

Título Análisis y simulación del modelo térmico y viscoso del proceso de melt spinning

Tipo de Producto Ponencia completa

Autores Marcelo Barone, Francisco Barceló, Jairo Useche, Axel Larreteguy, Marcelo Pagnola

Publicado en: XI Congreso Colombiano de Métodos Numéricos, UIS Bucaramanga, Colombia

Código del Proyecto y Título del Proyecto

A17T03 - Fluidodinámica Computacional – Simulación y Experimentos

Responsable del Proyecto

Axel Larreteguy

Línea

Fluidodinámica Computacional (CFD)

Área Temática

Modelado y Simulación (MyS)

Fecha

Agosto 2017

ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL MODELO TÉRMICO Y VISCOSO DEL PROCESO DE MELT SPINNING

Marcelo Barone^{1, 2*}, Francisco Barceló³, Jairo Useche⁴, Axel Larreteguy³, Marcelo Pagnola¹

¹INTECIN (UBA-CONICET)
Facultad de Ingeniería
Universidad de Buenos Aires
Av. Paseo Colón 850 (C1063ACV) Buenos Aires, Argentina
e-mail: marcelo.barone@conicet.gov.ar - mpagnola@fi.uba.ar, web: <http://intecin.fi.uba.ar>

²Departamento de Ingeniería Mecánica y Departamento de Ingeniería Ferroviaria
Facultad Regional Haedo
Universidad Tecnológica Nacional
Paris 532 (1706) Haedo, Buenos Aires, Argentina.
web: <http://frh.utn.edu.ar/>

³Laboratorio de Modelado y Simulación
Instituto de Tecnología - INTEC
Universidad Argentina de la Empresa - UADE
Lima 775 (C1073AAO) Buenos Aires, Argentina
e-mail: lbarcelo@uade.edu.ar - alarreteguy@uade.edu.ar, web: <http://uade.edu.ar>

⁴Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Facultad de Ingeniería
Universidad Tecnológica de Bolívar
Km 1 vía Turbaco, 130011 Cartagena, Colombia.
e-mail: juseche@unitecnologica.edu.co, web: <http://unitecnologica.edu.co/>

RESUMEN

El proceso de Melt Spinning es utilizado para la fabricación de cintas delgadas de materiales amorfos. El material se inyecta a través de una boquilla en estado líquido y se solidifica al entrar en contacto con una rueda rotante. En este trabajo se pretende encontrar mediante simulación computacional realizada con OpenFOAM[®] un perfil térmico del material desde su eyección por la boquilla hasta la conformación de la cinta propiamente dicha. Se utiliza un modelo de dos fases del tipo "Volume of Fluids" (VOF). A pesar de que ninguno de los dos fluidos (metal fundido y aire) puede considerarse compresible para las presiones de trabajo se utiliza un resolvidor de naturaleza compresible. Esto permite representar los cambios de densidad en el aire por cambios de temperatura y definir un modelo termo-físico para la aleación, no disponible en resolvidores de naturaleza incompresible. Para esto, se considera una aleación de conductividad térmica, calor específico y densidad constantes. El cambio de fase es representado por un modelo que relaciona viscosidad (μ) con temperatura (T) en el cual la viscosidad crece varios órdenes de magnitud cuando el material pasa por debajo de la temperatura de cristalización. Entre las opciones de modelos viscosos que ofrece OpenFOAM[®], se selecciona un modelo polinómico cuyos coeficientes fueron determinados luego de expandir la relación $\mu = -a(T - T^*)^7 + \mu^*$.

Utilizando OCTAVE se modificaron los valores del coeficiente a , T^* y μ^* hasta lograr una curva de ajuste [1] con la expansión de la función para obtener los coeficientes finales del polinomio dentro del rango de temperaturas de 600 a 1700 °C.

Palabras Clave: Melt Spinning, OpenFOAM[®].

Objetivo:

El objetivo del presente trabajo es la simulación del proceso de Melt Spinning incluyendo un modelo térmico y uno viscoso con OpenFOAM[®], ya que en trabajos anteriores [2] se realizó y simuló el modelo para dos fases, pero considerando la aleación en estado líquido para todo el proceso. Como continuidad del anterior trabajo se presenta este nuevo desarrollo que permite estudiar en más detalle las zonas donde se producen los cambios de fase (líquido/sólido) en el fluido cuyo cambio en la viscosidad se ha modelado.

Introducción:

El proceso de Melt Spinning obtuvo gran difusión para la producción de materiales amorfos desde los años '80. Estos materiales, obtenidos en forma de cintas de pequeños espesores poseen capacidades magnéticas incrementadas [3]. Utilizando aleaciones amorfas, entre ellas las de $Fe_{78}B_{13}Si_9$ (%at) para núcleos de transformadores eléctricos se logra disminuir las pérdidas en vacío hasta un 80 % [3; 4] en comparación con las de los núcleos construidos con chapas de $FeSi$ de grano orientado, utilizadas normalmente en estos dispositivos.

El proceso de melt spinning consiste en la conformación de una lámina (de aleación metálica) de fino espesor sobre una superficie. En este proceso, un chorro (jet) de metal líquido es expulsado por sobrepresión de un gas inerte a través de una boquilla para luego impactar sobre la superficie de una rueda de cobre giratoria (ver *Tabla 1*) para, de esta manera, formar una capa delgada de material fundido que solidifica rápidamente como una cinta continua que luego es colectada. De acuerdo a la distancia que existe entre la boquilla y la rueda giratoria (Gap), se determinan los procesos de: Chill block melt spinning (*CBMS*) y planar flow casting (*PFC*) [5]. En el *CBMS*, el jet de metal líquido es expulsado a través de una boquilla con un Gap >1 mm. En el *PFC*, en cambio, el Gap es inferior a 1 mm.

Metodología para la obtención del producto

Partiendo de la aleación estipulada se genera un lingote de aleación madre de $Fe_{78}B_{13}Si_9$ (%at), obtenida a partir de ferroaleaciones comerciales [6]. Luego el lingote es triturado en partículas de un tamaño medio de aproximadamente 5 mm, y estas se introducen posteriormente en el interior de un tubo de cuarzo de 10 mm de diámetro y 1,5 mm de espesor que funciona como crisol para el proceso de obtención de la cinta. El tubo de cuarzo posee en su parte inferior una boquilla de Nitruro de Boro con un orificio de Diámetro (Z) de 0,7 mm en su centro, por donde luego de calentada por encima de la temperatura de fusión, se eyecta la aleación en estado líquido.

Velocidad Rueda Vx [m/s]	Gap [mm]	Presión de eyección [mbar]	Orificio boquilla Z [mm]
30	3	2 ± 0,3	0,7

Tabla 1: Parámetros del proceso productivo

El crisol se posiciona con un Gap constante en la configuración tipo *CBMS* de acuerdo a *Tabla 1*, y con una bobina de cobre refrigerado por agua conectada a un horno de inducción se calienta la aleación sobre el punto de fusión (~1300 °C). En estas condiciones, mediante la aplicación de argón a sobrepresión se expulsa el material fundido a través de la boquilla. La velocidad de eyección alcanzada sobre la boquilla, permite la formación de una fina cinta sobre la rueda giratoria. De esta manera, el material producido posee estructura amorfa debido a la tasa de enfriamiento involucrada (~10⁶ K/s) [1; 7] en el proceso.

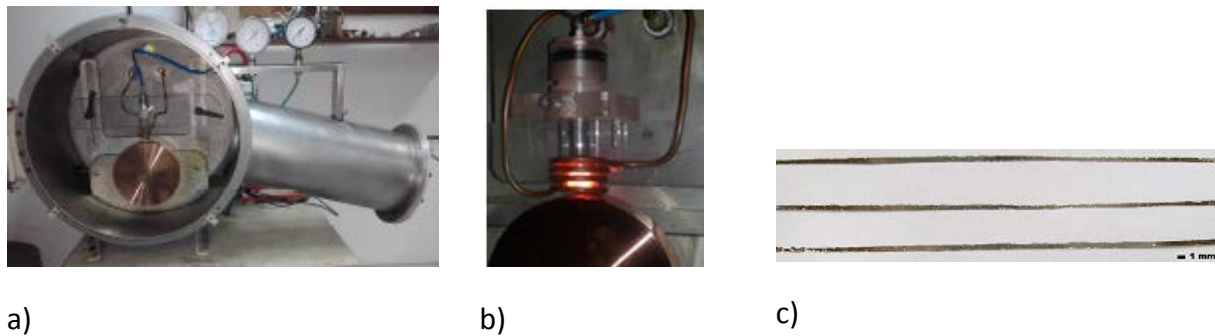


Figura 1: 1a) Equipo para producción de Melt Spinning. 1b) Detalle del sistema crisol – rueda.
 1c) Cintas obtenidas: Ancho 1,4 mm - Espesor promedio 49 μm .

Determinación de la viscosidad en el proceso

La relación entre la viscosidad del metal en función de la temperatura durante el cambio de fase se puede estimar según la expresión de Vogel-Fulcher-Tammann de acuerdo a lo reportado por Wang [7]. En nuestro caso, siguiendo el trabajo de Sowjanya et. al [8] se considera que para valores de viscosidades mayores a $10^{14} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ la aleación metálica utilizada en el proceso estará completamente en estado sólido. Estudiando entonces el cambio de la temperatura en nuestro perfil de eyección, y considerando la dependencia funcional de la viscosidad con la temperatura, se podrá inferir la región en la que sucede el cambio de estado líquido a sólido. La **Tabla 2** muestra la dependencia entre la viscosidad y la temperatura según el modelo de Vogel-Fulcher-Tammann.

Temperatura		Viscosidad - μ kg/m s
[°C]	[K]	
1400	1673	1,69E-02
1350	1623	2,39E-02
1300	1573	3,53E-02
1250	1523	5,51E-02
1200	1473	9,22E-02
1150	1423	1,68E-01
1100	1373	3,41E-01
1050	1323	7,96E-01
1000	1273	2,24E+00
950	1223	8,14E+00
887	1160	7,07E+01
655	928	3,81E+14

Tabla 2: Viscosidad en función de la temperatura de acuerdo a expresión Vogel-Fulcher-Tammann [7].

Obtención del Modelo:

Se utiliza un modelo de dos fases del tipo “Volume of Fluids” (VOF) incluido en el paquete OpenFOAM[®]. A pesar de que ninguno de los dos fluidos (metal fundido y aire) puede considerarse compresible para las presiones de trabajo, se utiliza un resolvidor de naturaleza compresible. Esto permite representar los cambios de densidad en el aire por cambios de temperatura y definir un modelo termo-físico para la aleación, no disponible en resolvidores de naturaleza incompresible incluidos en el paquete OpenFOAM[®].

Se considera una aleación de conductividad térmica $3.8444 \frac{W}{m K}$, calor específico $440 \frac{J}{kg K}$ y densidad $7874 \frac{Kg}{m^3}$ constantes. Entre las opciones de modelos viscosos que ofrece OpenFOAM[®], se selecciona un modelo polinómico cuyos coeficientes fueron determinados luego de expandir la siguiente relación:

$$\mu = -a(T - T^*)^7 + \mu^*$$

Utilizando rutinas OCTAVE se modificaron los valores del coeficiente a , la temperatura de referencia T^* y la viscosidad de referencia μ^* buscando un polinomio de grado 7 que ajustase los valores de la **Tabla 2** dentro del rango de temperaturas de 655°C a 1400°C.

Los coeficientes obtenidos se muestran en la **Tabla 3**. El polinomio se muestra en la figura 2.

c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7
2.684355×10^5	-1.174405×10^3	2.202010	-2.29376×10^{-3}	1.4336×10^{-6}	-5.376×10^{-10}	1.12×10^{-13}	-10^{-17}

Tabla 3: Coeficientes del polinomio obtenido. C_0 refiere al término independiente y C_7 al coeficiente de grado 7

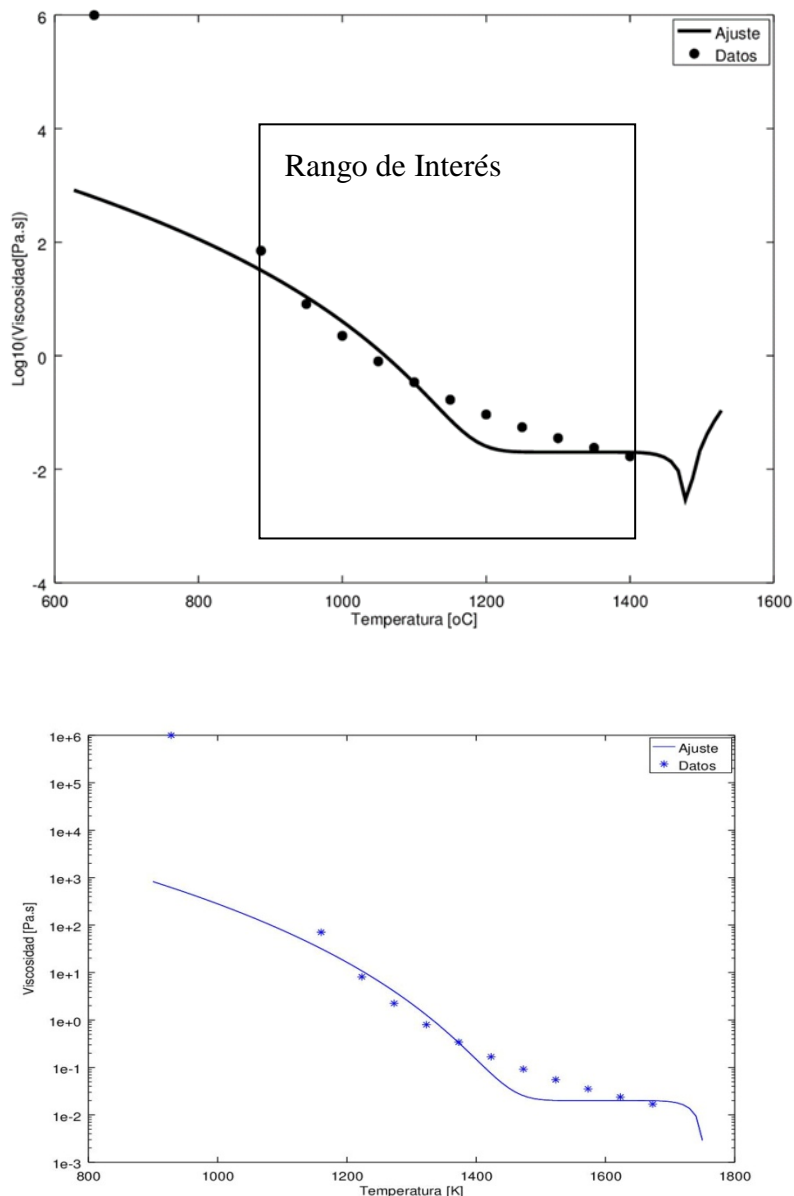


Figura 2 – Polinomio ajustado a los datos obtenidos a partir de la expresión Vogel-Fulcher-Tammann.

El polinomio obtenido muestra concordancia con los valores de la **Tabla 2** en el rango de 870°C a 1400°C. A fines de la simulación numérica no se considera necesario alcanzar valores de viscosidad de orden 10^{14} y se opta por considerar el material como sólido para viscosidades cercanas a 10^3 por lo que se desestima en la curva de ajuste el valor de viscosidad correspondiente a 655°C. Desestimando dicho punto y evaluando el error de cada punto con el polinomio obtenido se determinan los errores en normas L_1 , L_2 y L_∞ expuestos en la **Figura 3**. Los errores son similares en las 3 normas lo que demuestra que no existen “outliers” (valores demasiado alejados de la curva). La **Figura 3** muestra el perfil del error en cada zona. Se puede ver que en el rango que va entre 900°C y 1000°C se sobreestima la viscosidad mientras que en el rango de 1000°C a 1350°C es subestimada.

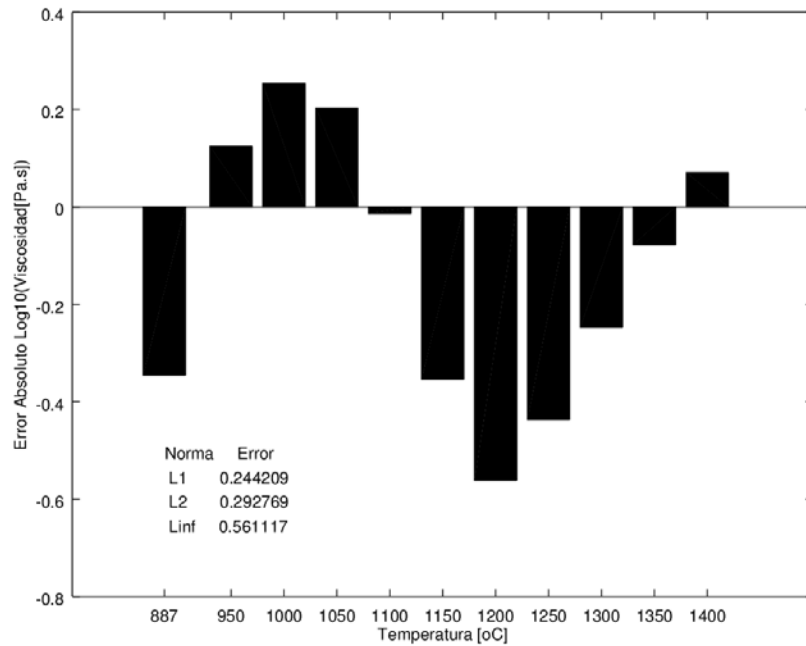


Figura 3–Errores absolutos entre los logaritmos decimales de la viscosidad de la **Tabla 2** y los obtenidos con el polinomio propuesto evaluado en esas temperaturas. Se indican además las normas L_1 , L_2 y L_∞ del error.

Resultados de la simulación:

En la **Figura 4** se observa el cambio de la temperatura en el perfil de cinta conformado. La zona de mayor interés se encuentra en las isothermas próximas a los 900 °C ya que es donde se produce la solidificación de las partículas de fluido. La viscosidad observada en la **Figura 5** queda determinada por el modelo matemático propuesto (la dirección horizontal del gráfico está comprimida en un factor 5 para favorecer la visualización de temperaturas y viscosidades).

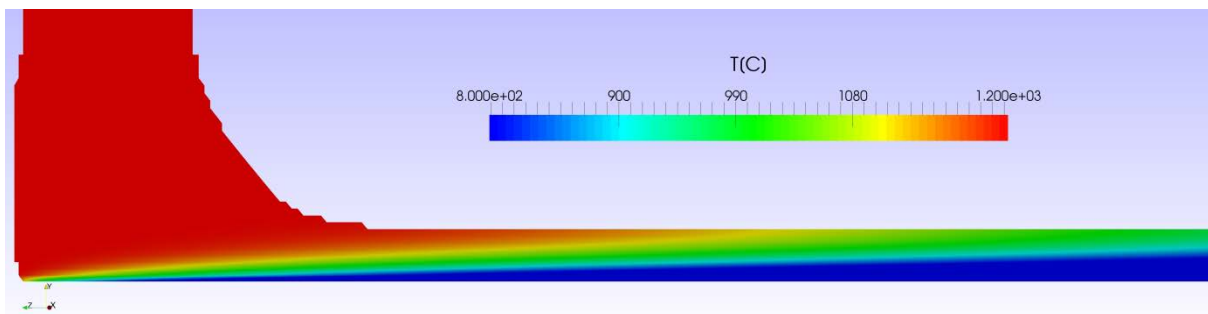


Figura 4 – Representación del perfil de temperaturas en el proceso de Melt Spinning para un espesor de cinta obtenido de 40 μm .

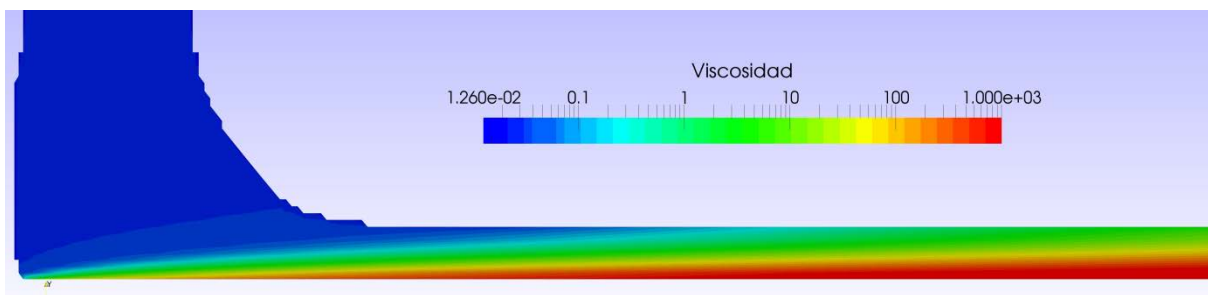


Figura 5 – Representación del perfil de viscosidades en el proceso de Melt Spinning para un espesor de cinta obtenido de 40 μm .

Discusión:

Observando los valores de viscosidad que se visualizan en la **Figura 5** se aprecia una zona de cambio de fase para temperaturas cercanas a los 950 °C, que de acuerdo con el modelo matemático propuesto es aproximadamente $82 \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$, valor similar a lo reportado en la bibliografía [7; 9] para el cual la aleación en estado líquido cambia de fase. El polinomio propuesto presenta errores respecto al modelo de *Vogel-Fulcher-Tammann* en el rango de 887°C a 1400°C y se aleja considerablemente del modelo o entrega valores irreales de viscosidad fuera de ese rango. Tanto los errores en el rango como fuera de él podrían ser eliminados si se introdujese en el resolvidor directamente la ecuación propuesta por *Vogel-Fulcher-Tammann*. Esto será tratado en un futuro trabajo, en el cual, mediante modificación del código fuente del resolvidor, se introducirá el modelo completo. No obstante a ello, y de acuerdo al perfil de temperaturas obtenido por Wang et. al [7] y M. Bussmann et. al [9] que se observa en la **Figura 6** se pueden ver similitudes con la **Figura 4**.

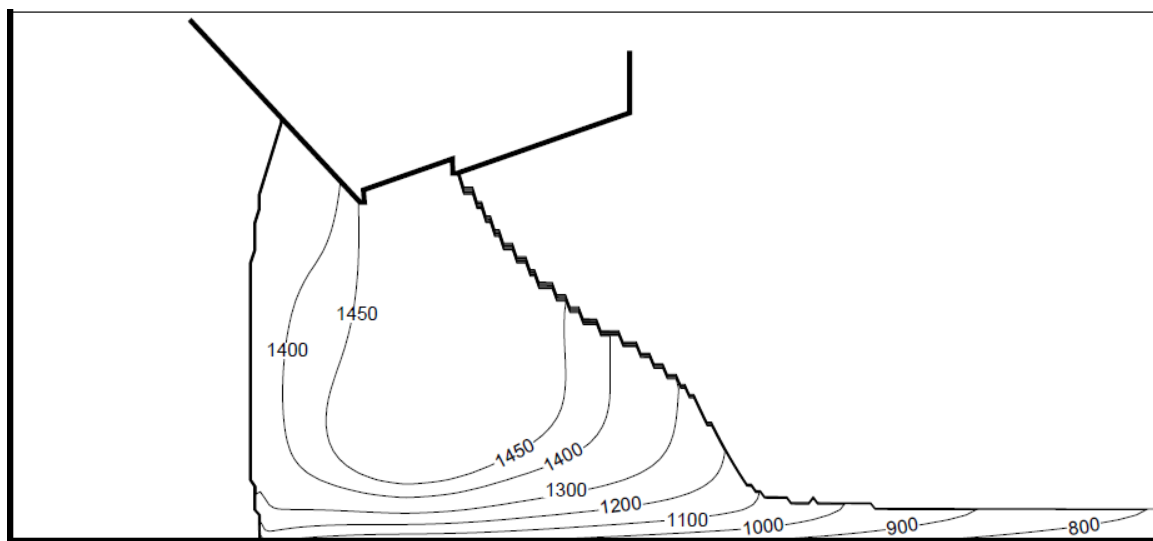


Figura 5: Perfil de isoterma en la conformación la cinta de acuerdo a M. Bussmann et. al [9].

Conclusiones:

En el tratamiento del modelo podemos ver que el perfil de las temperaturas está en el orden reportado en trabajos anteriores [10]. En cuanto a los valores de viscosidad podemos apreciar que el ajuste del polinomio seleccionado, considerado como aproximación a la expresión de Vogel-Fulcher-Tammann, resuelve razonablemente el cambio de fase impuesto en el modelado. Por otro lado, luego de la introducción del modelo térmico y viscoso como primera experimentación de simulación en OpenFOAM®, se pueden apreciar valores de temperatura y viscosidad acordes a la experiencia de este grupo y a las publicaciones actuales [7; 8; 9; 10].

Referencias

- [1] H. Liu, W. Chen, S. Qiu, G. Liu, "**Numerical simulation of initial development of fluid flow and heat transfer in planar flow casting**", Metall. Mater. Trans. B 40(3) (2009) 411–429.
- [2] M. Barone, M. Pagnola, J. Useche, "**Simulación con OpenFOAM® del proceso de Melt Spinning, una introducción a escala semi industrial**", X Congreso Colombiano de Métodos Numéricos. Simulación en Ciencias y Aplicaciones Industriales X CCMN 2015, Septiembre. 23-25, 2015, UTB Cartagena, Colombia.
- [3] D. Muraca, J. Silveyra, M. Pagnola, V. Cremaschi, "**Nanocrystals magnetic contribution to FINEMET-type soft magnetic materials with Ge addition**", Journal of Magnetism and magnetic Materials 321 (2009) pp: 3640–3645.
- [4] M. Pagnola, M. Malmoria, M. Barone and H. Sirkin, "**Analysis of Fe78Si9B13 (%at.) ribbons of noncommercial scrap materials produced by melt spinning equipment**", Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, Vol. 10 N° 4(2014) pp: 511-524
- [5] Paul H. Steen, Christian Karcher, "**FLUID MECHANICS OF SPIN CASTING OF METALS**", School of Chemical Engineering, Cornell University, Ithaca, New York 14853-5204 USA, Institute for Fluid Mechanics, Dresden University of Technology, 01062 Dresden, Germany. Kurokawa et al. - US Patent No: 5, 908, 068 (1999).
- [6] M. Malmoria, M. Pagnola, M. Barone, "**Estudio Magnético de Cintas de FeSiB Obtenidas mediante Melt Spinning**", 13^{er} Congreso Internacional en ciencia y Tecnología en Ciencia y Tecnología de Metalurgia y Materiales, p143
<http://www.samconamet2013.misiones.gov.ar/> (2013).
- [7] G-X Wang and E Matthys, "**Mathematical simulation of melt flow, heat transfer and non-equilibrium solidification in planar flow casting**", Modelling and simulation in materials science and engineering-Vol:10 N°: 1 (2002) pp: 35–55.
- [8] M. Sowjanya, T. Kishen Kumar Reddy, "**Cooling wheel features and amorphous ribbon formation during planar flow melt spinning process**", M. Journal of Materials Processing Technology 214 (2014) 1861–1870.
- [9] M. Bussmann, J. Mostaghimi, D.W. Kirk, and J.W. Graydon, "**A Numerical Study of Steady Flow and Temperature Fields Within a Melt Spinning Puddle**".
<http://lib-www.lanl.gov/la-pubs/00357001.pdf>
- [10] M. Barone, A. Marrugo, M. Pagnola, J. Useche, "Cambio de fase en el proceso de Melt Spinning: Análisis de capa límite y perfil térmico", Quinto Simposio Nacional en Mecánica de Materiales y Estructuras Continuas - SMEC 2016