

**PRECALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO DE CUCHARAS DE ACERIA
ABACOS DE OPERACION**

A. Gastón, M. Medina
Consejo de Investigaciones. Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Av. Pellegrini 250. 2000 Rosario. Argentina

RESUMEN

Las cucharas de acería se utilizan para transportar el acero fabricado en hornos o convertidores hasta las instalaciones de colada continua. Su ciclo de operación es un proceso multivariable, cuya evaluación y optimización depende de numerosos factores. La modelización matemática y simulación numérica es un camino idóneo para lograr una mejor comprensión del proceso. En este trabajo se presenta un modelo de precalentamiento y de enfriamiento de cucharas, los cuales son empleados en forma combinada con un modelo de cuchara llena de acero para obtener ábacos de operación. Se analiza una cuchara de 100 toneladas con revestimiento dolomítico y se obtienen resultados en cuanto a políticas de precalentamiento inicial de la cuchara. También se analiza el caso de cucharas en régimen térmico estable donde mayores tiempos de enfriamiento después del vaciado se compensan con precalentamientos adicionales.

ABSTRACT

Steel casting ladles are used to transport liquid steel from the furnace or converter to the continuous casting machine. The operating cycle of casting ladles is multivariable process, whose evaluation and optimization depends on many factors. Mathematical modeling and numerical simulation are very helpful to achieve a better understanding of this process. In this work models for preheating and cooling of casting ladles are used in combination with a metallurgy and transport model (ladle filled with steel) to generate operating rules. A 100 tn dolomitic ladles is analysed and the results regarding initial preheating are presented. For a casting ladle with a stable thermal state an additional preheating is calculated in order to compensate heat losses owing to different cooling periods after teeming.

1. INTRODUCCION

Las cucharas de acería se utilizan para transportar el acero fabricado en hornos o convertidores hasta las instalaciones de colada continua. Con el desarrollo de la metalurgia secundaria el afinado del metal se realiza actualmente en este recipiente. El ciclo de trabajo de la cuchara puede dividirse en las etapas siguientes: pre calentamiento, espera frente al horno u convertidor, vuelco del horno o convertidor y llenado de la cuchara, metalurgia y transporte, colada del acero, pérdidas en cuchara vacía.

Este ciclo de operación es un proceso multivariable, cuya evaluación y optimización depende de numerosos factores. En cada etapa, la evolución de la temperatura del acero y de la cuchara depende de lo acontecido en la estación previa y de la historia térmica de la cuchara. Así mismo, una variedad de situaciones, que hacen a la práctica operativa de cada acería, completan la caracterización del ciclo de trabajo (utilización de tapas, aislación del baño de acero, agitación y agregado de ferroaleaciones, etc.). La modelización matemática y simulación numérica muestra ser un camino idóneo para lograr una mejor comprensión del proceso de metalurgia de cuchara (afino) y colada del acero. La variación de cada uno de los parámetros que intervienen en la definición de los modelos permite adquirir un mayor conocimiento de la influencia de los mismos en la evolución de la temperatura del acero y de la cuchara y asentar las bases cuantitativas para ensayar e implementar cambios en la práctica operativa. Para realizar el proceso de simulación se ha desarrollado una herramienta de cálculo, de respuesta rápida implementable en un ordenador de tipo PC constituido por módulos asociados a cada etapa, de funcionamiento independientes o interaccionantes^{1,2,3,4}. Las ecuaciones de balance energético asociadas a cada etapa del ciclo se resuelven aplicando el método de elementos finitos. Es importante destacar que los módulos desarrollados son capaces de reproducir los resultados obtenidos con otros simuladores análogos, en particular los desarrollados en el IRSID (Institut de Recherche de la Sidérurgie Française).

Así mismo a fin de corroborar los modelos en forma experimental, los mismos fueron comparados con valores experimentales obtenidos en planta. Estas mediciones se llevaron a cabo en la Acería LD de la Planta General Savio de SOMISA. Las comparaciones se realizaron para cucharas de alta alúmina y dolomíticas de 200 toneladas con buena concordancia entre valores medidos y calculados.

La caída de temperatura que se produce en el acero fundido una vez que es vertido en las cucharas de acería depende del estado térmico en que éstas se encuentran en el momento de colar el metal desde los hornos o convertidores. Las cucharas de acería ingresan al circuito de trabajo luego de un periodo de secado (armado del revestimiento de una cuchara nueva o reparación del mismo) y pre calentamiento, que fija el nivel térmico inicial de las mismas. Desde el punto de vista de operacional, la necesidad de un pre calentamiento es imperativa para:

- 1 - minimizar el enfriamiento del acero en el interior de la cuchara

- 2 - cerrar las juntas entre ladrillos producidas en los enfriamientos
- 3 - reducir el desprendimiento del refractario por choque térmico (spalling)
- 4 - disminuir la temperatura de colada en el horno

La simulación de esta etapa del ciclo ha sido encarada por diferentes autores^{5,6,7,8}, que comparten las mismas hipótesis de trabajo para construir los modelos de cálculo. Si bien existen reglas cualitativas referentes al precalentamiento de cucharas, la implementación y adecuada cuantificación de las mismas dependerá de las características y disponibilidad de equipamiento de cada acería, del tipo de cucharas que constituyen el parque y de los tiempos involucrados en cada etapa del ciclo de operación, por lo que la disponibilidad de tales modelos es indispensable a la hora de ponerlas en práctica en forma exitosa.

Para un dado ciclo de operación, que pueda repetirse en forma regular, existe un estado térmico de la cuchara que resultará estable. Este estado puede caracterizarse por la repetitividad de los perfiles de temperatura en el revestimiento al final de cada etapa de ciclos consecutivos y por la de los valores de temperatura del acero al final de la metalurgia y del vaciado.

Encontrado este régimen estable para un ciclo particular, cuyas características se fijan previamente, en este trabajo, aplicando el modelo de precalentamiento desarrollado se busca cómo debe realizarse este precalentamiento para que una cuchara ingrese a este circuito de trabajo con esta condición térmica óptima. El modelo desarrollado tiene en cuenta diferentes condiciones operativas tales como: combustible y comburente utilizados, relación combustible/aire, precalentamiento del aire, tiempos de precalentamiento, etc..

Por otro lado, dentro del ciclo de operación de una cuchara de acería existen algunos periodos en los cuales las cucharas vacías se enfrían perdiendo energía por radiación al medio ambiente. Tal es el caso de la espera de las cucharas para su llenado frente a los hornos o convertidores o el enfriamiento de las mismas luego de producirse su vaciado en la máquina de colada continua o en las lingoteras. Estos periodos de enfriamiento producen importantes modificaciones en el perfil del revestimiento refractario. Como la evolución de la temperatura del acero en la cuchara depende fuertemente de la energía acumulada en ella durante la etapa de precalentamiento es importante conocer cómo variarán estos perfiles debido a las periodos de espera mencionados. Así mismo, permitiría decidir si es necesario volver a precalentar la cuchara para recomenzar su ciclo de trabajo o si tiene una temperatura adecuada como para llenarla nuevamente.

Aplicando el modelo de precalentamiento de cuchara, en combinación con los de enfriamiento y de cuchara llena de acero, se desarrollan ábacos de operación. Los mismos indican, fijado un ciclo de referencia (tiempo de cada etapa, temperatura deseada del acero al final de la metalurgia y vaciado, estado térmico óptimo de la cuchara para dicho ciclo), la duración del precalentamiento, en función del

tiempo de espera de las cucharas vacías luego del vaciado, necesario para restablecer el nivel térmico de referencia.

El funcionamiento de las acerías debe compatibilizar y coordinar la rotación de las cucharas para atender el suministro de acero a la colada continua de distintos productos: planchones, tochos, palanquillas. La definición de cada uno de estos ciclos involucra parámetros diferentes y un nivel térmico de la cuchara en particular. La cuchara saliente de un circuito (y con un estado térmico adecuado para repetirlo) puede ser obligada a ingresar a otro diferente, lo que introducirá variaciones en la temperatura del metal, en general no deseadas. La implementación de este tipo de ábacos permite encarar una utilización más racional de los sistemas de precalentamiento disponibles en las acerías con el consecuente ahorro energético y una mejor calidad del acero colado, la cual es fuertemente dependiente de un buen control de temperatura del metal durante su proceso de fabricación.

La disponibilidad conjunta de estos ábacos y de un seguimiento en tiempo real del estado geográfico y térmico de la cuchara permite utilizar las predicciones del modelo de simulación del ciclo de operación y las mediciones de temperatura corrientemente efectuadas durante el proceso para conducir la marcha de la operación con cierto conocimiento de lo que puede acontecer.

2. MODELO PARA EL PRECALENTAMIENTO

Para analizar el precalentamiento de la cuchara se empleó un modelo de cámara de combustión. Para determinar el calor transferido por los gases de la combustión al revestimiento refractario se plantea el siguiente balance de energía :

$$H_{cbst} + H_{cbr} = Q_{transf}(t_g, t_p) + H_{humo}(t_g) \quad (1)$$

La ecuación (1) se plantea bajo las siguientes hipótesis :

- 1) Se supone que los gases de la combustión están perfectamente mezclados (densidad y composición uniformes) y se les asigna una temperatura media t_g (temperatura de transferencia de los gases) dentro de la cuchara.
- 2) Los gases de la combustión abandonan la cuchara a la temperatura t_g .
- 3) El gas es gris (absortividad = emisividad)
- 4) Se considera que la temperatura de la pared lateral y del piso es uniforme.
- 5) Se considera que la combustión es completa, es decir que se quema el gas en su totalidad, ya sea con o sin exeso de comburente.

De la ecuación (1) puede determinarse t_g y con esta temperatura calcular Q_{transf} .

Para determinar los perfiles de temperatura en el refractario se plantea la ecuación del calor en régimen transitorio :

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} k_r \frac{\partial t}{\partial x}$$

$$-k_r \frac{\partial t}{\partial x} (x=0) = q_{\text{transf}} \quad (2)$$

$$-k_r \frac{\partial t}{\partial x} (x=L) = h (t_{\text{pared}} - t_{\text{ambiente}})$$

La energía transferida al revestimiento refractario puede evaluarse mediante la siguiente expresión, válida para el caso de emisividades superiores a 0.8 ^{9,10}:

$$Q_{\text{transf}} = \sum_{i=1}^3 Q_{gi} \quad (3)$$

$$Q_{gi} \cong A_i \frac{(\epsilon_i + 1)}{2} (\epsilon_g E_g - \alpha_{gi} E_i) \quad \epsilon_i > 0.8 \quad (4)$$

En el cálculo de Q_{transf} se desprecia la transferencia de calor por convección. Cálculos estimativos demuestran que éste es mucho menor que el calor transferido por radiación.

El conjunto de ecuaciones (2) se resuelve por el método de los elementos finitos con un esquema de diferencias finitas de tipo Euler para la variable temporal ^{11,12,13,14}

3. MODELO PARA EL ENFRIAMIENTO DE CUCHARA

Para obtener los perfiles de enfriamiento se modeliza la cuchara como si fuera un recinto radiante constituido por N superficies a temperatura $T_i(t)$ con $i = 1, \dots, N$ que intercambian radiación entre sí. Las hipótesis del modelo son las siguientes:

- 1- dentro del recinto no hay gases que absorban o emitan energía (CO_2 o H_2O).
- 2- las superficies radiantes son grises (es decir la emisividad y la absorptividad son independientes de la longitud de onda de la radiación) y la reflexión es difusa (la radiación es igualmente reflejada en todas las direcciones).
- 3- cada zona i de la cuchara tiene una temperatura uniforme superficial T_i . Esta temperatura T_i es función del tiempo.
- 4- se desprecia la transferencia de calor por convección.

Para determinar el flujo neto de calor ^{10,15} en las distintas zonas en que se dividió la cuchara considere una superficie cualquiera A_i del recinto (ver figura 3-1). Se tiene:

$$B_i = \epsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \epsilon_i) \sum_{k=1}^N \bar{\phi}_{ik} B_k \quad (5)$$

$$H_i = \sum_{k=1}^N \bar{\phi}_{ik} B_k \quad (6)$$

$$q_i = B_i - H_i \quad (7)$$

Para obtener los valores de B_i se resuelve el sistema de ecuaciones (5), conocidos los valores de $T_i(t)$ en cada superficie. Reemplazando B_i en (6) se obtiene H_i y finalmente de (7) se calcula q_i .

Para determinar los perfiles de temperatura en el interior del refractario se plantea la ecuación del calor en régimen transitorio para cada zona en que se divide la cuchara con las siguientes hipótesis:

1 - la conducción del calor es radial para los cilindros laterales y axial para la tapa y el piso. Cálculos realizados^{16,17} muestran que los gradientes en dirección vertical son muchos menores que los generados por la conducción del calor en sentido horizontal. Por este motivo se considera que los cilindros laterales en que se divide la pared de la cuchara no interactúan con los adyacentes.

2 - como el espesor del revestimiento refractario es mucho menor que el diámetro de la cuchara se emplea una geometría plana para resolver la ecuación del calor.

4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se analizó el precalentamiento de una cuchara dolomítica de 100 toneladas. En las tablas I y II se muestran las características geométricas, la configuración del revestimiento refractario y las propiedades térmicas del acero.

En la figura 1 se muestra el perfil de temperatura de la pared lateral refractaria, calculados para distintos flujos de gas natural. Se observa, para una misma cantidad de combustible quemado, una temperatura interior más alta, a mayor entrega de energía por unidad de tiempo. Por otro lado, la energía almacenada en la pared es mayor en el caso en que se quema un flujo de $100 \text{ m}^3/\text{h}$.

La influencia de la duración del precalentamiento en la disminución de la temperatura del acero debido a las pérdidas por conducción a los refractarios, se muestra en la figura 2, para un tiempo de permanencia de 60 minutos de acero en cuchara y para una masa de gas natural constante de 1000 m^3 y 2000 m^3 . De esta gráfica se concluye que las pérdidas mínimas se obtienen con precalentamientos entre 6 a 7 hs. para 1000 m^3 . Para tiempos menores, con mayores flujos de gas se obtienen mayores pérdidas de energía en los humos que salen de la cuchara (hay menor transferencia). Para mayores tiempos de precalentamiento la pérdida de energía a través de las paredes hacia el medio ambiente aumenta y la energía acumula en el revestimiento disminuye. Para el doble de combustible la pérdida mínima se sitúa para un precalentamiento de alrededor de 15 horas. Esta gráfica se construye en el caso ideal en el cual inmediatamente después del precalentamiento se llena la cuchara con acero. En una situación real, la cuchara espera frente al convertidor para su llenado y allí se observa que las menores pérdidas se obtienen para un perfil de precalentamiento con mayor energía acumulada.

Un resultado importante puede inferirse teniendo en cuenta la baja difusividad de los materiales refractarios. A igual cantidad de energía suministrada, un precalentamiento prolongado asegura el calentamiento de las capas más profundas del revestimiento. Al aumentar la potencia se obtendrán temperaturas más elevadas en la zona cercana a la superficie que intercambia calor con los gases de la combustión (ver figura 1), estando el resto de la pared más fría. Luego del

precalentamiento, durante el tiempo de espera de la cuchara, pueden producirse importantes modificaciones en el perfil de temperatura. Gran parte de la energía confinada en los primeros centímetros de la capa de trabajo se disipará por radiación al medio ambiente, quedando en promedio el revestimiento más frío, que en caso de un precalentamiento más prolongado. Así mismo, al aumentar más rápidamente la temperatura de la cara interna de la cuchara, disminuirá la transferencia de calor, aumentando la energía de los gases que abandonan la cuchara. Este comportamiento general queda manifiesto en la figura 3 que muestra cómo evoluciona la energía por unidad de tiempo contenida en los gases que abandonan la cuchara y en la figura 4 que muestra la energía por unidad de tiempo transferida al revestimiento refractario durante 5 hs de precalentamiento con $200 \text{ m}^3/\text{h}$ de gas natural.

Es interesante analizar el caso de cucharas en régimen térmico estable. Si durante un ciclo regular (ver figura 7), con una cuchara en régimen estable, se produce una espera mayor que 25 minutos, es conveniente realizar un corto precalentamiento para compensar pérdidas y volver al régimen estable. En la figura 5 y 6 se muestran los resultados de precalentamientos de media y una hora, para distintos tiempos de espera de 40, 60, 80 y 100 minutos, y para distintos flujos de gas natural. En la ordenada de estas figuras se grafica la diferencia de la temperatura del acero al final de la metalurgia con respecto a la misma temperatura en el régimen estable. Así, por ejemplo, una cuchara que estaba en régimen térmico estable, y que debió esperar 60 minutos, volverá a su estado térmico anterior con un precalentamiento de una hora quemando gas natural con un flujo de $350 \text{ m}^3/\text{h}$. Para precalentamientos de media hora, se observa que sólo se recupera el régimen estable en el caso de una espera de 40 minutos y quemando un flujo de gas de casi $600 \text{ m}^3/\text{h}$.

Este conjunto de resultados es una muestra de las posibles aplicaciones de este simulador del ciclo de operación de cucharas de acería. Como conclusión final se podría decir, que mediante la utilización de esta herramienta numérica, convenientemente ajustada a los parámetros de una determinada acería, se pueden establecer reglas de operación para la optimización del proceso.

NOMENCLATURA

H_{cbst}	: entalpía de la combustión
H_{cbr}	: entalpía del comburente
Q_{transf}	: calor transferido a las paredes de la cuchara.
H_{humos}	: entalpía de los gases que abandonan la cuchara.
h	: coeficiente de transferencia de calor por convección.
k_r	: conductividad del refractario.
ρ	: densidad del refractario.
c	: calor específico del refractario.
$E_{g,i}$: energía emitida por un cuerpo negro a T_g y T_i respectivamente
ϵ_g	: emisividad del gas
α_g	: emisividad y absortividad del gas
B_i	: radiocidad de la superficie A_i (energía emitida + reflejada)
H_i	: flujo de radiación incidente sobre la superficie A_i

- q_i : flujo neto de radiación en la superficie A_i
 ϵ_i : emisividad de la superficie A_i
 Φ_{jk} : factor de configuración geométrico. Representa la fracción de la energía emitida por A_j que es interceptada por A_k

BIBLIOGRAFIA

1. Gastón A., Laura R., Medina M. "A Model and Numerical Analysis for Predicting The steel Temperature and Thermal State of Casting Ladles". *Proc. 6th Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing Industries, Buenos Aires*. Pergamon Press, Vol 1, (1990), 231 - 235.
2. Gastón A., Laura R., Medina M. "Thermal Cycle of Continuous Casting Ladles: A Mathematical Model for Predicting the Steel Temperature during the Tapping and the Filling Period". *Latin American Applied Research*. Vol 23, (1993), N°3.
3. Gastón A., Medina M. "Comportamiento Térmico de Cucharas de Acería. Simulación Numérica de Ciclos de Operación". *Bol. Soc. Española de Cerámica y Vidrio*, 32 (1993) 5,311-316.
4. Gastón A., Medina M. "Comportamiento Térmico de Cucharas de Acería. Refractarios de Alta Alúmina, Dolomita, Magnesita y Magnesita-Carbono". *Bol. Soc. Española de Cerámica y Vidrio*, (1993). Publicación en prensa.
5. Pfeifer H., F. Fett, H. Schafer, and K Heinen. "Heating-up model for Steel Casting Ladles". *Stahl und Eisen*, 105, (1985), N° 14/15, 759 - 764.
6. Furet J., and J. Mignon. "Preheating of the Steel Ladle". *Metall. Rep. CRM*, N°37(1973), 3-11.
7. Thorildsson S. "Preheating of Ladles". *Scandinavian Journal of Metallurgy* 2, (1973), 277-281.
8. Chone J. and F. Teyssier. "Le Prechauffage des Poche a L'Acierie. Programme de Calcul HADES". *Rapport IRSID RE 442* (1975).
9. Hottel H. and A. Sarofim. *Radiative Transfer*. Mac Graw Hill, New York (1967).
10. Siegel R. and J. Howell. *Thermal Radiation Heat Transfer*. Mac Graw Hill, New York (1972).
11. Thomée V. *Galerkin Finite Element Methods for Parabolic Problems*. Springer Verlag. New York (1984).
12. Ciarlet P.G. *Numerical Analysis of the Finite Element Method*. Les Presses de L'Université de Monreal (1975).
13. Zienkiewicz O. C. *El Método de los Elementos Finitos*. Editorial Reverté, Barcelona (1980).
14. Glowinsky R. *Numerical Methods for Non Linear Variational Problems*. Springer Verlag, New York (1984).
15. Szekeley J. and N. J. Themelis. *Rate Phenomena in Process Metallurgy*. J. Wiley, New York (1971).
16. Szekeley J. and J. W. Evans. "Radiative Heat Loss from the Surface of Molten Steel Held in a Ladle". *Trans. of the Metallurgical Society of Aime*, Vol. 245, (1969) 1149-1159.
17. Birat J. and J. Petegnief. "Comportement Thermique de l'Acier, de la Poche et du Repartiteur de Coulée Continue". *Rapport IRSID RE 1358* (1987).

TABLA I
CARACTERISTICAS GEOMETRICAS DE LA CUCHARA

Altura	$\bar{H} = 2.6715 \text{ m}$ (Ajusta volumen total de la cuchara)
Diámetro	$\bar{D} = 2.735 \text{ m}$
Altura del acero en la cuchara	$H_a = 2.1889 \text{ m}$ (Ajusta área lateral de transferencia de calor)

TABLA II
CARACTERISTICAS DEL REVESTIMIENTO REFRACTARIO Y DEL ACERO

P A R E D E L A T E R A L	Capa de Trabajo	Alta Alumina	Dolomita	Magnesita (96%)	MgO - C (C 10%)
		L = 155 mm $\rho = 2900 \text{ kg/m}^3$ c = 1045 J / kg °C k = 1.75 W / m °C	L = 155 mm $\rho = 2915 \text{ kg/m}^3$ c = 1100 J / kg °C k = 2.2 W / m °C	L = 155 mm $\rho = 2950 \text{ kg/m}^3$ c = 1212 J / kg °C k = 4.0 W / m °C	L = 155 mm $\rho = 2950 \text{ kg/m}^3$ c = 1212 J / kg °C k = 7.0 W / m °C
P I S O	Capa de Seguridad	Capa de Aislación		Capa de Aislación	
	L = 76 mm $\rho = 2292 \text{ kg/m}^3$ c = 1000 J / kg °C k = 1.4 W / m °C	L = 12.7 mm $\rho = 961 \text{ kg/m}^3$ c = 1000 J / kg °C k = 0.17 W / m °C			

P I S O	Capa de Trabajo	Alta Alumina	Dolomita	Magnesita (96%)	MgO - C (C 10%)
		L = 250 mm $\rho = 2900 \text{ kg/m}^3$ c = 1045 J / kg °C k = 1.75 W / m °C	L = 250 mm $\rho = 2915 \text{ kg/m}^3$ c = 1100 J / kg °C k = 2.2 W / m °C	L = 250 mm $\rho = 2950 \text{ kg/m}^3$ c = 1212 J / kg °C k = 4.0 W / m °C	L = 250 mm $\rho = 2950 \text{ kg/m}^3$ c = 1212 J / kg °C k = 7.0 W / m °C
P I S O	Capa de Seguridad	Capa de Aislación		Capa de Aislación	
	L = 76 mm $\rho = 2292 \text{ kg/m}^3$ c = 1000 J / kg °C k = 1.4 W / m °C	L = 12.7 mm $\rho = 961 \text{ kg/m}^3$ c = 1000 J / kg °C k = 0.17 W / m °C			

ACERO LIQUIDO	$\rho = 7830 \text{ kg/m}^3$	c = 450 J / Kg °C
---------------	------------------------------	-------------------

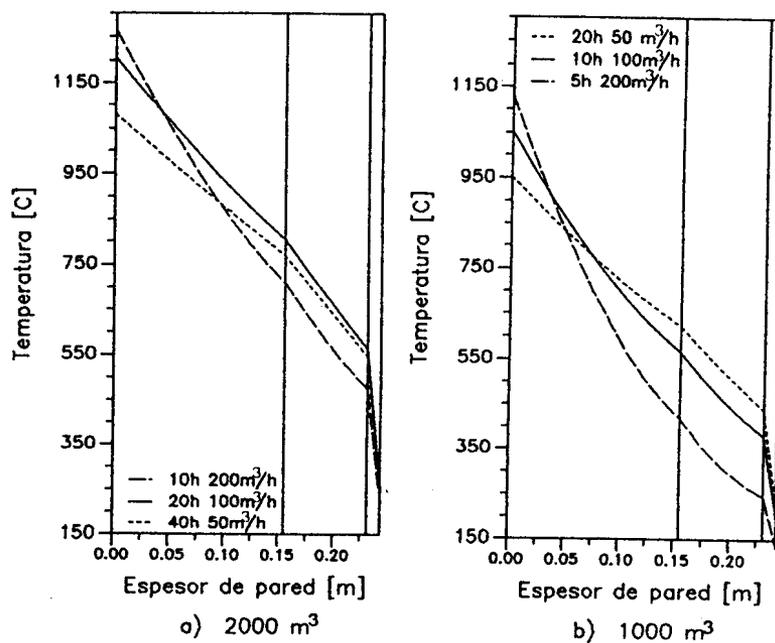


Fig.1: Perfiles de Pre calentamiento

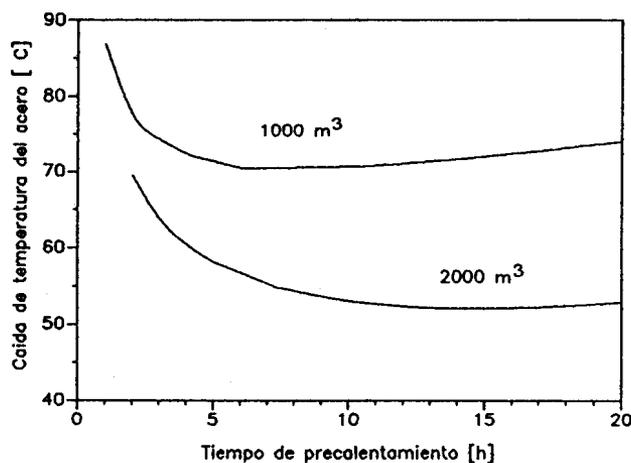


Fig 2: Caída de temperatura del acero despues de permanecer 60 min. en la cuchara en funcion del tiempo de pre calentamiento a flujo constante.

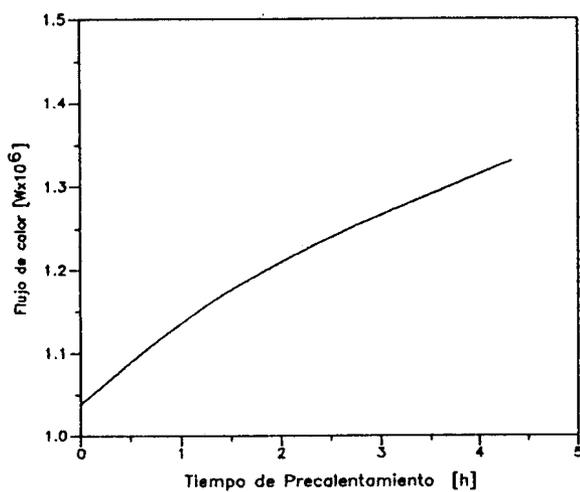


Fig.3: Energía por unidad de tiempo en los gases de la combustión que abandonan la cuchara
Pre calentamiento con gas natural

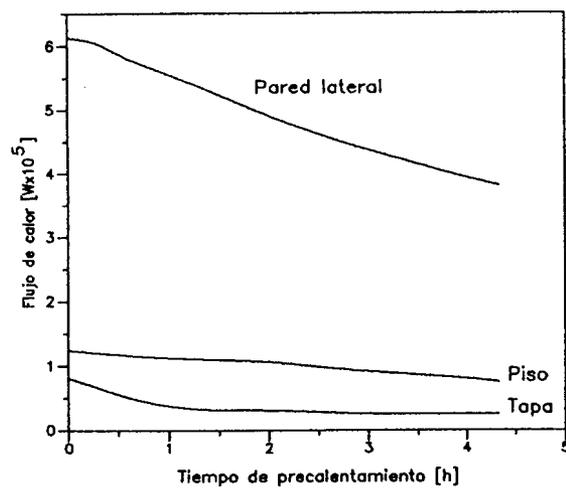


Fig.4: Flujo de calor absorbido por el revestimiento refractario
Pre calentamiento con gas natural

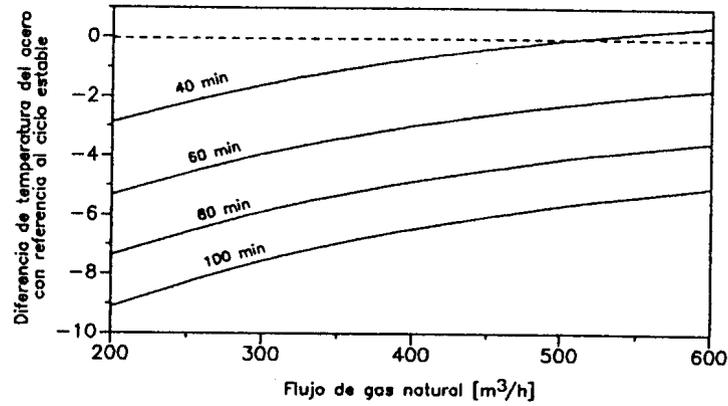


Fig. 5: Pre calentamiento durante media hora, para distintos periodos de enfriamiento de la cuchara luego del vaciado

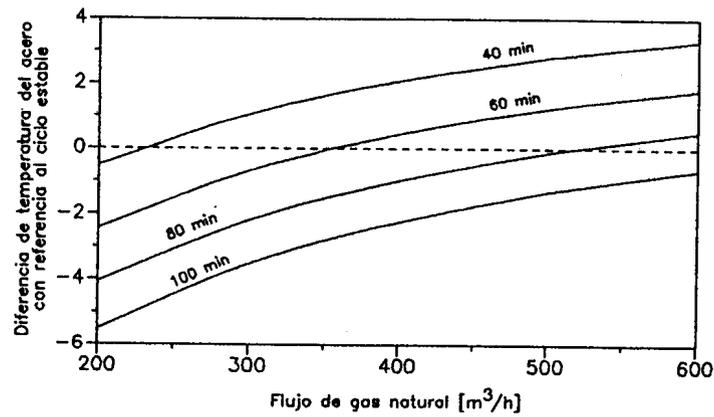


Fig. 6: Pre calentamiento durante una hora, para distintos periodos de enfriamiento de la cuchara luego del vaciado

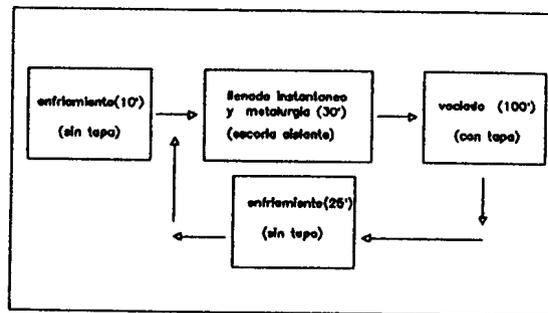


Fig.7: Ciclado de la Cuchara