

APLICAÇÃO DE SOFTWARE DE SIMULAÇÃO PARA O PROCESSO DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO⁽¹⁾

Pedro Henrique Costa Pereira da Cunha (2)

Sergio Luiz Telles Bartex (3)

Vinicius Karlinski de Barcellos (4)

Carlos Alexandre dos Santos (5)

Jaime Alvares Spim Junior (6)

RESUMO

O objetivo deste trabalho consistiu no desenvolvimento e aplicação de um software de simulação para o processo de lingotamento contínuo para ser utilizado como uma ferramenta capaz de simular com precisão e confiabilidade aferidas a solidificação de tarugos de aço, possibilitando a otimização do processo de fabricação dos produtos siderúrgicos. Utilizou-se de um modelo numérico de transferência de calor e solidificação para determinação dos coeficientes de transferência de calor do molde. Para a aferição do software, comparou-se os resultados térmicos gerados pelo simulador com as medidas de temperaturas do processo, obtidas em planta, para diferentes qualidades de aços e com dados reais da espessura de casca solidificada obtidos através de macrografias. As medidas de temperatura foram realizadas com a inserção de termopares ao longo da parede do molde e com uso de pirômetro óptico infravermelho posicionado em diferentes regiões da máquina de LC. O modelo desenvolvido mostrou-se bastante coerente e preciso quando seus resultados foram comparados com os dados reais do processo. Os resultados gerados devem permitir melhoria do processamento com aumento de qualidade, uma vez que esses devem indicar níveis apropriados de temperatura e espessura de casca sólida, nas diferentes zonas de resfriamento, durante a solidificação.

Palavras-chave: Lingotamento contínuo, coeficiente de transferência de calor, solidificação, simulação.

(1) 6° ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. De 24 a 28 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

(II) Estudante de Engenharia Metalúrgica - UFRGS

(III) Estudante de Engenharia Mecânica - UFRGS

(IV) Mestrando - LAFUN / PPGEM / UFRGS

(V) Professor Doutor Adjunto - PUCRS

(VI) Professor Doutor Adjunto - LAFUN / PPGEM / UFRGS

A INTRODUÇÃO

O processo de lingotamento contínuo (LC) do aço constitui-se na solidificação contínua do aço líquido num produto semi-acabado de determinada forma geométrica através da extração de calor imposta ao mesmo. Essa forma geométrica assumida pelo lingote pode ser um tarugo, um bloco, uma placa ou ainda um perfil.

Na produção de aço pelo processo de lingotamento contínuo, as condições de resfriamento ao qual o lingote está submetido quando em contato com a superfície do molde, influenciam nas características mecânicas, estruturais e produtividade do aço lingotado. A determinação dos coeficientes de transferência de calor (h 's) é necessária para um melhor entendimento dos fenômenos que ocorrem na interface metal/molde.

Neste trabalho utilizou-se de um modelo numérico de transferência de calor e solidificação para determinação dos coeficientes de transferência de calor do molde da máquina de LC com o objetivo de desenvolver e aplicar um software de simulação do processo para ser utilizado como uma ferramenta capaz de simular com precisão e confiabilidade a solidificação de tarugos de aço, possibilitando a otimização do processo de fabricação dos produtos siderúrgicos.

MATERIAL E MÉTODOS

O modelo numérico desenvolvido é baseado no Método de Diferenças Finitas (MDF), o qual correlaciona uma analogia entre sistemas térmicos e elétricos (1), aplicado sobre a equação geral de condução de calor (Eq. 1). O sistema corresponde a uma malha bidimensional que trabalha sobre a seção transversal do tarugo. O modelo permite diferentes valores do coeficiente de transferência de calor (h) atuando ao mesmo tempo para cada face do tarugo e também permite que o coeficiente em cada face varie ao longo do processo em função de cada elemento que toca ou circunda o tarugo em cada nível de distância, desde o menisco até o oxicorte. (2).

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = \left(k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q \quad (1)$$

onde ρ é densidade (kg/m^3), c o calor específico (J/kg K), k a condutibilidade térmica (W/mK), T a temperatura (K), t o tempo (s), $\frac{\partial T}{\partial t}$ é a taxa de resfriamento (K/s), x a direção (mm) e q é a fonte de calor associado a mudança de fase.

considerando fluxo de calor bidirecional $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$, chega-se a equação 2:

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = \left(k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q \quad (2)$$

O acoplamento de malha para inserção do modelo matemático é realizado sobre uma seção transversal do tarugo, conforme mostra a Figura 1, e o modelo numérico é aplicado em cada elemento de volume dos planos bidimensionais (xz , yz) por serem os planos que apresentam altas taxas de extração de calor, enquanto que o eixo de condução (z) apresenta simetria nas condições de transferência de calor com as seções adjacentes. (3). A simetria do material e das condições de

extração de calor permite que somente metade da seção transversal seja modelada, assim, possibilitando simular a evolução térmica como um todo. (4).

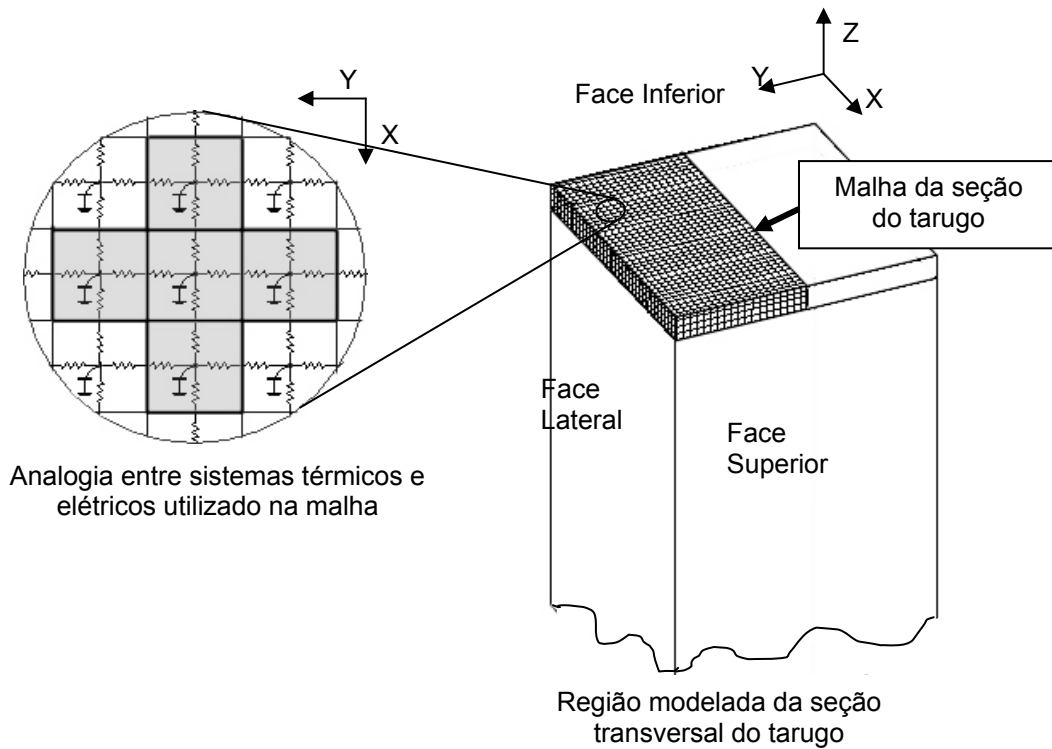


Figura 1 – Esboço representativo do modelo numérico desenvolvido.

As medidas de temperatura do molde foram obtidas a partir do monitoramento do molde de seção quadrada de 240 mm com 30 termopares tipo K inseridos da seguinte maneira: 10 termopares no centro da face de raio externo, 10 termopares no centro da face de raio interno e 10 termopares no centro da face lateral, como ilustra a Figura 2. (2).

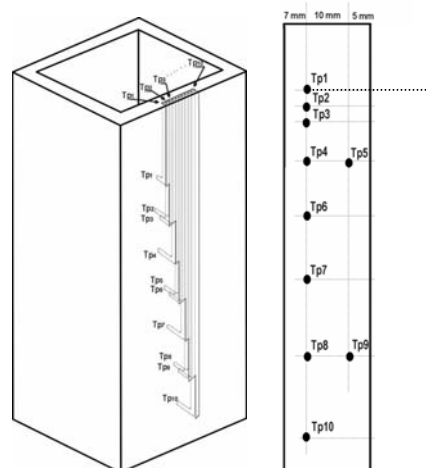


Figura 2. Disposição dos termopares no interior da espessura do molde de cobre do LC.

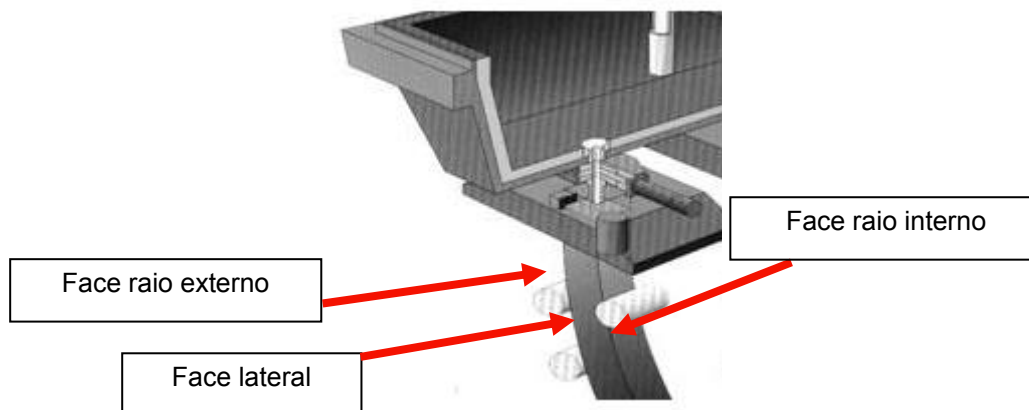


Figura 3 - Desenho representativo da máquina de lingotamento contínuo, mostrando as faces do molde.

Para a obtenção dos resultados de temperatura na superfície do tarugo no lingotamento, foi utilizado um pirômetro óptico portátil. As medidas foram realizadas em um dos veios da máquina de lingotamento contínuo, escolheu-se uma das faces laterais, devido à facilidade e a logística da monitorização. Devido ao fato do sistema de monitorização não permitir medidas contínuas ao longo de toda a dimensão do tarugo, escolheu-se pontos estratégicos para a coleta de dados. Conforme ilustra a Figura 4.

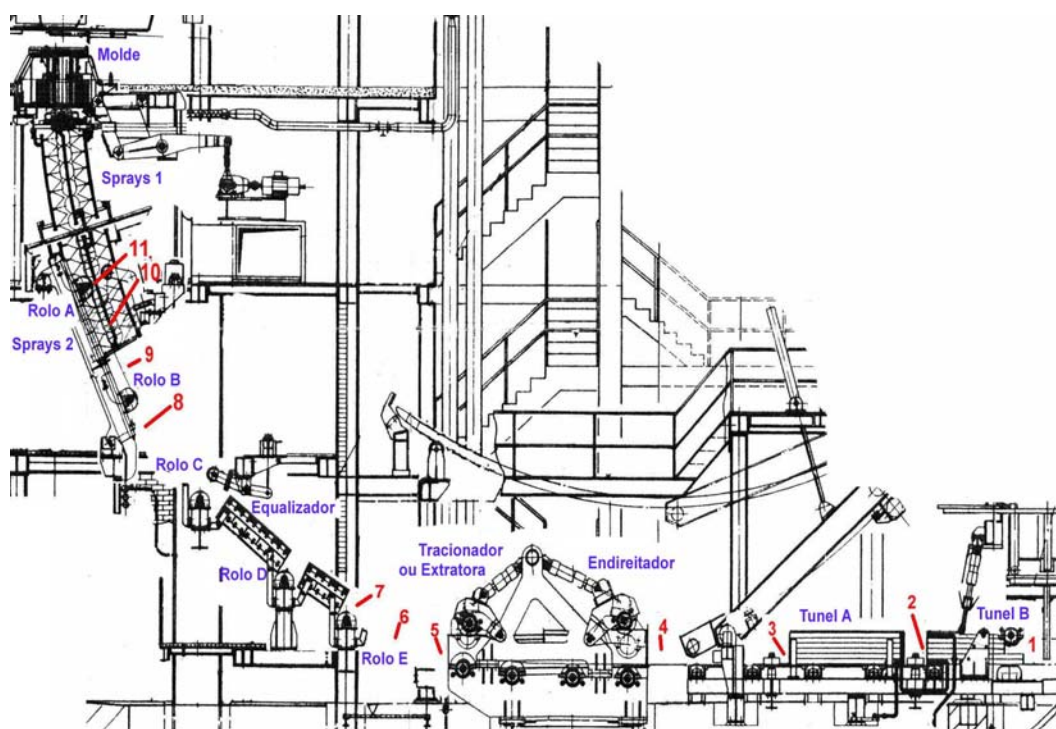


Figura 4 - Vista global lateral da máquina de lingotamento contínuo.

Na tabela 1, observa-se a indicações dos 11 pontos escolhidos abaixo do molde, partindo do primeiro ponto próximo ao oxicorte, até o último ponto na saída do molde. Essas medidas de temperatura posteriormente receberam um filtro, fornecendo um valor médio e o desvio padrão dos resultados obtidos.

Tabela 1 - Levantamento dos pontos monitorados.

Pontos Monitorados	Zonas	Localização
11	Rolo de Apoio A	abaixo do platô
10	Região Livre	abaixo do rolo A
9	Região Livre	acima rolo B
8	Região Livre	abaixo rolo B
7	Rolo de Apoio E	sobre o rolo E térreo
6	Região Livre	antes do extrator
5	Rolo Tracionador 1 e 2	ponto desempenho
4	Região Livre	após extrator
3	Região Livre	antes túnel A
2	Região Livre	após túnel A
1	Região Livre	após túnel B

DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE DE SIMULAÇÃO

O software foi desenvolvido em linguagem de programação C++ orientada a objeto, trabalhando em plataforma windows, possuindo rotinas que acoplam o modelo numérico do fenômeno de transferência de calor e solidificação com uma base de conhecimento dos fenômenos que ocorrem no processo. Esse programa simula a solidificação de tarugos para diferentes qualidades de aço em diferentes condições de processo.

O sistema tem capacidade para armazenar todas as informações físicas relativas ao aço e de utilização interna ao modelo numérico. Ao se projetar o software, uma preocupação inerente foi a possibilidade de permitir que os parâmetros térmicos utilizados, como as temperaturas de transformação, as propriedades termofísicas do metal, entre outros, pudessem vir de diferentes fontes, como valores fixos de literatura, equações empíricas de literatura, e também equações empíricas desenvolvidas internamente na siderúrgica. Este fato permite que o sistema desenvolvido, sirva a um propósito de comparação entre as diferentes informações, e posteriormente se analise qual a mais confiável para o lingotamento em questão. A Figura 5 mostra um exemplo da tela de do programa, onde se observam gráficos que mostram a evolução da temperatura superficial, a evolução da casca sólida ao longo do processo, a taxa de resfriamento, a velocidade de solidificação e o perfil térmico do molde, além de informações específicas da corrida em andamento, apresenta-se também nessa tela um esboço da seção transversal do tarugo e sua evolução térmica na forma de gradientes de cores.

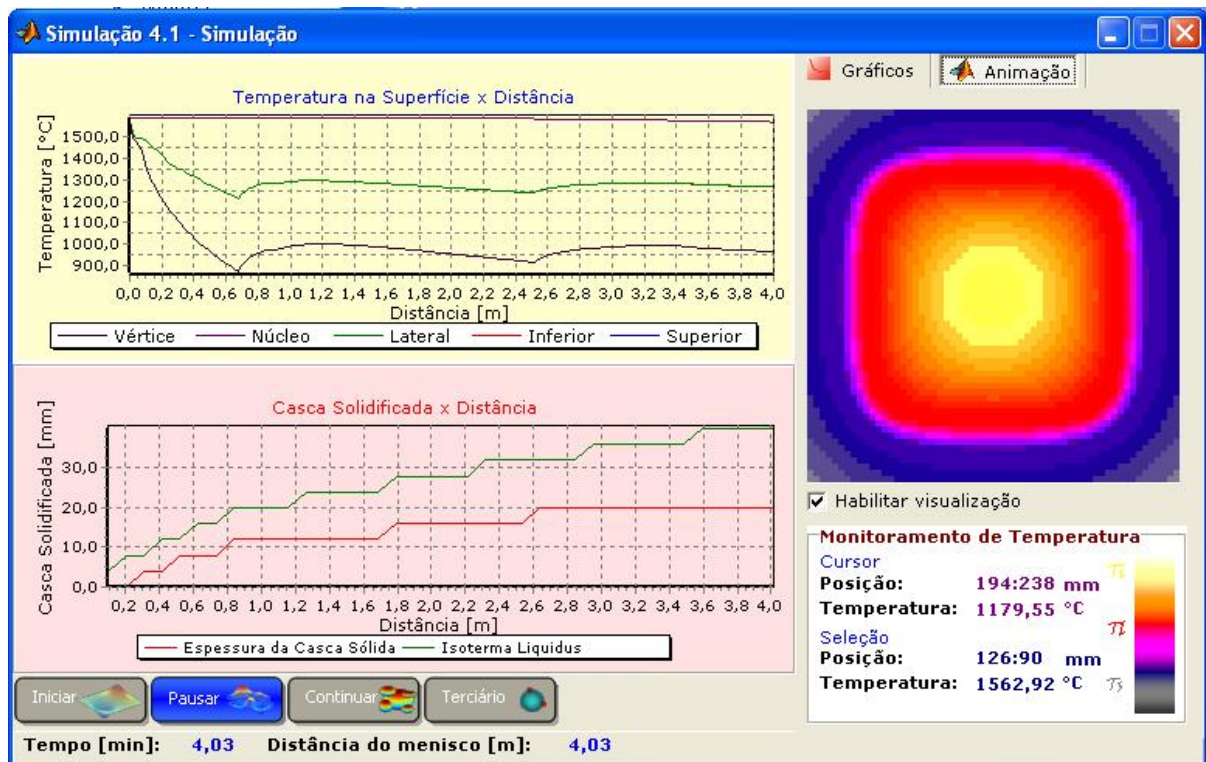


Figura 5 - Tela de simulação do software desenvolvido.

Os resultados finais da simulação são apresentados em forma de relatório, permitindo obter informações do fechamento do poço líquido, espessura da casca solidificada e comportamento térmico de qualquer região no interior e superfície das faces do tarugo. O Programa possui um módulo acoplado ao programa principal chamado módulo molde, este tem como função determinar os coeficientes de transferência de calor (h) ao longo do comprimento do molde para suas diferentes faces.

O programa possui interface gráfica responsável pelo cálculo dos h 's e ao final da simulação, o programa utiliza os valores do coeficiente de transferência de calor (h) ao longo do molde, conforme ilustra a Figura 6.

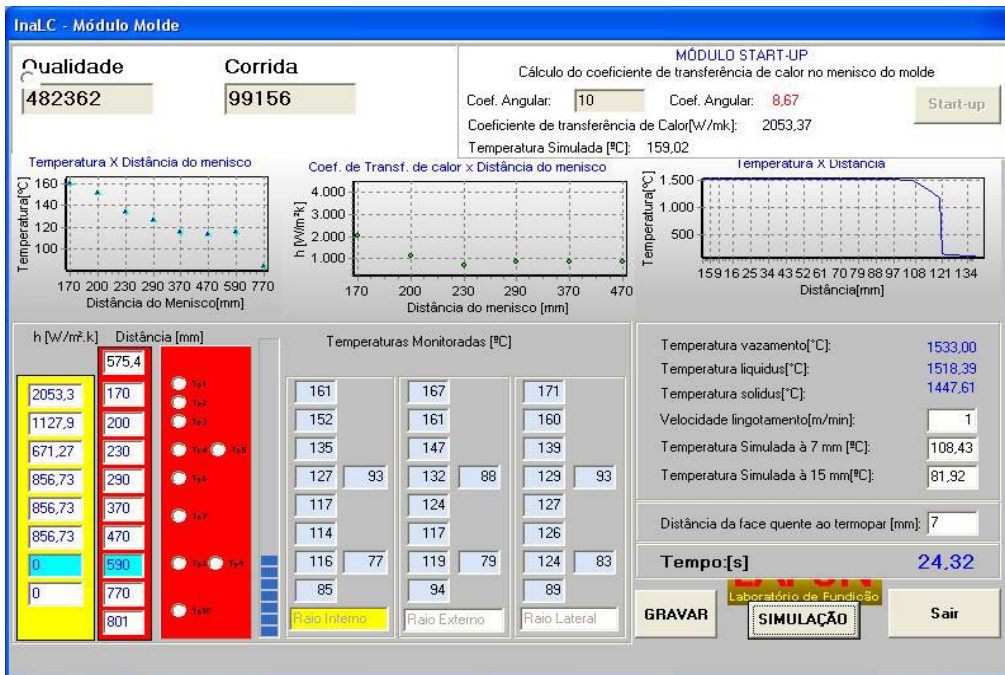


Figura 6 - Tela principal do programa onde observa-se o acompanhamento da evolução da solidificação do tarugo no molde e os coeficientes de transferência de calor.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos pelos termopares inseridos no molde nas faces lateral, face raio externo e face raio interno correspondem a valores de temperatura em função do tempo. Esses dados posteriormente receberam tratamento estatístico, fornecendo um valor médio e um desvio padrão dos valores. Posteriormente essas informações foram utilizadas dentro do modelo numérico para obtenção dos valores dos coeficientes de transferência de calor ao longo do molde. As Figuras 7a, 7b e 7c ilustram os valores brutos de temperatura das 3 faces.

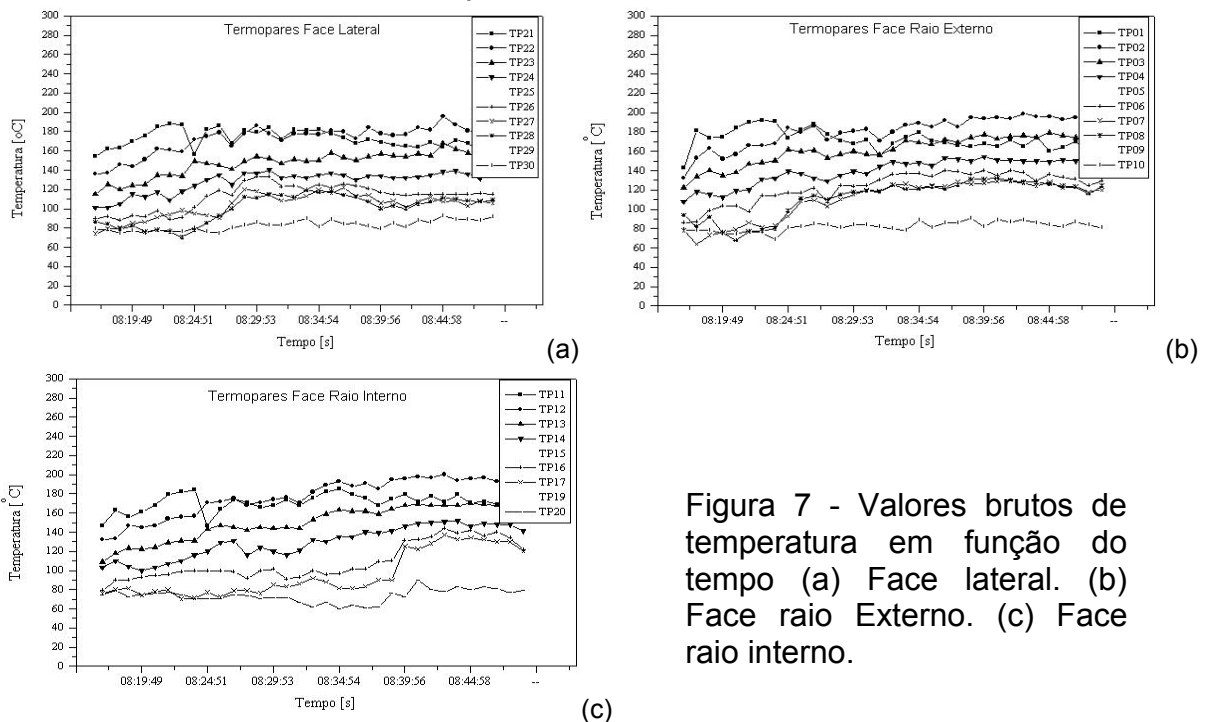


Figura 7 - Valores brutos de temperatura em função do tempo (a) Face lateral. (b) Face raio Externo. (c) Face raio interno.

Para a aferição do software foram monitoradas diversas corridas de diferentes qualidades de aço. Os valores de velocidade de lingotamento (VI) e temperatura de vazamento (Tv) utilizados para simulação correspondem aos valores médios ponderados no tempo, uma vez que, naturalmente apresenta oscilações desses valores ao longo da corrida. A Figura 8 mostra a comparação de uma curva simulada de temperatura em função da distância do menisco de um aço médio carbono, com os valores medidos nos pontos monitorados através do pirômetro ótico. A comparação mostra uma boa concordância das temperaturas experimentais e simuladas.

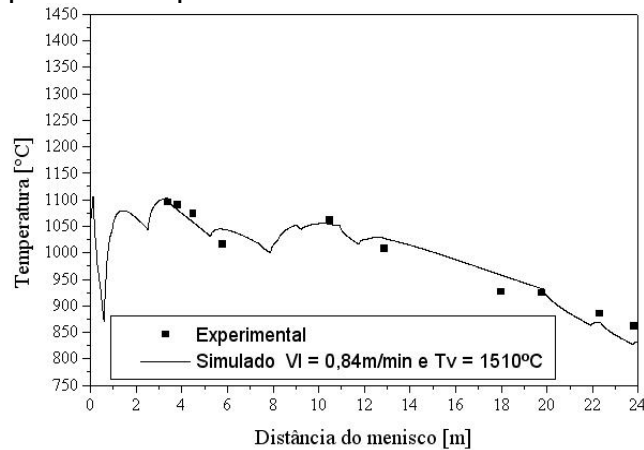


Figura 8 - Comparação entre a curva simulada e os pontos medidos ao longo do processo através do pirômetro ótico.

Os resultados da espessura da casca formada foram obtidos mediante a macrografias. Essas macrografias correspondem à seção transversal localizada a uma determinada distância do menisco, posição esta que possui um agitador eletromagnético, a qual permitiu verificar a espessura da casca solidificada na respectiva distância, lembrando que estas serão significativas, quando o tarugo na distância do agitador eletromagnético, ainda se encontrar na condição de líquido em seu interior. Caso contrário, a macrografia não apresentará nenhum tipo de resultado considerável. A Figura 9 mostra um resultado comparativo esperado entre um macrografia de um aço médio carbono com o perfil térmico obtido durante a simulação de uma corrida.

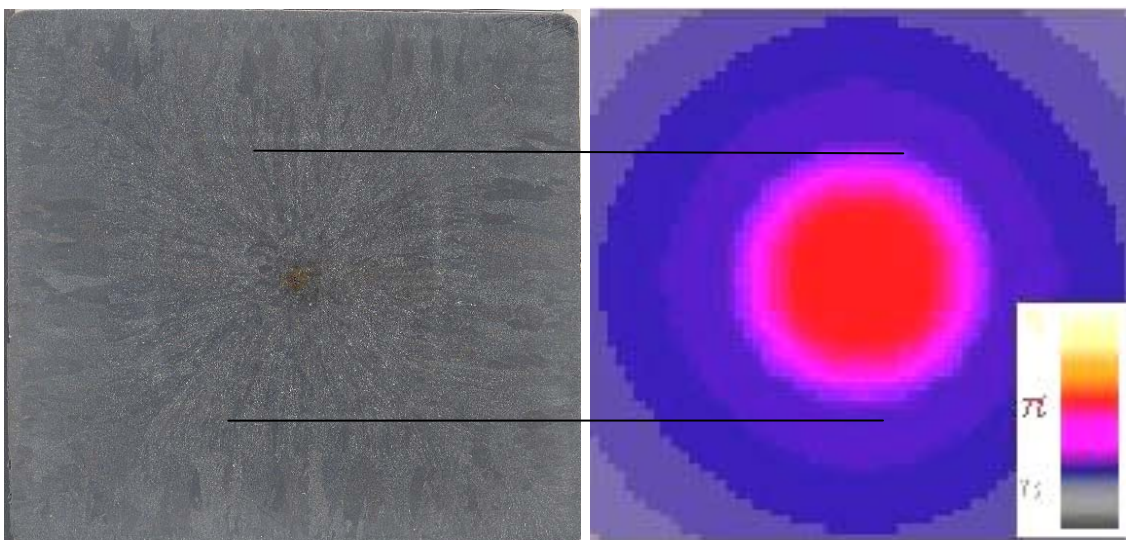


Figura 9 - Comparativo entre uma macrografia e um perfil térmico.

CONCLUSÃO

A metodologia de aferição se mostrou bastante eficiente quando seus resultados foram comparados com os dados reais obtidos na em planta. O desenvolvimento das rotinas numéricas na forma de um software permitiu estabelecer análises para a verificação da influência de diferentes variáveis do processo sobre os resultados do simulador, apontando para o caminho da grande necessidade de se fornecer informações confiáveis para o software, com o objetivo de se obter garantia nos resultados de simulação. Os resultados gerados pelo software devem permitir a otimização do processo de fabricação, uma vez que estes devem indicar níveis apropriados dos parâmetros da máquina de LC como, por exemplo, temperatura de vazamento, velocidade de lingotamento e temperaturas nas diferentes zonas de resfriamento.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), à GERDAU Aços Especiais Piratini (AEP), a toda equipe do Laboratório de Fundição (LAFUN) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ao orientador Prof. Dr. Jaime Alvares Spim Junior e ao Engenheiro Metalúrgico Vinicius Karlinski de Barcellos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SPIM, J. A; GARCIA, A. An optimization of The finite difference method for modeling solidification of complex shaped domains, Mechanical Sciences and Engineering, V.XIX, NO. 3, P. 392-409, 1997.
- (2) KARLINSKI, V. B; FERNANDES, P. C; FOGAZZI, W; COLEMBERGUE, L. A. K; FERREIRA, C.R.F; COCIAN, L. F. E; SANTOS, C. A; SPIM, J. A. Aferição do Software InALC+ com dados Experimentais de Lingotamento Contínuo (LC) da Aços Especiais Piratini (AEP - GERDAU). Trabalho a ser apresentado no XXXVII Seminário de Aciaria - Internacional. De 21 a 24 de maio de 2006, Porto Alegre - RS - Brasil.
- (3) SANTOS, C. A; GARCIA, A; FERREIRA, C. R. F; SPIM JR, J. A. Evaluation of Heat Transfer Coefficients Along the Secondary Cooling Zones in the Continuous Casting of Steel Billets. In: Inverse Problems, Design and Optimization Symposium, Rio de Janeiro. Inverse Problems, Design and Optimization. Rio de Janeiro: E-papers Publishing House Ltd, 2004. v. II. p. 28-35. 2005.
- (4) BARCELLOS, V.K; FOGAZZI, W; FERREIRA, C. R. F; DOS SANTOS, C. A; SPIM, J. A. Desenvolvimento de rotinas para determinação e avaliação dos coeficientes de transferência de calor em um molde no lingotamento contínuo de aços. Trabalho a ser apresentado no 61º Congresso Anual da ABM. Rio de Janeiro - RJ - Brasil. 2006.

APPLICATION OF SIMULATION SOFTWARE FOR THE CONTINUOUS CASTING PROCESS (1)

Pedro Henrique Costa Pereira da Cunha (2)

Sergio Luiz Telles Bartex (3)

Vinicius Karlinski de Barcellos (4)

Carlos Alexandre dos Santos (5)

Jaime Alvares Spim Junior (6)

ABSTRACT

The objective of this work was the development and application of a simulation software for the continuous casting process to be used as a tool capable of simulate with precision and trustworthiness checked the solidification de steel billets, making possible the optimization of the manufacture process of the siderurgical products. A solidification and heat transfer numerical model was used to determine the heat transfer coefficients of the mold. For the software validation, was compared the termal results obtained by de simulator with the process temperatures measures, collected in plant, for different steel qualities and with real data of solid shell thickness obtained through macrographs. The measures of temperature had been carried through with the insertion of thermocouples to long of the wall of the mold and with use of optic infra-red pyrometer located in different regions of the Continuous Casting machine. The developed model revealed sufficiently coherent and precise when its results had been compared with the experimental data gotten in the continuous casting machine. The generated results must allow improvement of the processing with quality increase, a time that these must indicate appropriate levels of temperature and solid shell thickness, in the different cooling zones, during the solidification.

Key-words: Continuous Casting, Heat Transfer Coefficient, Solidification, Simulation

(1) 6° ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. De 24 a 28 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

(II) *Student of Metallurgy Engineering - UFRGS*

(III) *Student of Mechanics Engineering - UFRGS*

(IV) *Master Degree Student - LAFUN / PPGEM / UFRGS*

(V) *PhD Professor - PUCRS*

(VI) *PhD Professor - LAFUN / PPGEM / UFRGS*