

DESARROLLO DE UN EQUIPO PARA MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN POLVOS COLADORES FUNDIDOS¹

Alejandro Martín²
Elena Brandaleze³
Edgardo Benavidez³
Leandro Santini³
Gustavo Di Gresia⁴

Resumen

En el proceso de colada continua, la transferencia de calor en el molde juega un rol fundamental. La extracción de calor se regula a través de las distintas variables de proceso y el tipo de polvo. 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 cara del molde (100°C – 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 (1.100°C – 1.300°C) el material fluye con una determinada viscosidad proporcionando la lubricación necesaria al acero durante su desplazamiento en el molde. En este trabajo se presentan detalles de la construcción de un equipo desarrollado para determinar la conductividad térmica en dichos polvos coladores, simulando las condiciones de operación. Además, se informan datos de conductividad térmica y la evolución de la propiedad en función de la temperatura.

Palabras clave: Transferencia térmica; Polvo colador; Colada continua.

DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM PÓS FLUXANTES FUNDIDOS

Resumo

No processo de lingotamento contínuo, a transferência de calor tem importância fundamental. A extração de calor se regula através das distintas variáveis do processo e o tipo de pó. Dito material, quando toma contato com o aço líquido se funde e penetra no espaço entre o molde refrigerado e o aço. Nos instantes iniciais do processo de solidificação na camada líquida se podem desenvolver precipitados cristalinos em maior ou menor proporção, que variam as condições térmicas do processo. Cabe mencionar que sobre a face do molde (100°C – 200°C), o pó fluxante forma camadas cristalinas, vítreas ou mixtas. No entanto, na zona em contato com o aço (1.100°C – 1.300°C) o material flui com uma determinada viscosidade proporcionando a lubrificação necessária ao aço durante seu deslocamento no molde. Neste trabalho se apresentam detalhes da construção de um equipamento desenvolvido para determinar a condutividade térmica nos pós fluxantes, simulando as condições de operação. Além disso, se informam dados de condutividade térmica e a evolução da propriedade em função da temperatura.

Palavras-chave: Transferência de calor; Pó fluxante; Lingotamento contínuo.

¹ Trabajo a ser presentado en el XXXIX Seminario de Acería – Internacional, 12 a 16 de Mayo de 2008, Curitiba, PR, Brazil.

² Instituto Argentino de Siderurgia, Av. Central y 19 Oeste, 2900 San Nicolás, Prov. de Buenos Aires, Argentina. siderurgia@siderurgia.org.ar

³ Departamento de Metalurgia, Universidad Tecnológica Nacional – FRSN, Colón 332, San Nicolás, Prov. de Buenos Aires, Argentina.

⁴ Ternium-Siderar, Planta General Savio, Casilla de Correo 801, 2900 San Nicolás, Prov. de Buenos Aires, Argentina.

1 INTRODUCCIÓN

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. Dentro de los mismos se pueden citar:

- ❖ Defectos superficiales.
- ❖ Tensiones térmicas en la piel que luego promueven la propagación de grietas, debido a contracciones diferenciales que se producen en la piel como consecuencia de la transformación de austenita a ferrita.
- ❖ Crecimiento heterogéneo de la piel que pueden causar distintos problemas de calidad superficial incluyendo marcas de oscilación profundas, dando lugar a la formación de posibles grietas transversales.
- ❖ Puntos calientes localizados.
- ❖ Perforaciones.

Por tal motivo, resulta de vital importancia poder evaluar la transferencia 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, entre ellos se pueden mencionar: S. Ohmiya, K. Mills, B. Thomas, A.C. Mikrovay y M.A. Jenkins.⁽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 habitualmente, donde la muestra a ensaya 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 informan los detalles de la construcción de un equipo para determinar la conductividad térmica de los polvos coladores fundidos y se presenta la evolución de tal propiedad con el tiempo.

2 DISEÑO DEL EQUIPO PARA MEDICIÓN DE TRANSFERENCIA TÉRMICA

Luego de evaluar los diferentes métodos posibles para lograr realizar este tipo de mediciones se decide pensar en un equipo que tenga similitudes con el molde de la colada continua.

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. Durante el ensayo, este espacio es ocupado con el polvo colador fundido. En una etapa inicial del desarrollo se utilizó como fuente de calor un soplete oxi-gas que proporciona la temperatura requerida, en la zona central de la placa de acero (que simula el acero que va solidificando). El bloque de cobre es refrigerado por agua. Dicha refrigeración se realiza con agua a través de una serpentina de cobre (Figura 1).

El conjunto se halla vinculado mediante tornillos pasantes en los cuatro extremos de la placas. Una vez volcado el polvo colador fundido en el espacio libre entre placas, 5 termocuplas comienzan a registrar la evolución térmica del sistema.

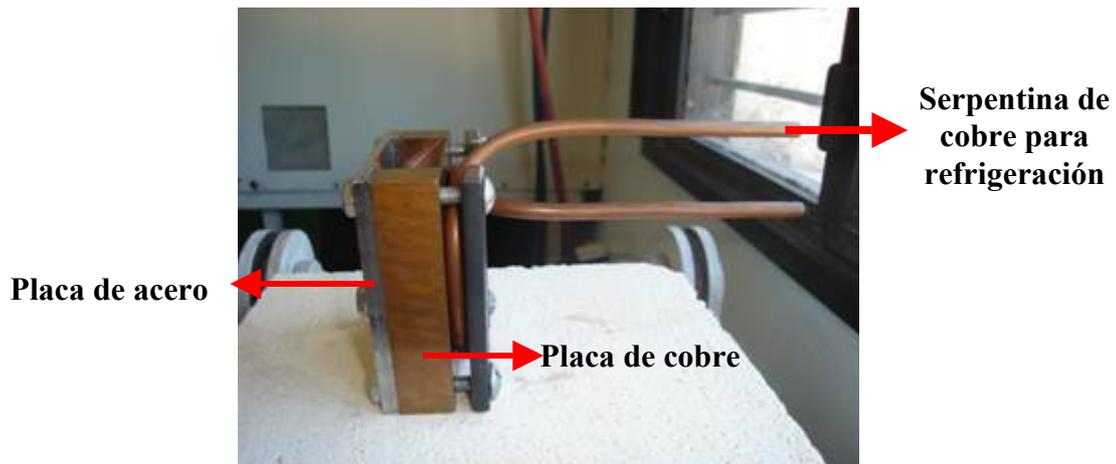


Figura 1. Disposición de las placas de cobre y acero unido al sistema de refrigeración del equipo de transferencia térmica.

Una vista superior por donde se carga el material fundido se puede observar en la Figura 2. A este equipo se le suma un dispositivo para sostener las termocupas 5 termocupas (1 tipo S y 4 tipo K) que registran la evolución de la temperatura en distintos puntos de interés (Figura 3).

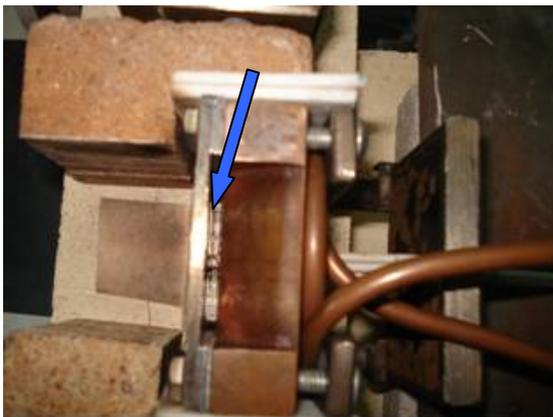


Figura 2. Vista superior que muestra el espacio entre placas donde se aloja el polvo colador fundido.



Figura 3. Disposición de las placas de cobre y acero unido al sistema de refrigeración del equipo de transferencia térmica.

Las termocupas se identifican como: TS y K1, K2, K5 y K6 y registran la temperatura de los puntos detallados en el croquis de Figura 4. Tal como se puede notar una de las termocupas (TS) registra la temperatura de la placa de acero, 2 termocupas registran en 2 puntos a distintas profundidades del espesor de la capa de polvo colador (K1 y K2) y 2 termocupas registran la temperatura en dos puntos de la placa que simula el molde (K5 y K6). Todas ellas se hallan conectadas al sistema de control que capta las señales. Cabe mencionar que además se desarrolló una interfase y un software para almacenar los datos del ensayo, que permite luego procesarlos para obtener las curvas correspondientes a la evolución térmica de cada termocupla.

El equipo se monta sobre una base de refractarios de alta alúmina, en las proximidades de un horno Lindberg que se utiliza para fundir el polvo en un crisol de platino.

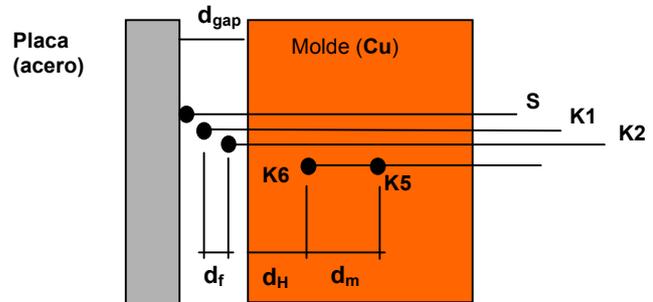


Figura 4. Montaje previo al ensayo y distribución de las termocuplas en las distintas zonas de registro.

Cabe comentar que en una segunda etapa del desarrollo, con el objetivo de lograr un calentamiento más homogéneo de la placa de acero, se trabaja en el diseño y puesta a punto de una unidad calefactora con control electrónico (Figura 5). Este dispositivo permite alcanzar mayor aproximación a la condición real en el molde y eliminar el calentamiento localizado que produce el soplete oxi-gas sobre la placa de acero. Además, dicha unidad calefactora proporciona un mayor control del calentamiento a temperaturas similares a las de proceso (1.200°C).



Figura 5. Dispositivo armado con la pantalla calefactora y el controlador de potencia en etapa experimental.

3 ENSAYO DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

En este trabajo se presentan resultados obtenidos sobre ensayos de determinación de la conductividad térmica que se realizaron sobre muestras de polvo colador comercial cuya composición química se presenta en la Tabla 1, utilizando el equipo desarrollado en la etapa inicial con calentamiento mediante soplete.

Tabla 1. Composición química de un polvo colador ensayado

Composición química de un polvo colador ensayado (%)											
SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	F	P ₂ O ₅	C
31,0	27,0	1,8	4,4	0,06	0,20	1,40	11,0	0,62	9,05	0,1	4,0

Se inicia el calentamiento con el soplete sobre la placa de acero hasta alcanzar la temperatura requerida y la estabilidad necesaria para realizar el ensayo (Figura 6 a). Por otra parte, en un horno Lindberg se funde el polvo colador a 1.300°C y también se espera el tiempo para lograr la homogenización térmica. Luego se vuelca el polvo colador fundido en la cavidad del equipo, éste comienza a desplazarse hacia abajo formando la película de polvo colador (Figura 6b).



(a) (b)
Figura 6. Etapa de calentamiento y vuelco del polvo.

El sistema adquisidor de datos registra los valores de temperatura que censa cada termocupla. La evolución térmica de cada una de ellas también se va monitoreando en la pantalla de la PC (Figura 7).



Figura 7. Imagen del dispositivo durante el ensayo.

En la Figura 8, se puede observar el gráfico con la evolución térmica de cada termocupla obtenida durante el ensayo.

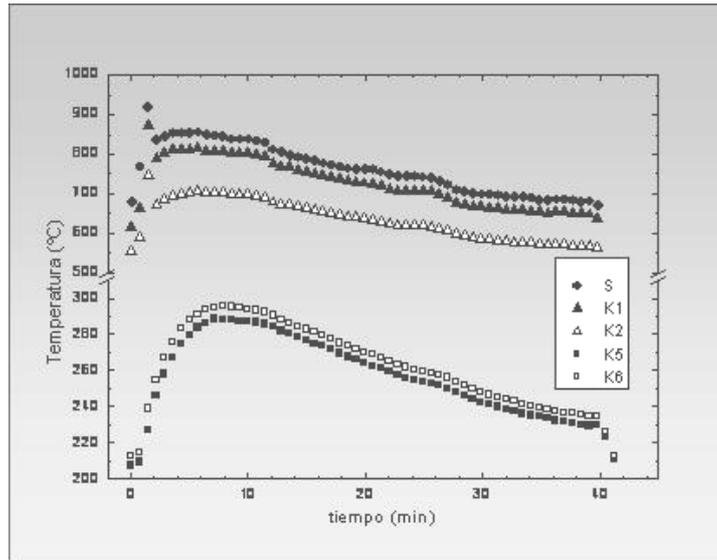


Figura 8. Evolución térmica del sistema durante el ensayo.

4 CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

A partir de los datos de cada termocupla y de las distancias señaladas en figura 4, se puede calcular el flujo de calor (q), la conductividad térmica del fundido (K_f), del gap (k_{gap}) y de las resistencias interfaciales, utilizando las expresiones que se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Expresiones para el cálculo del flujo de calor, conductividad térmica del fundido, del *gap* y resistencias térmicas interfaciales acero/polvo fundido y molde/polvo fundido.

Flujo de calor	Temperatura interfaz molde/polvo fundido	Resistencia interfaz acero/polvo fundido
$q = k_{Cu} \frac{(T_{K6} - T_{K5})}{d_m}$	$T_{m/f} = T_{K6} + \frac{q \cdot d_H}{k_{Cu}}$	$R_{Fe} = \frac{(T_S - T_{f/a})}{q}$
K del polvo fundido	Temperatura interfaz polvo fundido/molde	Resistencia interfaz molde/polvo fundido
$k_f = \frac{q \cdot d_f}{T_{K1} - T_{K2}}$	$T_{f/m} = T_{K2} - \frac{q \cdot d_f}{k_f}$	$R_{Cu} = \frac{(T_{F/m} - T_{m/F})}{q}$
K efectiva del gap		
$k_{gap} = \frac{q \cdot d_{gap}}{T_S - T_{m/f}}$		

donde:

q = flujo de calor

k_{Cu} → conductividad térmica del cobre (385 W/mK)

T_{K5} y T_{K6} → temperaturas en el molde de cobre

d_m → distancia entre las termocuplas en el molde (T_{K5} , T_{K6})

T_{K1} y T_{K2} → temperaturas en el polvo fundido

d_f → distancia entre las termocuplas en el polvo fundido (T_{K1} y T_{K2})

T_S → temperatura sobre la cara interna de la placa de acero

$T_{m/f}$ → temperatura en la interfaz molde/polvo fundido

d_H → distancia de la interfaz molde/polvo fundido a la termocupla K6

$T_{f/a}$ → temperatura en la interfaz acero/polvo fundido

k_{gap} → conductividad térmica del *gap*

k_{polvo} → conductividad térmica de la capa de polvo colador fundido

En la Tabla 3 se presentan los valores de conductividad del polvo fundido, del *gap*, la resistencia de la interfaz Acero/polvo fundido y molde/polvo fundido a tres temperaturas diferentes.

Tabla 3. Conductividades térmicas y resistencias a diferentes temperaturas.

T (°C)	K_f (W/mK)	K_{gap} W/mK)	R_{Cu} ($m^2 \cdot K/W$)	R_{Fe} ($m^2 \cdot K/W$)
850	1,65	0,94	0,0018	-0,0007
800	1,54	0,89	0,0019	-0,0008
700	1,65	0,88	0,0019	-0,0007

5 DISCUSIÓN

Una de las principales funciones del polvo colador en el *gap*, además mantener la lubricación requerida es brindar homogeneidad en la extracción de calor entre la piel solidificada y el molde. Se sabe que la piel presenta en los instantes iniciales espesores muy finos y resulta muy susceptible a transformaciones de fase que involucran cambios alotrópicos. Dichos cambios en el acero, están acompañados por importantes variaciones volumétricas dando lugar a la generación de grietas o roturas de dicha piel ocasionando serios problemas operativos como las perforaciones. Por tal razón, los incrementos de las velocidades de colada generan en la actualidad una necesidad de mayor control sobre las propiedades térmicas y por lo tanto la medición de conductividad térmica representa una información apreciable tanto para la comparación de distintos tipos de polvos coladores, como para la predicción de problemas operativos.

Las mediciones de transferencia térmica bajo condiciones que se aproximen a la operación pueden determinar el flujo de calor efectivo, determinado por la conducción, radiación y posiblemente convección a través de fases líquidas presentes en el polvo.^(1,6,7)

La interpretación de las curvas de evolución de la temperatura en función del tiempo obtenidas, indican la presencia de un pico registrado por las termocupas S, K1 y K2, al minuto del inicio del registro de temperaturas, que se debe al ingreso del polvo colador en el *gap*. Este ascenso de temperatura se registra, con menor velocidad, en las termocupas K5 y K6, ubicadas en el bloque de cobre. El sistema completo llega a estabilizarse alrededor de los 8 minutos.

De acuerdo con los valores registrados de temperatura, y aplicando las ecuaciones correspondientes, se obtienen los valores de los coeficientes de conductividad y resistencia térmica que se presentan en la Tabla 3. En la mencionada tabla, se toma como valor de temperatura, aquel registrado por la termocupa S (en contacto con la placa de acero).

En esta etapa inicial del desarrollo se realizaron las mediciones de temperatura entre los 700°C y los 850°C, aunque el objetivo es realizar mediciones a temperaturas crecientes hasta superar los 1.000°C que corresponden al rango de interés industrial. En este sentido la modificación del equipo con el empleo de la placa calefactora no sólo permite alcanzar estos valores de temperatura sino también obtener un calentamiento más homogéneo durante el experimento.

La conductividad térmica del polvo colador (k_f) se encuentra dentro de los valores determinados experimentalmente en la literatura,⁽⁸⁾ típicamente entre 1-2 W/m.K, y aumenta con la temperatura al igual que el k_{gap} .

Es importante destacar que la conductividad térmica “efectiva” del gap (k_{gap}) es alrededor de la mitad de la conductividad térmica del polvo fundido (k_f). Como se establece, a través de las fórmulas de ambos, el valor de k_{gap} contempla las resistencias térmicas establecidas en las distintas interfases. De aquí, que la influencia de la resistencia térmica, principalmente de la interfaz cobre/polvo (R_{Cu}), se manifiesta en el menor valor de la conductividad efectiva del gap respecto de la conductividad del polvo fundido.

A partir de que el valor de k_{gap} tiene en cuenta las resistencias térmicas entre las distintas interfases, el mismo cobra gran importancia cuando se consideran los aspectos de extracción de calor en el proceso de colada continua. El disponer de este dato a las temperaturas de proceso, permite que a través de este equipo se puedan seleccionar polvos coladores o prevenir problemas operativos.

Los valores negativos de la resistencia térmica en la interfaz acero/polvo dan muestra de un buen contacto térmico en dicha zona. Esto es comprobado tras el ensayo, ya que se observó una fuerte adhesión del material fundido a la placa de acero.

6 CONCLUSIONES

- ✓ El desarrollo del equipo permite incorporar una técnica experimental para medir la conductividad térmica en polvos coladores, complementando los modelos matemáticos existentes y constituye una herramienta para predecir el comportamiento del polvo colador bajo condiciones de operación en el molde.
- ✓ Los valores de conductividad térmica medidos en el polvo colador, están de acuerdo con los valores citados en la bibliografía.
- ✓ Los valores negativos de la resistencia térmica en la interfaz acero/polvo, demostraron un buen contacto térmico en dicha zona.
- ✓ La influencia de la resistencia térmica de la interfaz cobre/polvo se manifiesta en el menor valor de la conductividad “efectiva” del gap respecto de la conductividad del polvo fundido.
- ✓ Tanto desde el punto de vista operativo en la colada continua como para realizar la selección de un polvo colador, la conductividad efectiva del gap y la conductividad térmica del polvo colador representan datos de gran importancia.

REFERENCIAS

- 1 S. Ohmiya, K. H. Tacke and K. Schwerdtfeger, Ironmaking and Steelmaking, 1983, **10**, 24-30.
- 2 M. Susa, K. Mills, M.J. Richardson, R. Taylor and D. Stewart, Ironmaking and Steelmaking, 1994, **21 (4)**, 279-286.
- 3 D. T. Stone and B. Thomas, Canadian Metallurgical Quarterly, 1999, **38 (5)**, 363-375.
- 4 A.C. Mikrovas, S. A. Argyropoulos and I.D. Sommerville, Ironmaking and Steelmaking, 1991, **18 (3)**, 169-181.
- 5 M.S. Jenkins, Steelmaking Conference Proceedings, 1995, **78 (3)** Iron and Steel Society, Warrendale, 667-669
- 6 R. Scheel, W. Korte, Metallurgical Plant and Technology, **6**, (1987) 22-33
- 7 A. Yamauchi, K. Sorimachi et al. ISIJ international, Vol 33 (1983), **1**, 140 – 147.
- 8 R. Taylor y K. Mills, Ironmaking and Steelmaking, 1988, **15**, 4, 187-194.