



TRANSFERENCIA DE CALOR Y TENSIONES TERMICAS EN UNA CUCHARA DE ACERO LIQUIDO. MODELO TEMPCU

Gustavo Sánchez Sarmiento

Departamento de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires
Av. Paseo Colón 850 (1063) Buenos Aires

Analia Gastón

Consejo de Investigaciones, Universidad Nacional de Rosario.
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Av. Pellegrini 250. 2000 Rosario.

Raúl Topolevsky

CITEFA, Villa Martelli, Provincia de Buenos Aires

RESUMEN

En este trabajo se describe un modelo computacional para la determinación la distribución espacial y temporal de la temperatura en una cuchara para colada de acero; la evolución de la temperatura del metal líquido (considerando varios mecanismos acoplados de transferencia de calor y reacciones químicas); y las tensiones térmicas inducidas en el revestimiento refractario como consecuencia de esta distribución. Este modelo (denominado TEMPCU) permite la simulación de un ciclo completo de operaciones que se realizan con la cuchara en una planta de acería: precalentamiento, colado, transporte, vaciado y enfriamiento. El cálculo de las tensiones térmicas se realiza aplicando un modelo analítico simple. Basándose en esta simulación pueden seleccionarse esquemas de operación de una cuchara de acería para lograr un adecuado control de la temperatura del acero y con niveles de tensiones inducidas que no superen los admisibles por los materiales refractarios que componen el revestimiento de una cuchara.

ABSTRACT

This work describes a computational model for the determination of the spacial and temporal distribution of the temperature of a steel casting ladle; the evolution of the temperature of the liquid metal (taking into account some coupled mechanisms of heat transfer and chemical reactions); and the thermal stresses induced in the refractory lining by this distribution. This model, named TEMCU allows the simulation of a complete working cycle of the ladle in the steel plant: preheating, tapping, transport, casting, cooling. The calculation of thermal stresses is performed applying a simple analytical model. Based on this numerical simulation operating schedules can be selected to achieved good control of the temperature of steel in the ladle, with induced stress levels that do not exceed material strength limitations.

INTRODUCCION

Las cucharas de acero que generalmente se emplean para procesos de colada continua están sujetas a muy severas condiciones de carga térmica, fundamentalmente en etapas tales como el precalentamiento, llenado, transporte y refinamiento del acero. Además de los efectos nocivos de ciertos niveles de temperatura que pueden alcanzar los materiales refractarios y el recipiente, las tensiones térmicas producidas en los mismos ante dichas sollicitaciones pueden dar lugar a graves problemas estructurales. Entre estos últimos, la fisuración o rotura de los materiales refractarios, una excesiva flexión del recipiente y una desestabilización de la estructura portante, pueden disminuir la disponibilidad de la cuchara y su vida útil. Por otra parte, un adecuado control de la evolución de la temperatura del metal líquido es de crucial importancia para la calidad del producto resultante y para

la optimización de las operaciones de colado en la acería. Este control es indispensable particularmente para la optimización de las máquinas de colada continua.

El modelo computacional que aquí se presenta (Modelo TEMPCU) tiene por objeto la determinación de la distribución espacial y temporal de la temperatura en una cuchara para colada de acero, en forma acoplada con la evolución de la temperatura del metal líquido, ante operaciones arbitrarias que se realizan en una planta de acería: precalentamiento, colada, transporte, descarga, etc. En una simulación de colada, inicialmente se calcula la variación de la temperatura en el chorro de acero líquido resolviendo por Runge-Kutta una ecuación diferencial ordinaria. El campo no estacionario de temperatura de la cuchara es luego calculado a través de una formulación en elementos finitos bidimensionales axisimétricos, y un esquema de diferencias finitas tipo Crank-Nicolson para la variable temporal. La red de elementos finitos se genera automáticamente en el programa, en base a los parámetros geométricos de la cuchara. En el interior de la cuchara, por encima del nivel de acero líquido se considera intercambio de calor por radiación en forma acoplada con la conducción en la cuchara. El metal líquido ocupa un espacio variable dentro de la cuchara, definido por la variación temporal del nivel del mismo por encima del fondo de aquella. De esta manera se simulan indistintamente diferentes operaciones realizadas con la cuchara, como casos particulares del mismo marco algorítmico. La evolución temporal de la temperatura del metal líquido resulta de un balance térmico acoplado con la determinación de la distribución de la temperatura en los materiales refractarios y en la tapa, en la cual se consideran los efectos de adiciones arbitrarias de minerales durante la colada.

Para el cálculo de las tensiones térmicas inducidas por la distribución de temperatura en cada paso temporal, en alturas arbitrarias de la pared cilíndrica se aplica un modelo analítico simple previamente formulado por A. Gastón y M. Medina [1].

De los resultados de este modelo se pueden seleccionar esquemas de operación adecuados para lograr un buen control de la temperatura del acero, con niveles de tensiones térmicas que no superen valores admisibles para cada material refractario con que se reviste la cuchara.

APROXIMACIONES E HIPOTESIS BASICAS DEL MODELO TERMICO

En la figura 1(a) y 1(b) se indican esquemáticamente los mecanismos de transferencia de calor contemplados en el modelo. El sistema TEMPCU ha sido concebido para cucharas cuya geometría es la indicada en la figura 2 y está basado en las siguientes aproximaciones físicas [2-8]:

1) la geometría del sistema y sus materiales constitutivos son idealizados según un modelo axisimétrico como el mostrado en la figura 2, quedando definido por los siguientes parámetros geométricos y físicos:

- todas las dimensiones que se especifican en dicha figura (algunos espesores pueden ser iguales entre sí, simplificándose la geometría);
- las constantes termofísicas de cada uno de los materiales involucrados: conductividad térmica, densidad y calor específico;
- el coeficiente de transferencia térmica pelicular de la superficie interior de la cuchara, referido tanto al acero líquido como al aire;
- las emisividades del acero líquido, de la escoria, de la pared interior y de la tapa de la cuchara;
- una temperatura exterior al recipiente uniforme, junto con un coeficiente de transferencia térmica uniforme y constante sobre la superficie exterior;

La simetría del sistema implica que se desprecian eventuales detalles geométricos no axisimétricos. Puede considerarse opcionalmente la remoción de la tapa, dependiendo del proceso simulado.

2) La etapa de sangrado queda definida solamente por el tiempo en que ésta se produce y por la masa total del acero líquido volcado, su temperatura, su densidad y su calor específico.

10) Cálculo de la variación de la temperatura del metal líquido, en base a un balance de energía calórica en el seno del mismo

11) Impresión y graficación de resultados varios

HIPOTESIS BASICAS DEL MODELO TERMOMECANICO ANALITICO

El modelo termomecánico empleado para la determinación de las tensiones térmicas en el revestimiento refractario y la carcaza se basa en la superposición de dos estados de tensión plana [9,10]:

- el estado de tensiones que se generan en un disco cilíndrico libre de tracción en su superficie, debido a una distribución de temperatura que depende del radio del disco,
- el estado de tensiones que se originan en un cilindro largo con radio interior a y exterior b sometido a una presión interior y exterior, uniformes en su superficie.

Generalmente la cuchara está constituida por una serie de capas cilíndricas concéntricas de materiales con distintas propiedades termomecánicas. Como la temperatura media de cada capa disminuye hacia el exterior, las capas interiores se ven impedidas de expandirse libremente y aparece una presión radial de interacción entre capas adyacentes debida a la diferencia de expansión térmica. Los valores de la presión de interacción entre las capas cilíndricas adyacentes se determinan planteando la compatibilidad de desplazamientos en la interfase entre capas y resolviendo el sistema de ecuaciones resultante.

El modelo termomecánico analítico se encuentra descrito en detalle en [1].

Este modelo se ha incorporado a TEMPCU de forma tal que las tensiones se determinan en tres zonas a distintas alturas de la pared cilíndrica de la cuchara, teniendo cada zona una configuración de capas de material refractario y espesores diferente. Finalizado el cálculo de la distribución de temperatura en el revestimiento de la cuchara se calculan las tensiones térmicas inducidas por la distribución resultante en cada paso de tiempo.

EJEMPLO DE APLICACION

Se presenta a continuación los resultados de la simulación de un ciclo completo de operación de una cuchara de acería realizada con el sistema TEMPCU. Se han elegido las salidas por pantalla más representativas, que dan una idea global de la potencialidad del modelo y de la diversidad de situaciones que éste puede contemplar.

La entrada de datos se realiza íntegramente mediante manejo de cursor en pantalla, pudiéndose partir si se lo desea de algún archivo de datos que previamente puede haber sido almacenado durante una corrida anterior.

La figura 3 muestra la red de elementos finitos, generada automáticamente por el programa. Por su parte, la figura 4 indica cómo evoluciona el nivel de acero líquido en la cuchara para simular las etapas de: a) llenado, b) transporte y metalurgia, c) vaciado y d) enfriamiento posterior al vaciado.

La distribución de isoterms en el revestimiento refractario para cuatro instantes de tiempo, que se corresponden con las etapas de trabajo antes mencionadas, se muestran en la figura 5. Puede definirse en forma interactiva la cantidad de pasos de tiempo entre gráficos de isoterms. En la figura 6 se grafica las evoluciones de la temperatura del acero y la de algunos puntos de la cuchara durante el ciclo de operación. La elección de la cantidad de puntos y su posición (nodos) se realiza en forma interactiva por pantalla.

Finalmente la figura 7 muestra cómo evoluciona la tensión térmica circunferencial inducida por la distribución de temperatura en la cuchara durante su ciclado, en varias posiciones radiales a una determinada altura.

3) Un ciclo completo de operación que puede simularse con TEMPCU está constituido por las siguientes etapas: a) sangrado, b) cuchara llena de acero, c) vaciado de la cuchara y d) enfriamiento de la cuchara posterior a la finalización del vaciado. Cada una de estas etapas queda definida por sus correspondientes lapsos de tiempo. Pueden simularse también ciclos incompletos especificando con lapso de tiempo nulo la o las etapas faltantes.

4) El metal líquido ocupa un espacio de la cuchara variable en el tiempo, definido por la variación temporal del nivel del mismo por encima del fondo de la cuchara. De esta manera se simulan indistintamente las etapas enumeradas anteriormente, como casos particulares del mismo marco algorítmico.

5) La temperatura del metal líquido es considerada uniforme, dada la elevada agitación a la que el mismo es sometido.

6) La transferencia de calor dentro de la cuchara y de los materiales refractarios se realiza por conducción, en ambas direcciones radial y axial simultáneamente sin hipótesis especiales sobre la dirección del flujo.

7) Se supone que la escoria por encima del metal líquido tiene en todo momento una temperatura igual a la de aquél.

8) En el espacio por encima del metal líquido (y por ende de la escoria), se supone que la transferencia de calor se realiza por radiación entre la superficie interior de la cuchara, la superficie superior de la escoria, y eventualmente la superficie inferior de la tapa.

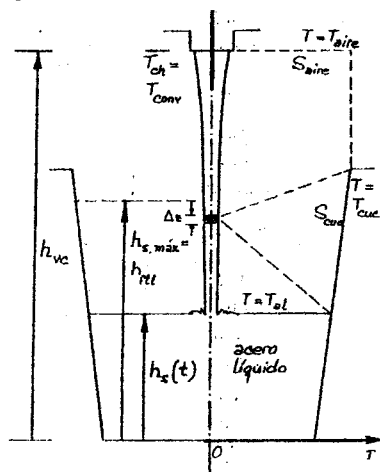


Figura 1(a): Mecanismos de transferencia de calor en el chorro de acero líquido.

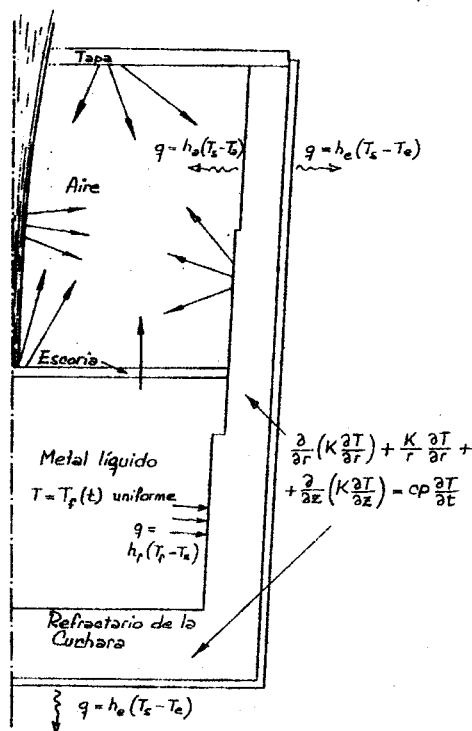


Figura 1 (b): Mecanismos de transferencia de calor contemplados en el modelo

9) Durante el llenado de la cuchara se simula radiación de calor hacia las paredes interiores, proveniente del chorro vertical del metal líquido.

10) La evolución temporal de la temperatura del metal líquido resulta de un balance térmico simultáneo con la determinación de la distribución de temperatura en los materiales refractarios y en la tapa.

PASOS FUNDAMENTALES DEL MODELO TERMICO Y METODOS NUMERICOS EN LOS QUE ESTA BASADO

Los pasos básicos que ejecuta el programa son los siguientes [2]:

1) especificación por parte del usuario de los siguientes datos en forma interactiva a través de manejo de cursor en pantalla:

- datos geométricos de la cuchara;
- datos de las operaciones a simular;
- temperatura, masa, densidad y calor específico del acero líquido volcado;
- lapsos de tiempo de cada etapa;
- propiedades termofísicas de los materiales;
- emisividades de los materiales, temperatura del aire;
- control de discretizaciones temporales y espaciales; y
- datos sobre las condiciones iniciales y sobre las condiciones de contorno.

2) Generación automática de la red de elementos.

3) Resolución numérica de la transferencia de calor en el chorro de acero líquido durante el sangrado mediante el método de Runge-Kuta.

4) Graficación de la variación de temperatura en el chorro de acero líquido.

5) Especificación por parte del usuario de los siguientes datos en forma interactiva a través de manejo de cursor en pantalla:

- datos para el cálculo del efecto térmico de las adiciones durante el colado;
- cantidad de cada uno de los elementos contenidos en el vuelco y en la cuchara;
- variación de la temperatura de la cuchara por agitado, en función del tiempo;
- instantes inicial y final con la tapa de la cuchara colocada

6) Cálculo del efecto térmico de las adiciones de minerales durante el colado, a partir de los datos ingresados y de las características energéticas de las reacciones químicas involucradas

Los pasos 7) a 11) se repiten para cada paso de tiempo:

7) Fijación del nivel de metal líquido y de la capa de escoria para ese paso de tiempo, de acuerdo con la etapa del proceso bajo simulación.

8) Determinación de los flujos calóricos por radiación en el espacio por encima del metal líquido.

9) Resolución de la ecuación de conducción del calor en las paredes de la cuchara, mediante una formulación en elementos finitos para la discretización temporal de la variable espacial, y un esquema en diferencias finitas tipo Crank-Nicolson para la variable temporal.

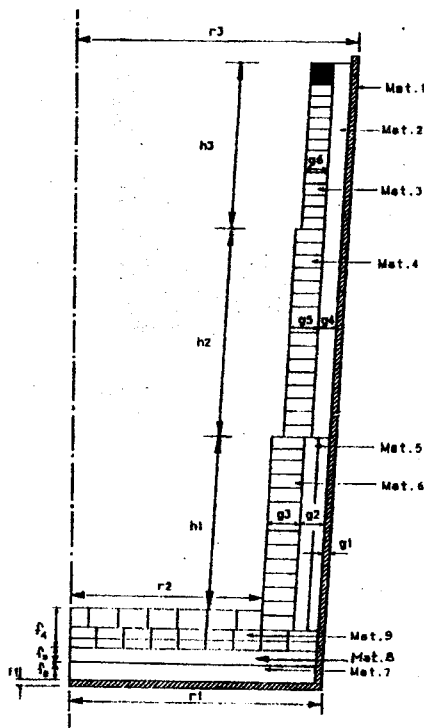


Figura 2: Parámetros geométricos que definen la configuración de la cuchara

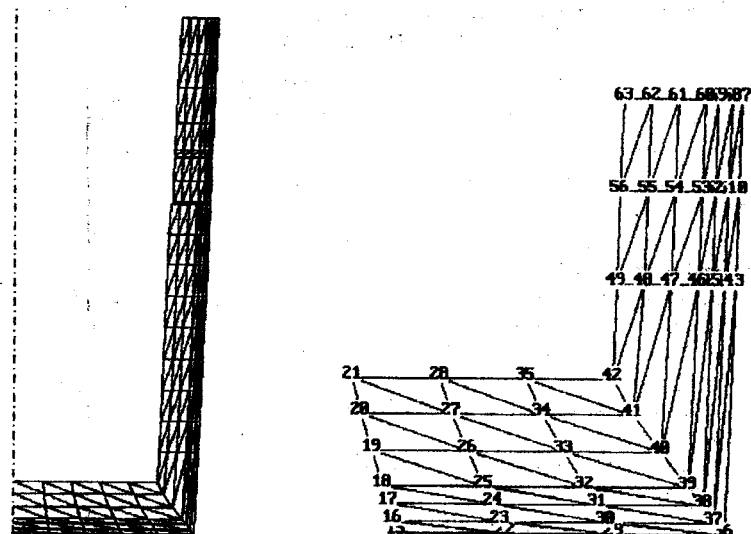


Figura 3: Red de elementos finitos generada automáticamente por el programa TEMPCU y detalle de la misma

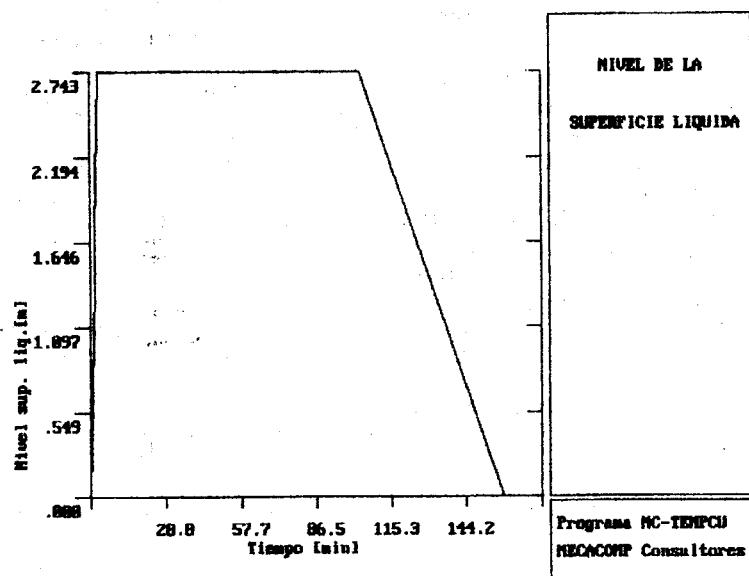


Figura 4: Evolución del nivel de acero en la cuchara para la simulación del : a) llenado; b) transporte y c) vaciado

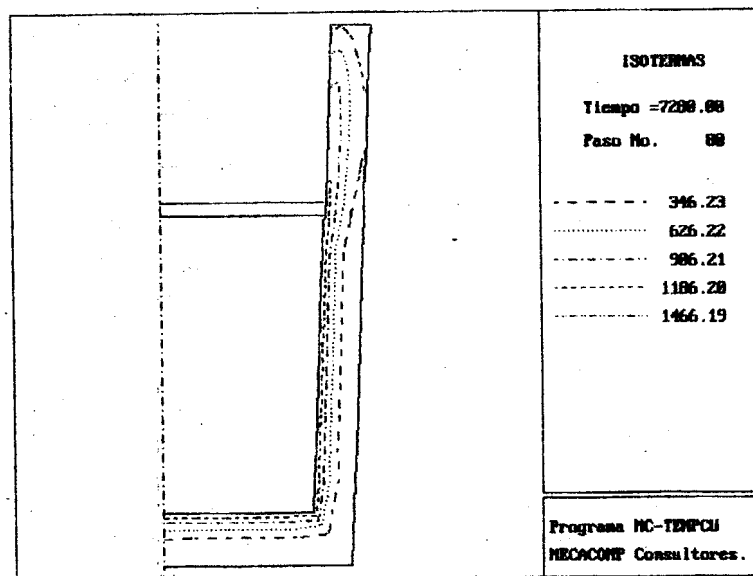


Figura 5(b): Distribución de isotermas en el revestimiento refractario durante el vaciado de la cuchara

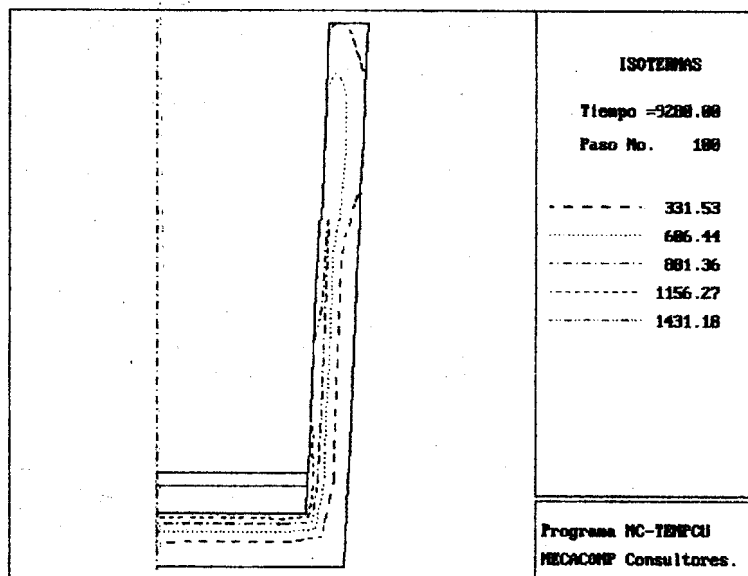


Figura 5(c): Distribución de isotermas en el revestimiento refractario al final de vaciado de la cuchara

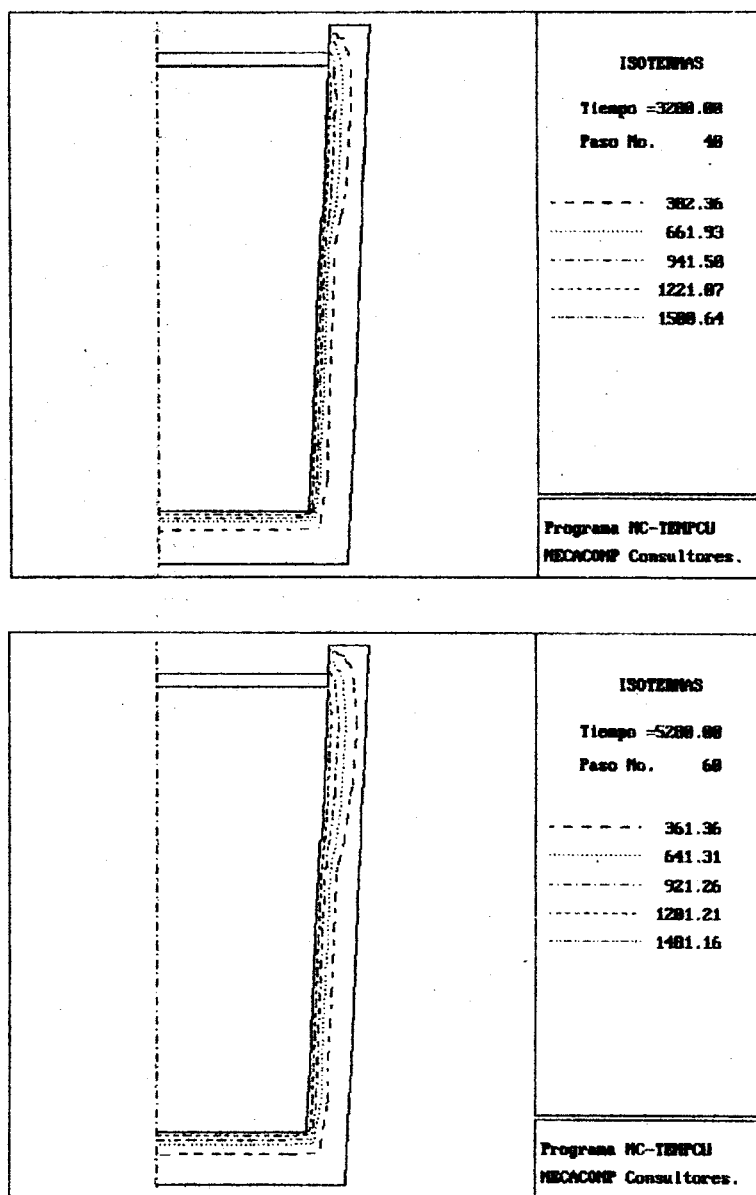


Figura 5(a): Distribución de isothermas en el revestimiento refractario durante la etapa de transporte y metalurgia

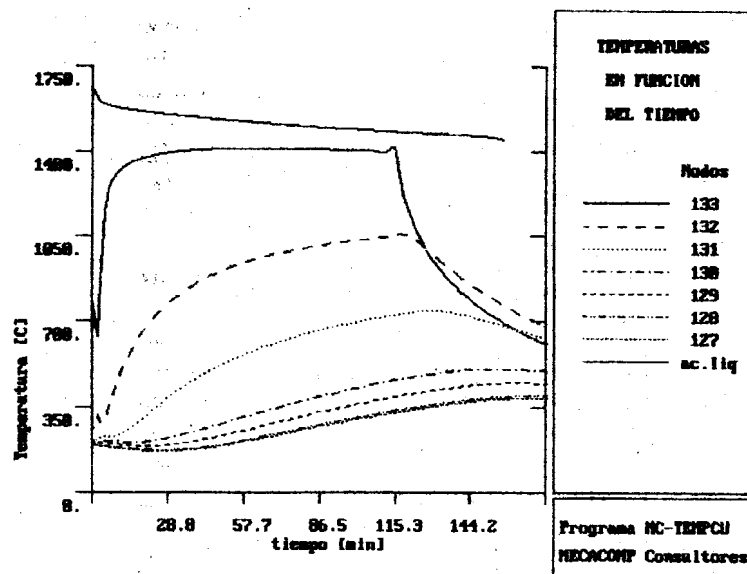


Figura 6: Variación temporal de la temperatura del acero líquido y de algunos puntos de la cuchara durante el ciclo de operación

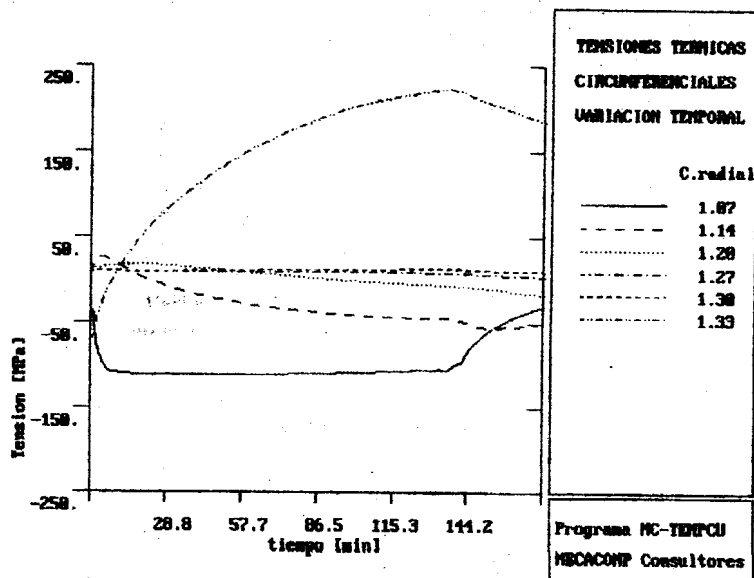


Figura 7: Evolución de la tensión térmica circunferencial en la cuchara durante su ciclado

CONCLUSIONES

El ciclo de operación de una cuchara de acería es un proceso multivariable, cuya evaluación y optimización depende de numerosos factores. La modelización matemática y simulación numérica resulta ser un camino idóneo para profundizar la comprensión de este proceso y asentar las bases cuantitativas para ensayar e implementar cambios en la práctica operativa con el objetivo de optimizar el manejo del parque de cucharas.

Esta simulación puede realizarse con el sistema TEMPCU, desarrollado en lenguaje FORTRAN 77 para computadoras personales tipo IBM PC, con sistema operativo MS-DOS.

Esta herramienta de cálculo, útil en el proceso de colada también tiene campo inmediato de aplicación en otro aspecto de gran relevancia tecnológica y económica, como es una adecuada elección de los refractarios que configuran el revestimiento de la cuchara. Las tensiones inducidas durante el ciclo de trabajo constituyen uno de los principales mecanismos de desgaste de los revestimientos. El seguimiento de la evolución de la temperatura y tensiones de ciertos puntos claves del revestimiento permite fijar criterios referentes al tiempo de servicio de las cucharas a fin de evitar la superación de los límites admisibles, perjudiciales desde el punto de vista estructural y en cuanto a la calidad y limpieza de los aceros colados.

REFERENCIAS

1. Gastón, A. y M. Medina, *Modelado del comportamiento termomecánico de refractarios en aplicaciones siderúrgicas*, Mecánica Computacional, Vol. 15, 1995, AMCA, págs.555-564.
2. Sánchez Sarmiento, G., H. Reggiardo y H. Madias, "IAS-TCUCHARA : Modelo computacional de la transferencia de calor en una cuchara con acero líquido acoplada con la evolución de la temperatura del metal". Informe Técnico de MECACOMP . Octubre 1992.
3. Gastón, A. , R. Laura y M. Medina, *A model and numerical analysis for predicting the steel temperature of casting ladles*, Proc. 6th Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing Industries, Pergamon Press, Vol.1, 1990, págs.231-235.
4. Gastón, A. , R. Laura y M. Medina, *Thermal cycle of continuous casting ladles: a mathematical model for predicting the steel temperature during tapping and the filling period*, Latin American Applied Research, Vol.3, 1993.
5. Gastón, A. y M. Medina, *Comportamiento térmico de cucharas de acería . Simulación Numérica de ciclos de operación*, Bol. Soc. Española de Cerámica y Vidrio, Vol.32, N°5, 1993, págs.371-378.
6. Gastón, A. y M. Medina, *Comportamiento térmico de cucharas de acería . Simulación Numérica de ciclos de operación*, Bol. Soc. Española de Cerámica y Vidrio, Vol.32, N°5, 1993, págs.371-378.
7. Gastón, A. y M. Medina, *Pre calentamiento y enfriamiento de cucharas de acería. Abacos de Operación*, Mecánica Computacional, Vol.14, 1994, págs.392-403.
8. Gastón, A. y M. Medina, *Thermal Modeling of Casting Ladles: High-Alumina, dolomite, magnesite and magnesia-graphite refractories*, Iron and Steelmaker, January 1996, págs.29-35.
9. Schacht, C.A., *Refractory Linings: Thermomechanical Design and Applications*, Marcel Dekker Inc., New York, 1995
10. Bell, D. and F.T. Patis, *Computer modelling of mechanical behavior of refractories in iron and steel-making applications*, UNITERC'89 Proceedings, págs.480-485.

11. **Sánchez Sarmiento, G.**, "MC-TERM : Programa para micro computadoras para conducción del calor dependiente del tiempo en medios bidimensionales por elementos finitos". Informe Técnico MECACOMP N° 16-87. Noviembre 1987.
12. **Basombrio F.G. y G.Sánchez Sarmiento**, "Resolución Numérica por elementos finitos de problemas no lineales de difusión dependiente del tiempo. Código CTRI". SIGMA, Revista de Matemáticas Aplicadas (Universidad de Chile), Vol.5, N° 3-4, 1979, pags.37-54.
13. **Boley, B. and J. Weiner**, *Theory of Thermal Stresses*, Kreiger Publishing Company, Malabar, Florida, 1985.
14. **Fang, Y.C.**, *Foundations of Solid Mechanics*, Prentice-Hall, Inc. New Jersey, 1965.
15. **Sánchez Sarmiento, G. y J. Tormo**, "IAS-LAMINATER: Modelo Computacional para la simulación de la evolución de temperatura en chapas laminadas en caliente". 13 Seminario de Laminación, Mar del Plata, Diciembre 12 al 15 de 1989. Vol.4, Art. XXVIII.
16. **Sánchez Sarmiento, G.**, "IAS-TERMCIL : Modelo Computacional para la evolución térmica y de transformaciones metalúrgicas durante un tratamiento térmico de cilindros de acero". Informe Técnico de MECACOMP para el IAS, N° 3-90. Marzo de 1990.
17. **Sánchez Sarmiento, G.**, "IAS-TERMCARG : Programa para el cálculo de la distribución de temperatura durante el calentamiento de una carga metálica en un horno de proceso". Informe Técnico de MECACOMP para el IAS, N° 5-90. Marzo de 1990.
18. **Pfeifer, H., F. Fett, H.Schafer and K. Heinen**, *Model zur thermischen simulation von stahlgiessepfannen*, Stahl und Eisen, Vol.104, N°14/15, 1984, pags. 1279-1287.
19. **Pfeifer, H., F. Fett, H.Schafer and K. Heinen**, *Heating-up model for steel casting ladles*, Stahl und Eisen, Vol.105, N°14/15, 1985, pags. 759-764.
20. **Lauvray J., Ph. Schittly, C. Zannoni y J. Petegnief**, *Etudes des phenomenes thermiques en poches et en repartituer de coulee continue*, Reveu Metallurgie - CIT, Junio 1985, pags.439-448.
21. **Cardout, J.M.**, *Le suive géographique et thermique des poches d'acier a Solmer*, Reveu Metallurgie - CIT, Marzo 1986, pags.203-210.
22. **J. Petegnief**, *Temperature control for liquid steel for billet and bloom casting: the french experience*, Rapport IRSID, 1988.
23. **Linka, J.W., A.W. Cramb and D.H. Bright**, *A model for predicting the thermal history of a ladle of steel*, Bethlehem Steel Corporation Report, 1986.
24. **Morrow, G. And R. Russell**, *Thermal modelling in melt shop applications: theory and practice*, Ceramic Bulletin, Vol. 64, 1985, pags. 1007-1012.
25. **Day, J and F. Mucciardi**, *Ladle Insulation. An Overview*, Uniterc'89, American Ceramic Society, Vol. 1, 1989, pags. 453-467.
26. **Tomazin C.E., E. A. Upton and R.A. Wallis**, *The effect of ladles refractories and practices on steel temperature control*, I&SM, junio 1986, pags. 28-34.
27. **Wei, M.L. and K.N. Singh**, *Design of refractory lining and steel shell for caster ladles*, Iron and Steel Engineer, Abril 1986, pags. 58-69.
28. **Millet, L.W.**, *Design of refractory lining and steel shell for caster ladles*, Iron and Steel Engineer, April 1986, pags. 58-69.
29. **Schacht, C.A.**, *Improved Mechanical Material Property Definition for Predicting the Thermomechanical Behavior of Refractory Linings of Teeming Ladles*, J. Am.Ceram.Soc.76 Vol.1, 1993, pags.202-206.

30. Schacht, C.A., *Structural behavior of teeming ladles lined with high-alumina refractories*, Iron and Steel Engineer, August 1984, págs.33-40.
31. Chen, E. S. *Thermomechanical Studies of Obround Ladles During Preheating and Use*, I&SM, June 1993, págs.37-43.
32. Rathner, R. Knauder and H. Weissensteiner, *Thermomechanical Behavior of Refractory Linings with Special Emphasis on BOF Vessels*, UNITERC'91 Proceedings, págs.12-16.
33. Chen E., R. Launtensleger and B. Brezny, *Thermomechanical Analysis of a 225-ton BOF - Vessel*, Iron and Steel Engineer, November 1993, págs.43-51.
34. Chen E., J.Knauder and R.Rathner, *Geometry Optimization of a BOF Lining.*, J. Ceramic Bulletin, vol.71, N°1, 1992.
35. Schacht, C.A., *Influence of lining retrain and nonlinear material properties in predicting thermal shock fracture of refractory linings*, UNITERC'89 Proceedings, págs.1286-1316.