

IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO PARA O PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO EM FORNOS ESR¹

Sidinei Colodeti Cristo²
Gilberto Cardozo³
Marco Antonio Rezende⁴

Resumo

Os recentes avanços nos processos de metalurgia secundária (forno panela, VOD, RH, etc...) têm produzido aços com nível de qualidade cada vez maior principalmente sob o ponto de vista de limpeza e desgaseificação, entretanto, para algumas aplicações especiais, além dos requisitos citados, a isotropia e baixo nível de segregação também são exigidos e tais processos pouco podem fazer para melhoria destas características quando da formação da estrutura bruta de solidificação.

O processo de refusão por eletroescória (ESR) é um dos processos de refino que satisfaz com grande êxito os requisitos de limpeza, estrutura e baixos níveis de segregação gerando produtos praticamente isentos de inclusões e com alto índice de isotropia sob o ponto de vista de propriedades mecânicas^(1,2).

Uma das características mais importantes na definição da estrutura bruta de fusão é a distância entre os braços primários e secundários das dendritas. Tal dimensão pode ser diretamente relacionada com o tempo local de solidificação (LST) que é o tempo no qual o material inicialmente na temperatura *liquidus* atinge a temperatura *solidus* ⁽³⁾.

Na busca da otimização do processo com o objetivo de produzir lingotes de excelente qualidade estrutural é, portanto, de fundamental importância o conhecimento do tempo local de solidificação em função dos parâmetros de processo.

Neste sentido, a Villares Metals está desenvolvendo um programa de computador através da implementação de um modelo matemático para determinação do ponto ótimo do processo.

O presente trabalho mostra o estágio atual da implementação de tal modelo e alguns resultados iniciais.

Palavras-chave: ESR, simulação, solidificação e LST.

- 1- Trabalho a ser apresentado no XXXV Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais em maio de 2004 em Salvador BA
- 2- Engenheiro de Processos da Aciaria de Villares Metals S.A. – Sidenor
- 3- Supervisor Técnico do Departamento de Processos Especiais de Villares Metals S.A. - Sidenor
- 4- Gerente de Aciaria de Villares Metals S.A. - Sidenor

1- Introdução

Os recentes progressos no campo dos processos secundários têm elevado a qualidade dos produtos produzidos pelas rotas tradicionais principalmente nos aspectos : limpeza e desgaseificação.

Por outro lado, com relação à solidificação, muito pouco pode ser feito para o controle da estrutura bruta em processos convencionais. Para preencher esta lacuna, produtos com requisitos superiores de limpeza e de estrutura, necessitam passar pela refusão em fornos ESR⁽²⁾.

O processo de refusão por escória eletrocondutora (ESR) tem como objetivo obter produtos de alta qualidade sob o ponto de vista de composição química, limpeza, macrossegregação e de estrutura bruta.

A figura 1 mostra de forma esquemática o forno ESR.

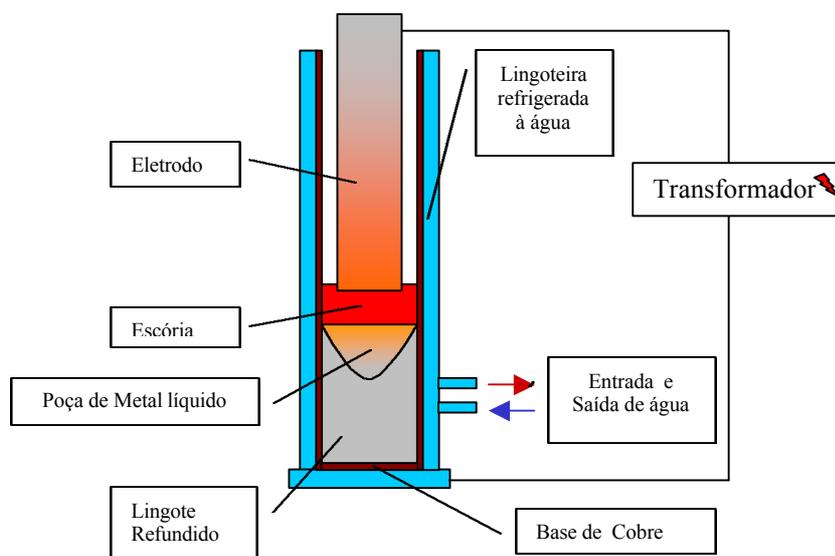


Figura 1 - Desenho esquemático do forno ESR

O processo consiste em refundir um eletrodo sólido através de aquecimento de uma escória eletrocondutora pela passagem da corrente elétrica e posterior solidificação em lingoteira de cobre refrigerada à água.

A refusão em forno ESR é um dos mais importantes processos de refino desenvolvidos para a produção de aços especiais e superligas. As principais razões do seu sucesso são: refusão sob camada de escória que remove elementos não desejáveis principalmente inclusões não metálicas sem alterar a composição química, solidificação controlada de volumes relativamente pequenos de material líquido resultando na formação de um lingote homogêneo, sem defeitos internos e com estrutura refinada e obtenção de produtos que atendam faixas estreitas de tolerância de composição química.

Tais características do lingote refundido são essenciais para superligas e aços especiais que geralmente são utilizadas em aplicações de alta responsabilidade e que requerem alto grau de limpeza e excelentes propriedades mecânicas que em outros processos não podem ser obtidos.

Os produtos obtidos por este processo têm alto grau de isotropia, o que em aplicações como moldes e matrizes são fundamentais para a vida útil e ausência de distorções principalmente após tratamento térmico.

Apesar dos custos adicionais envolvidos, o ESR em muitos casos é competitivo e até superior aos processos convencionais. Isto ocorre devido, principalmente, ao alto rendimento metalúrgico do processo.

Devido às vantagens metalúrgicas, o ESR tem sido usado como uma ferramenta moderna e necessária para a produção de aços especiais e superligas.

Uma das principais características que definem a qualidade da estrutura de solidificação são as distâncias entre os braços primários e entre braços secundários de dendritas. Por sua vez, tais distâncias dependem fortemente do histórico térmico a que o lingote foi submetido.

O tempo local de solidificação (intervalo de tempo no qual a temperatura em um ponto do material varia da temperatura *liquidus* até a *solidus*), segundo Flemings⁽³⁾ pode ser relacionado com as distâncias entre os braços de dendritas e portanto pode ser utilizado para se avaliar a estrutura bruta de solidificação.

O conhecimento do comportamento do tempo local de solidificação (LST) em função das variáveis de processo é, portanto, fundamental para a determinação dos valores ótimos a serem utilizados para a obtenção de lingotes com excelente estrutura.

Neste sentido, muitos esforços foram feitos para desenvolver modelos que descrevem o regime de fluxo de energia para este processo⁽⁴⁻⁷⁾ alguns dos quais são discutidos na próxima seção.

Entre os vários parâmetros de processo, a taxa de refusão, que é velocidade com que a lingoteira é preenchida pelas gotas líquidas, se destaca pela sua importância, pois o LST é fortemente influenciado por tal parâmetro.

Com base no modelo de Ballantyne e Mitchell⁽⁴⁾ foi implementado um *software* capaz de simular a refusão tendo como variáveis principais a taxa de refusão e o diâmetro do lingote.

De posse deste modelo, foi possível determinar o comportamento da curva de LST versus taxa de refusão para lingoteiras de vários diâmetros.

A organização do trabalho encontra-se da seguinte forma: na seção 2 são comentadas as principais características de alguns dos modelos disponíveis na literatura; a formulação matemática e hipóteses assumidas para a implementação do modelo são descritas na seção 3; em seguida são apresentados os principais resultados e discussões e finalmente, na seção 5, são abordadas as principais conclusões obtidas e modificações planejadas para tornar o modelo mais próximo da realidade.

2- Modelos Propostos

Ballantyne e Mitchell⁽⁴⁾ apresentaram um modelo que trata apenas da região do lingote focalizando a poça líquida e que leva em conta a transferência de calor apenas pelo mecanismo de condução. Entretanto, existem correntes de convecção no fluido que também causam transporte de calor. Este mecanismo é considerado aumentando-se artificialmente o valor da condutividade térmica na equação de transporte de calor.

Foi utilizado o método de diferenças finitas implícito para a solução das equações diferenciais de transferência de calor. Tal método permite que o programa atualize as constantes termofísicas usadas em função da temperatura.

Neste modelo o calor latente de solidificação foi levado em conta através de um incremento no calor específico nas regiões onde há metal líquido.

No topo do lingote, a condição de contorno utilizada foi assumida como sendo uma distribuição de temperaturas constante ao longo do tempo já que o processo é quase estacionário. A temperatura central foi fixada em cerca de 150°C a 250°C de superaquecimento para as gotas metálicas que atravessam a escória.

Foi adotado o coeficiente de transferência de calor convectivo entre a superfície lateral do lingote e as paredes do molde para a determinação da condição de contorno nesta interface. Para a obtenção de tal coeficiente, foram levadas em conta as resistências no filme de escória, do vão formado entre lingote e molde, do molde de cobre e da interface água/molde. O valor assumido foi de 556,8 W/m².°C antes da formação do vão. Após a formação do vão, o valor do coeficiente de transferência de calor foi ajustado para obter melhor aderência entre valores medidos e calculados e variou entre 795,4 W/m².°C e 209,3 W/m².°C.

Os autores não esclarecem qual critério foi utilizado para determinar a distância do menisco na qual o vão se forma.

Com relação à condição de contorno da base do lingote, foram feitas simulações para lingote de 1000mm de diâmetro e 4000mm de altura utilizando valores de coeficiente de transferência de calor variando ao longo do processo entre 0 e 418,68 W/m².°C e conclui-se que o efeito da variação do mesmo é muito pequeno sobre o perfil da poça de solidificação quando o processo está em estado quase estacionário. Não é mencionado o critério utilizado para a determinação da variação de tal coeficiente durante o processo.

A figura 2 apresenta a comparação de resultados previstos e perfil da poça de fusão observada experimentalmente para um lingote de 320mm de diâmetro da liga A286. Pode-se observar claramente que a aderência entre os valores previstos e o resultado experimental casos é muito boa.

Dilawari e Szekely ⁽⁷⁾ desenvolveram um modelo matemático que tem como domínio: o eletrodo, a escória, a poça de fusão e lingote sólido. O modelo considera além dos fluxos de energia, os efeitos da interação dos campos elétricos e magnéticos e a movimentação por convecção das fases líquidas.

Para tanto, foram resolvidas as equações de Maxwell e de Navier-Stokes para regime turbulento tanto na poça de fusão como na escória e portanto foi possível descrever os campos de velocidade na escória líquida e na poça metálica.

Para facilitar a resolução do conjunto de equações diferenciais o eletrodo, a escória líquida e a poça metálica foram considerados como possuindo forma cilíndrica, ou seja, a interface entre metal líquido e lingote sólido é horizontal e a ponta do eletrodo em contato com a escória é plana.

O modelo faz um estudo sobre a formação de gotas metálicas a partir do eletrodo e considera o incremento de temperatura na poça metálica devido ao transporte de energia que ocorre quando da agregação das mesmas no banho.

O trabalho utilizou o coeficiente de transferência de calor entre o lingote e a água de refrigeração da lingoteira, entretanto, não há menção sobre o valor utilizado e se foi considerada variação ao longo do tempo.

Entre os principais resultados deste modelo está a determinação das linhas de corrente para uma lingoteira de 70cm de diâmetro que é mostrado na figura 3.

Através da comparação entre a condutividade térmica efetiva obtida pelo modelo e a condutividade térmica molecular verificou-se que a relação entre tais valores varia entre 3 e 5.

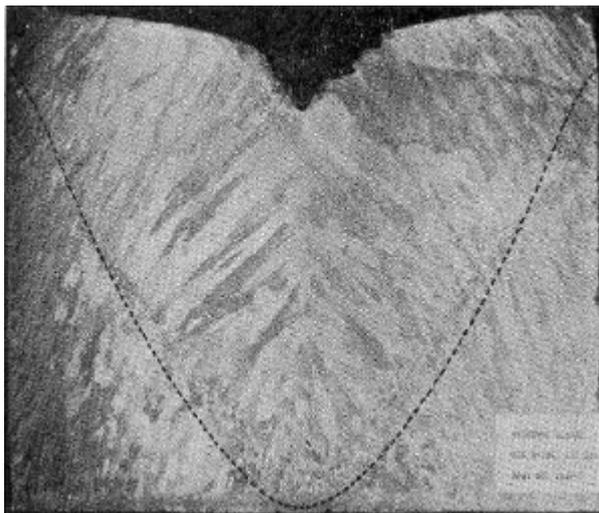


Figura 2 - Perfil da poça de fusão prevista e observada para um lingote de 320mm de diâmetro da liga A286⁽⁴⁾

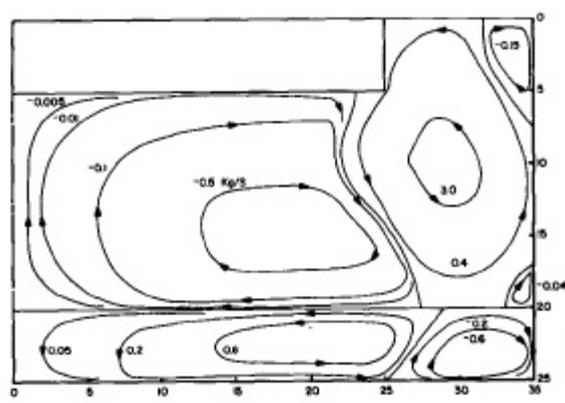


Figura 3- Linhas de iso-velocidades para regime não isotérmico⁽⁷⁾

Os resultados deste modelo sugerem que as forças eletromagnéticas são mais importantes na movimentação de líquidos do que a convecção natural.

O trabalho não apresenta resultados sobre perfis da poça metálica ou campos de temperatura obtidos pois estes são definidos como dado de entrada.

Choudhary e Szekely^(5,6) desenvolveram um modelo que descreve os campos de temperatura e de velocidade e descreve perfis de poça de fusão para fornos de refusão industriais.

O eletrodo, a escória líquida, a poça de fusão e o lingote sólido são o domínio deste modelo que não utiliza a condutividade térmica efetiva como dado de entrada e portanto leva em conta as equações de Maxwell e Navier-Stokes que são resolvidas apenas para a fase escória.

As restrições geométricas do modelo de Dilawari e Szekely foram eliminadas para tornar o modelo mais realístico. Para tanto, a relação expressa pela equação abaixo foi utilizada para a determinação da condutividade térmica efetiva na fase metálica.

$$\left(\frac{K_l}{K_{ml}} \right) = \frac{1}{3} \left(\frac{K_{efe}}{K_{es}} \right)_{\text{médio}} \dots\dots\dots(7)$$

Portanto, é necessário primeiramente resolver as equações de Maxwell e Navier-Stokes na escória para então se determinar a condutividade térmica efetiva na poça metálica.

Foi utilizado o coeficiente de transferência de calor convectivo para modelar a transferência de calor nas superfícies laterais do lingote e escória. Tal coeficiente varia ao longo da altura de forma linear após a temperatura *solidus* ter sido atingida como forma de simular a formação do *gap*. Para regiões de temperaturas maiores que a temperatura *solidus* o coeficiente usado foi de 418,4 W/m².°C e em regiões de temperaturas menores o valor inicial foi 418,4 W/m².°C e final foi 188,3 W/m².°C.

Os resultados mostram que os valores da relação entre condutividade térmica efetiva e condutividade térmica molecular atingem valores da ordem de 87 o que mostra o alto grau de movimentação na escória líquida.

3- Modelo Matemático Utilizado

Como dito anteriormente, foi utilizado o modelo de Ballantyne e Mitchell ⁽⁴⁾ como base para este trabalho. Portanto, não foram considerados os efeitos dos campos magnético e elétrico bem como a movimentação de fluidos devido à convecção natural

Devido à natureza do processo de refusão, os fluxos de calor envolvidos não podem ser considerados como pertencente a um estado estacionário e portanto é necessária a solução das equações de fluxos de calor em regime transiente sob certas condições de contorno.

Assumindo-se que as propriedades térmicas são constantes, a equação diferencial de transferência de calor pode ser escrita em coordenadas cilíndricas como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots(1)$$

Uma quantidade considerável de calor flui pela base da lingoteira que é refrigerada à água. Praticamente não existe o contato direto entre o lingote e a base de cobre pois se observa a presença de um filme de escória que cobre uma área substancial da base. O fluxo de calor que atravessa esta base é equacionado considerando o coeficiente de transferência de calor convectivo associado ao gradiente térmico entre a base do lingote e base de cobre.

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = h_b (T - T_b) \dots\dots\dots(2) \quad 0 < r < R, z = 0, t > 0$$

Através da lateral do lingote a maior parte da energia utilizada no ESR é transferida ao molde refrigerado à água ⁽¹¹⁾. Assim como na base do lingote, existe a presença de um filme contínuo de escória ao longo de toda a superfície. É observa a presença de gap devido à contração de solidificação e que é uma das maiores resistências do sistema ⁽¹¹⁾.

Para tais condições foi assumido que tal condição de contorno é obtida introduzindo-se o coeficiente de transferência de calor associado ao gradiente térmico e é expresso como segue:

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = h_s (T - T_s) \dots\dots\dots(3) \quad r = R, 0 < z < Z, t > 0$$

É assumida a condição de simetria axial e portanto a linha de simetria é considerada uma parede na qual não há fluxo de calor. Portanto, tal condição pode ser expressa por:

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \dots\dots\dots(4) \quad r = 0, 0 < z < Z, t > 0$$

Uma vez que o sistema apresenta regime térmico transiente, é necessária uma condição inicial do campo de temperatura para o lingote quando do início da refusão que pode ser expressa por:

$$T = T_0(r, z) \dots\dots\dots(5) \quad 0 < r < R, 0 < z < Z, t = 0$$

Com relação à zona pastosa (presença de sólido e líquido) existem várias abordagens para a tratar a liberação do calor latente de solidificação. Neste trabalho foi utilizado o calor específico equivalente que leva em conta o calor específico e o calor latente liberado na região entre temperatura *solidus* e *liquidus*.

Pode-se então formular:

$$Cp_i = Cp + \frac{L_H}{T_L - T_S} \dots\dots\dots(6) \quad T_S < T < T_L$$

O método de diferenças finitas descrito na referência 8 foi utilizado para resolver as equações diferenciais.

O coeficiente de transferência de calor da interface molde/lingote considera as seguintes resistências à passagem do fluxo de calor: película de escória formada, molde de cobre, formação de um vão, camada limite no fluxo de água na interface molde/água. O valor considerado foi de 418,4 W/m².°C na região do menisco (interface escória / metal líquido) e decresce a uma taxa de 697,27 W/m².°C⁽⁵⁾ por metro de distância do menisco.

Com relação à base, foi utilizado o valor constante de 200 W/m².°C para coeficiente de transferência de calor.

Na região adjacente ao topo do lingote é assumido que há um perfil de temperaturas constante ao longo do tempo, mas que varia de forma parabólica ao longo do raio. A temperatura utilizada para porção central é de 1650°C e para a região da periferia a temperatura usada foi de 1600°C. Foi utilizado para esta interface o coeficiente de transferência de calor de 12.560 W/m².°C que foi utilizado por Mitchell e Ballantyne⁽¹²⁾.

Uma vez que a movimentação de massa devido à interação dos campos magnético e elétrico e da convecção natural na região líquida não é considerada, é necessária a utilização da condutividade térmica efetiva que neste modelo foi assumida como sendo igual a duas vezes o valor da condutividade térmica do metal líquido na temperatura em questão.

Um problema cuja solução não é trivial é o fato de que o lingote está “crescendo” durante todo o processo, o que torna a geometria do sistema variável com o tempo. Para tratar este problema foi assumido um incremento instantâneo de um elemento diferencial de altura após determinado tempo que depende da velocidade de preenchimento e do valor da altura do mesmo.

Os dados termofísicos tiveram sua variação com a temperatura considerada e foram obtidos a partir da referência 9.

Como mostrado pela equação 6, foi assumido como linear a variação da fração solidificada com a temperatura.

4- Resultados e Discussão

O *software* Delphi 5.0 foi utilizado para a criação do programa executável.

Em todas as simulações realizadas foram utilizados os dados de propriedades físicas do aço inox 316 que é muito semelhante à liga A286, portanto, foi admitido que as duas ligas têm as mesmas propriedades termofísicas.

A figura 4 mostra de forma gráfica o resultado de simulação para lingote de 320 mm de diâmetro em três diferentes alturas (1m, 0,7m e 0,4m). Observa-se pequena diferença na profundidade da poça metálica, confirmando o comportamento quase estacionário do processo.

Comparando-se o resultado da figura 4 com o resultado da figura 2 observa-se que não há concordância pois enquanto a profundidade da poça de fusão da simulação apresentou valor de 120mm, Ballantyne e Mitchell⁽⁴⁾ obtiveram aproximadamente 186mm.

Uma das razões que podem explicar tal diferença pode estar associada com o critério utilizado para a variação do coeficiente de transferência de calor ao longo da altura do lingote. Como já dito anteriormente, foi utilizada uma variação linear.

A condutividade efetiva utilizada no presente trabalho foi igual duas vezes a condutividade molecular enquanto que no trabalho de Ballantyne e Mitchell⁽⁴⁾ foram feitos ajustes neste parâmetro para obter a melhor aderência.

O gráfico da figura 5 mostra a variação do LST em função da taxa de refusão para diferentes diâmetros.

Observa-se que as curvas têm comportamento semelhante aos resultados obtidos por outros modelos^(4,11,12), mostrando a existência de uma taxa de refusão ótima para o mínimo tempo local de solidificação. Verifica-se também que a taxa de refusão que fornece menor LST aumenta com o incremento do diâmetro do lingote.

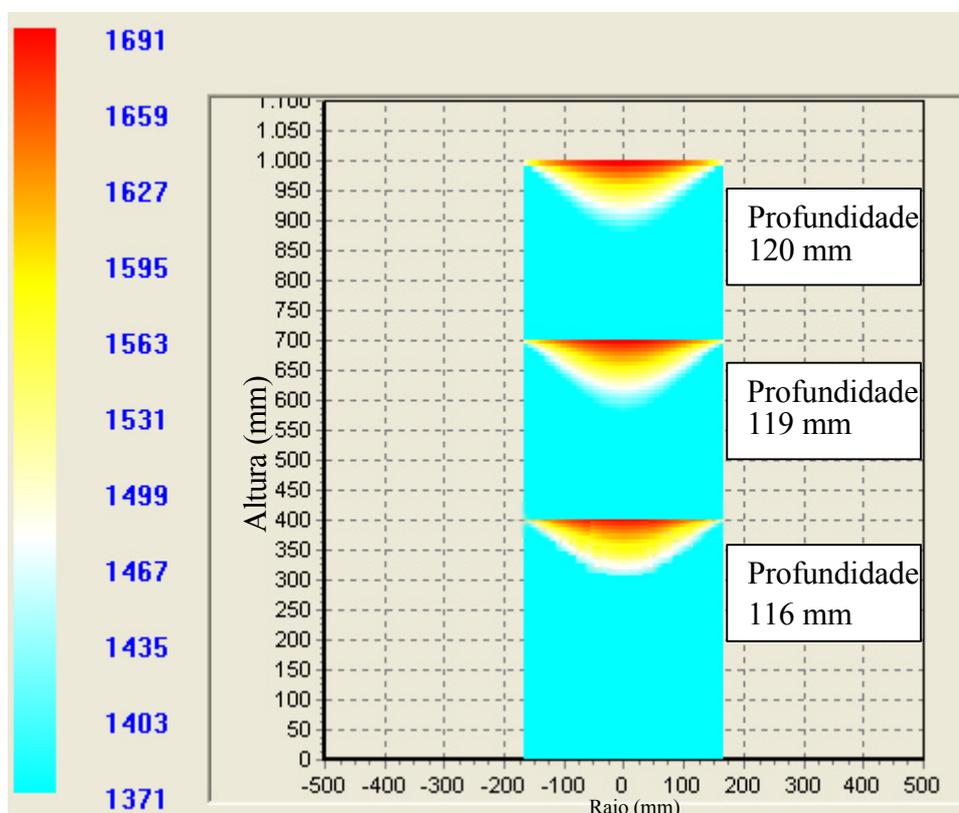


Figura 4- Campo de temperaturas da simulação da solidificação da liga A286 para três diferentes alturas de lingote (1m, 0,7m e 0,4m)

5- Conclusões e Próximos Passos

Diante dos resultados mostrados podemos concluir:

- 1- O caráter quase estacionário do processo foi comprovado;
- 2- O programa criado é capaz de simular a solidificação com razoável confiança;
- 3- Os resultados das simulações feitos comprovaram a existência de um ponto de mínimo na curva LST x taxa de refusão, que é o ponto ótimo de processo sob o ponto de vista estrutural e
- 4- Em condições de mesma taxa de refusão, o aumento do diâmetro do lingote acarreta no aumento do LST.

Dentro do planejamento de evolução deste trabalho temos:

- 1- Realizar experimentos para verificação do modelo;
- 2- Resolver as equações de Navier-Stokes e de Maxwell para determinação da condutividade efetiva;
- 3- Agregar ao programa um modelo para determinação comportamento da segregação e
- 4- Determinar os coeficientes de transferência de calor a partir de princípios físicos.

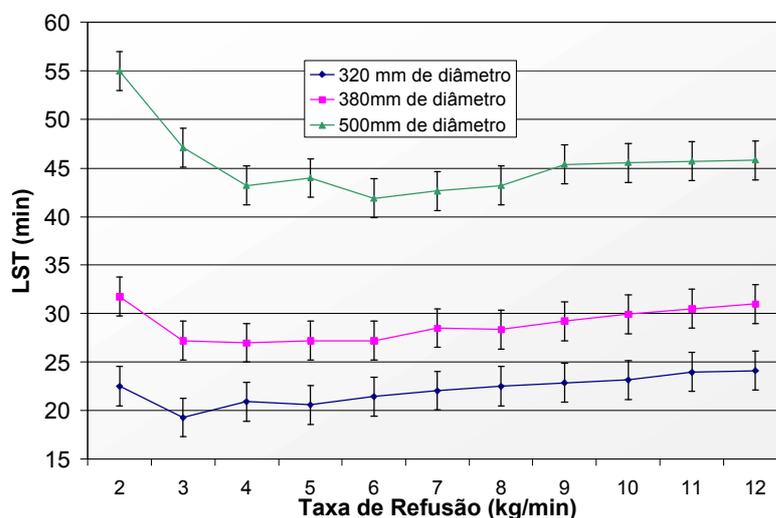


Figura 5 -Comportamento do Tempo Local de Solidificação(LST) em Função da Taxa de Refusão

Referências Bibliográficas

01. SILVA, A.L.C.;MEI R. P. **Aços e Ligas Especiais**. São Paulo: Homart Fotocomposição e Artes Gráficas. 1988. p 394.
02. PLÖCLINGER, E. Electroslag Remelting – A Modern Tool in Metallurgy, **Journal of The Iron and Steel Institute**, p. 533-541, ago. 1973.
03. FLEMINGS, M.C. **Solidification Processing**. Massachusetts: McGraw-Hill. 1974. p.146-154.
04. BALLANTYNE, A.S.; MITCHELL, A. Modeling of Ingot Thermal Fields In Consumable Electrode Remelting Processes, **Ironmaking and Steelmaking**, N. 4, 1977. p. 222-239.
05. CHOUDHARY,M.;SZEKELY,J. Modelling of Fluid and Heat Transfer in Industrial-Scale ESR System, **Ironmaking and Steelmaking** N. 5, 1981 p. 225-232.
06. CHOUDHARY,M.;SZEKELY,J. The Modelling of Pool Profiles, Temperature Profiles and Velocity Fields in ESR Systems, **Metallurgical Transactions B** vol 11B, set 1980, p. 439-453.
07. DILAWARI, A.H.; SZEKELY,J. Heat Transfer and Fluid Flow Phenomena in Electroslag Refining. **Metallurgical Transactions B** vol 9B, mar 1978, p. 77-86.
08. CROFT,D.R.;LILLEY,D.G. Heat Transfer Calculations Using Finite Difference Equation. London: Applied Science Publishers LTD, 1977. p. 69-109.
09. Pehlke,R.D. **Summary of Thermal Properties for Casting Alloys and Mold Materials**.; Springfield, NTIS, 1982. 166 p.
10. GEIGER,G.H.; POIRIER,D.R. **Transport Phenomena in Metallurgy** . California: Addison Wesley Publishing Company, 1973. p.252-254.

11. TAYLOR, C.R.; **Electric Furnace Steelmaking** Iron and Steel Society 1976 p. 191-234
12. MITCHELL, A.; BALLANTYNE, A.S. Factors Affecting Solidification and Ingot Temperatures in ESR, **Proceedings of Sixth International Vacuum Metallurgy Conference on Special Melting** San Diego, California, April 1979 p. 569-598.

Agradecimento

Os autores agradecem ao Professor Dr. Marcelo de Aquino Martorano pelo apoio dado na elaboração deste trabalho.

Lista de Símbolos

T	Temperatura (K)	r	raio (m)	α	Difusividade térmica (m^2s^{-1})
t	Tempo (s)	z	Altura (m)	k	Condutividade térmica ($W.m^{-1}^{\circ}C^{-1}$)
Cp	Calor específico ($J.kg^{-1}^{\circ}C^{-1}$)	L	Calor Latente ($J.kg^{-1}$)	h	Coefficiente de transf. De calor convectivo ($W.m^{-2}^{\circ}C^{-1}$)

Lista de índices

0	inicial	L	Liquidus	S	Solidus
s	superfície	b	base	l	Metal líquido estagnado
ml	Metal em movimento	efe	efetivo	es	escória

Abstract

The late development on secondary metallurgical processes (ladle furnace, VOD,RH, etc..) have been producing high quality steels, especially on the cleanness and degassing point of view. However, some applications ask for other requirements such as low segregation level and isotropic properties and those processes are not able to achieve these requirements when the cast structure is generated.

The electroslag remelting process (ESR) is one of refining processes which rich successfully the cleaning and structure requirements making products without inclusions and with a high level of isotropy on mechanical properties^(1,2).

One of most important features on defining the cast structure is the primary and secondary dendrite arm space. Such dimension can be straightly associated with the local solidification time (LST) which is the time taken by a droplet to cross the *solidus* temperature from the *liquidus* temperature⁽³⁾.

Looking for the optimum process operation in order to produce excellent quality structure it is very important to have the knowledge of how the LST varies with the process parameters.

Therefore, Villares Metals is developing a software by the implementation of a mathematical model to define the optimum process parameters.

This paper shows the present stage of the model implementation and some first results.

Key Words: ESR, Simulation, Solidification and LST.