

# AFERIÇÃO DO SOFTWARE INALC+ COM DADOS EXPERIMENTAIS DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO (LC) DA AÇOS ESPECIAIS PIRATINI (AEP – GERDAU)<sup>1</sup>

Vinicius Karlinski de Barcellos<sup>2</sup>  
Paulo Carvalho Fernandes<sup>3</sup>  
Wilson Fogazzi<sup>4</sup>  
Luís Augusto Colembergue Kluszo<sup>5</sup>  
Carlos Raimundo Frick Ferreira<sup>6</sup>  
Luís Fernando Espinosa Cocian<sup>7</sup>  
Carlos Alexandre dos Santos<sup>8</sup>  
Jaime Alvares Spim<sup>9</sup>

## Resumo

O objetivo deste trabalho consistiu na aferição de um *software* de simulação para o processo de lingotamento contínuo. Focalizou-se com este objetivo criar uma ferramenta prática e aplicada, capaz de simular com precisão e confiabilidade a solidificação de um tarugo de aço ao longo do processo. Objetivou-se, também, utilizando-se da simulação, mapear a evolução da casca solidificada ao longo das diferentes etapas de resfriamento para tarugo com secção quadrada de 240 mm. Foi desenvolvido um modelo inverso de condução de calor que utiliza técnicas de buscas para determinação dos coeficientes de transferência de calor ao longo do comprimento do molde. Para aferição do modelo numérico de transferência de calor e solidificação, utilizou-se do confronto térmico de resultados gerados pelo simulador com medidas experimentais de temperaturas obtidas em planta para diferentes qualidades de aços. As medidas de temperatura foram realizadas com a inserção de termopares na parede do molde e com uso de pirômetro óptico posicionado em diferentes pontos ao longo da planta industrial. O desenvolvido foi aferido com dados reais de temperatura obtidos no molde e na superfície do tarugo e com dados reais da espessura solidificada obtidos através de macrografias Baumann. Com o desenvolvimento e a aferição do simulador InALC+, os resultados gerados em diversas seqüências de corridas para aços de baixo, médio e alto carbono, permitiram compreender a influência dos parâmetros do processo como: velocidade de lingotamento, temperatura no distribuidor, comportamento térmico no molde, entre outros, os quais influenciam no comportamento térmico durante a solidificação.

**Palavras-chave:** Lingotamento contínuo, Coeficiente de transferência de calor; Solidificação; Simulação.

## VALIDATION OF THE SOFTWARE INALC+ WITH CONTINUOUS CASTING EXPERIMENTAL DATA FROM GERDAU AÇOS ESPECIAIS PIRATINI

### Abstract

The objective of this work is to check the software InALC+ for use in the continuous casting process. It was necessary to simulate accurately the solidification of steel billets along the process. It was also aimed at mapping the evolution of the shell solidification during different stages of heat transfer in 240 mm square billets. A transfer-inverse heat model that uses searching techniques to determine the heat transfer coefficients along the length of the mold was developed. In order to validate the numerical model, a comparison of thermal results generated by the simulator with the experimental measures of temperatures obtained in the plant for different steels grades was conducted. The temperature measurements were carried out with thermocouples inserted directly onto the mold wall as well as with an optical pyrometer placed at different positions along the machine. The simulation was checked with real temperature data obtained in the mold and on the billet surface and with data of the solidified shell thickness observed on Baumann macrographs. With the validation of the InALC+ simulator, the simulated results from several sequences of continuous casting heats for low, medium and high carbon steel grades have helped a great deal with the understanding of the influence of process parameters such as casting speed, tundish temperature, thermal behavior in the mold, among others on the overall thermal behavior during solidification.

**Key words:** Continuous casting; Heat transfer coefficient; Solidification; Simulation.

<sup>1</sup> Trabalho apresentado no XXXVII Seminário de Aciaria - Internacional, 21 a 24 de maio de 2006, Porto Alegre, RS

<sup>2</sup> Mestrando LAFUN / PPGEM / UFRGS - vkbeng@yahoo.com.br

<sup>3</sup> Doutorando, Aciaria GERDAU AEP – paulo.fernandes@gerdau.com.br

<sup>4</sup> Doutorando LAFUN / PPGEM / UFRGS – wilsonfogazzi@hotmail.com

<sup>5</sup> Doutor, Desenvolvimento Tecnológico GERDAU AEP – colembergue.kluszo@gerdau.com.br

<sup>6</sup> MSc. Pesquisador LAFUN / PPGEM / UFRGS - frick@vortex.ufrgs.br

<sup>7</sup> Prof. MSc. ULBRA – cocian@terra.com.br

<sup>8</sup> Prof. Dr. Adjunto PUCRS – carlos.santos@puccrs.br

<sup>9</sup> Prof. Dr. Adjunto LAFUN / PPGEM / UFRGS - spim@ct.ufrgs.br

## INTRODUÇÃO

A determinação das características associadas ao processo de lingotamento contínuo dos aços (LC) constitui-se em um desafio constante. Este processo metalúrgico apresenta alto grau de complexidade, pois associa fenômenos como: solidificação, mudanças de fase, fluxo de calor, escoamento de fluidos e processos termo-mecânicos. Pela natureza do LC, a transferência de calor que ocorre nas diferentes zonas de resfriamento do veio é o principal fenômeno presente. Sistemas de monitoramento e simulação do fenômeno de solidificação do aço têm sido desenvolvidos com o objetivo de quantificar e prever o comportamento térmico do LC.<sup>(1-</sup>

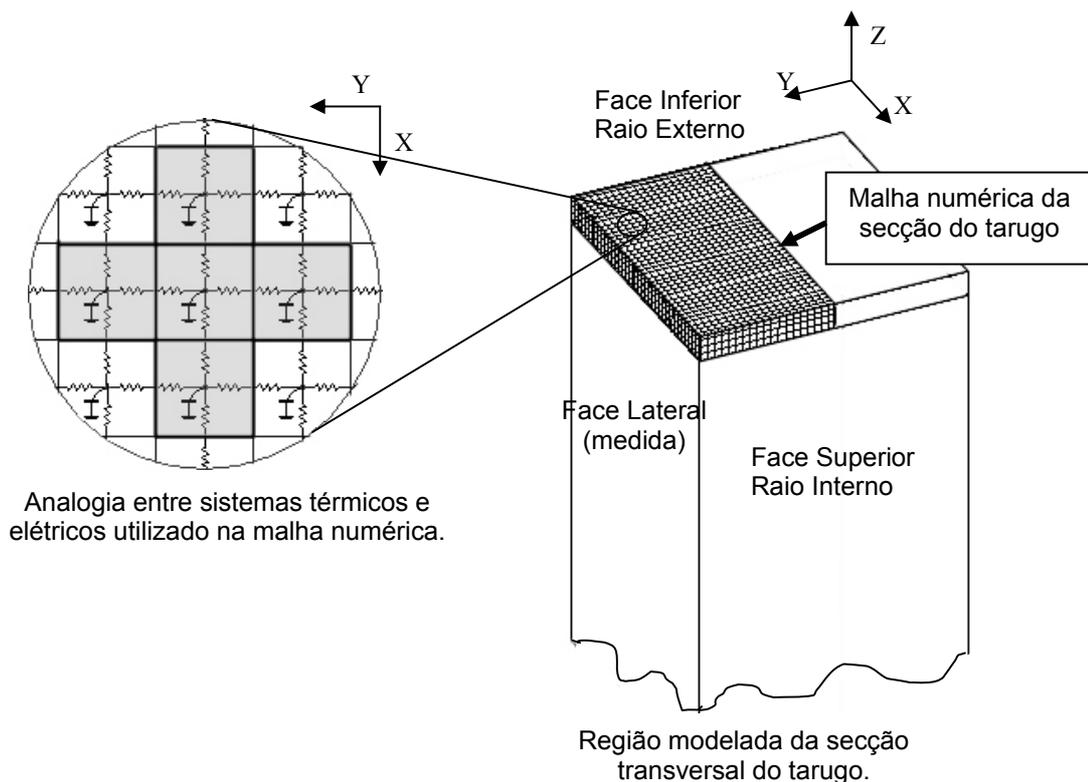
<sup>3)</sup> O trabalho de aferição de um modelo numérico que simule a solidificação está ligado à necessidade de monitorização da máquina de LC. Este trabalho mostra a utilização de um software de simulação da transferência de calor e solidificação, o qual vem gradativamente sendo aferido com dados experimentais obtidos em uma planta de produção de aços especiais. O modelo utilizado prevê a espessura de casca formada durante todo o lingotamento, último ponto a solidificar e perfil térmico do veio durante as diferentes etapas de retirada de calor, além de todo o mapa térmico do tarugo desde o menisco até o oxicorte.

## DESENVOLVIMENTO DO MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico desenvolvido é baseado no Método de Diferenças Finitas (MDF), o qual correlaciona uma analogia ente sistemas térmicos e elétricos,<sup>(4)</sup> conforme mostra a Figura 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 circunde o tarugo em cada nível de distância, desde o menisco até o oxicorte.<sup>(5)</sup>

O acoplamento de malha para inserção do modelo matemático é realizado sobre uma seção transversal do tarugo 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.<sup>(6)</sup> A simetria do material e das condições de calor permite que somente metade da seção transversal seja modelada, assim, possibilitando simular a evolução térmica como um todo.<sup>(5)</sup>

Os parâmetros utilizados na aferição do sistema correspondem a resultados medidos na planta para velocidades e temperaturas de distribuidor instantâneas, ou seja, valores atuantes no instante da medida. A correta informação dos dados de entrada como, por exemplo: temperatura exata do aço líquido no instante do preenchimento do molde, água de refrigeração dos chuveiros, velocidade de lingotamento, parâmetros físicos do metal de trabalho, como: temperaturas solidus e liquidus para cada composição, propriedades termofísicas como condutividade térmica, calor específico, densidade e calor latente de solidificação, devem ser confiáveis para a garantia da precisão das simulações. No caso, devido às oscilações inerentes ao processo real, as simulações foram realizadas com os valores de temperaturas de distribuidor e velocidades de processos, tomadas como médias ponderadas no tempo.



**Figura 1.** Esboço representativo do modelo numérico desenvolvido.

## DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA NUMÉRICO

O software foi desenvolvido em linguagem de programação C++ orientada a objeto, trabalhando em plataforma Windows, possuindo rotinas que acoplam o modelo matemático 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 lingotes em forma de tarugos para diferentes qualidades de aço.

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, 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 2 mostra um exemplo da tela de simulação, onde observa-se 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 a corrida em andamento, apresenta-se também nessa tela um esboço da seção transversal do tarugo e a evolução térmica deste na forma de gradientes de cores.

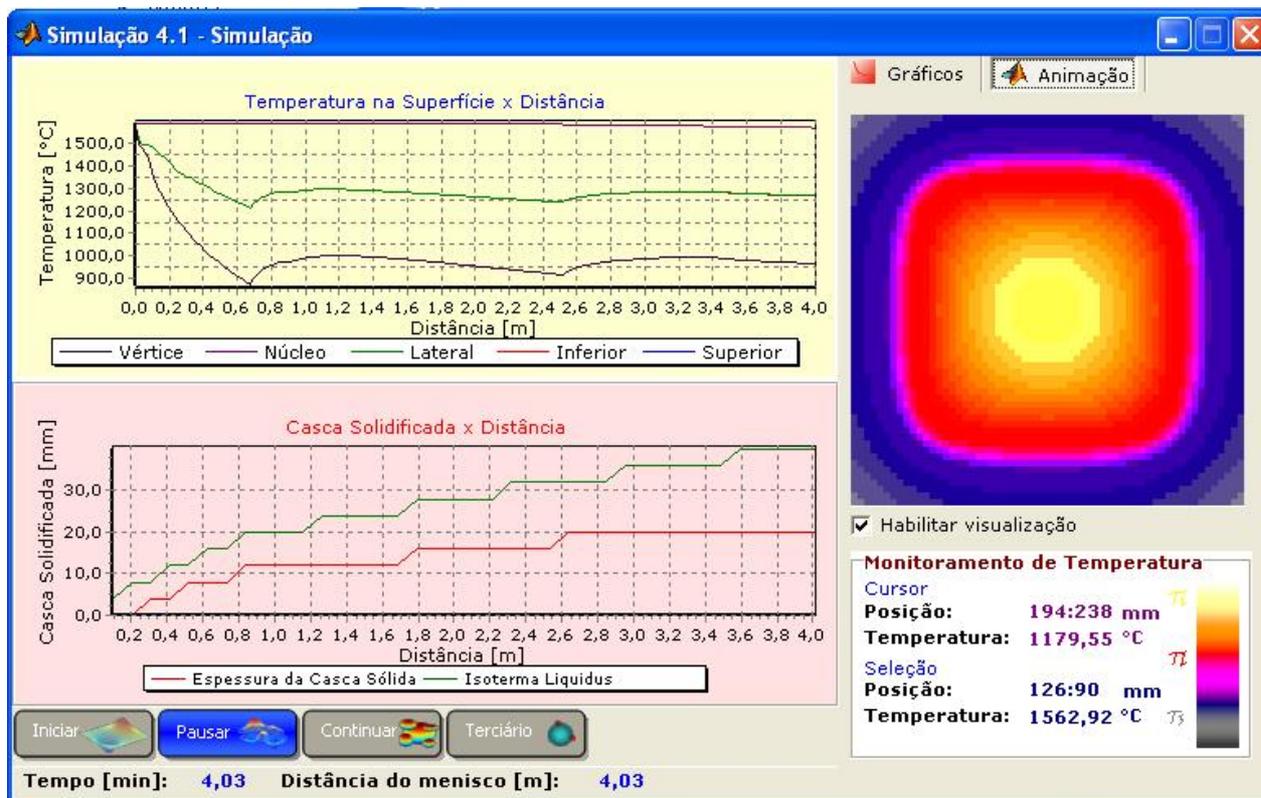
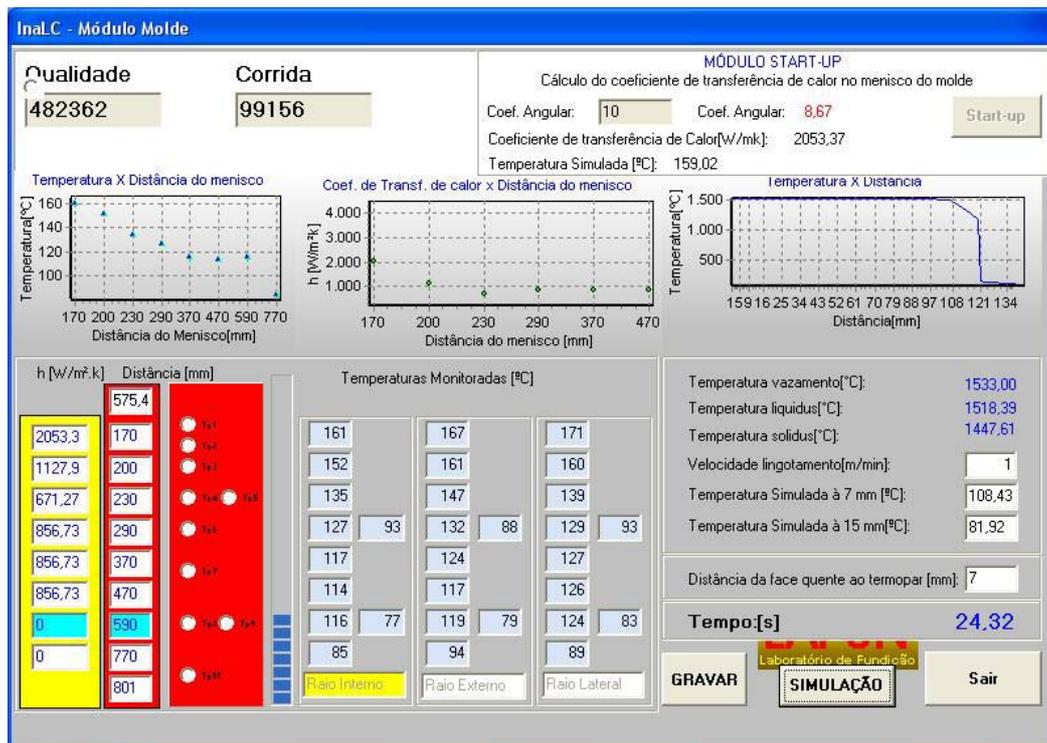


Figura 2. Telas de simulação do software desenvolvido.

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 InALC+ 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 método usado para determinar os coeficientes de transferência de calor nas interfaces metal/molde e molde/água de refrigeração é baseado na solução do Problema Inverso de Condução de Calor (PICC).<sup>(7)</sup> Este método utiliza-se de medidas de temperaturas experimentais obtidas por termopares acoplados ao molde em posições conhecidas, e comparadas com temperaturas calculadas pelo modelo de diferenças finitas nas correspondentes posições da malha numérica. O desenvolvimento e aplicações do PICC são descritas em detalhes por Spinelli e outros<sup>(8)</sup> e Santos e outros.<sup>(9)</sup>

O programa possui interface gráfica composta por 02 telas acopladas ao programa InALC+. Uma das telas serve para inserção das temperaturas experimentais obtidas nas três faces do molde e a outra corresponde a tela principal, na qual os  $h$ 's são calculados (Figura 3). Ao final da simulação, o programa InALC+ utiliza os valores do coeficiente de transferência de calor ( $h$ ) em diferentes secções ao longo do molde.



**Figura 3.** Tela principal do programa, Observar o acompanhamento a evolução da solidificação do tarugo no molde e os coeficientes de transferência de calor.

## METODOLOGIA EXPERIMENTAL NA INDÚSTRIA

Foram realizadas medidas no interior do molde, com a colocação de 30 termopares tipo K (Cromel – Alumel) instalados na região central de três faces do molde, dispostos do seguinte modo: 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<sup>[Barcellos, 2006]</sup>. Para a obtenção dos resultados de temperatura na superfície do tarugo ao longo do processamento, foi utilizado um pirômetro ótico portátil. As medidas foram realizadas em um sistema de 3 veios, escolhendo-se como o veio representativo o veio número 3. Escolheu-se uma das faces laterais, no caso a face contrária ao outro veio vizinho, devido à facilidade e a logística da monitorização desta ao longo do processamento. 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, no caso os pontos escolhidos correspondiam aqueles que eventualmente poderiam explicar a formação de falhas e defeitos na superfície do tarugo, como por exemplo, a região de desempenho. A Tabela 1 mostra a localização na máquina de lingotamento contínuo (MLC) dos pontos monitorados.

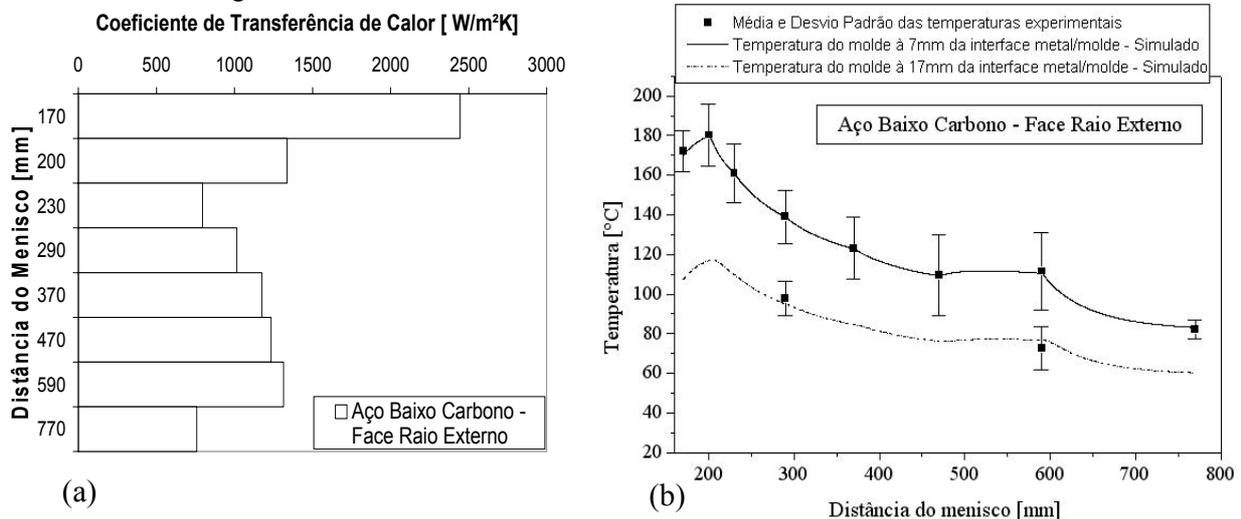
Na Tabela 1, observa-se a indicações de 14 pontos localizados abaixo do molde, partindo do primeiro ponto próximo ao oxicorte, até o último ponto na saída do molde (abaixo do spray ring). Outro pirômetro ótico instalado na saída do molde (ponto 01) permitiu determinar a temperatura na saída. Os resultados obtidos pelos pirômetros, correspondem a uma nuvem de valores, coletados por tempo determinado. Essa nuvem de valores posteriormente recebeu um filtro, fornecendo um valor médio e o desvio padrão dos resultados obtidos.

**Tabela 1.** Levantamento dos pontos monitorados na MLC – AEP Secção 240 mm.

Pontos Monitorados	Zonas	Localização
	Molde	Paredes do molde
01	Spray Ring Inferior	entre os dois rolos
02	Sprays Zona I	abaixo do rolo de pé
03	Região Livre	acima do platô
04	Rolo de Apoio A	abaixo do platô
05	Região Livre	abaixo do rolo A
06	Região Livre	acima rolo B
07	Região Livre	abaixo rolo B
08	Rolo de Apoio E	sobre o rolo E térreo
09	Região Livre	antes do extrator
10	Rolo Tracionador 1 e 2	ponto desempenho
11	Região Livre	após extrator
12	Região Livre	antes túnel A
13	Região Livre	após túnel A
14	Região Livre	após túnel B

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

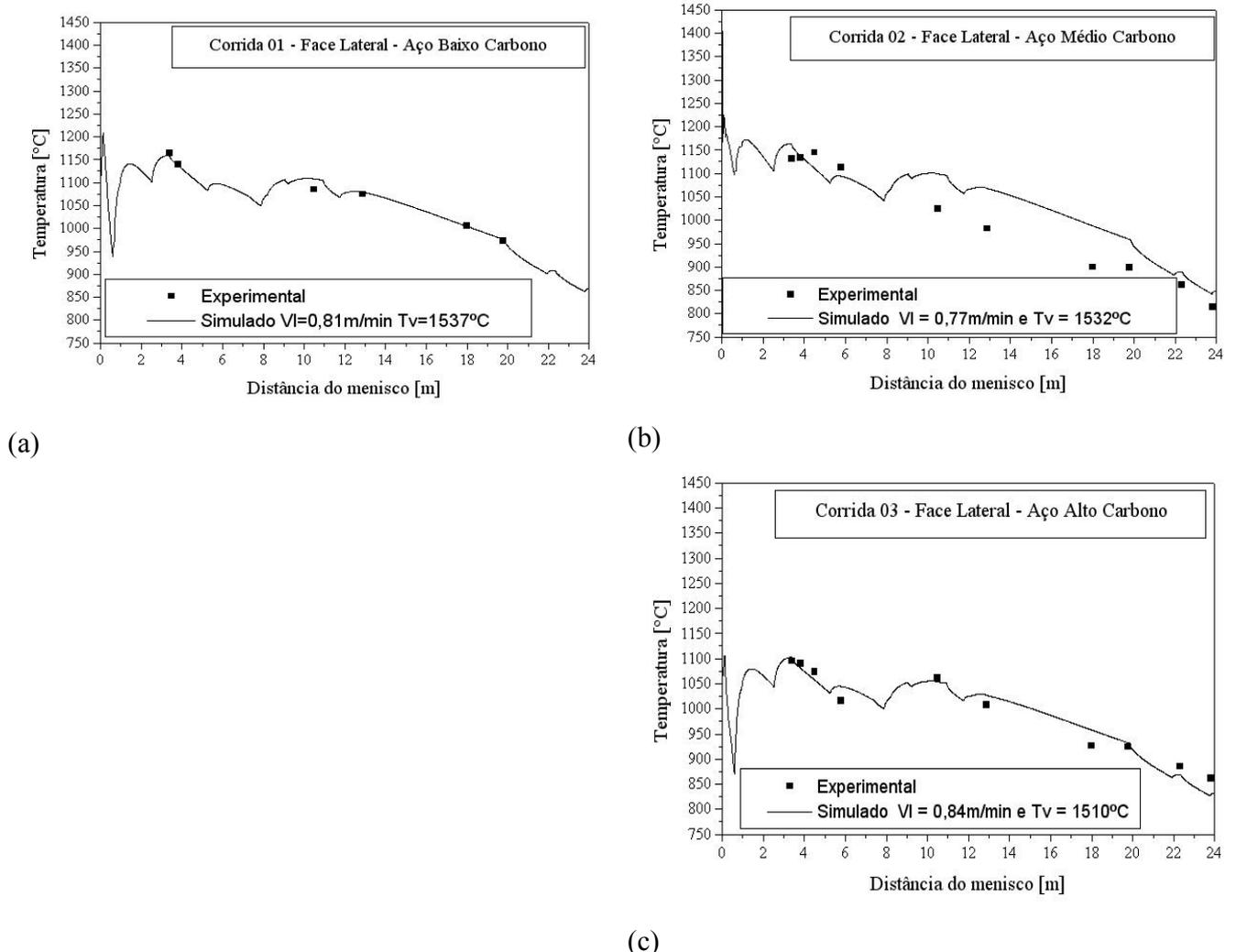
Os resultados de simulação foram comparados com resultados da temperatura do molde e da superfície, obtidos na planta. Utilizando-se de uma técnica de correlação numérico experimental, pode-se ajustar os coeficientes de transferência de calor do modelo, para valores quantitativos do equipamento. A Figura 4a mostra os valores de coeficientes de transferência de calor da interface metal/molde de um aço baixo carbono na velocidade de lingotamento de 0,85 m/min calculados com o simulador. Na comparação das temperaturas monitoradas na parede do molde com as temperaturas simuladas, a Figura 4b mostra a boa concordância do modelo.



**Figura 4.** Coeficientes de transferência de calor calculados e perfis de temperaturas simuladas e experimentais no molde à 7mm e à 17mm da interface metal/molde de um aço baixo carbono na velocidade de lingotamento de 0,85 m/min.

Para a aferição do software foram monitoradas três corridas com diferentes composições (aços de baixo, médio e alto teor de carbono). Os valores de velocidade e

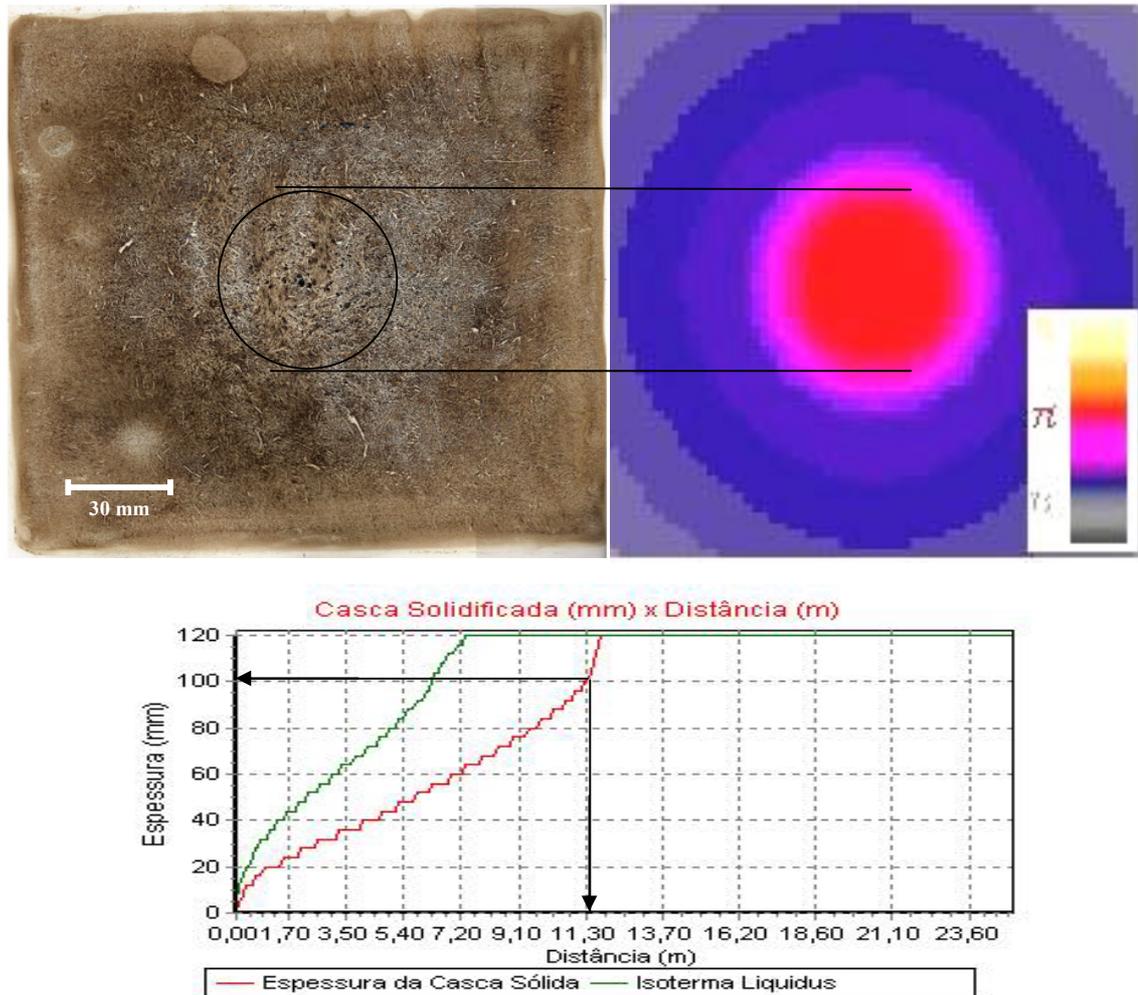
temperatura do distribuidor utilizado no modelo numérico correspondem aos valores médios ponderados no tempo, uma vez que o sistema prático, naturalmente apresenta oscilações desses valores ao longo da corrida. As Figuras 5a, 5b e 5c mostram a comparação da curva de temperatura de superfície simulada, com os valores medidos nos pontos monitorados. A comparação uma boa concordância das temperaturas experimentais e simuladas.



**Figura 5.** Comparação entre os resultados simulados e os valores monitorizados em planta para a corrida 01, 02 e 03.

Os resultados da espessura da casca formada foram obtidos mediante a macrografia Baumann. 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 técnica de medida da espessura seguiu as normas internas da empresa, sendo os resultados posteriormente comparados com os resultados

apresentados pelo modelo numérico. Foi feita uma média das espessuras da casca solidificada nas quatro faces da imagem metalográfica, obtendo uma espessura média de 90 mm para a corrida 02 de um aço médio carbono, enquanto que o programa calculou uma espessura sólida de 100 mm, o que representa uma diferença de 10%, valor este que se mostrou bem próximo da medida experimental, conforme apresentado na Figura 6.



**Figura 6.** Macrografia Baumann utilizada para a medida da espessura da casca sólida comparada com resultados da simulação da corrida 02.

## CONCLUSÕES

A metodologia de aferição se mostrou bastante coerente e preciso quando seus resultados foram comparados com os dados físicos obtidos na máquina de LC. O desenvolvimento das rotinas numéricas na forma de um software, permitiu estabelecer análises para a verificação da influência de diferentes variáveis sobre os resultados, 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 devem permitir melhoria de processamento com

aumento de qualidade, uma vez que estes devem indicar níveis apropriados de temperatura e espessura de casca sólida, nas diferentes zonas de resfriamento, ao longo da máquina de LC.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao suporte financeiro provido da CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e a GERDAU Aços Especiais Piratini (AEP).

## **REFERÊNCIAS**

- 1 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.
- 2 CHANDRA, S.; Brimacombe, J.K.; Samarasekera, I.V.; Mould –Strand Interaction in Continuous Casting of Steel Billets – Part 3: Mould Heat Transfer and Taper. *Ironmaking & Steelmaking*, v. 20, n. 2, pp. 104-112. 1993.
- 3 MAHAPATRA, R.B.; Brimacombe, J.K.; Samarasekera, I.V.; Walker, N.; Paterson, E.A.; Young, J.D.; Mold Behavior and its Influence on Quality in the Continuous Casting of Steel Slabs: Part II. Mold Heat Transfer, Mold Flux Behavior, Formation of Oscillation Marks, Longitudinal Off-Corner Depressions, and Subsurface Cracks. *Metallurgical Transaction B*, v. 22, pp. 875-888, Dec. 1991.
- 4 SPIM, J. A; et al; An optimization of The finite difference method for modeling solidification of complex shaped domains, *Revista Brasileira de Ciências Mecânicas*, São Paulo, V.XIX, No. 3, p. 392-409, 1997.
- 5 NASCIMENTO, H.V.; et al., Monitoramento de Temperaturas em Planta de um Molde Parabólico de Lingotamento Contínuo, XXXVI Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais – ABM, Vitória – ES, 2005.
- 6 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 (2).
- 7 HO, K.; PEHLKE, R., Mechanisms of Heat Transfer at a Metal–Mold Interface, *AFS Transactions*. V 92, p. 587-598. 1985.
- 8 SPINELLI, J.E.; TOSETTI, J.P.; SANTOS, C.A.; SPIM, J.A.; GARCIA, A., Microstructure and solidification thermal parameters in thin strip continuous casting of a stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*. V 150, p. 255–262. 2004.
- 9 SANTOS, C. A. ; FORTALEZA, E. L. ; FERREIRA, C. R. F. ; SPIM JR, J. A. ; GARCIA, A. . A Solidification Heat Transfer Model and A Neural Network Based Algorithm Applied to the Continuous Casting of Steel Billets and Blooms. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Grã-Bretanha, v. 13, p. 1071-1087, 2005 (1).