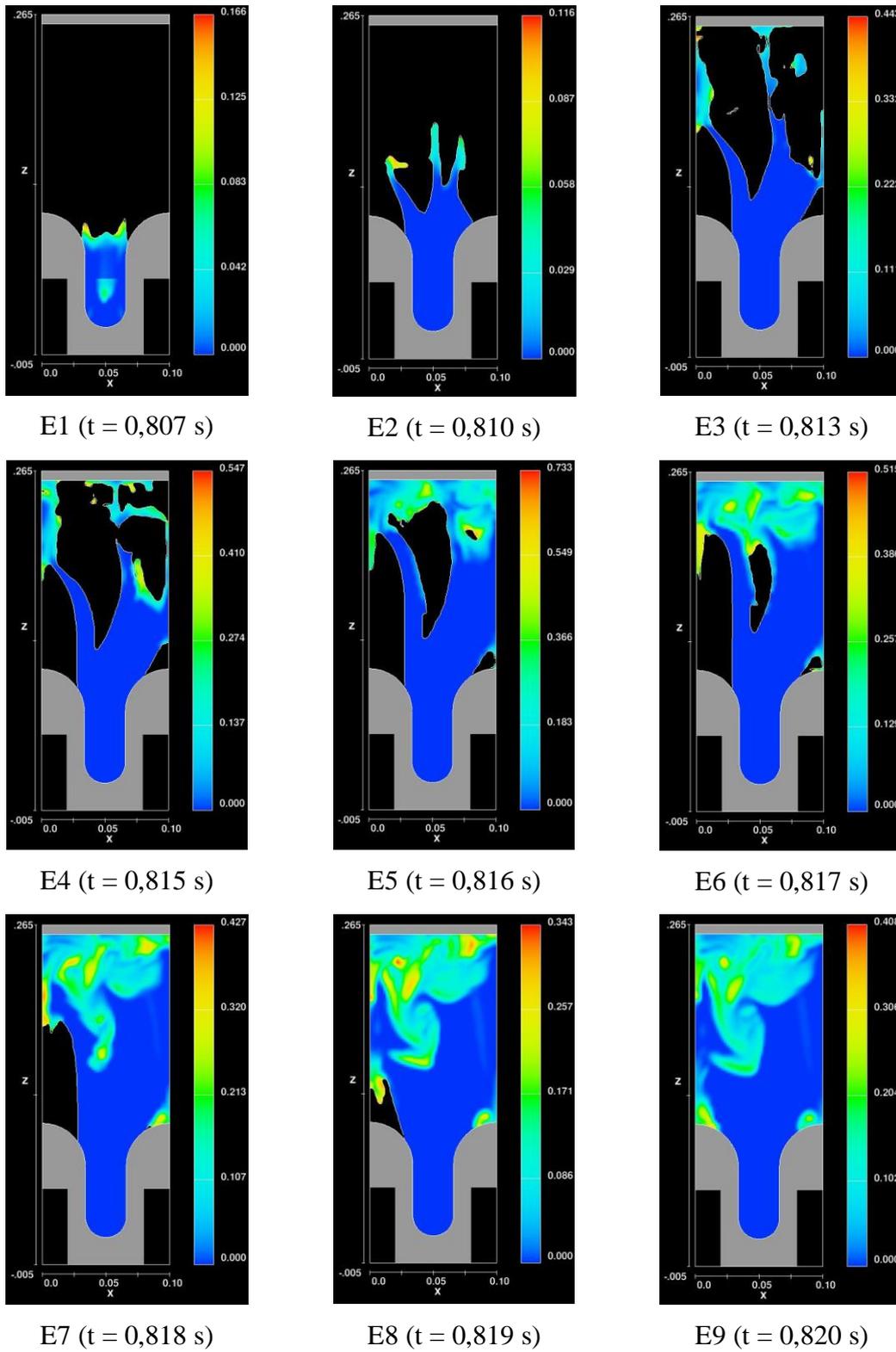


Figura 4. 32: Evolución en la distribución del flujo en el caso E.

- **Energía y Solidificación.**

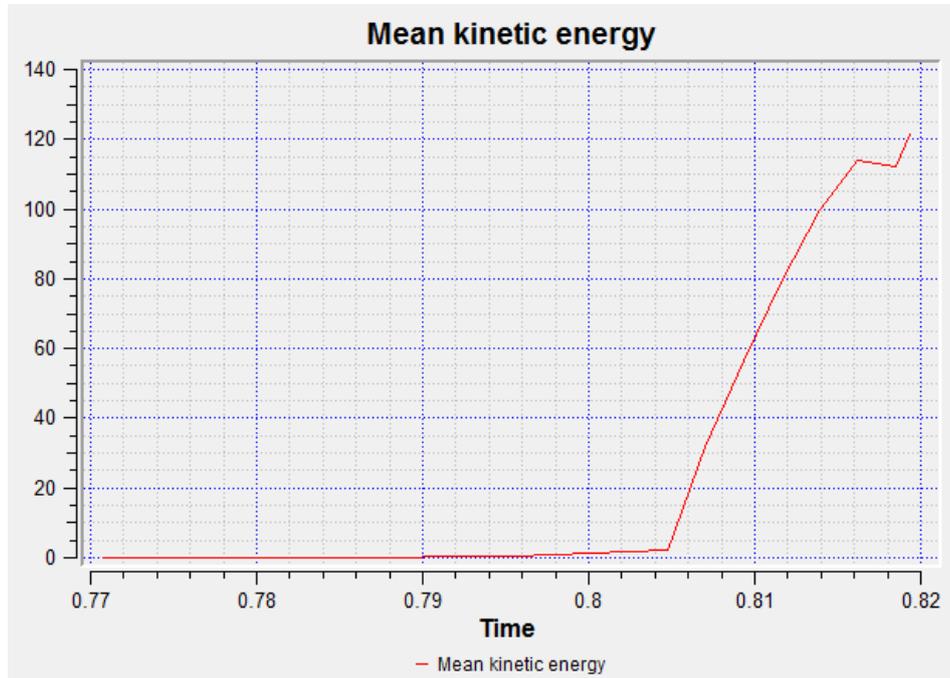


Figura 4. 33: Distribución energética caso E.



Figura 4. 34: Fracción de solidificación caso E.

- Distribución de Temperaturas.

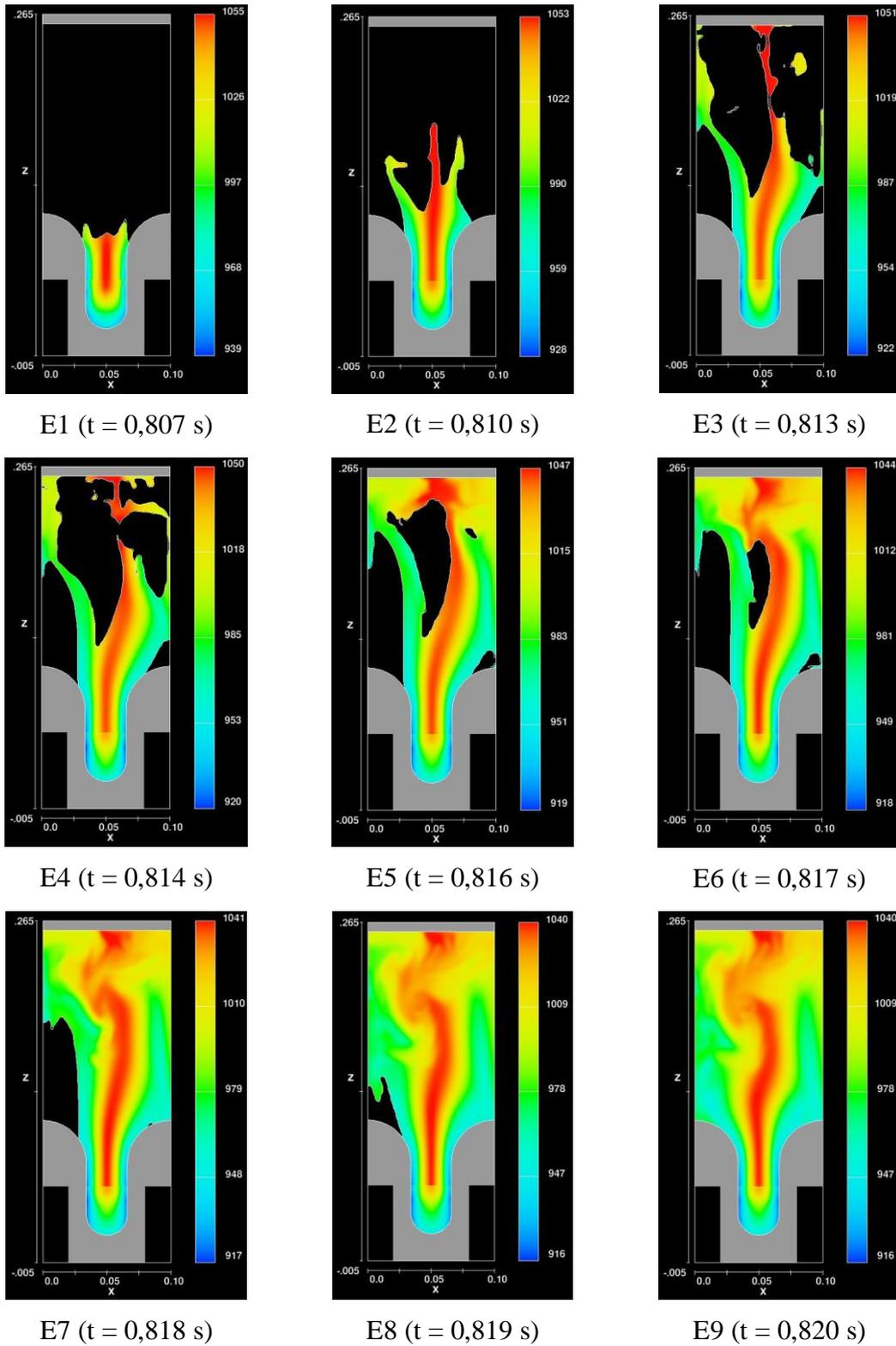


Figura 4. 35: Evolución en la distribución de la temperatura en el caso E.

- **Simulación:**

- b) Inicio llenado molde: 0.807 s
- c) Finalización simulación: 0.820 s
- d) Duración: 0.013 s.
- e) Nivel de Errores y Residuos: Muy bajo
- f) Grado de iteraciones máximas necesarias: 17

- **Llenado del molde:**

- a) Distribución: la entrada al molde se realiza más homogéneamente que en los casos anteriores. El fluido se introduce a alta velocidad y presión permitiendo a la cámara de distribución hacer su función y guiar al fluido durante todo el proceso de llenado disminuyendo el atrapamiento de aire. No obstante, la alta velocidad de avance del pistón crea salpicaduras internas que al final se traducirán en una merma en las propiedades mecánicas.
- b) Atrapamiento de aire máximo: **0.408**

- **Energía y Solidificación:**

- g) Mean Kinetic Energy (max): 120 **Kg-m²/s²**
- h) Nivel de turbulencia: Alto
- i) Fracción de solidificación:
 - a. (max): 0.0032
 - b. Final: 0.0014

4.2.2.2. Caso F. Velocidad de llenado 0,5 m/s

- Simulación FLOW3D.

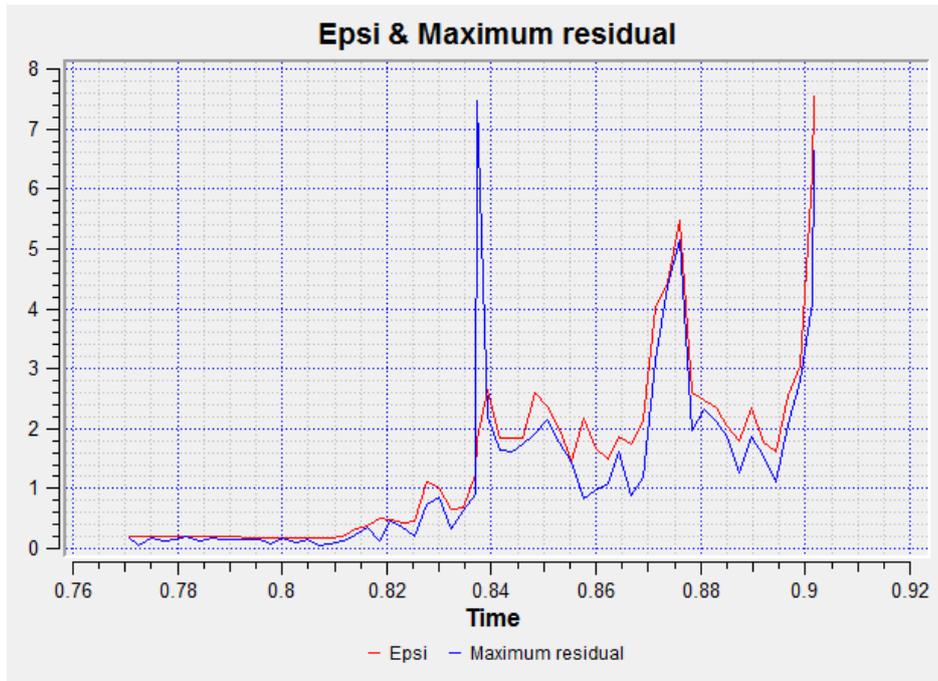


Figura 4. 36: Errores y nivel residual de la simulación caso F.

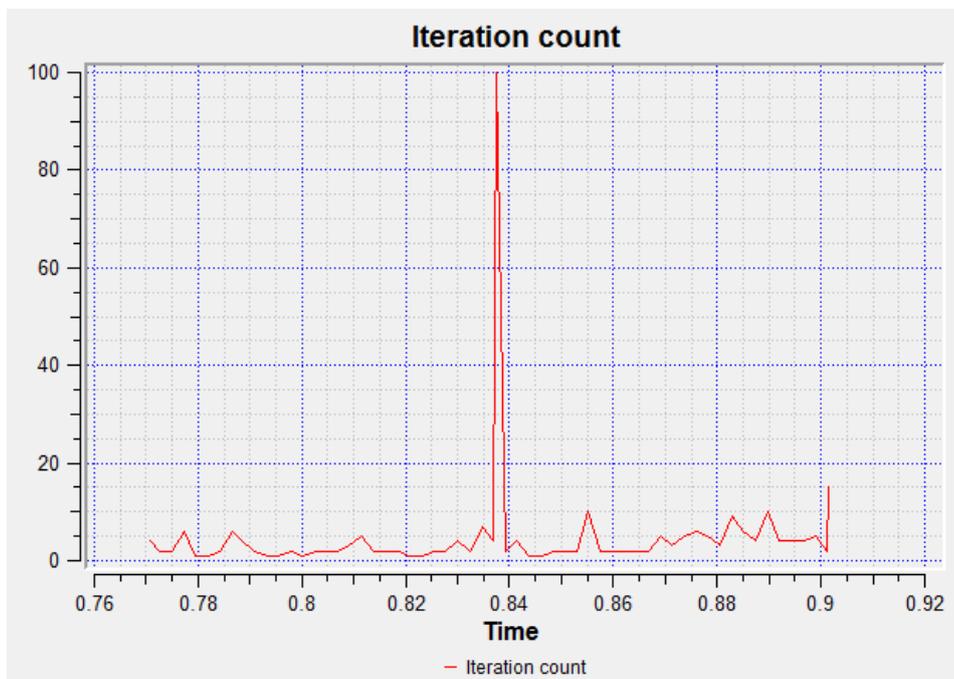


Figura 4. 37: Número de iteraciones durante la simulación caso F.

- Atrapamiento de aire

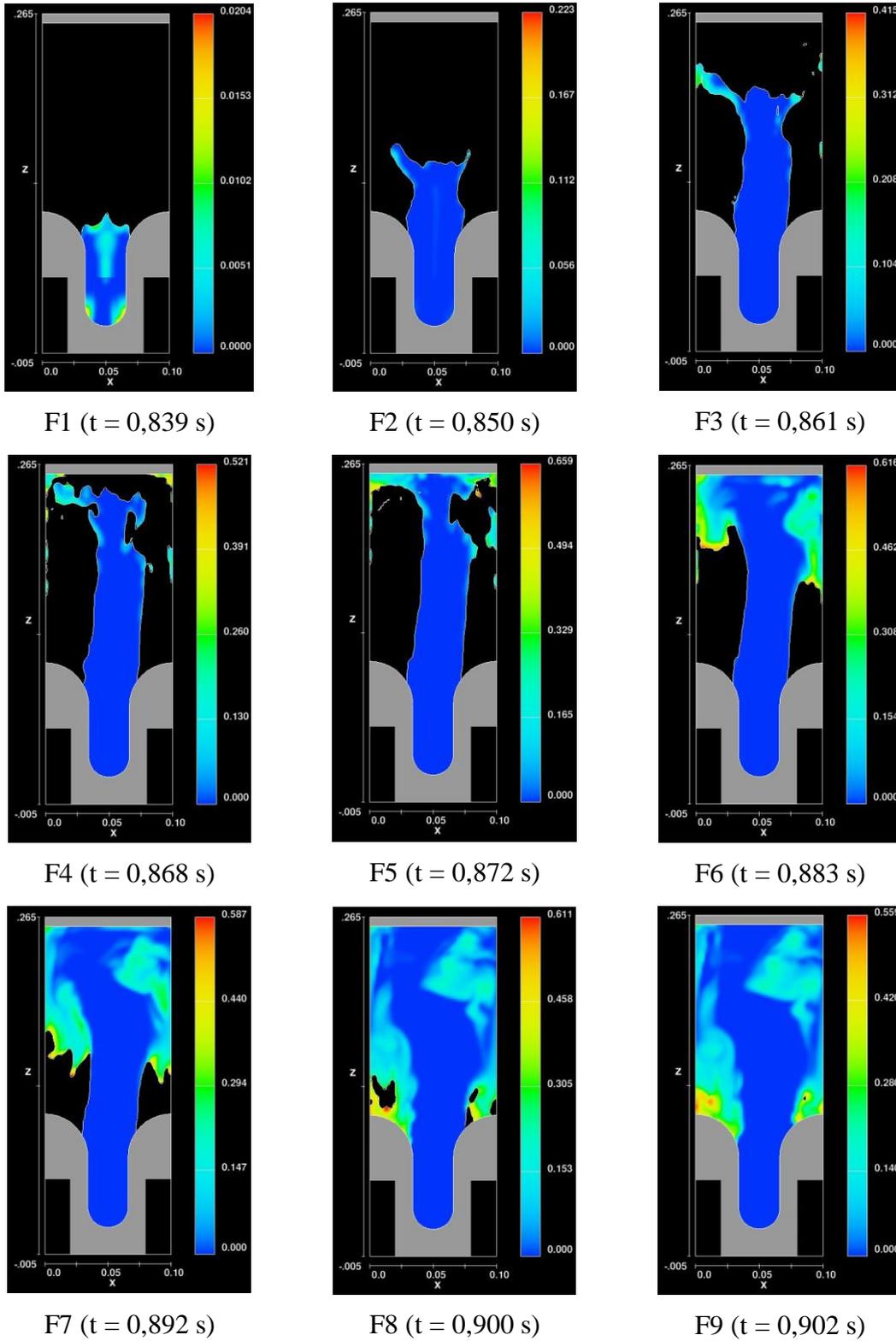


Figura 4. 38: Evolución en la distribución del flujo en el caso F.

- **Energía y Solidificación.**

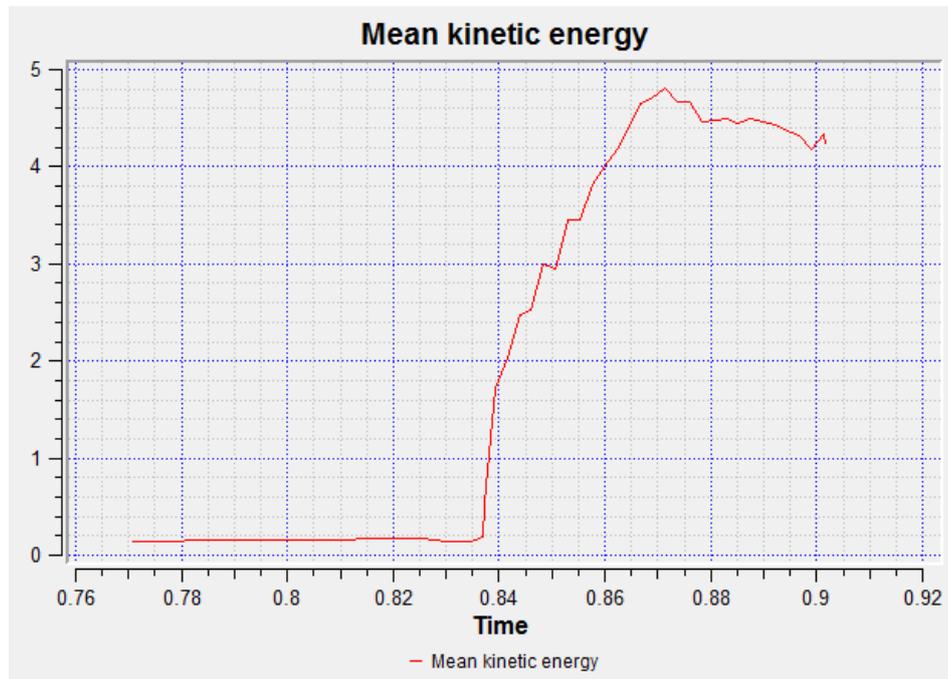


Figura 4. 39: Distribución energética caso F.

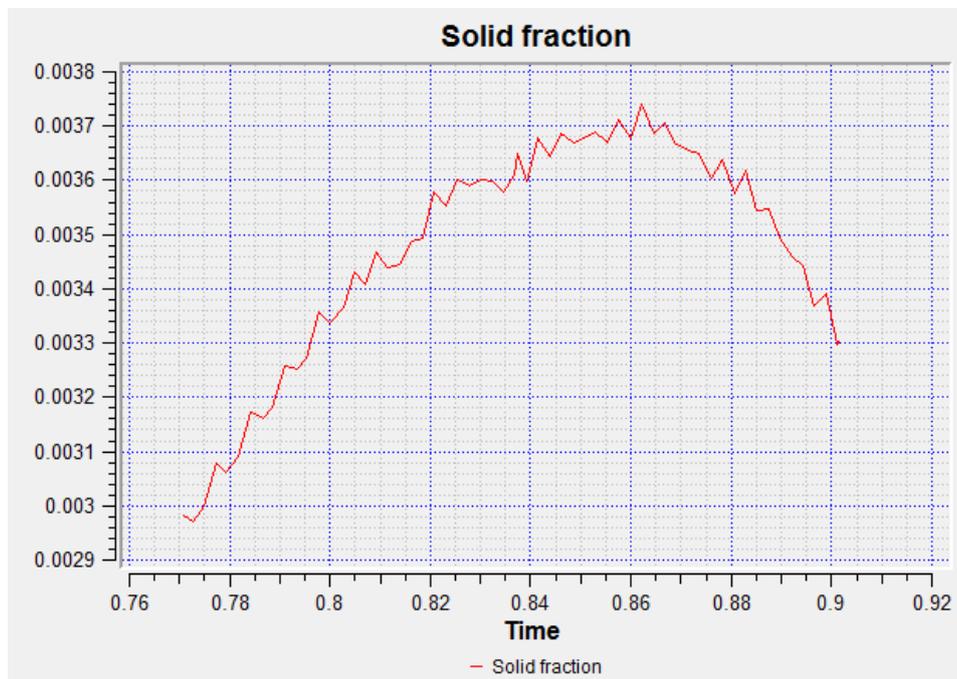


Figura 4. 40: Fracción de solidificación caso F.

- Distribución de Temperaturas.

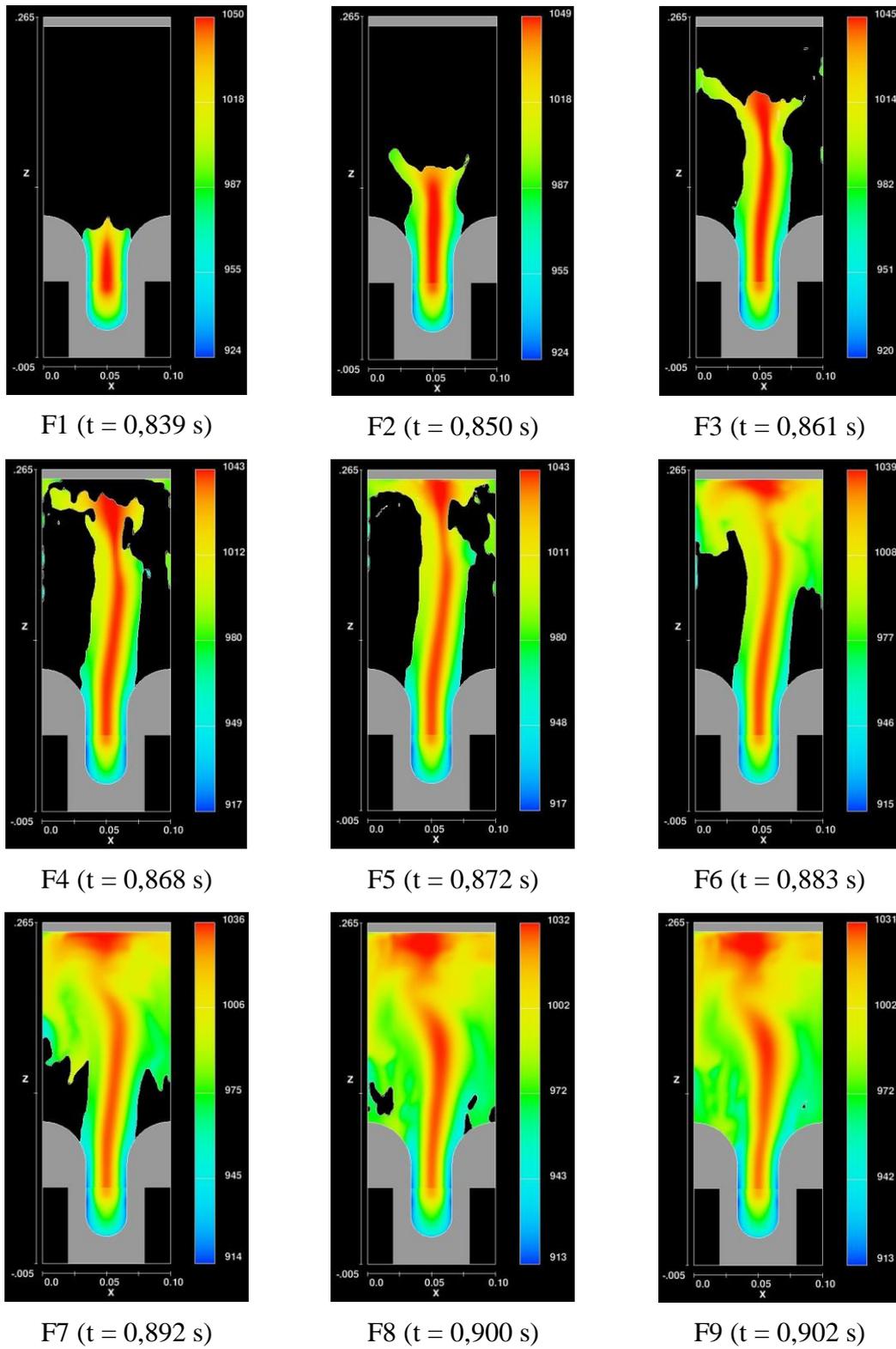


Figura 4. 41: Evolución en la distribución de la temperatura en el caso F.

- **Simulación:**

- a) Inicio llenado pieza: 0.839 s
- b) Finalización simulación: 0.902 s
- c) Duración: 0.063 S
- d) Nivel de Errores y Residuos: Alto
- e) Grado de iteraciones máximas necesarias: >100

- **Llenado del molde:**

- a) Distribución: la entrada al molde se realiza más homogéneamente que en los casos anteriores. El fluido se introduce a alta velocidad y presión permitiendo a la cámara de distribución hacer su función y guiar al fluido durante todo el proceso de llenado disminuyendo el atrapamiento de aire. No obstante, la baja velocidad de avance del pistón crea salpicaduras internas que al final se traducirán en una merma en las propiedades mecánicas.
- b) Atrapamiento de aire máximo: **0.559**

- **Energía y Solidificación:**

- a) Mean Kinetic Energy (max): 4.8 **Kg-m²/s²**
- b) Nivel de turbulencia: Bajo
- c) Fracción de solidificación
 - a. (max): 0.0038
 - b. Final: 0.0033

4.2.3. Análisis del llenado de Molde 3.

4.2.3.1. Geometría del molde 3.

El molde 3 muestra un cambio significativo en la cámara de distribución, además de la abertura de la cámara de distribución curvada, presenta un espesor en la entrada de 9 mm que disminuye en forma de rampa hasta los 4 mm de la pieza.

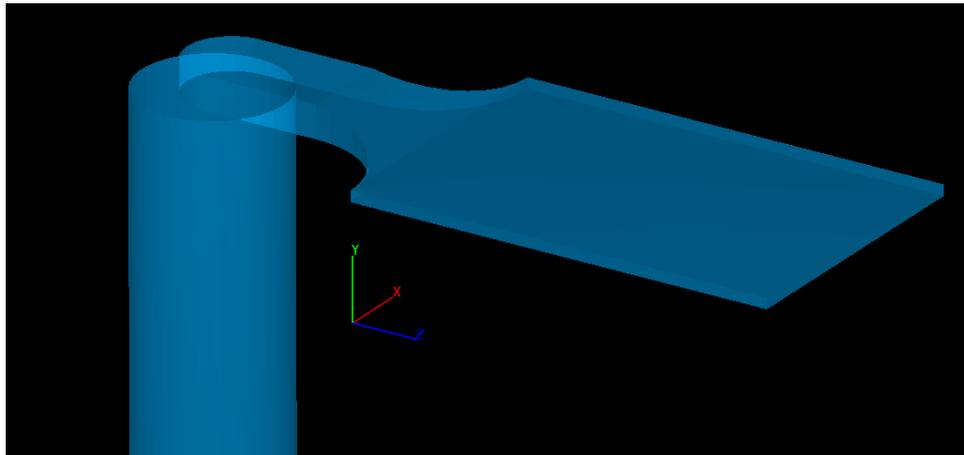


Figura 4. 42: Geometría del molde 3.

Ésta mejora supone una convergencia en el llenado de la pieza más homogénea que los moldes anteriores. Lo cual trataremos de demostrar con las simulaciones en Flow3D.

4.2.3.2. Análisis del llenado del molde 3 según el atrapamiento de aire y la distribución de temperaturas.

4.2.3.2. Caso G. Velocidad de llenado 1 m/s

- Simulación FLOW3D.

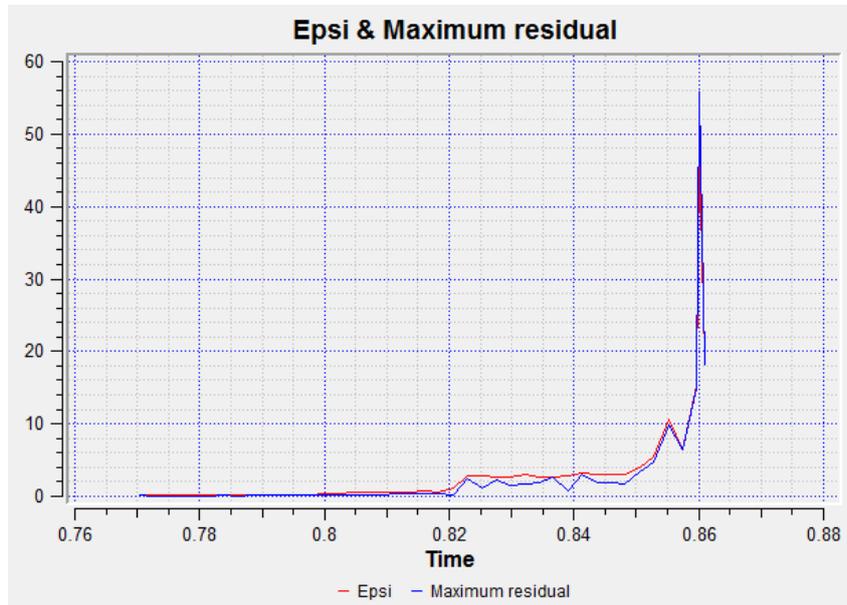


Figura 4. 43: Errores y nivel residual de la simulación caso G.

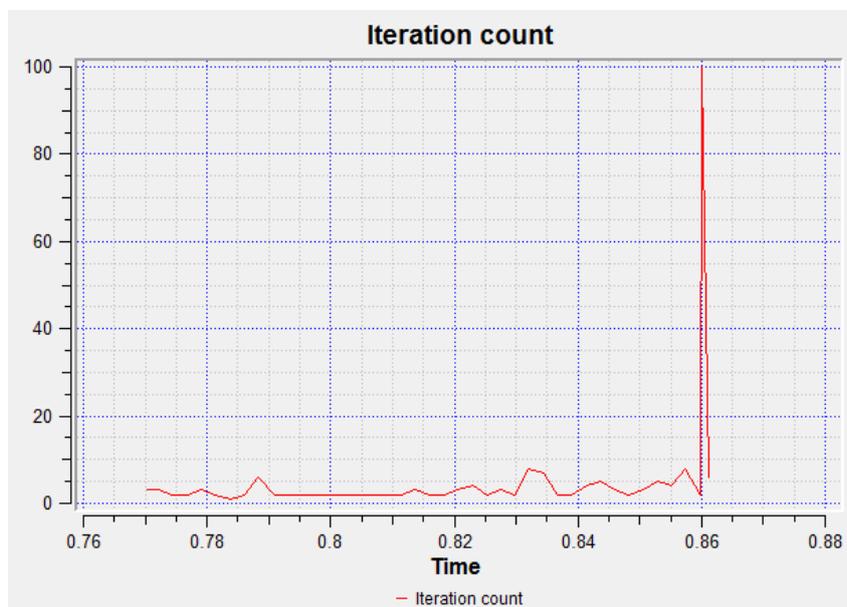


Figura 4. 44: Número de iteraciones durante la simulación caso G.

- Atrapamiento de aire

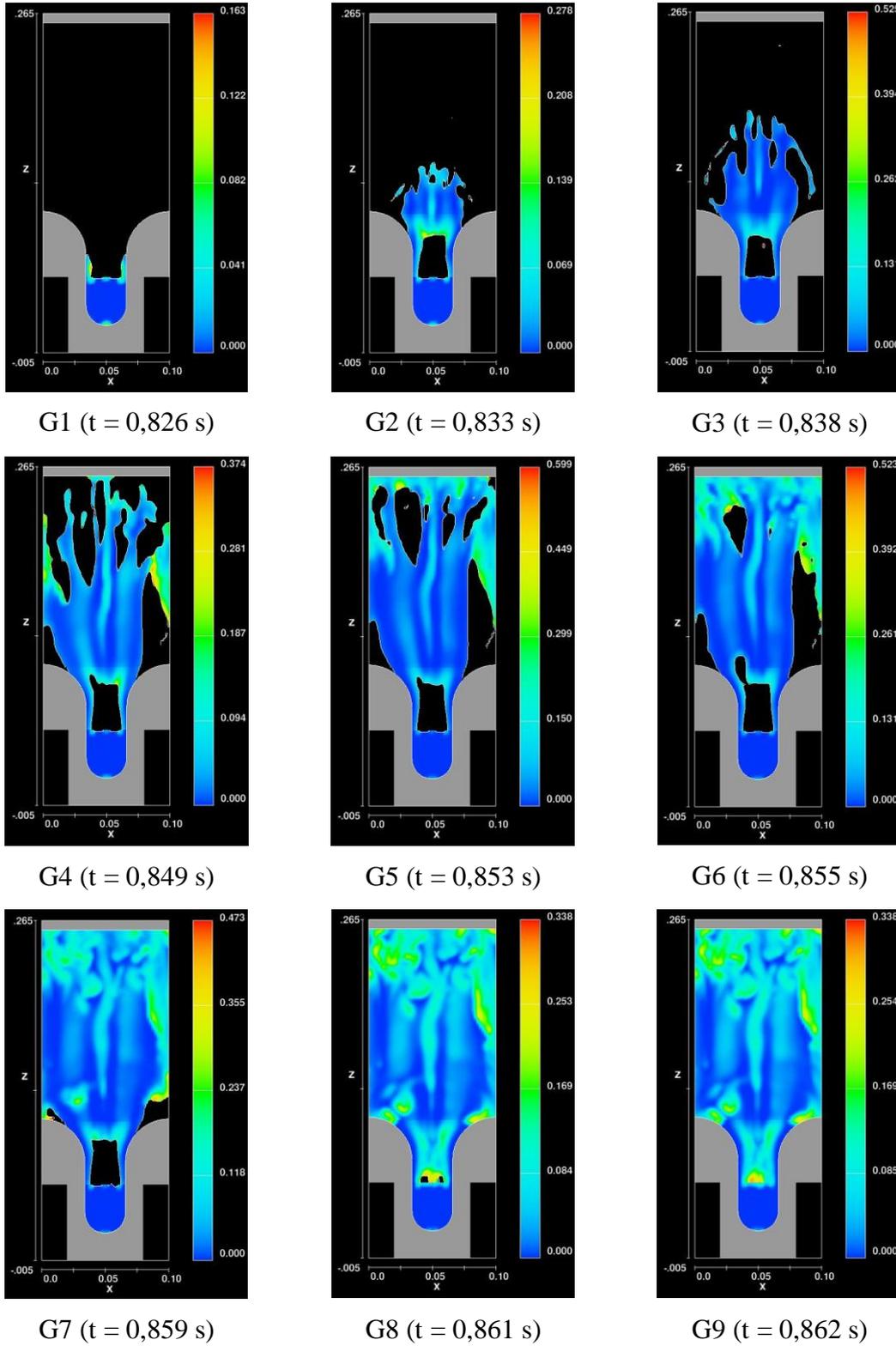


Figura 4. 45: Evolución en la distribución del flujo en el caso G.

- **Energía y Solidificación.**

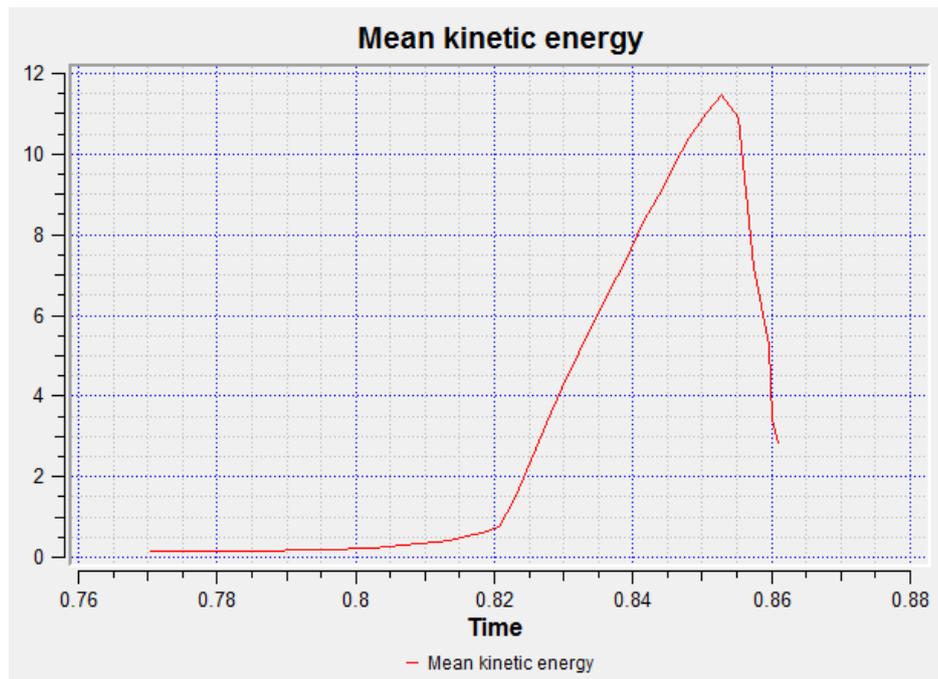


Figura 4. 46: Distribución energética caso G.



Figura 4. 47: Fracción de solidificación caso G.

➤ **Distribución de Temperaturas.**

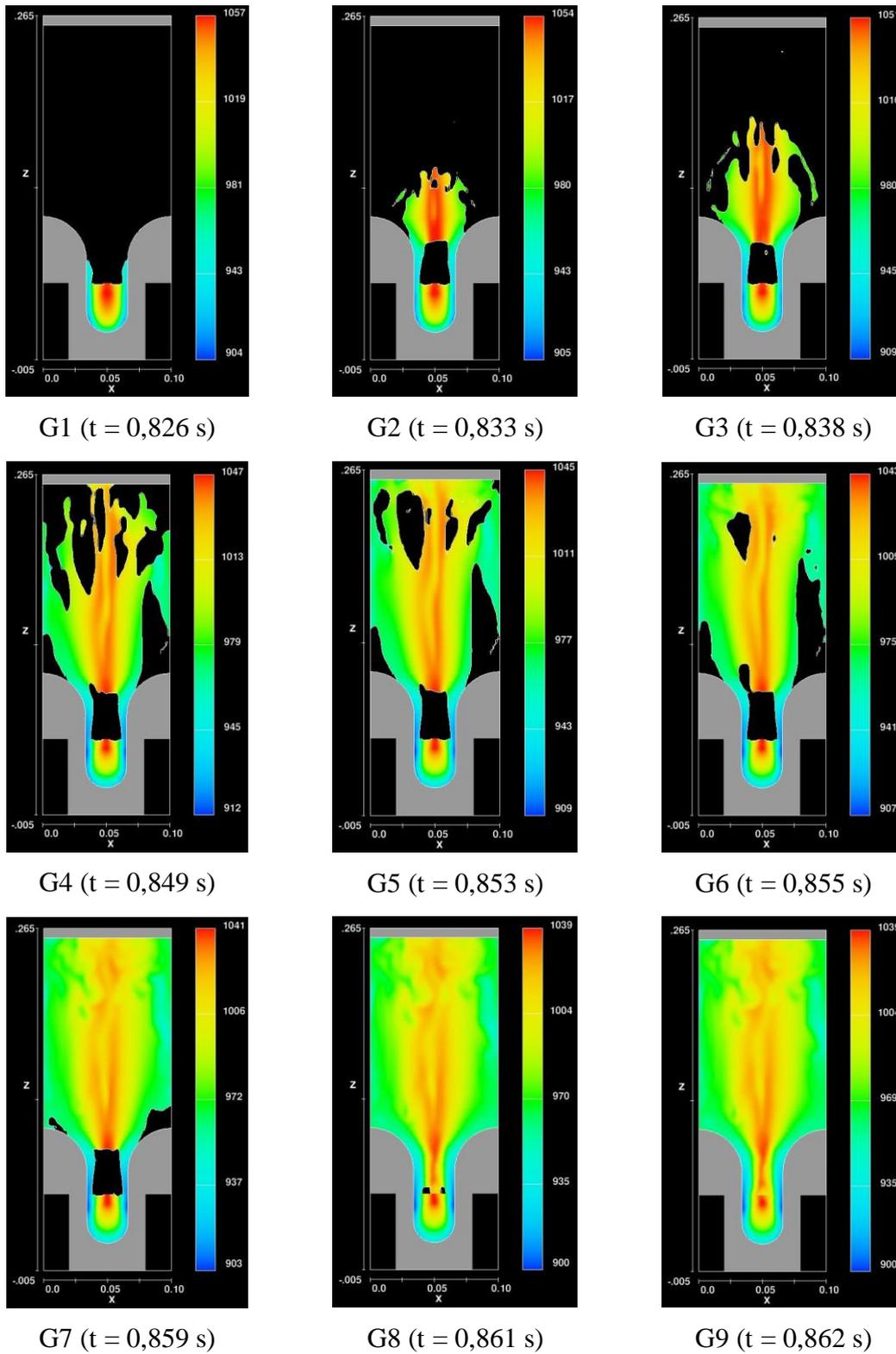


Figura 4. 48: Evolución en la distribución de la temperatura en el caso G.

- **Simulación:**

- a) Inicio llenado del molde: 0.826 s
- b) Finalización simulación: 0.862 s
- c) Duración: 0.036 s
- d) Nivel de Errores y Residuos: Muy bajo
- e) Grado de iteraciones máximas necesarias: >100

- **Llenado del molde:**

- a) Distribución: la nueva distribución de la cámara mejora significativamente el reparto de fluido durante la fase de llenado. El nivel de atrapamiento de aire durante todo el proceso disminuye y se traduce en un estado final óptimo.
- b) Atrapamiento de aire máximo: **0.338**

- **Energía y Solidificación:**

- a) Mean Kinetic Energy (max): 11.5 **Kg-m²/s²**
- b) Nivel de turbulencia: Bajo
- c) Fracción de solidificación
 - a. (max): 0.0034
 - b. Final: 0.0011

4.2.3.2. Caso H. Velocidad de llenado 3 m/s

- Simulación FLOW3D.

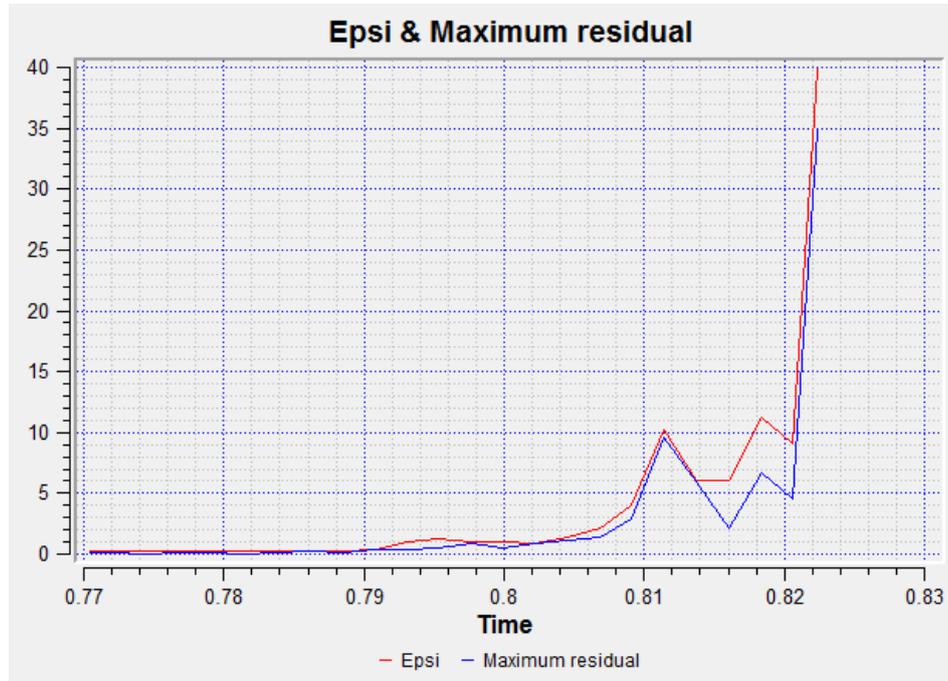


Figura 4. 49: Errores y nivel residual de la simulación caso H.

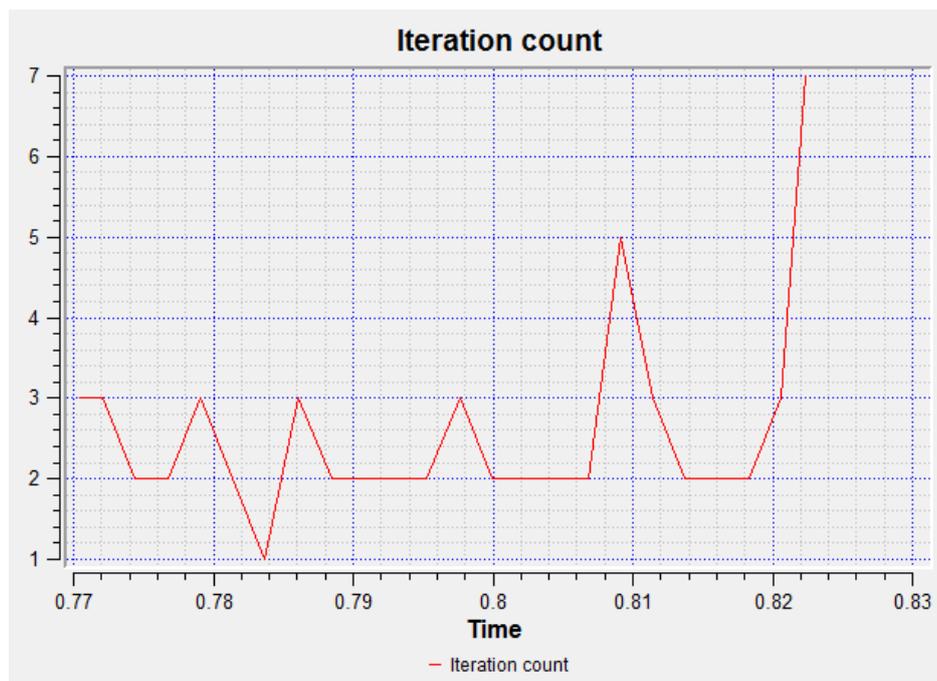


Figura 4. 50: Número de iteraciones durante la simulación caso H.

- Atrapamiento de aire

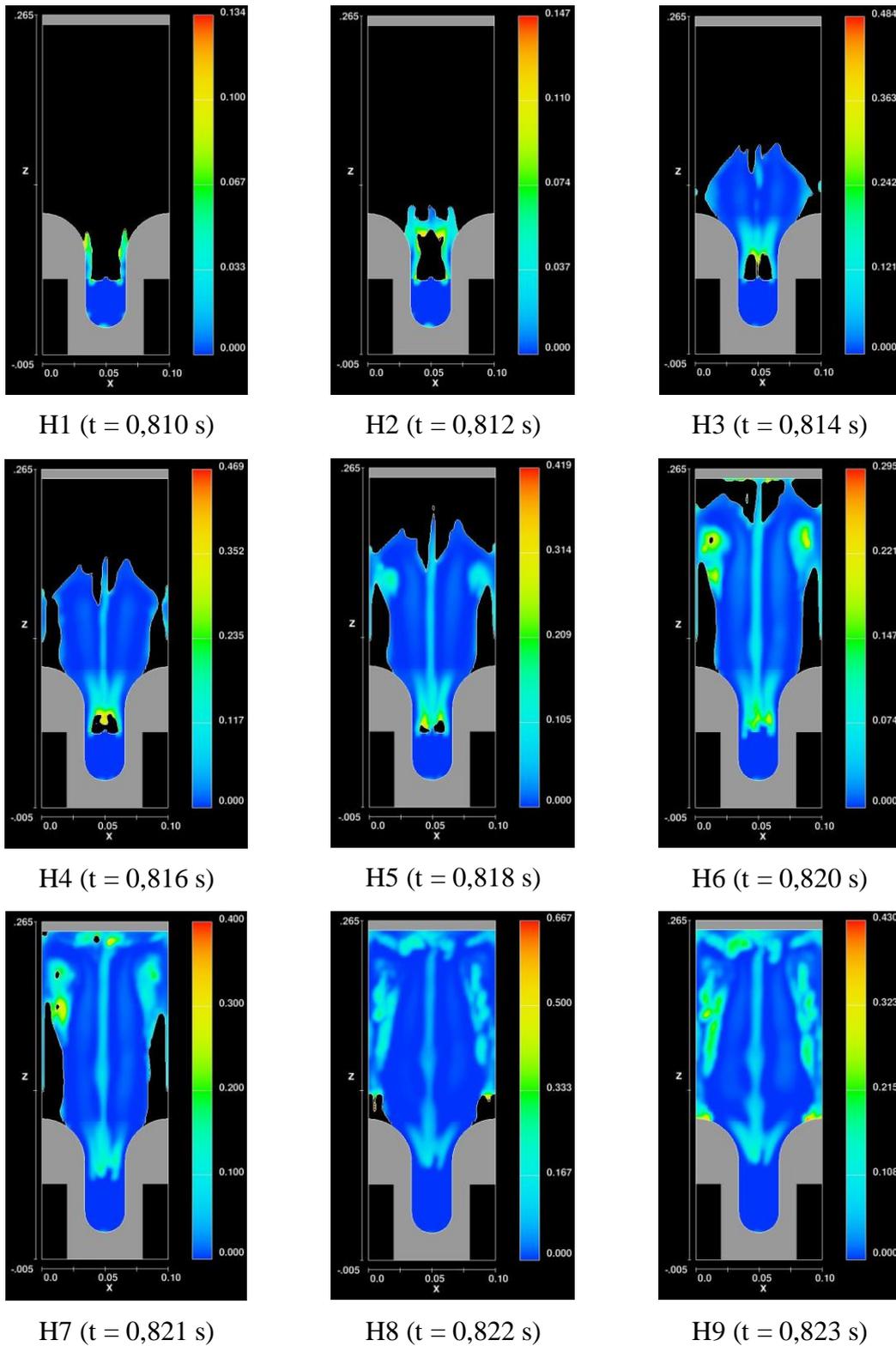


Figura 4. 51: Evolución en la distribución del flujo en el caso H.

- **Energía y Solidificación.**

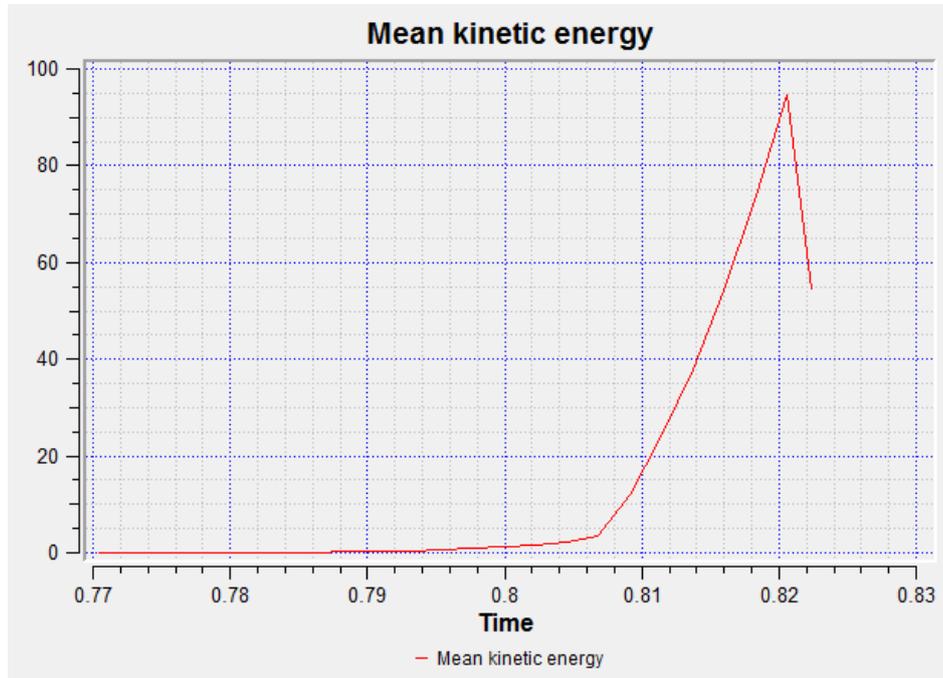


Figura 4. 52: Distribución energética caso H.



Figura 4. 53: Fracción de solidificación caso H.

➤ **Distribución de Temperaturas.**

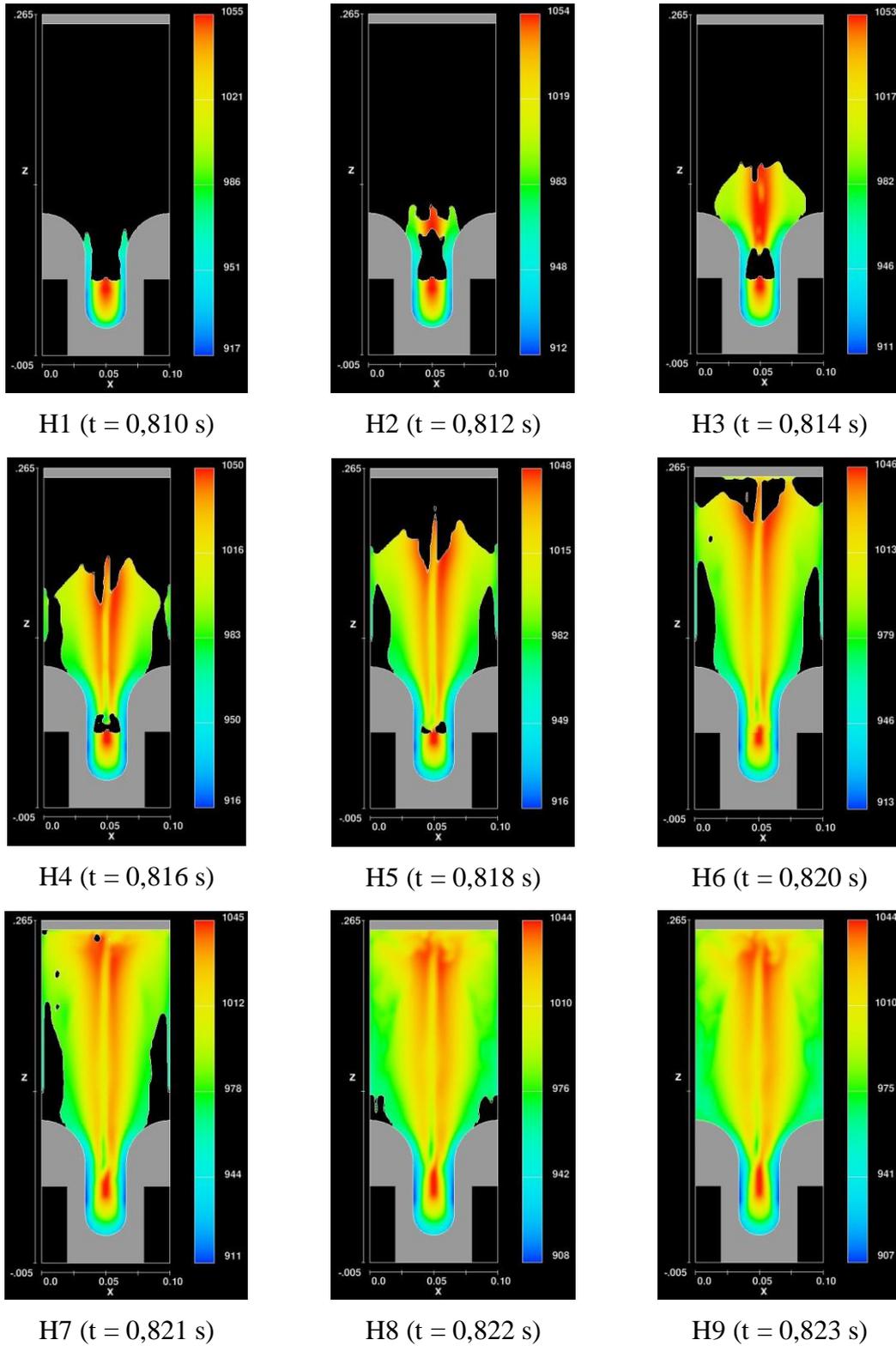


Figura 4. 54: Evolución en la distribución de la temperatura en el caso H.

- **Simulación:**

- d) Inicio simulación: 0.810 s
- e) Finalización simulación: 0.823 s
- f) Duración: 0.013 s
- g) Nivel de Errores y Residuos: bajo
- h) Grado de iteraciones máximas necesarias: 7

- **Llenado del molde:**

- i) Distribución: la nueva distribución de la cámara mejora significativamente el reparto de fluido durante la fase de llenado. El nivel de atrapamiento de aire durante todo el proceso disminuye y se traduce en un estado final óptimo. El régimen de velocidad de avance del pistón se complementa perfectamente con la geometría de la cámara de distribución y las propiedades del fluido.
- j) Atrapamiento de aire máximo: **0.430**

- **Energía y Solidificación:**

- k) Mean Kinetic Energy (max): 90 **Kg-m²/s²**
- l) Nivel de turbulencia: medio.
- m) Fracción de solidificación
 - a. (max): 0.0033
 - b. Final: 0.0005

4.2.3.2. Caso I. Velocidad de llenado 0,5 m/s

- Simulación FLOW3D.

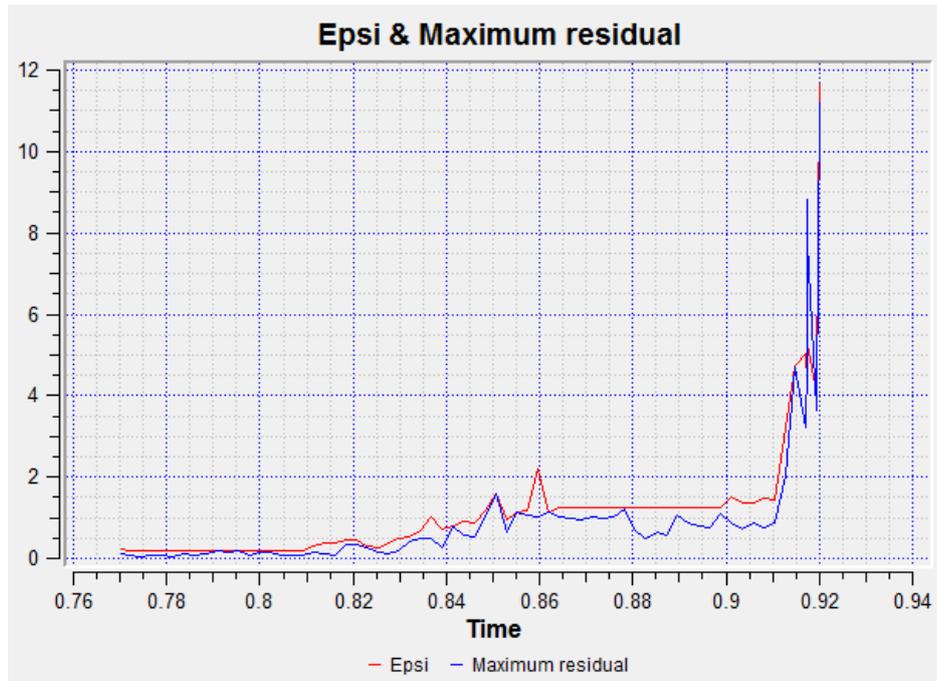


Figura 4. 55: Errores y nivel residual de la simulación caso I

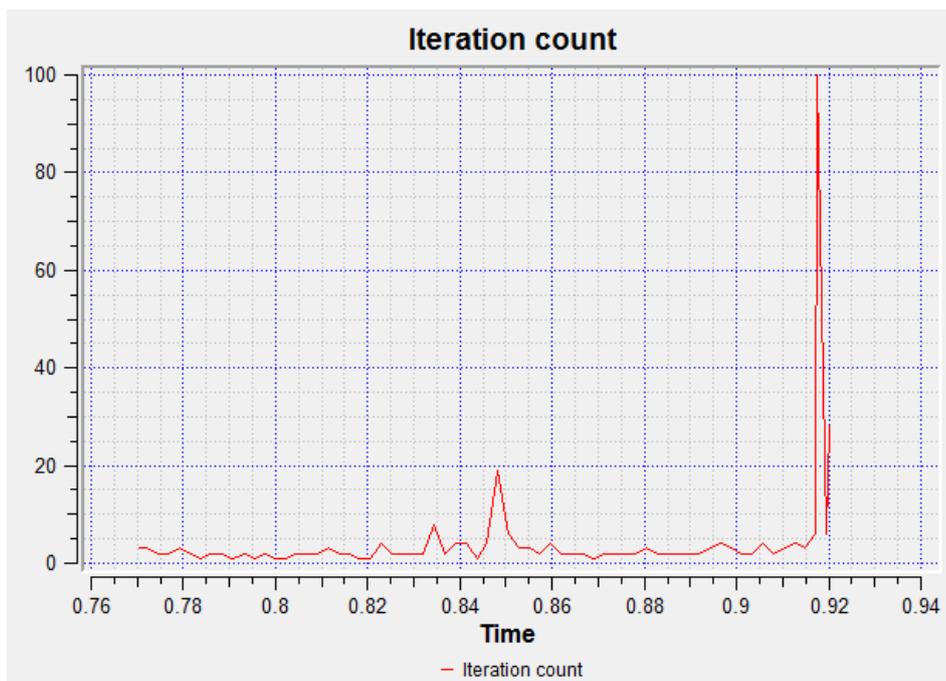


Figura 4. 56: Número de iteraciones durante la simulación caso I.

- Atrapamiento de aire

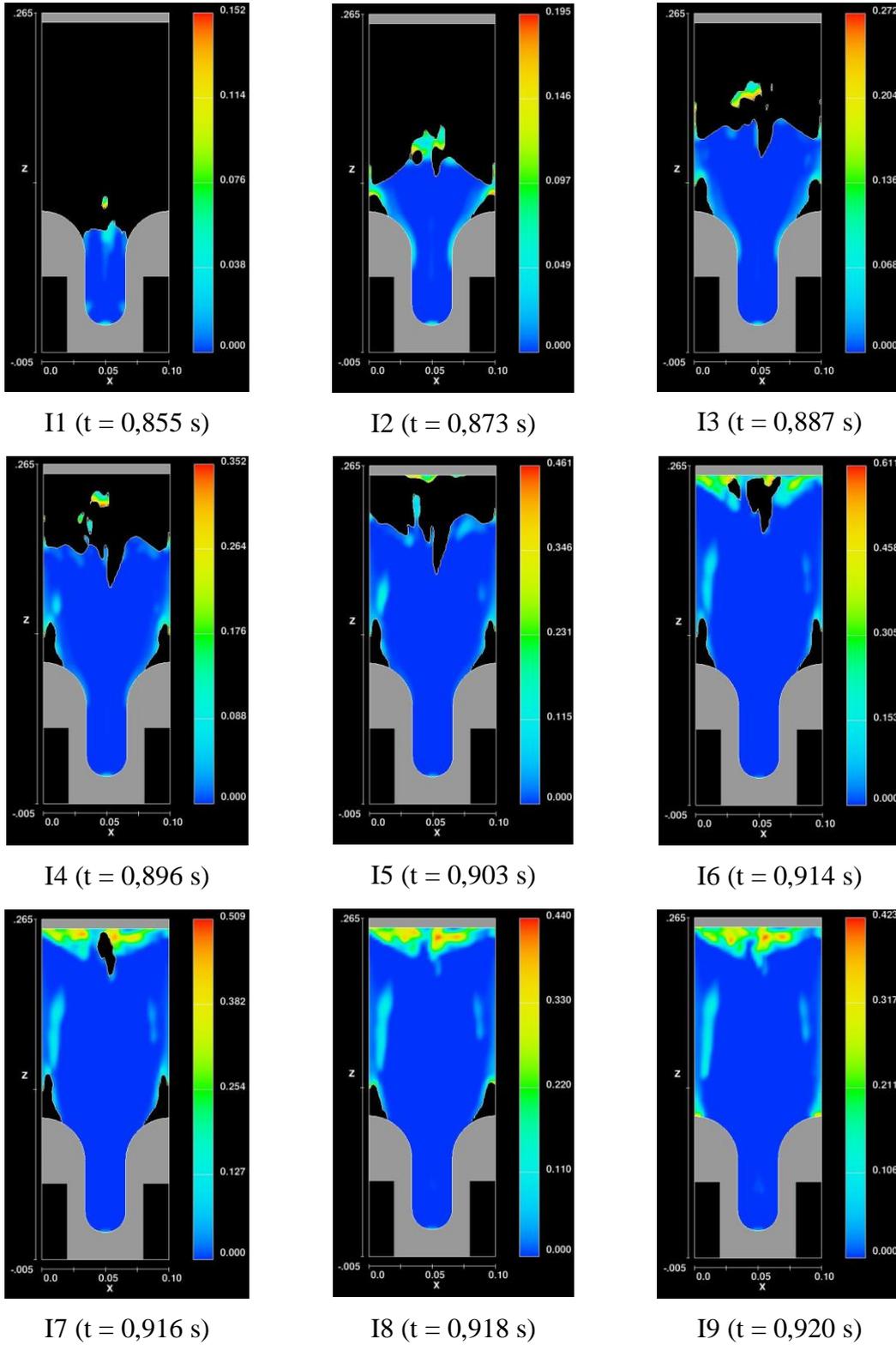


Figura 4. 57: Evolución en la distribución del flujo en el caso I.

- **Energía y Solidificación.**

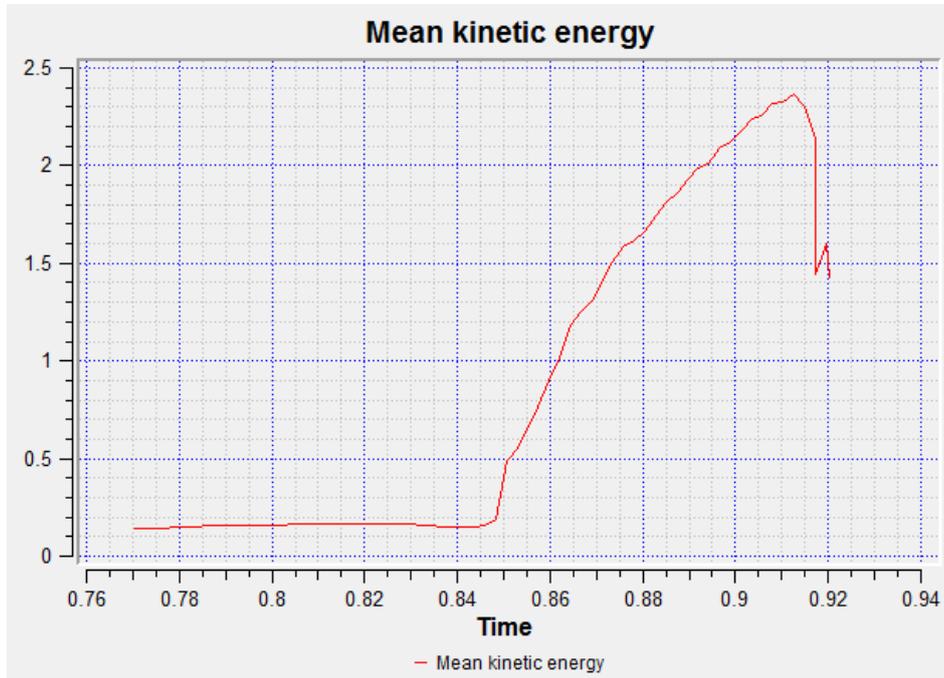


Figura 4. 58: Distribución energética caso I

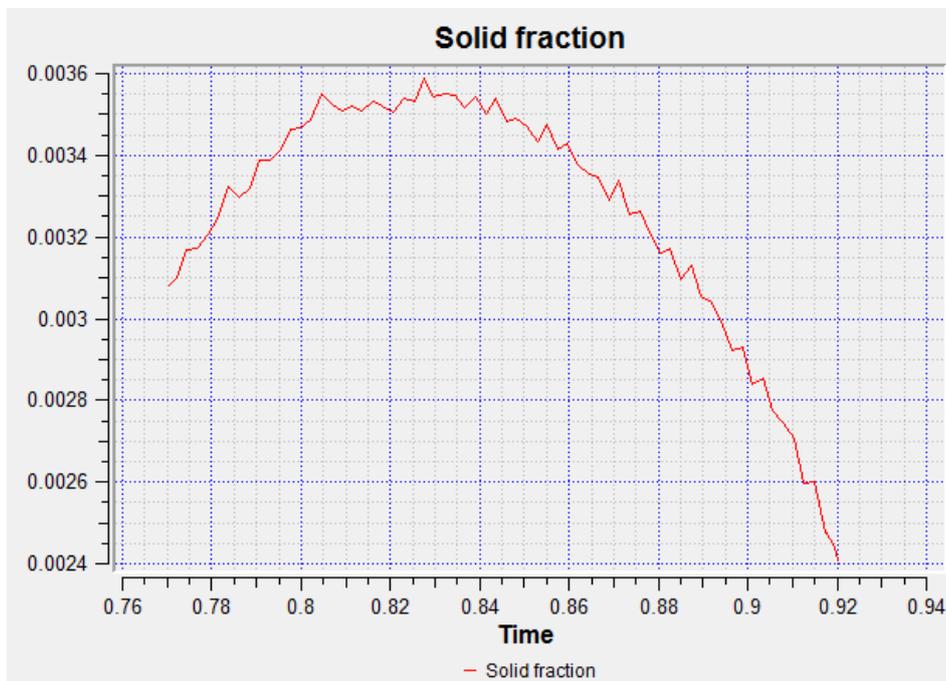


Figura 4. 59: Fracción de solidificación caso I.

➤ **Distribución de Temperaturas.**

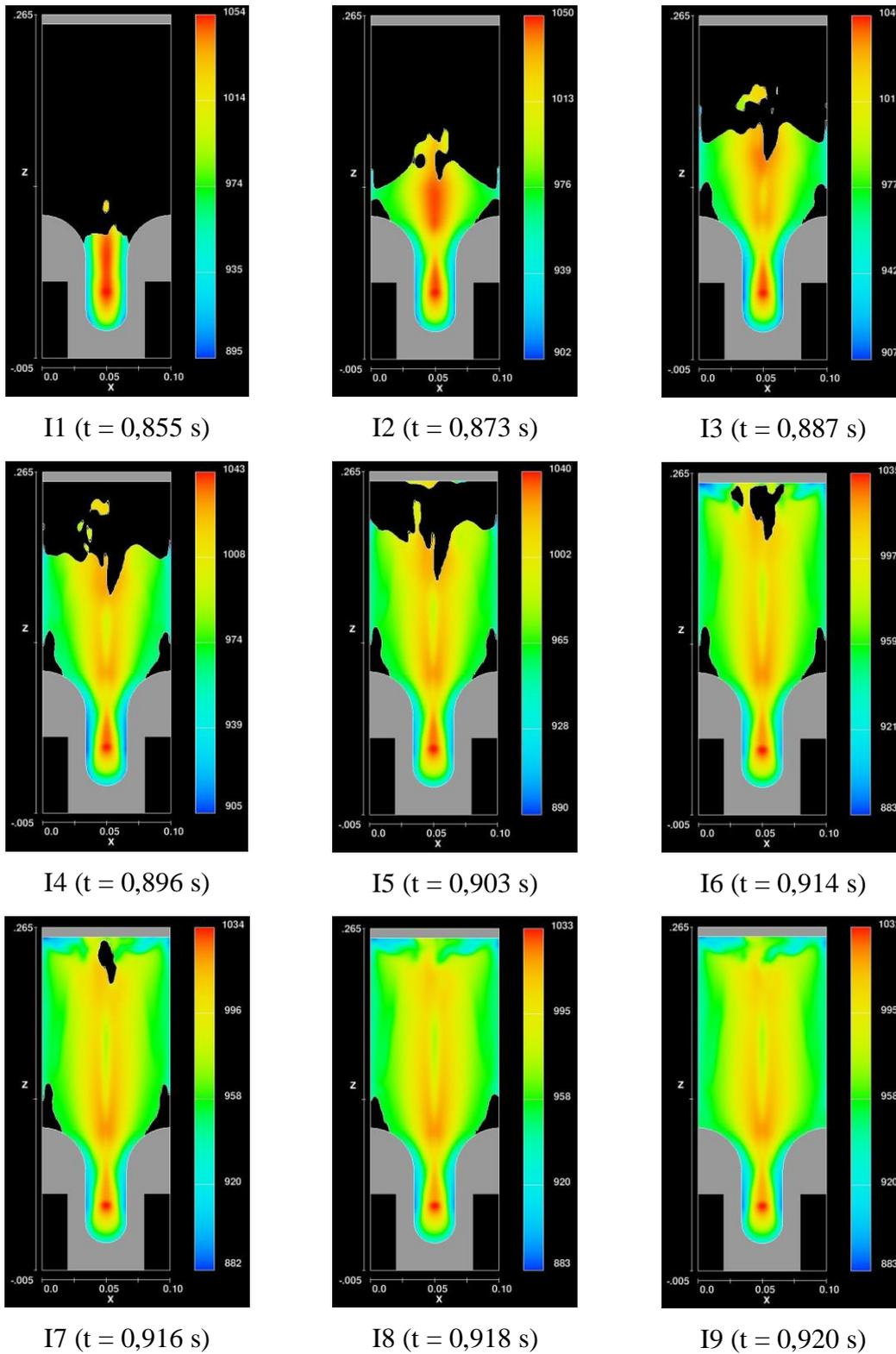


Figura 4. 60: Evolución en la distribución de la temperatura en el caso I.

- **Simulación:**

- a) Inicio simulación: 0.855 s
- b) Finalización simulación: 0.920 s
- c) Duración: 0.065 s
- d) Nivel de Errores y Residuos: medio
- e) Grado de iteraciones máximas necesarias: >100

- **Llenado del molde:**

- a) Distribución: la nueva distribución de la cámara mejora significativamente el reparto de fluido durante la fase de llenado. El nivel de atrapamiento de aire durante todo el proceso disminuye y se traduce en un estado final óptimo. El lento régimen de velocidad de avance del pistón no se complementa perfectamente con la geometría de la cámara de distribución y las propiedades del fluido obteniéndose resultados cualitativos inferiores a los de los casos G y H.
- b) Atrapamiento de aire máximo: **0.423**

- **Energía y Solidificación:**

- a) Mean Kinetic Energy (max): 2.3 **Kg-m²/s²**
- b) Nivel de turbulencia: medio.
- c) Fracción de solidificación
 - a. (max): 0.0032
 - b. Final: 0.0021

4.3. Comparativa del estado final de la pieza entre los diferentes casos analizados.

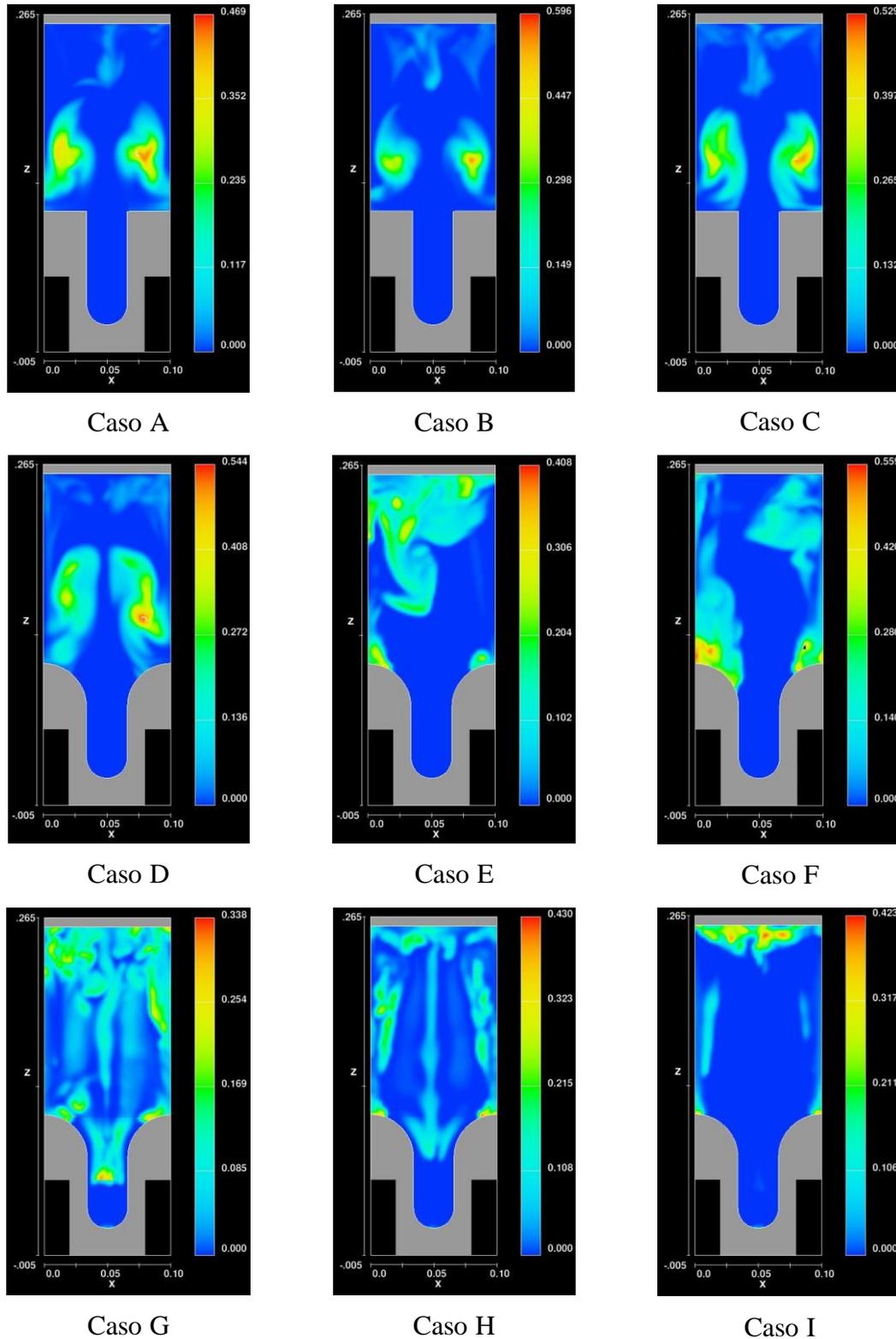


Figura 4. 61: Estado final de la pieza según las diferentes simulaciones.

	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso E	Caso F	Caso G	Caso H	Caso I
Inicio de la simulación	0.821	0.807	0.842	0.822	0.807	0.839	0.826	0.810	0.855
Finalización de la simulación	0.851	0.820	0.900	0.853	0.820	0.902	0.862	0.823	0.920
Duración	0.030	0.013	0.058	0.031	0.013	0.063	0.036	0.013	0.065
Nivel de Errores y residuos	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	Muy Bajo	Alto	Muy Bajo	Bajo	Medio
Número máximo de iteraciones	14	15	>100	15	17	>100	>100	7	>100
Atrapamiento de aire al final del llenado	0.469	0.596	0.529	0.544	0.408	0.559	0.338	0.430	0.423
Mean Kinetic Energy	60	470	13	47	120	4.8	11.5	90	2.3
Nivel de turbulencia	Medio	Alto	Muy Bajo	Medio	Alto	Bajo	Bajo	Medio	Medio

Tabla 4. 2 Comparativa del estado final de la pieza.

4.4. Simulación óptima.

Siendo notoria la influencia positiva que la geometría de la cámara de distribución ejerce sobre el estado final de la pieza, las simulaciones indican que la geometría del molde 3 será necesaria para garantizar una correcta homogenización del metal fundido previo a la solidificación.

En cuanto al régimen de velocidad de avance del pistón en la etapa de llenado, el parámetro fundamental para selección de la simulación óptima será el nivel de atrapamiento de aire tanto al final como en durante el proceso de llenado.

El Caso G, posee el menor nivel de atrapamiento de aire al final del proceso de llenado. No obstante, la duración del llenado es alta y provoca salpicaduras internas que derivarán en defectos estructurales debido a la solidificación prematura de pequeñas porciones.

El Caso H y el Caso I poseen un nivel de atrapamiento de aire semejante y muy inferior al resto de simulaciones de los moldes 1 y 2. Para valorar la calidad de los parámetros de llenado y la configuración de la misma, debemos detenernos a analizar la evolución completa del proceso de llenado.

El caso H, presenta una distribución muy homogénea durante toda la fase de llenado. La alta velocidad de avance del pistón en dicha etapa evita las salpicaduras internas y por tanto la existencia de defectos derivados de tal efecto y la aparición de micro-porosidades por atrapamientos de aire en diferentes puntos de la pieza. Solamente al final del proceso de llenado, se obtiene en los bordes laterales a la cámara de distribución un mayor valor de atrapamiento derivado de no haber considerado vientos en el molde. Surge aquí un evidente punto de mejora para posteriores proyectos: la disposición y tamaño de los vientos para diferentes casos.

El caso I, también presenta un bajo nivel de atrapamiento de aire al finalizar el proceso de llenado. Sin embargo, la velocidad de avance del pistón más lenta influye positivamente en el llenado continuo. Como se ha comentado en el caso H, la selección de la distribución de los vientos será el factor determinante para concluir definitivamente si es el Caso H o el Caso I el más favorable para la obtención de la pieza final de mayor calidad.

4.5. Simulación del proceso de Solidificación.

Uno de los valores añadidos del presente proyecto de simulación mediante el uso del software Flow3D, es el de obtener un avance importante en cuanto a 'Know How' en el proceso de solidificación de la pieza tras el proceso de llenado.

Para la obtención de resultados de solidificación total de la pieza se ha utilizado la geometría del molde 3, Caso H.

Tras finalizar el proceso de llenado ($t = 0,823$ s), se inició la simulación con la correcta configuración para valorar detalladamente la solidificación. El avance del pistón se anuló y se programó para que no moviera permitiendo así que la presión en el interior del molde no variara por efectos dinámicos.

4.5.1 Análisis de la solidificación total de la pieza tras el llenado

En la presenta gráfica se puede observar la evolución de la fracción de solidificación en función del tiempo.

Se divide en 3 etapas:

Etapa 1.

- T inicio: 0.823 s
- T final: 20 s
- Se aprecia un grado de solidificación de 4% del total de la pieza cada segundo.

Etapa 2.

- T inicio: 20 s
- T final: 37 s
- Se aprecia un grado de solidificación de 1% del total de la pieza cada segundo.

Etapa 3.

- T inicio: 37 s
- T final: 140 s
- El 5% restante de la pieza solidifica mucho más lentamente.

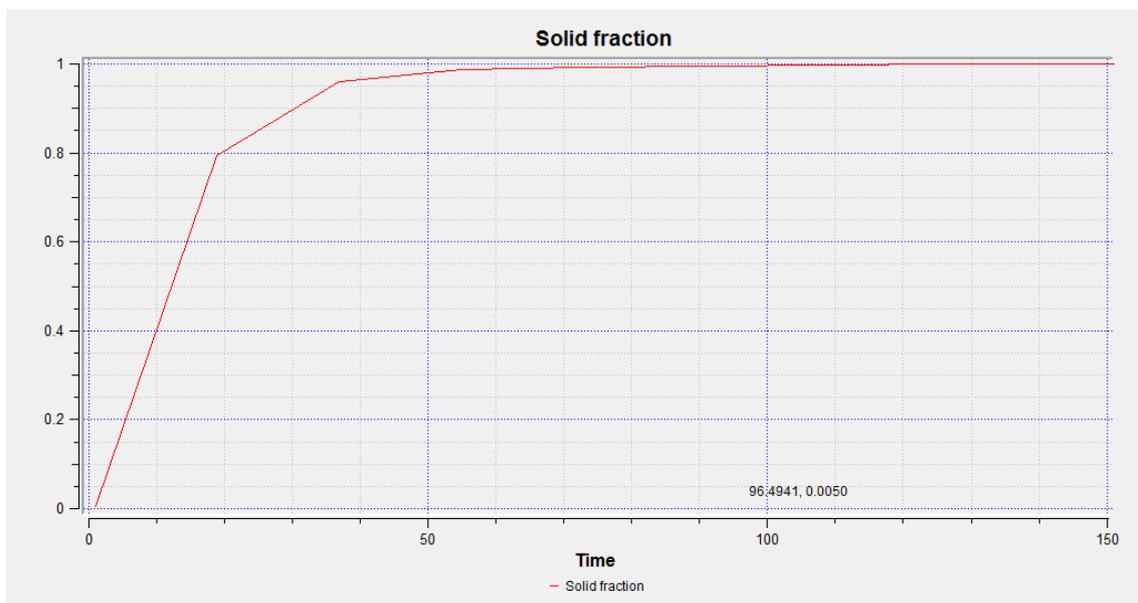


Figura 4. 62: Evolución de la solidificación.

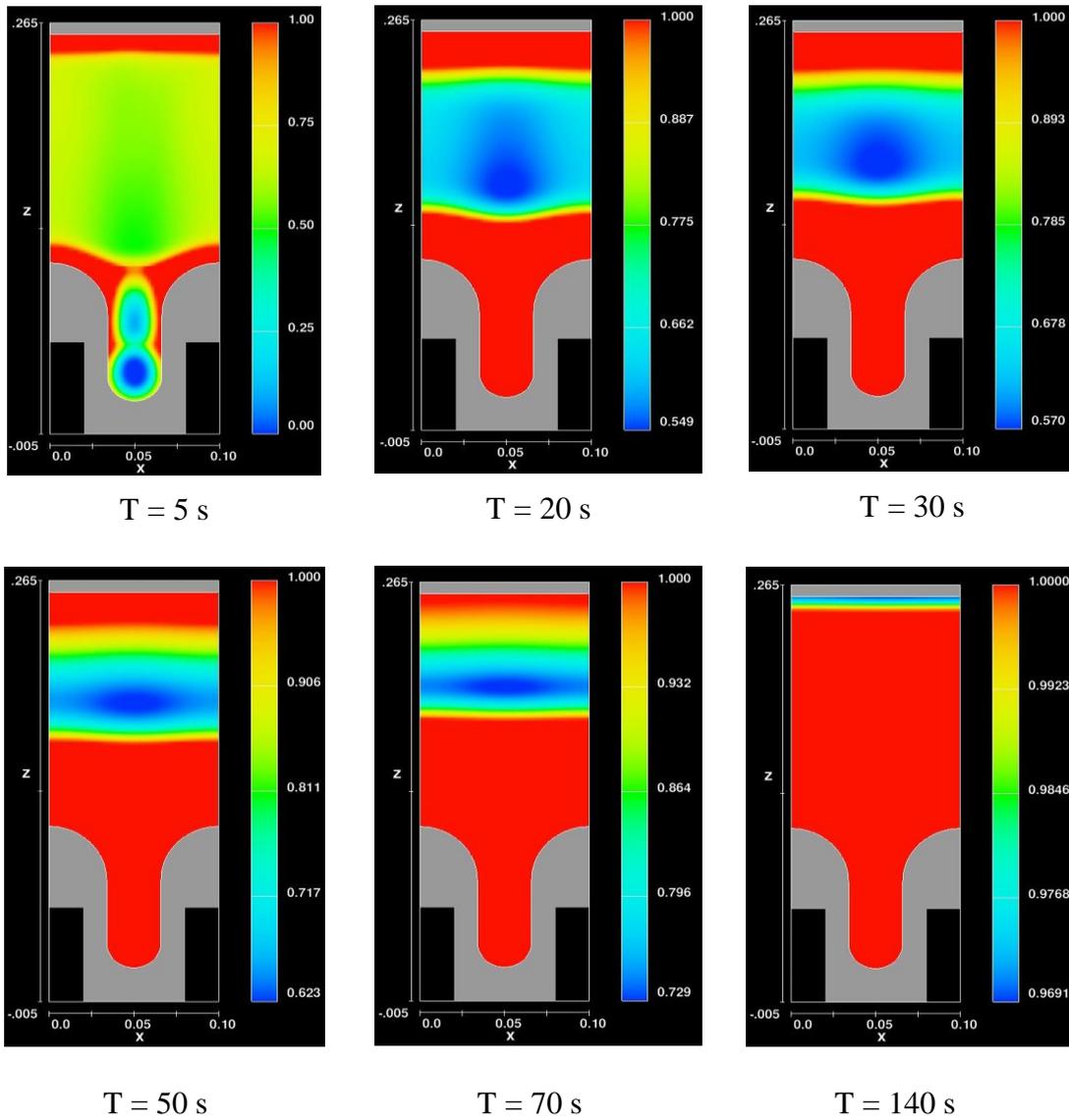


Figura 4. 63: Distribución de la solidificación.

CAPÍTULO 5

Conclusiones y trabajos futuros

A continuación se resumen las conclusiones más destacadas del estudio realizado. También se indican las posibles extensiones futuras del trabajo desarrollado en el presente Proyecto Fin de Carrera.

5.1. Conclusiones finales

En este proyecto se ha realizado un estudio del comportamiento del metal fundido durante los primeros instantes de llenado del molde y de las principales variables de la fase de transición que pueden afectar a dicho patrón de flujo así como el proceso de solidificación completo de la pieza.

Para llevar a cabo el estudio numérico se han utilizado modelos basados en el código comercial CFD de diferencias finitas Flow3D, y han sido empleados para estudiar el movimiento de la superficie libre del fluido durante el proceso de inyección.

Para estudiar el flujo del metal fundido durante la fase de llenado del molde se ha utilizado un modelo CFD tridimensional en el que se impone la velocidad del flujo de líquido en la entrada del sistema de distribución y **considerando los efectos de transferencia de calor, la dinámica del aire sobre la evolución del flujo de líquido y la solidificación del material durante todo el proceso de llenado**. Se ha estudiado también la influencia de distintas variables del proceso de inyección, que forman parte de la que se ha denominado fase de transición del proceso de inyección, sobre el patrón de flujo líquido en los primeros instantes de llenado de la cavidad.

Los resultados obtenidos han permitido constatar que la longitud del conducto de entrada y el pre-llenado inicial del sistema de distribución no tienen una influencia apreciable sobre el patrón de flujo líquido, cualesquiera que sean las velocidades de inyección. Solo para algunas condiciones de operación se ha podido constatar una ligera variación del perfil, pero que no modifica de forma apreciable el patrón del flujo líquido. En este sentido, se puede apreciar que la inclusión del modelo de tensión superficial solo provoca un ligero redondeo del frontal del chorro, que tal vez sea debido a la adherencia

del fluido a las paredes del canal de colada en los últimos instantes de su paso por el mismo, pero esto no tiene efecto apreciable en el patrón que sigue el fluido en la cavidad. Por otro lado, se ha encontrado que la **ley de movimiento aplicada para conseguir la velocidad de la fase rápida sí puede influir sobre el patrón de flujo**. Se ha podido comprobar que si la segunda fase se inicia cuando el fluido aún no ha entrado en la cavidad, la influencia de este cambio de velocidad del líquido sobre el patrón de flujo no es significativa, y solo se producen ligeras irregularidades en la superficie del chorro pero sin modificación de su patrón general. Sin embargo, cuando la segunda fase se inicia una vez el fluido ha alcanzado la cavidad del molde, se produce un cambio en el patrón de flujo, produciéndose un ensanchamiento parte frontal del flujo líquido similar al patrón tipo “palm”. El grado de ensanchamiento depende, tal y como se ha comprobado en el estudio realizado de la magnitud del cambio de velocidad y de la cantidad de fluido en la cavidad en el momento de dicho cambio de velocidad.

En base a estos resultados, se han descartado la longitud del conducto de entrada, el pre-llenado del sistema de distribución y el modelo de tensión superficial como variables que puedan afectar significativamente al patrón de flujo líquido y por tanto a la cantidad de aire atrapado en la cavidad, pero sí se ha confirmado la influencia de la ley de movimiento aplicada al pistón para conseguir la velocidad de la fase rápida.

En cuanto al estudio de la distribución de velocidades al finalizar la fase de transición, se ha utilizado un modelo CFD tridimensional en el que se ha impuesto la velocidad del pistón en los últimos instantes de recorrido del mismo para conseguir la velocidad requerida del líquido a la entrada del sistema de distribución, y en el que se han tenido en cuenta los efectos de transferencia de calor, de la dinámica del aire sobre la evolución del flujo de líquido, de la tensión superficial y de la solidificación. Se ha comprobado que durante la transición de la cámara al sistema de distribución se origina una componente horizontal a la entrada del sistema de distribución, tendiendo a abrir la parte frontal del chorro de agua.

En este proyecto no se ha estudiado la evacuación del aire a través de los vientos.

Se puede concluir que los resultados del estudio llevado a cabo en este proyecto han permitido conocer de forma cualitativa las principales variables que pueden tener efecto sobre el patrón de flujo, permitiendo descartar aquellas cuyo efecto es despreciable, y también han permitido un mayor conocimiento del efecto que puede causar la presión del aire sobre el patrón de flujo líquido, y por tanto en los mecanismos de atrapamiento de aire que pueden tener lugar durante el llenado del molde.

Por ello, este estudio ha contribuido a un mejor entendimiento de los fenómenos que originan porosidad por atrapamiento de aire en piezas fundidas por inyección a presión y a establecer criterios para la mejora de la calidad final del producto.

5.2. Desarrollos futuros

Los resultados obtenidos en este proyecto sugieren la consideración de posibles líneas de investigación futuras.

1. Realización de nuevos ensayos considerando únicamente la geometría de la cámara de distribución del molde 3. Los nuevos ensayos se deben enfocar en la optimización de los valores de temperaturas iniciales, coeficientes de transferencia de calor en diferentes materiales y numerosos modelos de avance del pistón en la fase rápida del llenado.
2. Dado que la conclusión del capítulo 4 ha dejado cierto grado de incertidumbre en cuanto al caso óptimo (Caso H o Caso I). Se propone realizar de nuevo las simulaciones existentes para diferentes distribuciones de los vientos y obtener así un molde definitivo en el cual analizar detalladamente la solidificación.
3. Realizar un análisis de detalle de la fase de solidificación total de la pieza. Para ello resulta intensamente necesario el uso de computadoras de alto rendimiento debido al elevado requerimiento de prestaciones para la simulación y el gigantesco volumen de datos manejados durante simulaciones de larga duración.
4. El punto 3 sugiere la necesidad de la optimización de la elección del mallado adecuado para cada caso y la correcta partición de las simulaciones, lo cual supone un grado de competencia con Flow3D muy alto.

Bibliografía

- [1] Alexandrou, A.N., Duc, E. y Entov, V., 2001. "Inertial, viscous and yield stress effects in Bingham fluid filling of a 2-D cavity", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 96 no. 3, pp. 383-403.
- [2] ASM Specialty Handbook, 1996, Aluminum and Aluminum alloys, ASM International, 199-206.
- [3] Babaei, R., Abdollahi, J., Homayonifar, P., Varahram, N. y Davami, P., 2006, "Improved Advection Algorithm of Computational Modeling of Free Surface Flow Using Structured Grids", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 195, no. 7-8, pp. 775-795.
- [4] Backer, G., Ranganathan, M., Heimsch, J., McLaughlin, M. y Kim, C.W., 2001, "Simulation of Flow-Induced Gas Entrapment and Its Effect on Porosity in Aluminum Die Castings", *Transactions of the 21st International Die Casting Congress*, NADCA, Cincinnati, Ohio, T01-011, pp. 1-5.
- [5] Barkhudarov, M., You, H., Ortega, J., Beech, J., Chin, S.B. y Kirkwood, D.H., 1993, "Experimental Validation and Development of FLOW-3D for Casting Problems", in: *Modeling of Casting Welding and Advanced Solidification Processes-VI*, Proceedings of the VI International Conference 1993, Palm Beach, FL, TMS, AIME, 1993, p. 441.
- [6] Bar-Meir, G., 1995, "On Gas/Air Porosity in Pressure Die Casting," PhD thesis, University of Minnesota.
- [7] Bar-Meir, G., Eckert, E.R.G. y Goldstein, R.J., 1996, "Pressure Die Casting: A Model of Vacuum Pumping," *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 118, pp. 259-265.
- [8] Bar-Meir, G., Eckert, E.R.G. y Goldstein, R.J., 1997, "Air Venting in Pressure Die Casting," *ASME Journal of Fluids Engineering*, vol. 119, pp. 473-476.
- [9] Barton, H.K., 1963, "How to Vent Die Casting Dies," *Foundry*, julio, pp. 52-59.
- [10] Belopukhov, A.K. y Korotkov, R., 1969, "Gas content factors in pressure die castings", *Russian Casting Production*, pp.121.
- [11] Bennett, C.H., 1990, "Venting-The Die Casting Machine Becomes an Air Compressor," *Die Casting Engineer*, pp. 22-26.
- [12] Brevick, J.R., Armentrout, D.J. y Chu, Y., 1994, "Minimization of Entrained Gas Porosity in Aluminum Horizontal Cold Chamber Die Casting," *Transactions of NAMRI/SME*, 22, pp. 41-46.

- [13] Brevick, J.R., Bhoi, A. y Harm, J., 2006. "Evaluation of Flow in Die Casting using High Speed Radiography", *NADCA 110th, Metal Casting Congress*, Columbus, Ohio.
- [14] Campbell, J., 1991, *Castings*, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK. pp. 64.
- [15] Chvorinov, N., 1940, *Giesserei*, vol. 27, pp. 177-186,201-208,222-225.
- [16] Cleary, P.W., Ha, J. y Ahuja, V., 2000, "High Pressure Die Casting Simulation Using Smoothed Particle Hydrodynamics", *International Journal of Cast Metals Research*, vol. 12, no. 6, pp. 335-355.
- [17] Cleary, P.W. y Ha, J., 2000, "Three Dimensional Modelling of High Pressure Die Casting", *International Journal of Cast Metals Research*, vol. 12, no. 6, pp. 357-365.
- [18] Cleary, P., Ha, J., Alguine, V. y Nguyen, T., 2002, "Flow Modelling in Casting Processes", *Applied Mathematical Modelling*, vol. 26, no. 2, pp. 171-190.
- [19] Cleary, P.W. y Ha, J., 2002, "Three-Dimensional Smoothed Particle Hydrodynamics Simulation of High Pressure Die Casting of Light Metal Components", *Journal of Light Metals*, vol. 2, no. 3, pp. 169-183.
- [20] Cleary, P., Prakash, M., Ha, J., Sinnott, M., Nguyen, T. y Grandfield, J., 2004, "Modeling of Cast Systems Using Smoothed-Particle Hydrodynamics", *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, vol. 56, no. 3, pp. 67-70.
- [21] Cleary, P. W., Ha, J., Prakash, M. y Nguyen, T., 2006. "3D SPH Flow predictions and validation for high pressure die casting of automotive components". *Applied Mathematical Modelling*, vol. 30, no. 11, 1406-1427.
- [22] Cleary, P. W., Ha, J., Prakash, M. y Nguyen, T., 2010, "Short Shots and Industrial Case Studies: Understanding Fluid Flow and Solidification in High Pressure Die Casting", *Applied Mathematical Modelling*, vol. 34, no. 8, pp. 2018-2033.
- [23] Coppola-Owen, A. H., 2007, "A Finite Element Model for Free Surface Flows on Fixed Meshes", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 54, no. 10, pp. 1151.
- [24] Cross, M., Pericleous, K., Croft, T.N., McBride, D., Lawrence, J.A. y Williams, A.J., 2006, "Computational Modeling of Mold Filling and Related Free-Surface Flows in Shape Casting: An Overview of the Challenges Involved", *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 37, no. 6, pp. 879-885.
- [25] Doehler, H.H., 1910, "Art of and Apparatus for Casting Fluid Metal", United States Patent 973,483, United States Patent and Trademark Office, Washington, D.C.
- [26] Davey, K. y Bounds, S., 1997, "Modelling the Pressure Die Casting Process Using Boundary and Finite Element Methods", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 63, no. 1-3, pp. 696-700.

- [27] Draper, A.B., 1967, "Effect of Vent and Gate Areas on the Porosity of Die Casting", *American Foundrymen's Society Transactions*, vol. 75, pp. 727-734.
- [28] Duran M., Karni, Y., Brevick, J., Chu, Y. y Altan, T., 1991, "Minimization of Air Entrapment in the Shot Sleeve of a Die Casting Machine to Reduce Porosity", Technical Report No ERC/NSM-C-91-31, The Ohio State University, Ohio.
- [29] Faura, F., López, J. y Hernández, J., 2001, "On the Optimum Plunger Acceleration Law in the Slow Shot Phase of Pressure Die Casting Machines", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 41, no. 2, pp. 173-191.
- [30] Flemings, M., 1991, "Behavior of Metal Alloys in the Semisolid State", *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 22, no. 5, pp. 957-981.
- [31] Freitas, C.J., 1995, "Perspective: Selected Benchmarks from Commercial CFD Codes", *Journal of Fluids Engineering*, vol. 117, no. 5, pp. 208-218.
- [32] Fulgosi M., Lakehal D., Banerjee S. y De Angelis V., 2003, "Direct Numerical Simulation of Turbulence in a Sheared Air-Water with Deformable Interface", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 482, pp. 319-345.
- [33] Flow Science, Inc., 2004, Flow-3D User's Manual.
- [34] Gao, D.M., 1999, "A Three-Dimensional Hybrid Finite Element-Volume Tracking Model for Mold Filling in Casting Processes", *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, vol. 29, no. 7, pp.877-895
- [35] Garber, L. y Draper, A.B., 1979, "The Effects of Process Variables on the Internal Quality of Aluminum Die Castings", *Transactions of the 10th SDCE International Die Casting Exposition & Congress SDCE-79*, G-T79-022.
- [36] Ginzburg, I. y Steiner, H., 2003, "Lattice Boltzmann Model for Free-Surface Flow and Its Application to Filling Process in Casting", *Journal of Computational Physics*, vol. 185, pp. 61-99.
- [37] Ha, J. y Cleary, P.W., 2000, "Comparison of SPH Simulations of High Pressure Die Casting with the Experiments and VOF Simulations of Schmid and Klein", *International Journal of Cast Metals Research*, vol. 12, no. 6, pp. 409-418.
- [38] Ha, J. y Cleary, P.W., 2005, "Simulation of High Pressure Die Filling of a Moderately Complex Industrial Object Using Smoothed Particle Hydrodynamics", *International Journal of Cast Metals Research*, vol. 18, no. 2, pp. 81-92.
- [39] Hansen, P.N., Flender, E. y Hartman, G.C., 1991, "MAGMASOFT-The MAGMA System of Mold Filling and Solidification Modelling", in *Numerical Simulation of casting solidification in automotive applications* (C. Kim and C.-W. Kim, eds.), pp. 221, The Minerals, Metals and Materials Society.

- [40] Hao, S. W., Hu, B.H., Niu, X.P. y Pehlke, R.D., 1998. "Atomization in High Pressure Die Casting - A Problem and a Challenge", *Die Casting Engineer*, vol. 42, no. 5, pp. 42-56.
- [41] Hernández-Ortega. J.J., 2010, "Estudio Numérico y Experimental de los Procesos de Fundición a Presión. Mecanismos de Formación de Porosidad durante el Llenado del Molde". Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena.
- [42] Hernández, J., López, J. y Faura, F., 2001, "Influence of Unsteady Effects on Air Venting in Pressure Die Casting", *ASME Journal of Fluids Engineering*, vol. 123, no. 4, pp. 884-892.
- [43] Hernández, J., López, J., Faura, F. y Gómez, P., 2003, "Analysis of the Flow in a High-Pressure Die Casting Chamber", *ASME Journal of Fluids Engineering*, vol. 125, no. 2, pp. 315-324.
- [44] Hernández, J., Zamora, R., Palacios, J., López, J. y Faura, F., 2010, *J. Manuf. Sci. Eng.-T ASME*, 132, pp. 051011-1-051011-9
- [45] Hines, A.M. y Tu, J.S., 1993, "Modeling of Fluid Flow and Heat Transfer in the Solidification of Superalloy Investment Castings" in *Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VI* (T. S. Piwonka, V. Voller, and L. Katgerman, eds.), pp. 461-468, The Minerals, Metals and Materials Society.
- [46] Hirt, C.W., 1991, "A FLOW-3D Study of the Importance of the Fluid Momentum in Mold Filling", *Numerical Simulation of casting solidification in automotive applications*, (C. Kim and C.-W. Kim, eds.), p. 173-188, The Minerals, Metals and Materials Society.
- [47] Hirt, C.W. y Nichols, B.D., 1981, "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", *Journal of Computational Physics*, vol. 39, pp. 201-225.
- [48] Hirt, C.W. y Sicilian, J.M., 1985, "A Porosity Technique for the Definition of Obstacles in Rectangular-Cell Meshes", *Proceedings of the 4th International Conference of Numerical Ship Hydrodynamics*, National Academy of Science, Washington, D.C., USA, p 450.
- [49] Hu, J., Ramlingam, S., Meyerson, G., Eckert, E.R.G. y Goldstein, R.J., 1992, "Experiment and Computer Modelling of the Filling Flows in Pressure Die Casting", *ASME/CIE Design*, San Francisco, CA, v 1, pp. 401-410.
- [50] Homayonifar, P., Babaei, R., Attar, E., Shahinfar, S. y Davami, P., 2008, "Numerical Modeling of Splashing and Air Entrapment in High-Pressure Die Casting", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 39, no. 3-4, pp. 219-228.
- [51] Hong, C. P., Lee, S.Y. y Song, K., 2001, "Development of a New Simulation Method of Mold Filling Based on a Body-Fitted Coordinate System", *Isij International*, vol. 41, no. 9, pp. 999-1005.

- [52] Huang, Y.J., Hu, B.H., Pinwill, I., Zhou, W. y Taplin, D.M.R., 2000, "Effects of Process Settings on the Porosity Levels of AM60B Magnesium Die Castings", *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 15, pp. 97-105.
- [53] Ilinca, F. y Hetu, J.F., 2000, "Finite Element Solution of Three-Dimensional Turbulent Flows Applied to Mold-Filling Problems". *International Journal for Numerical Methods in Fluids* vol. 34, pp. 729-750.
- [54] Jeong, J. H. y Yang, D.Y., 2004, "Finite Element Analysis of Filling Stage in Die-Casting Process Using Marker Surface Method and Adaptive Grid Refinement Technique", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 44, no. 2, pp. 209-230.
- [55] Jolly, M.R., 2005, "State of the Art Review of Use of Modelling Software for Shape Casting", *Shape Casting: The John Campbell Symposium*, Editors: Tiryakioglu, M. y Crepeau, P.N., The Minerals, Metals & Materials Society, pp. 337-345.
- [56] Kalpakjian, S., 1995, *Manufacturing Engineering and Technology*, Addison Wesley, New York.
- [57] Karban J.R., 2001, "The Effects of Intensification Pressure, Gate Velocity & Intermediate Shot Velocity on the Internal Quality of Aluminium Die Castings", *Transactions of the 21st International Die Casting Congress*, NADCA, Cincinnati, Ohio, paper T01-074.
- [58] Karni, Y., 1991, "Selection of Process Variables for Die Casting", PhD thesis, The Ohio State University, Ohio.
- [59] Kim, C.W., Siersma, K. y Kubo, K., 2006, "A Porosity Simulation for High Pressure Die Casting", *Simulation of Aluminum Shape Casting Processing: From Alloy Design to Mechanical Properties*, pp. 153-163.
- [60] Kimatsuka, A., Ohnaka, I., Zhu, J.D., Sugiyama, A. y Kamitsu, T., 2003, "Mold filling simulation of high pressure die casting for predicting gas porosity". In: *Proceedings from the 10th International Conference on Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes*, Stefanescu, D.M., Warren J.A., Jolly and Krane M.J.M. (Eds.), USA, 335-342.
- [61] Kimio, K. y Pehlke, R.D., 1985, "Mathematical Modeling of Porosity Formation in Solidification", *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 16, no. 2, pp. 359-366.
- [62] Kirkman, S., 2003, *Shrinkage Porosity: A Guide to Correcting the Problems*, NADCA, Rosemont.
- [63] Kothe, D.B., Juric, D., Lam, K. y Lally, B., 1998, "Numerical Recipes for Mold Filling Simulation", In *Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VIII*, B.G. Thomas and C. Beckermann, eds., pp. 17-28, The Minerals, Metals and Materials Society.

- [64] Kulasegaram, S., Bonet, J., Lewis, R.W. y Profit, M., 2003, "High Pressure Die Casting Simulation Using a Lagrangian Particle Method", *Communications in Numerical Methods in Engineering*, vol. 19, no. 9, pp. 679-687.
- [65] Kuo J.H. y Hwang W.S., 1998, "Flow Pattern Simulation in Shot Sleeve During Injection of Diecasting", *American Foundrymen's Society Transactions*, vol. 63, pp. 497-503.
- [66] Laty, P., Large, P. y Rigaut, C., 1991, "Simulor, a Software to Help the Development of the Mold", *Numerical Simulation of casting solidification in automotive applications* Eds. Kim, C. y Kim C.-W., The Minerals, Metals and Materials Society.
- [67] Lee, J.C., Seok, H.K. y Lee, H.K., 2005, "Significance of Gate Geometry and Injection Speed on the Flow Behaviors of Molten Al Alloy During Die Filling", *Metals and Materials International*, vol. 11, no. 3, pp. 191-196.
- [68] Lee, W.B., Lu, H.Y. y Lui, Y.B., 1995. "A Computer-Simulation of the Effect of Wall Thickness on the Metal Flow in Die-Casting Dies", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 52 no. 2-4, pp. 248-269.
- [69] Lefebvre, A.H., 1989, *Atomization and Sprays*, Hemisphere Publishing Corporation, New York.
- [70] Lewis, R. W., Navti, S.E. y Taylor, C., 1997, "A Mixed Lagrangian-Eulerian Approach to Modelling Fluid Flow During Mould Filling", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 25, no. 8, pp. 931-952.
- [71] Lewis, R. W., Ransing, R.S., Pao, W.K.S., Kulasegaram, K. y Bonet, J., 2004, "Alternative Techniques for Casting Process Simulation", *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, vol. 14, no. 2, pp. 145-166.
- [72] Lewis, G., Craw, D., y Bell, R., 1961. Porosity in zinc die casting. *Transactions of American Foundrymen's Society*. 69, 537-548.
- [73] Lindsey, D. y Wallace, J.F., 1972, "Effect of Vent Size and Design, Lubrication Practice, Metal Degassing, Die Texturing and Filling of Shot Sleeve on Die Casting Soundness", *Trans. 7th SDCE Int. Die Casting Congress and Exposition*, Chicago, USA, paper 10372, pp. 1-15.
- [74] Lipinski, M.D. (1996), "Mold Filling Simulation for Casting Processes", Ph.D. Thesis, Aachen.
- [75] López, J., Hernández, J., Faura, F. y Trapaga, G., 2000, "Shot Sleeve Wave Dynamics in the Slow Phase of Die Casting Injection", *ASME Journal of Fluids Engineering* vol. 122, no. 2, pp. 349-356.
- [76] López, J., Faura, F., Hernández, J. y Gómez, P., 2003, "On the Critical Plunger Speed and Three-Dimensional Effects in High-Pressure Die Casting Injection Chambers", *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 125, pp. 529-537.

- [77] Luis, L. y Draper, A.B., 1967, "Effect of Overflow Wells, Gating and Injection Parameters on the Porosity of a Die Casting", *American Foundrymen's Society Transactions*, vol. 74, pp. 245-256.
- [78] Maier, R.D., 1974, "Influence of liquid metal jet character on heat transfer during die casting". PhD thesis, Case Western Reserve University. Engineering, metallurgy.
- [79] Mao, H., 2004, "A numerical study of externally solidified products in the cold chamber die casting process", PhD thesis, The Ohio State University, Ohio, USA.
- [80] Minaie, B., Stelson, K. y Voller, V.R., 1991, Analysis and flow patterns and solidification phenomena in die casting processes. *J. Eng. Mech. Technol. ASME*, 113, 296-302.
- [81] Mosso, S.J., Swartz, B.K., Kothe, D.B. y Clancy, S.P., 1996, "Recent Enhancements of Volume Tracking Algorithm for Irregular Grids" (Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, LA-UR-96-277), presented at the Parallel CFD Conference, Capri, Italy, March 20-23.
- [82] Mosso, S.J., Swartz, B.K., Kothe, D.B. y Ferrell, R.C., 1996, "A Parallel, Volume-Tracking Algorithm for Unstructured Meshes", Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, LA-UR-96-2420.
- [83] Navti, S. E., Lewis, R.W. y Taylor, C., 1998, "Numerical Simulation of Viscous Free Surface Flow", *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, vol. 8, no. 4, pp. 445-464.
- [84] Niyama, E., Uchida, T., Morikawa, M., y Saito, S., 1982, "A Method of Shrinkage Prediction and Its Application to Steel Casting Practice", *International Cast Metals Journal*, vol. 7, no. 3, pp. 52-63.
- [85] Park, B. y Brevick, J.R., 1999, "Computer Flow Modeling of Cavity Pre-fill Effects in High Pressure Die Casting", *NADCA Transactions: World of Die Casting*, Cleveland, USA, paper T99-011.
- [86] Park, B. y Brevick, J.R., 2000, "Effect of cavity pre-fill patterns and air entrapment in cold chamber die casting", *NADCA Transactions: Die casting technology for the new century*, Rosemont (USA).
- [87] Park, J., Mobley, C.E. y Sahai, Y., 2002, "2-Dimensional Simulation of Metal Flow in Die Casting Shot Sleeves", *NADCA Transactions: Die Casting Toward The Future*, Rosemont, USA, paper T02-015, pp. 1-7.
- [88] Park, B. y Brevick, J.R., 2004, "Effect of Cavity Pre-Fill Patterns and Air Entrapment in Cold Chamber Die Casting", *Die Casting Technology for the New Century*, NADCA.
- [89] Peikert, F.W.J., 1964. Vent area as it affects evacuation of gas from a die cavity. Tesis de Master, Pennsylvania State University.

- [90] Pellini, W.S., 1953, "Factors With Determine Riser Adequacy and Feeding Range", *American Foundrymen's Society Transactions*, vol. 61, pp. 61-80.
- [91] Poirier, D.R., Yeum, K. y Maples, A.L., 1987, "A Thermodynamic Prediction for Microporosity Formation in Aluminum-Rich Al-Cu Alloys", *Metallurgical Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science*, vol. 18, no. 11, pp. 1979-1987.
- [92] Price, G.R., Reader, G.T., Rowe, R.D. y Bugg, J.D., 1998, "A Piecewise Parabolic Interface Calculations for volume Tracking", *Proceedings of the Sixth Annual Conference of the Computational Fluid/Dynamics Society of Canada*, University of Victoria, Victoria, British/Columbia.
- [93] Rappaz, M., 1989, "Modeling of Microstructure Formation in Solidification Processes", *International Materials Reviews*, vol. 34, pp. 93-124.
- [94] Rappaz, M., Gandin, Ch.-A., Desbiolles, J.-L. y Thévoz, Ph., 1996, "Prediction of Grain Structures in Various Solidification Processes", *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 27A, pp. 695-705.
- [95] Rearwin, E.W., 1960, "Gating of Aluminium Diecasting", *Foundry*, Noviembre, pp. 106.
- [96] Reikher, A., Barkhudarov, M., 2007, "Casting: An Analytical Approach", Springer, pp. 149-151
- [97] Righi, J.; LaCamera, A.F.; Jones, S.A., Truckner, W.G. y Rouns, T.N.; 1995, "Integration of experience and simulation based understanding in the die design process", *Congress and Exposition (The starting line for die casting innovation)*, NADCA Transactions, Indianapolis (USA), paper T95-023.
- [98] Sachs, B., 1952, "An Analytical Study of the Die Casting Process", PhD thesis, Columbia University.
- [99] Sant, F. y Backer, G., 1995, "Application of WRAFTS Fluid Flow Modeling Software to the Bench Mark Test Casting", *Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VII*, TMS, Cross, M. and Campbell, J., eds. Warrendale, PA, pp. 983-990.
- [100] Shapiro, A.H., 1954, *The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow*, The Ronald Press, New York.
- [101] Sivaramakrishnan, S., Thomas, B.G., Vanka, S.P., 2000, "Large Eddy Simulation of Turbulent Flow in Continuous Casting of Steel", *Materials Processing in the Computer Age III*, V. Voller y H. Henein, eds., TMS Annual Meeting, Nashville, TN, March 12-16, pp. 189-198.
- [102] Smith, W.E. y Wallace, J.F., 1963, "Gating of Die Castings", *AFS Transactions*, vol. 71, pp. 325-348.

- [103] Stefanescu D.M., 2005, "Computer simulation of shrinkage related defects in metal castings - a review", *International Journal of Cast Metals Research*, vol. 18, pp. 129-143.
- [104] Sturn, J.C., Scafer, W. y Sahm, P.R. (1988), "Modeling the Mold Filling and Solidification of a Steel Hammer Casting by the Use of the Computer Aided Solidification Technologies (CASTS) Software System", *Modeling of Casting and Welding Processes IV*, Eds. Giamei A.F. y Abbaschian G.J., pp. 845, The Minerals, Metals and Materials Society.
- [105] Syrcos, G. P., 2003, "Die Casting Process Optimization Using Taguchi Methods", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 135, no. 1, pp. 68-74.
- [106] Thome, M.C. y Brevick, J.R., 1993, "Modeling Fluid Flow in Horizontal Cold Chamber Die Casting Shot Sleeves", *American Foundrymen's Society Transactions*, 101, pp. 343-348.
- [107] Thome, M.C. y Brevick, J.R., 1995, "Optimal Slow Shot Velocity Profiles for Cold Chamber Die Casting", *Congress and Exposition (The starting line for die casting innovation)* NADCA Congress and Exposition, Indianapolis, paper T95-024.
- [108] Tszeng, T.C. y Chu, Y.L., 1994, "A Study of Wave Formation in Shot Sleeve of a Die Casting Machine", *ASME Journal of Engineering for Industry* vol. 116, no. 2, pp. 175-182.
- [109] Varaprasatham, S., 1966. Vent in Die Casting. Tesis de Master, Pennsylvania State University.
- [110] Van Tol, R. "Mould filling of horizontal thin-wall castings", 1999, PhD thesis, Technische Universiteit Te Delft (The Netherlands).
- [111] Veinik, A.I., 1962, *Theory of Special Casting Method*, ASME, New York.
- [112] Veinik, A.I., 1966, "Thermodynamic Factors in Metal Injection: Effect of Friction on Gas Content and Quality", *Transactions of the 4th SDCE International Die Casting Exposition & Congress*, Cleveland, Ohio, 103.
- [113] Vinarcik, E.J., 2003, *High Integrity Die Casting Processes*, John Wiley & Sons, INC, New York, pp. 53.
- [114] Wang, C.M., 1990, "Computer Modeling of Fluid Flow and Heat Transfer in Metal Castings", PhD Thesis, University of Pittsburg.
- [115] Wang, L., Nguyen, T. y Murray, M., 2001, "Simulation of Flow Pattern and Temperature Profile in the Shot Sleeve of a High Pressure Die Casting Process, *NADCA Transactions Die Casting in the 21st Century*, Cincinnati (USA), paper T01-014.

- [116] Xiong, S.M., Liu, B.C., Jia, L.R. y Wen, X.H., 2002, "Study on Numerical Simulation of Mold Filling and Solidification Processes Under Pressure Conditions", *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 18, no. 5, pp. 413-416.
- [117] Yan, H., Zhuang, W.W., Hu, Y., Zhang, Q.S. y Jin, H., 2007, "Numerical simulation of AZ91D alloy automobile plug in pressure die casting process", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 187, pp. 349-353.
- [118] Yuan, Q., Vanka, S.P. y Thomas, B.G., 2001, "Large Eddy Simulations of Turbulent Flow and Inclusion Transport in Continuous Casting of Steel", *Proceedings of 2nd International Symposium on Turbulent and Shear Flow Phenomena*, vol. 2, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, June 27-29, pp. 519-524.
- [119] Zamora, R., Faura, F., López, J. y Hernández, J., 2007, "Experimental Verification of Numerical Predictions for the Optimum Plunger Speed in the Slow-Phase of a High-Pressure Die Casting Machine", *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, vol. 33, pp. 266-276.
- [120] Zhou, J. X., Chen, L.L., Liao, D.M. y Liu, R.X., 2007, "High Pressure Diecasting Module of InteCAST Software and Its Applications", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 192-193, pp. 249-254.
- [121] Zhu, P. y Smith, R.W., 1992, "Dynamic Simulation of Crystal Growth by Monte Carlo Method II. Ingot Microstructures", *Acta Metallurgica*, 40, pp. 3369-3379.