

## **ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DEL ENSAYO DE FLUIDEZ EN ESPIRAL**

**Carlos Maldini<sup>†</sup>, Marcela Cruchaga<sup>†</sup>, Diego Celentano<sup>†</sup> y Oscar Bustos<sup>††</sup>**

<sup>†</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica

<sup>††</sup>Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Universidad de Santiago de Chile, Av. Bdo. O'Higgins 3363, Santiago de Chile.  
mcruchag@lauca.usach.cl

**Palabras clave:** Fluidéz en espiral, Solidificación, Plomo- Estaño, Mecánica Computacional.

**Resumen.** *En este trabajo se presenta un estudio experimental y numérico de la prueba de fluidéz en espiral usada en diversas fundiciones. Se diseñó una experiencia que permitió la observación del llenado del molde durante el proceso. Se presentan específicamente los resultados obtenidos para una aleación Pb-50Sn colada a la temperatura de 260°C. Se analiza numéricamente la experiencia realizada con la finalidad de evaluar la incidencia de algunos parámetros asociados al proceso de fundición propuesto. En particular se analiza la mecánica de fluidos con el seguimiento de la superficie interfaz metal-aire durante el proceso y la transferencia de calor asociada para modelos con y sin cambio de fase.*

## 1 INTRODUCCIÓN

Una característica apreciable para los materiales utilizados en los procesos de fundición es la habilidad del metal fundido a continuar fluyendo mientras éste continúa perdiendo temperatura y, aún, mientras ha comenzado la solidificación. En la terminología de la fundición, esta característica es conocida como “fluidez” y es un término empírico que indica una propiedad que define la capacidad del metal líquido para reproducir la forma de las cavidades del molde que lo contiene. Fluidez puede definirse entonces como la capacidad que tiene el metal líquido de escurrir a través de las paredes del molde, llenar todos los intersticios y reproducir exactamente los detalles del diseño. Ésta es una característica compleja referida al comportamiento del metal bajo condiciones específicas dentro del molde. Ha habido muchas investigaciones de esta propiedad<sup>1</sup>. En términos de fundición de aleaciones, la fluidez  $L_f$  se define como la máxima distancia con la cual el metal fluirá en un molde estándar<sup>1-2</sup>. Aunque la fluidez ha sido cuantificada consecuentemente como la máxima distancia con la cual el metal fluirá en un largo canal horizontal, este tipo de molde es inconvenientemente largo para usarse en una fundición y, además, los resultados son sensibles a ligeras inexactitudes en el aplanamiento del molde. Si el canal es enrollado en una espiral entonces el molde se torna más compacto y conveniente y, por lo tanto, menos sensitivo a errores de aplanamiento. Por esta razón se utilizan moldes en espiral. Entre los factores que influyen en la fluidez, la viscosidad es predominante. Casi universalmente, los objetos metálicos comerciales son solidificados desde una fase líquida a sus formas finales, llamadas fundiciones o bien en formas intermedias llamadas lingotes, las cuales se transforman mediante trabajo u otra fundición a sus formas finales<sup>3</sup>. El llenado de moldes es de máxima importancia en el proceso de fundición. Este proceso involucra problemas de mecánica de fluidos con transferencia de calor y, en particular, la predicción de la superficie interfaz móvil metal-aire. Dada la complejidad del problema se recurre al uso de herramientas computacionales para su análisis.

En este trabajo se presentan los resultados de una experiencia de moldeo realizada con la finalidad de observar el seguimiento del frente metal-aire durante el llenado de una espiral. Se presenta además una simulación del proceso basada en datos obtenidos de la experiencia con el objeto de validar la metodología utilizada en el análisis y, a su vez, de verificar la evolución de temperaturas. En particular se mostrarán los resultados del ensayo de fluidez en espiral para la aleación Plomo-Estano (Pb-50Sn), colada a la temperatura de 260° C, donde se filmó la colada para tener información sobre el llenado del molde. Para la simulación del llenado mencionado se utilizará un modelo basado en las ecuaciones diferenciales de continuidad, cantidad de movimiento y energía<sup>4,5</sup>, para cuya solución numérica se adopta, en el marco del método de elementos finitos, la metodología descrita en [6-8]. La metodología propuesta en este trabajo para el tratamiento de la superficie interfaz es diferente a la utilizada en [6]. Para el seguimiento del frente material se utiliza una formulación de malla fija. La interfaz se identifica con una función escalón de representación nodal<sup>10</sup>. La metodología adoptada para el seguimiento del frente material se basa en algoritmos extensamente utilizados en otros métodos numéricos en los cuales se propusieran mejoras para una descripción más precisa de la discontinuidad abrupta que representa el frente material.

## 2 ENSAYO EXPERIMENTAL

El ensayo de fluidez en espiral se realizó en las dependencias del Laboratorio de Fundición del Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Santiago de Chile. Se utilizaron básicamente dos moldes de arena contruidos de acuerdo con [1]. Un molde corresponde a la base en donde se encuentra la cavidad que se llena con forma de espiral y el otro es la tapa la cual tiene un embudo o jitio. Con la finalidad de observar el proceso de llenado de la espiral se diseñó un molde con una tapa de vidrio templado y un jitio de arena con forma de embudo en la parte superior. Para dichos ensayos se utilizó la aleación Plomo-Estaño por su bajo punto de fusión de 183 °C.

El llenado del molde se filma con la finalidad de obtener la posición del frente material en el tiempo. En la Tabla 1 se presentan los tiempos (relativos a la primera imagen registrada) y distancias totales (medidas desde el centro del jitio) correspondientes a la secuencia de imágenes extraídas del video del llenado del ensayo mencionado. Dicha secuencia fotográfica se muestra en la Figura 1. Las distancias de avance del frente material en el tiempo fueron obtenidas a través de mediciones hechas posteriormente a las imágenes. El tiempo se estima por un programa editor del vídeo digital original.

Tabla 1: Distancias totales y tiempos totales del llenado de la espiral.

Imagen Número	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tiempo relativo [s]	0	0.1	0.23	0.37	0.47	0.6	0.7	0.83	0.97
Distancia total [cm.]	11,0	16,5	22,6	29,8	34,0	37,0	38,0	40,5	41,5

## 3 MODELACIÓN NUMÉRICA

La formulación numérica adoptada para la descripción acoplada de la mecánica de fluidos con la transferencia de calor con y sin cambio de fase corresponde a un modelo acoplado de malla fija<sup>6-8</sup>. Se han despreciado los efectos térmicos en la ecuación de cantidad de movimiento, por lo cual se consideraron propiedades constantes con la temperatura y no se incluyó el efecto de convección natural en el proceso estudiado. En este contexto, la viscosidad de la zona pastosa se considera constante en este trabajo (un tratamiento que interpreta más adecuadamente el crecimiento equiaxial de los núcleos de solidificación que se producen en esta zona consiste en adoptar una viscosidad variable con la fracción sólida<sup>7,8</sup>). También, se supuso nulo el calor disipado por trabajo mecánico. Por otro lado, la descripción de la posición de la superficie libre del metal se realiza mediante una técnica nodal mejorada<sup>9</sup> de la familia de metodologías conocidas como “pseudoconcentración” o “level set methods”. La técnica propuesta incorpora una corrección para la conservación global de la masa y una técnica de integración mejorada que permite definir las propiedades de ambos medios mediante una distribución tipo escalón o Heaviside. La difusión numérica generalmente presente en la solución de este tipo de formulaciones (por utilizar una ecuación de

convección pura para determinar la posición de la interfaz) se controla por la metodología de proyección de la interfaz (representada por una función Heaviside o escalón en el frente material) a su representación nodal<sup>9</sup>.

En el presente apartado se presenta la simulación del proceso de llenado de un molde en espiral del ensayo de fluidez para la aleación Pb-50Sn con una temperatura de colada de 260°C. Para los análisis numéricos se admite conocida la velocidad de ingreso para lo cual se impone una velocidad en la entrada de acuerdo a la velocidad de avance del frente deducida de la gráfica experimental de la posición del frente material versus tiempo tal como se muestra en la Figura 2. Las propiedades utilizadas para la simulación se muestran en la Tabla 2. En las paredes de la espiral se adoptó la condición de no-deslizamiento. Para evaluar la transferencia de calor entre la espiral y el molde se consideró un coeficiente de convección cuya distribución varía en el tiempo de acuerdo al material que contacta con las paredes del molde. Los coeficientes utilizados se identifican en la tabla de propiedades y corresponden a valores utilizados en otros trabajos de validación con la experiencia<sup>8</sup>. Sin embargo, dichos coeficientes se adoptaron en este trabajo como una aproximación de los existentes en la configuración analizada. En este trabajo se realiza el análisis para dos situaciones de transferencia de calor diferentes. En el primer estudio (Caso 1) no se incluyen efectos de cambio de fase ( $L=0$ ). En el segundo análisis (Caso 2), se incluye los efectos de cambio de fase no isotérmico de acuerdo a las propiedades de la mencionada Tabla 2. El acoplamiento entre las ecuaciones de la mecánica de fluidos y la ecuación de energía se da únicamente a través del término de convección de la temperatura.

### 3.1 CASO 1 (SIN CAMBIO DE FASE):

En la Figura 3 se presentan las temperaturas obtenidas para distintos tiempos de llenado. La temperatura del metal al ingreso es de 260°C y la del fluido residente (aire) es de 25°C. A medida que avanza el frente material, se produce un frente térmico que hace que aumente la temperatura del canal. Es interesante apreciar que, dado que el llenado es rápido, la temperatura del metal líquido no alcanza a descender apreciablemente antes de que el frente material pare.

En la Figura 4 se superponen tres isotermas al frente material para distintos tiempos de llenado. Las isotermas presentadas corresponden a la temperatura liquidus ( $T_L$ ), en donde la aleación comienza a solidificarse, la temperatura solidus ( $T_S$ ), en donde la aleación se solidifica completamente, y la temperatura de 245°C, que es la temperatura promedio entre la temperatura de colada y la liquidus. En dicha figura puede observarse que la temperatura correspondiente al valor solidus se encuentra siempre por detrás del frente material aleación-aire. Este resultado implica que la zona del frente está solidificada, hecho que no ha sido observado experimentalmente. Esta predicción puede deberse a que en este análisis no se ha incluido el efecto de cambio de fase. La cuantificación del efecto del calor latente se presenta en el apartado siguiente (Caso 2). Por otro lado, puede observarse que el aire alejado del frente no modifica su temperatura durante el proceso debido a su mayor inercia térmica y a la rapidez del llenado.

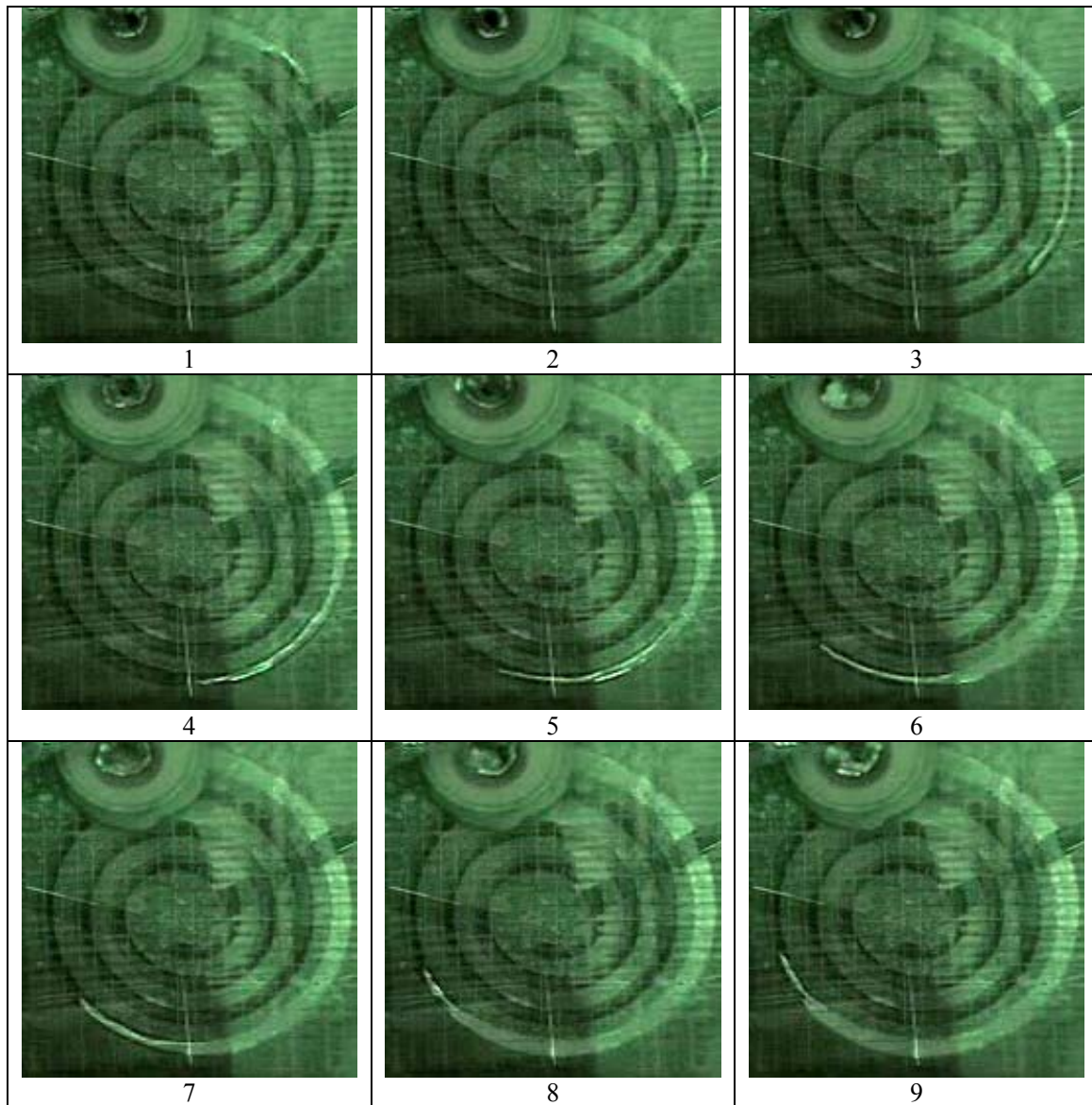


Figura 1: Secuencia de llenado espiral, Pb-50Sn  $T_C=260^\circ\text{C}$ .

### 3.2. CASO 2 (CON CAMBIO DE FASE):

En la Figura 5 se presentan las temperaturas obtenidas en la simulación con cambio de fase. Los resultados presentan una diferencia significativa en la predicción de las temperaturas respecto al caso anterior (Caso 1, sin cambio de fase). Para cada tiempo de llenado, se aprecia un mayor espaciamiento de las isotermas entre el intervalo liquidus-solidus ( $183^\circ\text{C} - 214^\circ\text{C}$ ). Este comportamiento también se evidencia en la Figura 6 donde se muestra el frente y esas dos isotermas. Para todos los tiempos de llenado, la zona determinada por las isotermas

liquidus-solidus es significativamente más grande que en el caso anterior donde no se considera la energía de cambio de fase. Además, el frente material se encuentra para todos los tiempos de llenado entre dichas isoterma. Esta predicción se aproxima a lo observado en los experimentos, donde el frente se mantiene en estado pastoso hasta el momento en que detiene su avance por la solidificación del material. Esto corrobora el cálculo de la transferencia de calor obtenida conjuntamente con la mecánica de fluidos y la predicción de la superficie de interfaz.

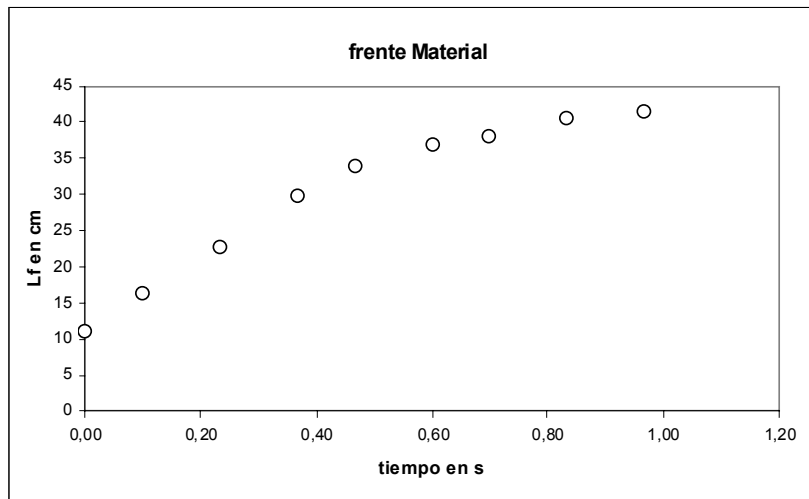


Figura 2: Evolución del avance del frente espiral, Pb-50Sn  $T_c=260^\circ$ .

Tabla 2: Propiedades utilizadas en la simulación.

	T (°C) aleación	T(°C) aire	$\rho$ (Kg./m <sup>3</sup> ) aleación	$\rho$ (Kg./m <sup>3</sup> ) Aire	$\mu$ (Kg./m*s) aleación	$\mu$ (Kg./m*s) aire
Pb-50Sn	260	25	9200	1	3	0.003

Tabla 2 (continuación): Propiedades utilizadas en la simulación.

	C (J/kg*K) Aleación	C (J/kg*K) aire	k (W/m*K) aleación	k (W/m*K) aire	L (W/m) Aleación	h (W/m <sup>2</sup> *K) aire	H (W/m <sup>2</sup> *K) Aleación
Pb-50Sn	330	1000	230	0.025	50000	100	1000

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un análisis experimental del ensayo de fluidez en espiral. La experiencia ha permitido conocer la evolución del proceso de llenado. Se presentó, además, la

simulación numérica de dicho proceso bajo dos condiciones de transferencia de calor. La solución obtenida con efectos de cambio de fase presenta un comportamiento adecuado. La temperatura solidus se encuentra un poco adelante del frente material y la liquidus detrás de éste, lo que describe en forma adecuada el comportamiento físico observado experimentalmente ya que el frente material, para desplazarse, no debe haberse solidificado. Sin embargo, el modelo no incluye el efecto sobre la velocidad de desplazamiento del frente material en función del estado del mismo. Sobre estos aspectos se deberá seguir trabajando en futuras investigaciones.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CONICYT ya que en el marco del Proyecto Fondecyt 1020029 se ha realizado este trabajo.

### 5. REFERENCIAS

- [1] Campbell J., *Castings*, Oxford -Butterworth Heinemann (1991).
- [2] Flemings M., *Solidification Processing*, New York, Mc Graw-Hill, Series in Materials Science and Engineering (1979).
- [3] Callister W., *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Barcelona, Editorial Reverté, S.A. (1997).
- [4] Malvern L.E., *Introduction to the mechanics of a continuous medium*, USA, Prentice-Hall, Inc (1969).
- [5] Mase T., *Continuum Mechanics for Engineers*, 2<sup>a</sup> ed., New York CRC Press (1999).
- [6] Cruchaga M., Celentano D., “Numerical Analysis of Thermally Coupled Flow Problems with Interfaces and Phase-change Effects”, *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, **16**(4), 247-262 (2002).
- [7] Cruchaga M., Celentano D., “A fixed mesh finite element thermally coupled formulation for the numerical analysis of melting processes”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **51**, 1231-1258 (2001).
- [8] Marcela Cruchaga, Diego Celentano and Roland Lewis: “Modelling fluid-solid interactions in casting processes”, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, **14** (2), 167-186 (2004).
- [9] Cruchaga M., Celentano D., Tezduyar T., “Numerical Simulation of Moving Interface Problems Using the ETILT Method”, Proceedings of VII US. National Congress on Computational Mechanics, Albuquerque –USA (2003).

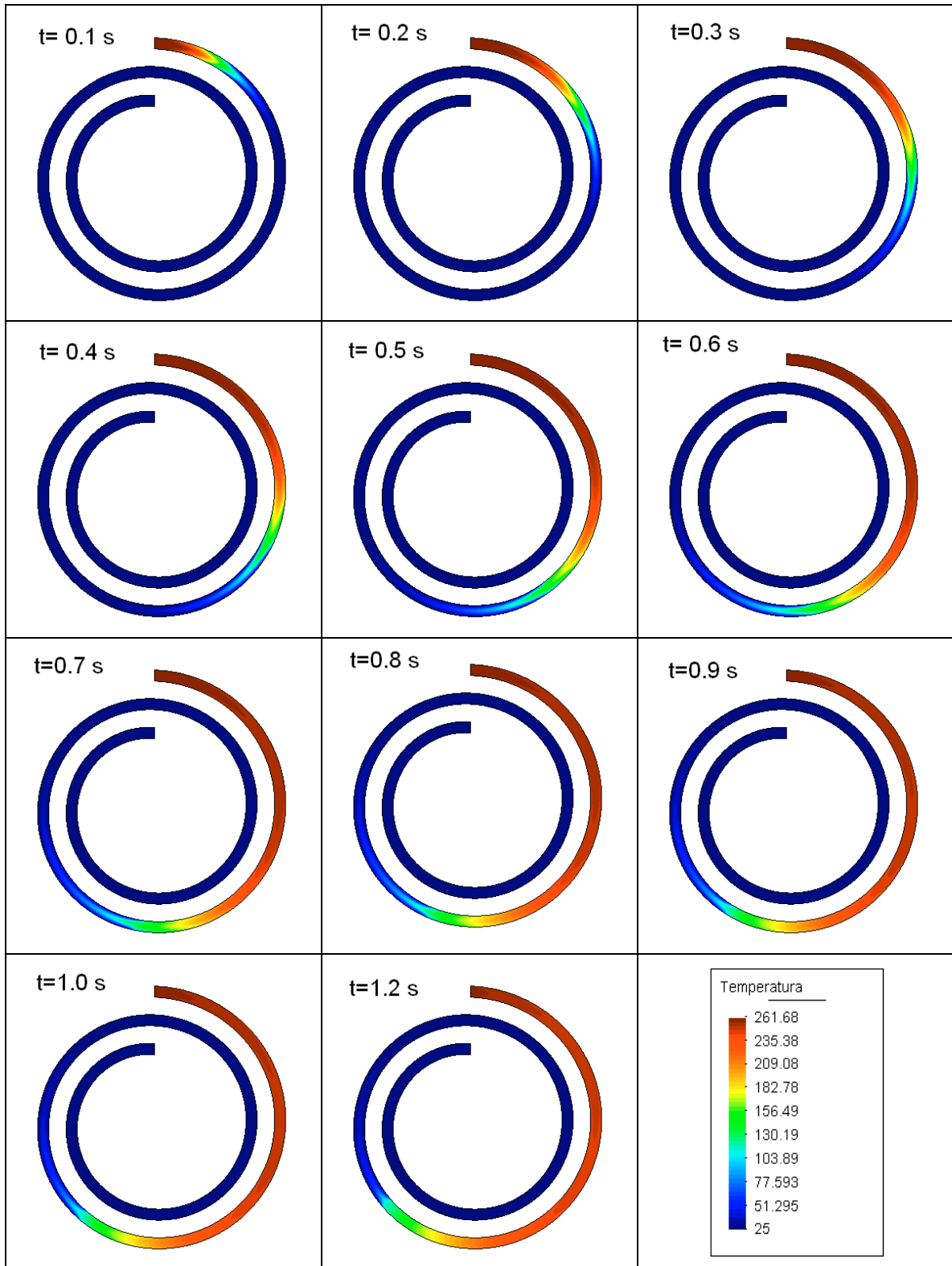


Figura 3: Variación en el tiempo de la temperatura para varios tiempos de llenado, Caso I.



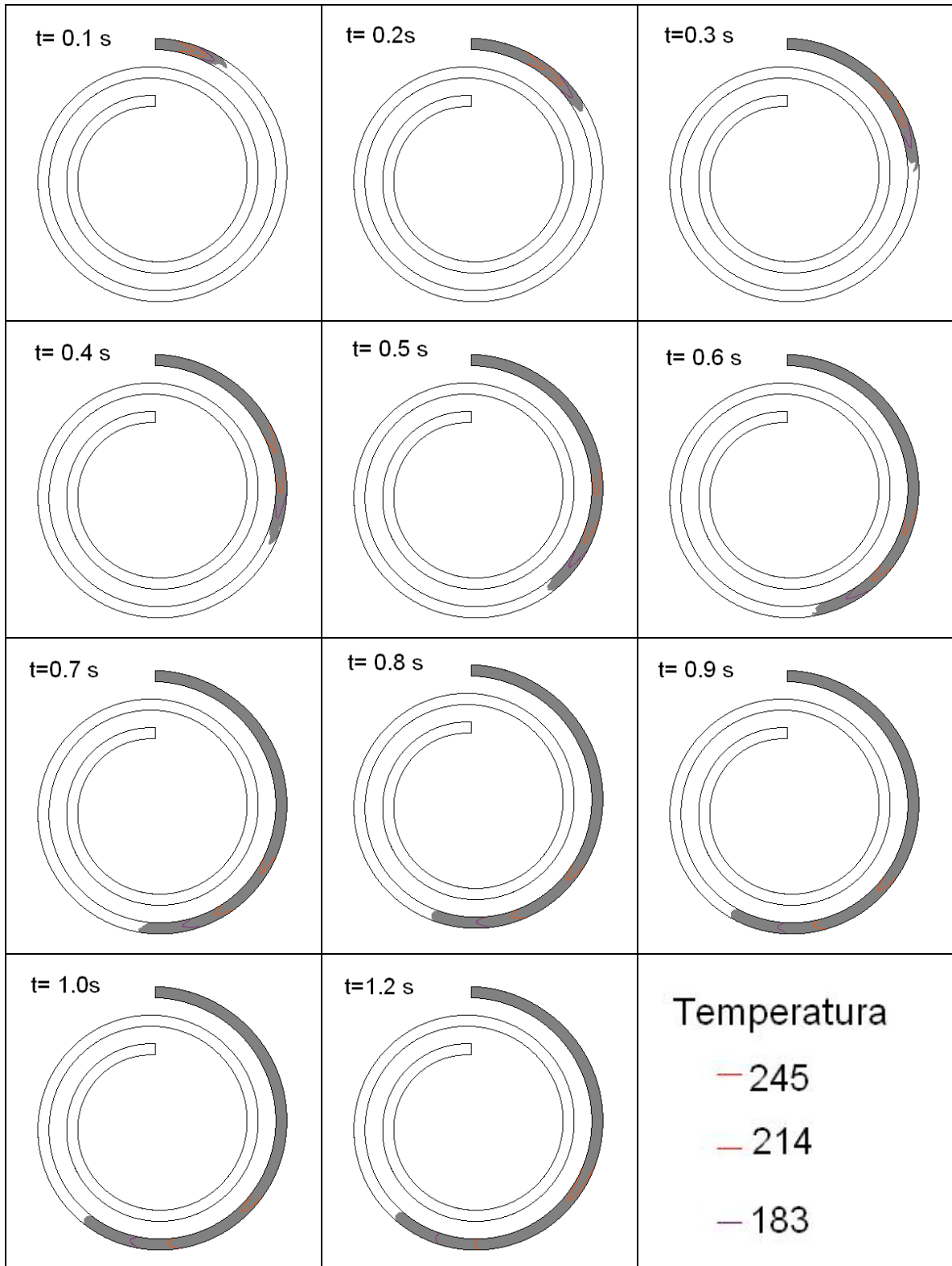


Figura 4: Frente material con las temperaturas solidus, liquidus y 245°C, Caso1.

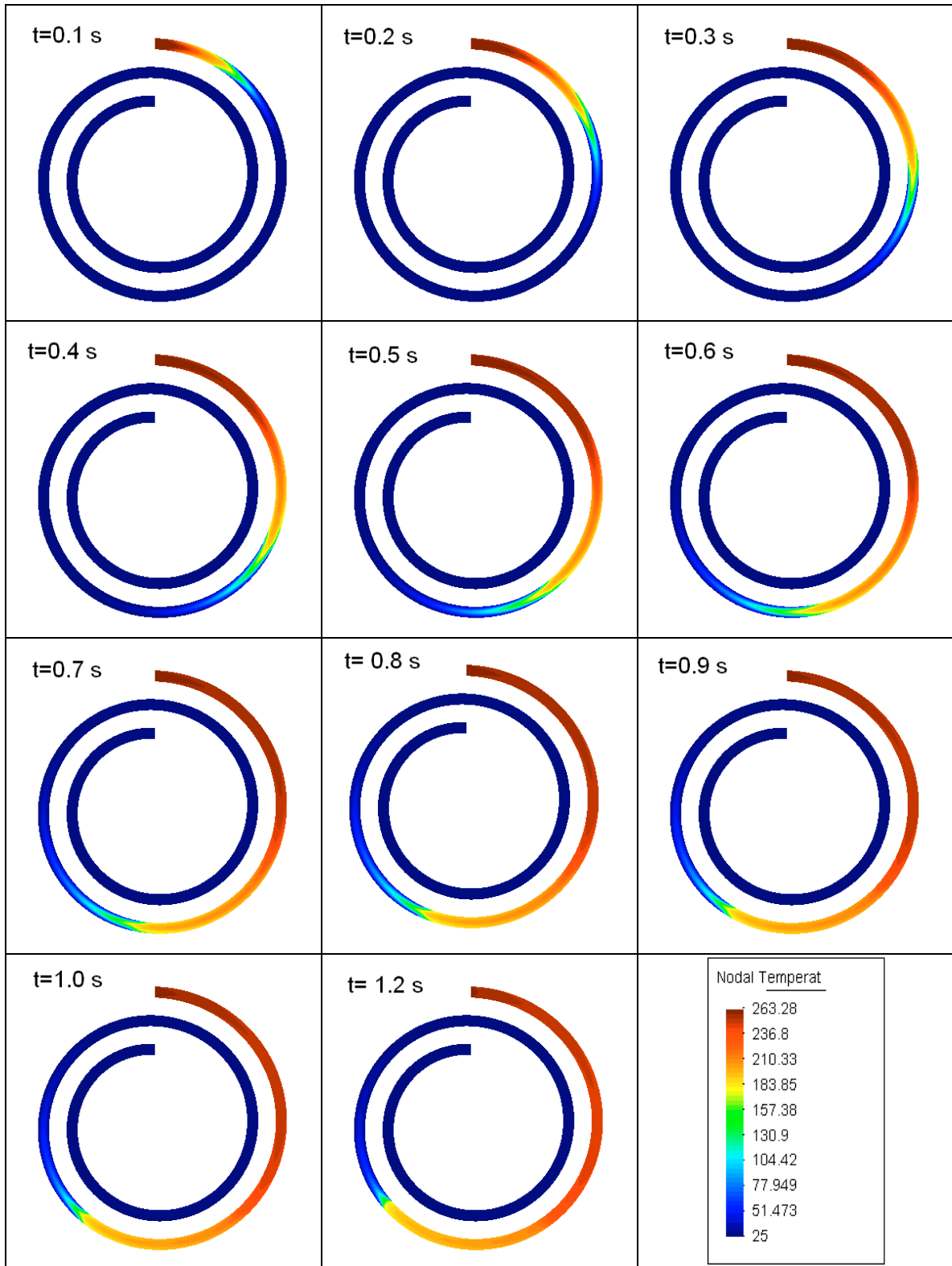


Figura 5: Variación en el tiempo de la temperatura para varios tiempos de llenado, Caso2.

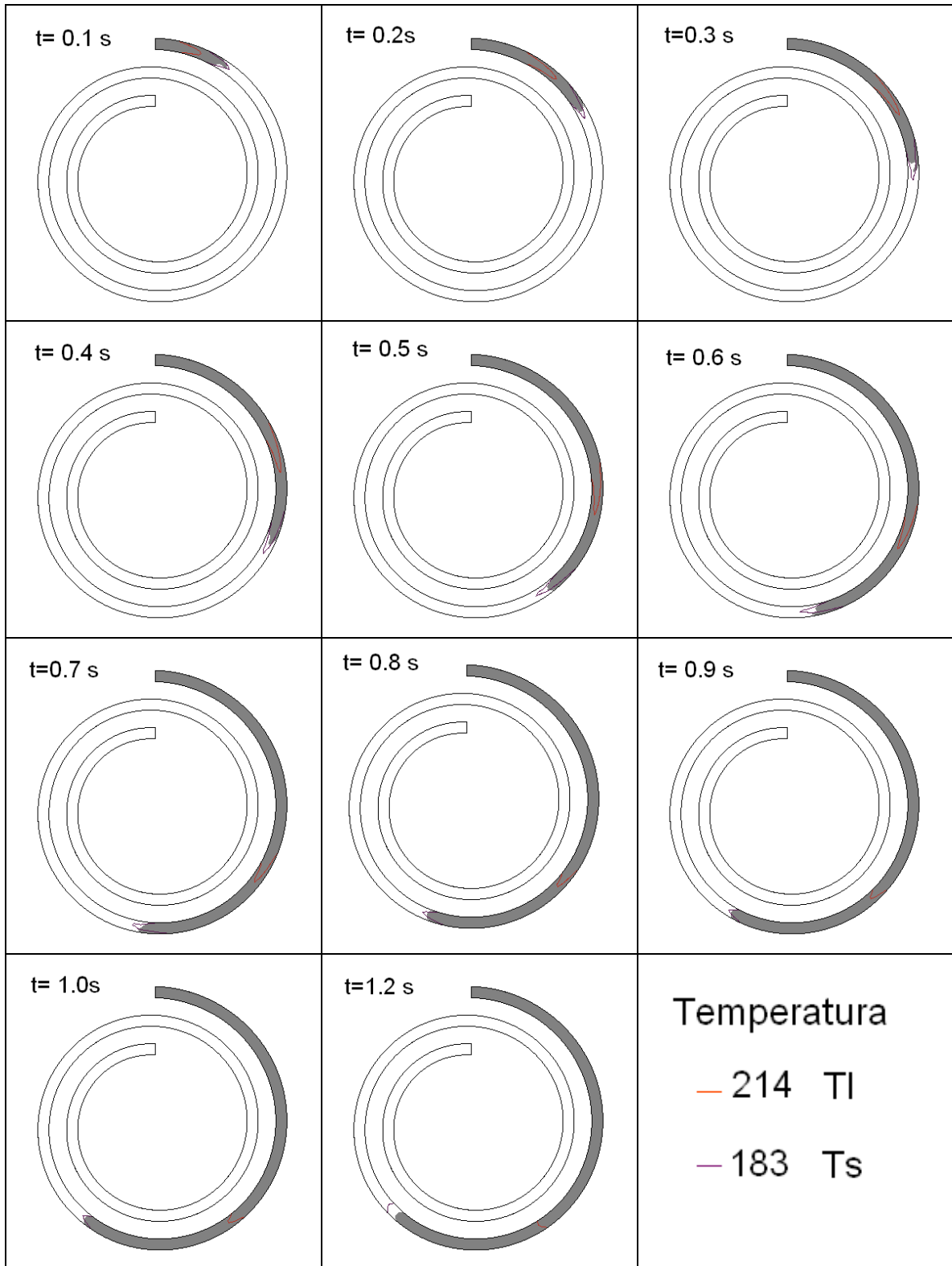


Figura 6: Frente material y temperaturas solidus y liquidus, Caso2.