



EQUIPO PARA MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN POLVOS COLADORES

Elena Brandaleze, Alejandro Martin, Leandro Santini, Edgardo Benavidez

Departamento de Metalurgia y Centro DEYTEMA – Facultad Regional San Nicolás, Universidad Tecnológica Nacional (FRSN-UTN), Colón 332, (2900) San Nicolás.

INTRODUCCIÓN

En el proceso de colada continua, la transferencia de calor en el molde juega un rol fundamental. La calidad superficial de los productos y diversos problemas operativos, que se producen en el proceso de colada continua, están determinados en gran proporción por la transferencia térmica a través de las capas de polvo colador. La extracción de calor se regula a través de las distintas variables de proceso y la calidad de polvo colador empleado. Dicho material, cuando toma contacto con el acero líquido se funde y penetra en el espacio entre el molde refrigerado y el acero. En los instantes iniciales del proceso de solidificación en la capa líquida se pueden desarrollar precipitados cristalinos en mayor o menor proporción, que varían las condiciones térmicas del proceso. Cabe mencionar que sobre la superficie en contacto con el molde (cara fría: 100 – 200°C), el polvo colador da lugar a la formación de capas cristalinas, vítreas o mixtas. En cambio, en la zona en contacto con el acero (cara caliente: 1100 – 1300°C) el material fluye con una determinada viscosidad proporcionando la lubricación necesaria al acero durante su desplazamiento en el molde.

Por tal motivo, resulta de vital importancia poder evaluar la conductividad térmica del polvo colador empleado. Muchos investigadores han desarrollado experimentos para medir propiedades térmicas de los polvos coladores simulando las condiciones del proceso de colada continua [1-5].

A tal fin, se debe contar con un equipo que permita realizar dichas mediciones y comparar el comportamiento que presentan los distintos polvos coladores utilizados en la acería. Sin embargo, un equipo de este tipo debe poseer características diferentes respecto a las tradicionales de los equipos que se aplican para la determinación de conductividad térmica donde, habitualmente la muestra a ensayar es sólida, con dimensiones de varios centímetros. En este caso, el material es un fundido de mediana viscosidad que no supera los 5 mm de espesor.

En este trabajo se informa la construcción de un equipo desarrollado para determinar la conductividad térmica en polvos coladores, simulando las condiciones de operación.



Dr. Elena Brandaleze
Doctora en Ingeniería



Ing. Alejandro Martin
Ingeniero Metalúrgico



Ing. Leandro Santini
Ingeniero Metalúrgico



Dr. Edgardo Benavidez
Doctor en Física

EQUIPO PARA LA MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Se construye un bloque de cobre que simula el molde, solidario a una placa de acero. El espacio libre entre ellos respeta los espesores habituales de la capa de polvo colador que se desarrolla en el proceso real (1 a 5 mm). Durante el ensayo, este espacio es ocupado con el polvo colador fundido.

Como fuente de calor se utiliza un soplete oxiacetilénico que proporciona la temperatura requerida (800°C - 1200°C) sobre la zona central de la placa de acero (que simula el acero que va solidificándose). El bloque de cobre es refrigerado por agua a través de un sistema de refrigeración acoplado al mismo. Un esquema del dispositivo se presenta en la figura 1.

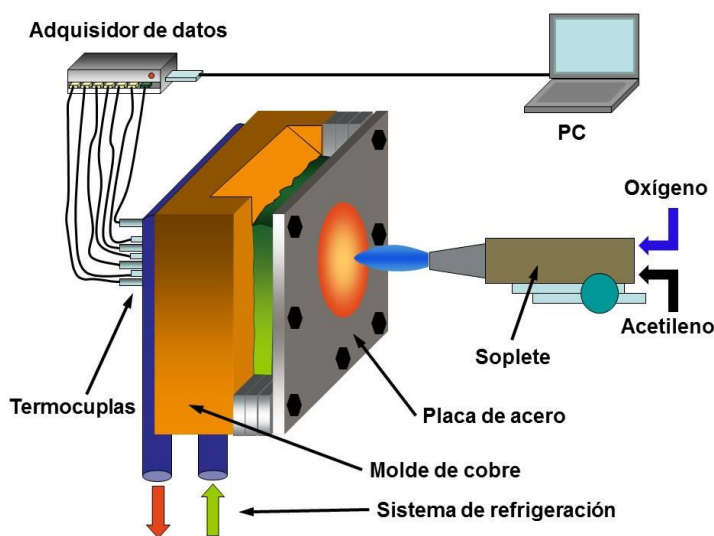


Fig. 1. Esquema general del equipo.

El conjunto se halla vinculado mediante tornillos pasantes en los cuatro extremos de las placas. Previo a la medición, el polvo colador es fundido (1300°C o 1400°C, según el tipo de polvo) en un crisol de grafito. Luego se extrae del horno para derramarlo dentro del “gap”.

Una vez volcado el polvo colador fundido en el espacio libre entre placas, cinco termocuplas comienzan a registrar la evolución térmica del sistema en distintos puntos de interés (figura 2).

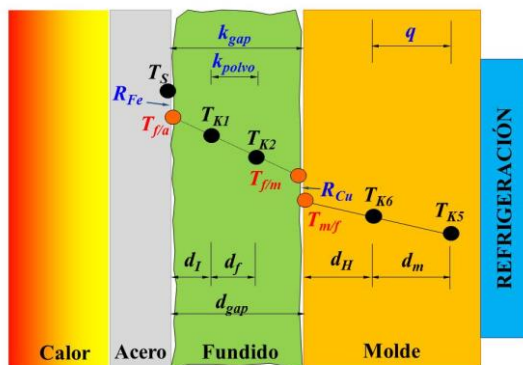


Fig. 2. Esquema del sistema placa (acero) – gap (fundido) – molde (cobre).

Los puntos seleccionados para el registro de temperaturas son: en la superficie de la placa de acero en contacto con el fundido (T_s), en el interior del material fundido (T_{K1} y T_{K2}) y en dos puntos en el interior del molde de cobre (T_{K6} y T_{K5}). En el esquema de figura 2 se detalla d_m : distancia entre las termocupas K_5 y K_6 ; d_i : distancia entre las termocupas K_1 y K_2 ; d_H : distancia de la interfaz fundido/molde a la termocupla K_6 .

Un adquisidor de datos asociado al equipo permite captar y registrar las señales de cada termocupla para poder luego determinar distintos parámetros [6, 7], entre ellos: flujo de calor (q), conductividad térmica del fundido (k_F), temperatura en la interfaz molde/fundido ($T_{m/f}$), temperatura en la interfaz fundido/molde ($T_{f/m}$), temperatura en la interfaz fundido/acero ($T_{f/a}$), conductividad térmica efectiva del "gap" (k_{EF}), resistencia

térmica de la interfaz fundido/molde ($R_{P/M}$) y resistencia térmica de la interfaz acero/fundido ($R_{A/P}$). Para estos cálculos, la conductividad térmica del cobre es ingresada como dato.

RESULTADOS OBTENIDOS

En la figura 3 se grafican los valores de temperatura obtenidos durante un ensayo típico realizado sobre un polvo colador. El pico que se observa en las termocupas S, K_1 y K_2 , al minuto del inicio del registro de temperaturas, se debe al ingreso del polvo colador en el gap. Este ascenso de temperatura se registra, con menor velocidad, en las termocupas K_5 y K_6 , ubicadas en el bloque de cobre. El sistema completo llega a estabilizarse alrededor de los 8 minutos.

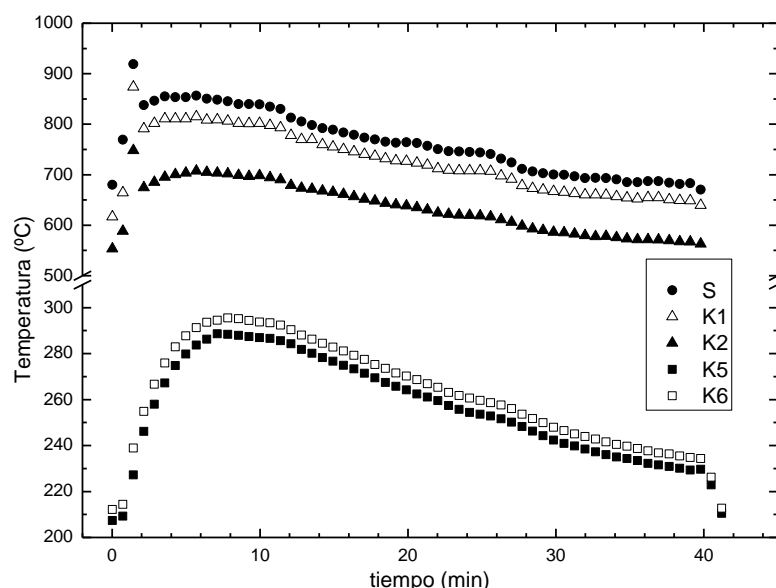


Fig. 3. Valores de las distintas temperaturas registradas en un ensayo.

De acuerdo con los valores registrados de temperatura, y aplicando las ecuaciones correspondientes, se obtienen los valores de los distintos coeficientes de conductividad y resistencia térmica mencionados arriba. A

modo de ejemplo, en la Tabla I se informan los valores de los parámetros térmicos extraídos de la medición de dos polvos coladores a $890^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$.

TABLA I. Resultados de un ensayo de conductividad térmica.

q (MW/m ²)	k _P (W/m.K)	k _{EF} (W/m.K)	R _{A/P} (x10 ⁻⁴ m ² .K/W)	R _P (x10 ⁻⁴ m ² .K/W)	R _{P/M} (x10 ⁻⁴ m ² .K/W)
0,194	2,66	0,73	19,0	11,3	11,1
0,209	2,10	0,83	14,6	14,3	7,5

El mencionado equipo sufrió algunas modificaciones y mejoras respecto el original presentado en [6]. En primer lugar se incrementó la distancia entre las termocuplas dentro del molde de cobre (d_m). Con el aumento de la distancia entre las termocuplas K₅ y K₆ se disminuyó el error en el valor calculado del flujo de calor (q), el cual se obtiene a partir de la diferencia de temperaturas registradas por ambas termocuplas. En segundo lugar, se mejoró el sistema de refrigeración. Esta mejora surgió a partir de un análisis de modelado que contempló las distribuciones de calor en todo el sistema. La mejora en la extracción del calor permitió garantizar la obtención de un flujo direccional del calor, que es la fundamentación en la cual se basa la utilización de las fórmulas de cálculo de todos los parámetros térmicos.

Una característica adicional es que, de las muestras extraídas luego del ensayo de conductividad térmica, se visualiza la

morfología de la capa que ha sufrido un gradiente de temperatura similar al que es sometido en el proceso real. Por lo cual se pueden determinar diferentes características de la microestructura desarrolla por parte del polvo colador durante su funcionamiento dentro del molde de colada continua.

Una capa extraída del equipo de transferencia térmica se observa en la figura 4, donde se puede distinguir que la zona cercana al lado de molde de cobre presenta una fase vítrea, mientras que la capa en la zona cercana a la placa de acero presenta formación de cristales y gran cantidad de poros. Las observaciones permiten distinguir dos regiones en la zona de cristales: una región a continuación de la zona vítrea (en la parte media de la capa) la cual presenta pequeños cristales y la región más cercana a la placa de acero (a la izquierda de la anterior), que presenta cristales de mayor tamaño.

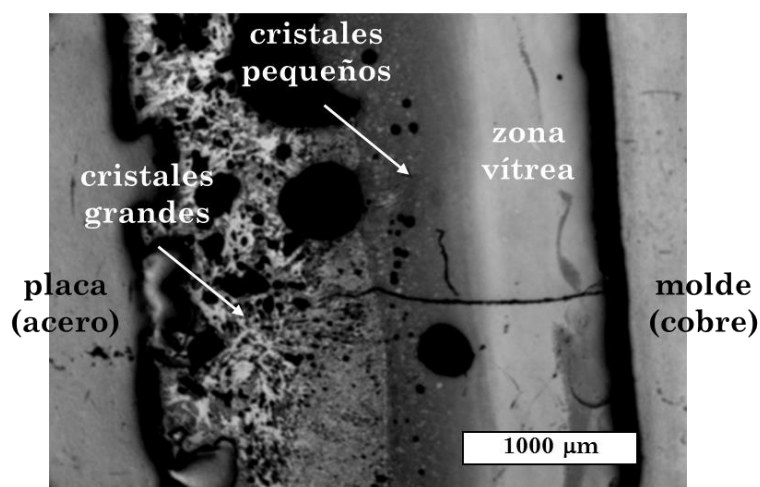


Fig. 4. Morfología típica de las capas extraídas del ensayo de conductividad térmica.



De las imágenes se mide: el espesor total (L_T), el ancho de la zona de cristales grandes (L_C), la zona de cristales pequeños o zona mixta (L_M) y la zona de fase vítrea (L_V). Por medio de SEM-EDS se determinan las composiciones de las distintas fases cristalinas y vítreas (amorfos) presentes en cada zona de la capa. Esto permite extender el análisis y la comprensión de la evolución estructural que desarrollan estos materiales [8].

Finalmente, es importante destacar, que los datos experimentales determinados por este equipo sirvieron para desarrollar un modelo matemático que describe las condiciones térmicas presentes en la capa de escoria infiltrada entre molde y acero durante el colado de barras redondas de colada continua [9]. Las propiedades térmicas de la capa de polvo colador determinadas experimentalmente se combinaron con mediciones realizadas en la planta industrial. El modelo permitió predecir la distribución de flujo de calor en el molde, así como el espesor y la distribución de temperaturas de la capa de escoria y del acero solidificado. Los resultados obtenidos mostraron un buen acuerdo entre los valores calculados y las mediciones realizadas tanto como en comparación con estudios previos reportados en la literatura.

REFERENCIAS

- [1] Heat Transfer Through Layers of Casting Fluxes, S. Ohmiya, K. H. Tacke, K. Schwerdtfeger, *Ironmaking and Steelmaking*, 10, 1983, p.24-30.
- [2] Thermal Properties of Slag Films Taken From Continuous Casting Mould, M. Susa, K. Mills, M.J. Richardson, R. Taylor, D. Stewart, *Ironmaking and Steelmaking*, 21, 1994, p.279-286.
- [3] Measurement and Modelling of the Heat Transfer Across Interfacial Mold Flux Layers, D. T. Stone, B. Thomas, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 38, 1999, p.363-375.
- [4] Measurements of the Effective Thermal Conductivity of Liquid Slags and Mould Powders, A.C. Mikrovas, S. A. Argyropoulos, I.D. Sommerville, *Ironmaking and Steelmaking*, 1991, 18, p.169-181.
- [5] Characterization and Modification of the Heat Transfer Performance of Mould Powders, M.S. Jenkins, *Steelmaking Conference Proceedings*, 78, 1995, Iron and Steel Society, Warrendale, p.667-669.
- [6] Determinación de transferencia térmica a través de capas de polvo colador fundido, A. Martín, E. Benavidez, L. Santini y E. Brandaleze, *Actas Congreso SAM/CONAMET 2007* (ISBN: 978-950-42-0094-9), 2007, p.1552-1557.
- [7] Desarrollo de un equipo para medición de conductividad térmica en polvos coladores fundidos, A. Martín, E. Brandaleze, E. Benavidez, L. Santini y G. Di Gresia, *Annals 39th Steelmaking Seminar – International* (ISSN: 1982-9345), 2008, p. 439-446.
- [8] Comportamiento térmico de polvos coladores y su vinculación con las características microestructurales, L. Santini, A. Martín, E. Benavidez, E. Brandaleze, C. Capurro, G. Cerrutti y C. Cicutti, *Actas 13º Congreso Internacional en Ciencia y Tecnología de Metalurgia y Materiales SAM/CONAMET 2013* (ISBN: 978-950-579-276-4), 2013.
- [9] Análisis de la transferencia de calor en el molde durante la producción de barras redondas de colada continua, C. Capurro, G. Cerrutti, C. Cicutti, L. Santini, A. Martín, E. Benavidez y E. Brandaleze, *Actas 20º Conferencia del Acero IAS* (ISBN: 978-950-9671-10-2), 2014.