

MONITORAMENTO DE TEMPERATURA EM PLANTA DE UM MOLDE PARABÓLICO DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO ¹

Hildo Valmir do Nascimento ^[2]
Lauri Luiz de Mello ^[2]
Paulo Carvalho Fernandes ^[2]
Carlos Raimundo Frick Ferreira ^[3]
Carlos Alexandre dos Santos ^[3]
Jaime Alvares Spim ^[3]

Resumo

O objetivo foi projetar uma ferramenta para monitorar a temperatura de um molde durante o lingotamento contínuo (LC) de blocos de aço com secção de 240 x 240 mm. O monitoramento foi realizado durante o processo nas paredes do molde e na superfície do bloco logo abaixo do molde. Com os dados obtidos durante o monitoramento, desenvolveu-se um modelo de condução de calor inverso usado para a obtenção do coeficiente real de transferência de calor no molde. Nos experimentos foram utilizados 30 termopares, colocados em pontos estratégicos de um molde parabólico, dispostos do seguinte modo: 10 termopares no centro da face do raio externo; 10 termopares no centro da face de raio interno e 10 termopares no centro da face lateral, sendo cada termopar disposto numa posição diferente um do outro na direção de lingotamento e a 7 e 17 mm da face quente do molde. Um sistema de aquisição de dados, desenvolvido especificamente, foi utilizado para o registro das temperaturas. Para maior controle dos parâmetros monitorados, foi estabelecido para todos os experimentos a utilização de um pirômetro infravermelho, colocado na saída do molde, abaixo do rolo de pé. Os dados foram processados e comparados no simulador InALC. Os resultados obtidos com a monitoração do molde parabólico mostram que a inserção de termopares a 7 mm e a 17 mm da interface metal/molde foram eficientes para a simulação no InALC. As seqüências de corridas executadas com o molde parabólico monitorizado, e o levantamento dos dados de processo, confirmaram os resultados obtidos no simulador InALC. Com os resultados será possível otimizar o tempo de processo e interferir na produtividade e na qualidade do produto final.

Palavras-chave: Lingotamento contínuo de aços, temperaturas do molde, coeficientes de transferência de calor.

⁽¹⁾ XXXVI Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais - ABM – Maio 2005, Vitória – E.S.

⁽²⁾ Membro ABM – Gerdau - AFP

⁽³⁾ Membro ABM – LAFUN-UFRGS

1 INTRODUÇÃO

O processo de lingotamento contínuo possui três fases bem distintas em suas etapas de resfriamento: a primeira fase é efetuada no molde de cobre refrigerado a água, a segunda é por sprays que borrifam água, ou água e ar sobre a superfície do bloco; e a terceira fase é a de radiação livre.

O resfriamento primário que ocorre no molde é feito pela condução de calor do metal líquido para o molde e a conseqüente passagem deste para a água de refrigeração por meio de convecção forçada. Nesta fase do processo, o dimensionamento do molde já prevê uma máxima extração de calor em função do volume e para isso, os moldes são feitos com estreitos canais de passagem de água ao longo de seu comprimento e largura, objetivando principalmente a obtenção de altas velocidades de escoamento da água sem a necessidade de volumes absurdos de líquido bombeado. No que diz respeito ao contato térmico entre metal e molde, pode-se observar três regiões distintas: - do menisco até o ponto de início da solidificação, região onde o metal líquido se encontra separado do molde por uma camada de pó fluxante; - região de bom contato térmico entre metal sólido e a parede do molde, devido à ação da pressão ferrostática exercida pelo metal líquido sobre a camada solidificada, sendo que o comportamento dessa região tem influência decisiva na qualidade superficial do bloco; - região onde existe uma separação física ou formação de um *gap* de ar bem definido entre metal e molde, dificultando a retirada de calor.

O resfriamento secundário, caracterizado por zonas ou regiões de sprays com vazões independentes, é responsável pela continuidade do processo de solidificação do metal, sendo também determinante na temperatura que o metal chega na região do desempenho. A transferência de calor nesta região é caracterizada pelos seguintes mecanismos: - radiação da superfície do bloco para o ambiente; - convecção devido ao impacto do jato de água; - ebulição da água que escorre ao longo da superfície do bloco e se acumula sobre os rolos; - condução devido ao contato da superfície do bloco com os rolos; - convecção do ar que circunda o bloco, que pode ser desprezada devido ao mínimo efeito causado em relação aos outros modos de transferência de calor.

A terceira fase é a de radiação livre, onde o bloco desloca-se ao longo da máquina enquanto evolui a solidificação até a região do oxicorte. Nessa fase o bloco mantém pontos de contato com os rolos de apoio e em alguns casos, com rolos extratores que contribuem no processo de extração de calor. O coeficiente de transferência de calor do ambiente é constituído pela combinação de duas componentes: uma parcela radioativa, representada pelo coeficiente de transferência de calor por radiação e uma parcela convectiva representada pelo coeficiente de transferência de calor por convecção.

O objetivo do presente trabalho foi projetar uma ferramenta para monitorar a temperatura de um molde durante o lingotamento contínuo de tarugos de aço com secção de 240 x 240 mm, sendo o monitoramento realizado durante o processo nas paredes do molde e na superfície do bloco logo abaixo do molde. Com os dados obtidos durante o monitoramento, desenvolveu-se um modelo de condução de calor inverso usado para a obtenção do coeficiente global de transferência de calor no molde.

2 DETALHAMENTO EXPERIMENTAL

A Figura 1 apresenta um esboço do equipamento industrial no qual se realizou a ancoragem experimental, destacando os diferentes componentes da máquina, as diferentes regiões de refrigeração pelo qual o bloco está submetido durante o lingotamento, citando molde, sprays e radiação livre.

Objetivou-se a colocação de 30 termopares tipo K nas faces do molde parabólico,

secção 240 mm, dispostos do seguinte modo: - 10 termopares no centro da face de raio externo;

- 10 termopares no centro da face de raio interno;
- 10 termopares no centro da face lateral.

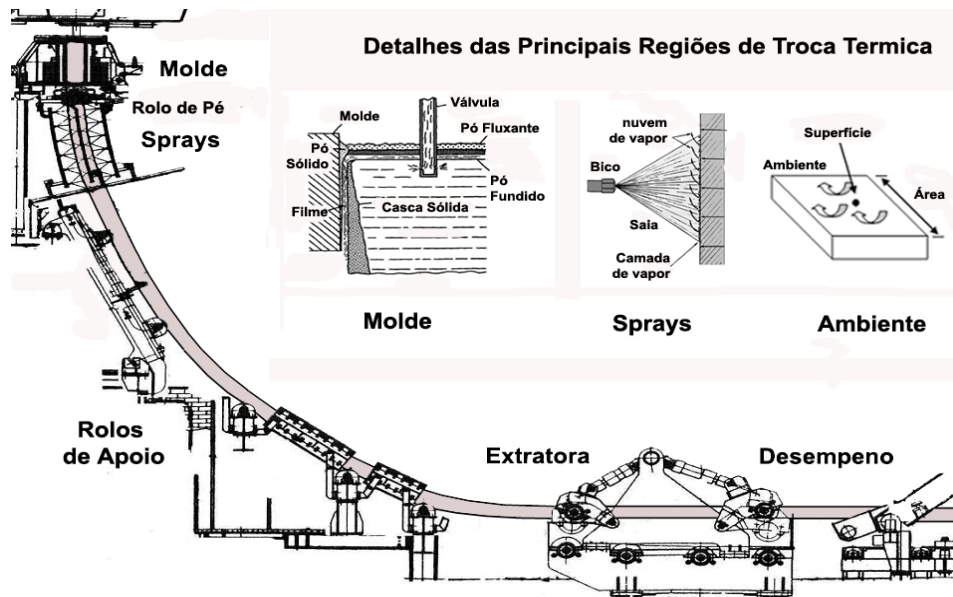


Figura 1. Esboço da máquina de lingotamento contínuo de aços.

A disposição dos termopares ao longo do comprimento do molde foi dada conforme a Figura 2, desde a região do menisco a 170 mm do topo do molde, nível de metal líquido, até 31 mm acima da saída do molde, resultando em um total de 10 (dez) pontos estratégicos de monitorização nas faces.

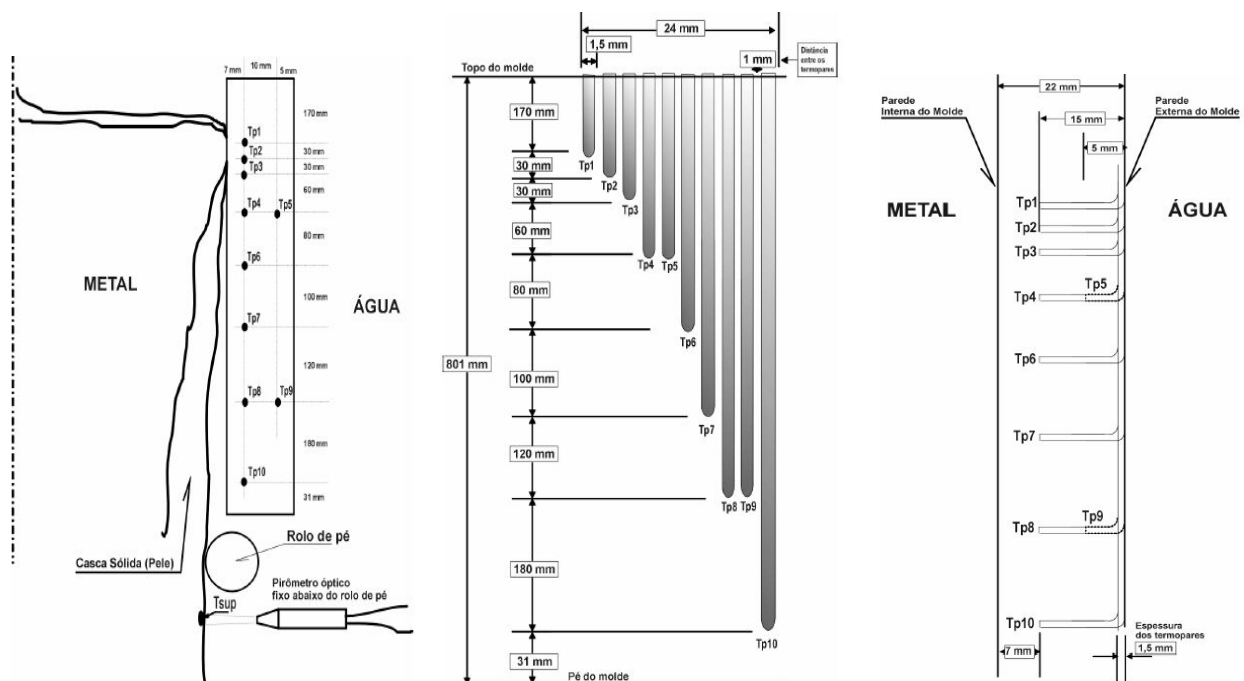


Figura 2. Representação esquemática do posicionamento dos termopares no molde.

Os termopares Tp1, Tp2, Tp3, Tp4, Tp6, Tp7, Tp8 e Tp10 foram posicionados a uma distância de 7 mm da face quente do molde, interface metal/molde, sendo Tp1 a referência da temperatura do menisco. Os termopares Tp5 e Tp9 foram localizados a uma

distância de 17 mm da face quente, e estes fornecem subsídios para a determinação da condução de calor ao longo da espessura da jaqueta de cobre do molde. Os 3 (três) jogos de termopares foram posicionados no centro das respectivas faces, visando minimizar o efeito de borda do sistema de solidificação. A nomenclatura adotada para os termopares e a respectiva distância da face fria do molde é apresentada na Tabela 1. A Figura 3 apresenta uma seqüência de fotos dos principais passos da preparação do molde para instalação dos termopares.

Tabela 1. Nomenclatura adotada para os termopares colocados em diferentes posições nas faces.

TERMOPAR	FACE – RAIO EXTERNO	FACE – RAIO INTERNO	FACE LATERAL	DISTÂNCIA DO TOPO DO MOLDE (mm)	DISTÂNCIA DA FACE QUENTE (mm)
Tp1	E1	I1	L1	170	7
Tp2	E2	I2	L2	200	7
Tp3	E3	I3	L3	230	7
Tp4	E4	I4	L4	290	7
Tp5	E5	I5	L5	290	17
Tp6	E6	I6	L6	370	7
Tp7	E7	I7	L7	470	7
Tp8	E8	I8	L8	590	7
Tp9	E9	I9	L9	590	17
Tp10	E10	I10	L10	770	7



(a)



(b)



(c)



(d)



Figura 3. Etapas de preparação do molde para posicionamento dos termopares: (a) usinagem, (b e c) detalhe dos sulcos para passagem dos termopares, (d) terminais para acoplamento entre os termopares e os cabos de compensação, (e) sistema completo do molde.

Para a aquisição dos dados de temperaturas monitoradas no molde, utilizou-se um placa A/D acoplada a um computador mono-usuário e software de tratamento gráfico, empregando-se uma taxa ou frequência de aquisição de 1 ponto por minuto.

3. Resultados e Discussões

A Tabela 2 apresenta os principais dados das corridas monitoradas, citando composição química em porcentagem em peso do carbono e dados operacionais durante o lingotamento. Inicialmente, foram monitoradas 180 corridas no molde parabólico de secção 240 mm, compreendendo várias qualidades de aços. No entanto somente serão apresentados, em caracter prático, os resultados de duas qualidades de aço (SAE 1020 e 1040), uma vez que as demais análises ainda se encontram em fase de desenvolvimento.

Tabela 2. Principais parâmetros das corridas monitoradas.

Corrida	C (%)	T _{DISTRIB} (°C)	V _{Ling} (m/min)
01	0,2100	1555	0,92
02	0,3800	1528	0,85

Os gráficos apresentados nas Figuras 4 e 5 mostram os dados obtidos pelos termopares estrategicamente posicionados nas três faces do molde. Durante o monitorização, o tempo médio por corrida foi de aproximadamente 50 minutos. Os gráficos foram divididos em duas categorias: (a) dados globais de temperaturas do molde durante as corridas nas três diferentes faces do molde, e (b) temperaturas médias do molde durante o lingotamento, desprezando os instantes iniciais e finais de cada corrida. Os gráficos com as temperaturas médias apresentam os valores máximos e mínimos medidos (representados por x), o valor médio (), a mediana e o desvio padrão (representados pela caixa). Para a determinação dos coeficientes de transferência de calor metal/molde, foram utilizados os valores da temperatura média de cada termopar durante a corrida, desprezando os instantes de início e fim da corrida. A metodologia empregada pode ser obtida em trabalhos anteriores desenvolvidos pelo grupo de pesquisa. ^(1,2)

Conforme pode-se observar pelos gráficos, o comportamento térmico do molde durante o lingotamento apresenta diferenças em relação às diferentes faces monitoradas,

regiões de maior aquecimento, presença de picos de temperaturas próximos ao menisco, regiões com presença de patamares de temperaturas praticamente constantes, etc.

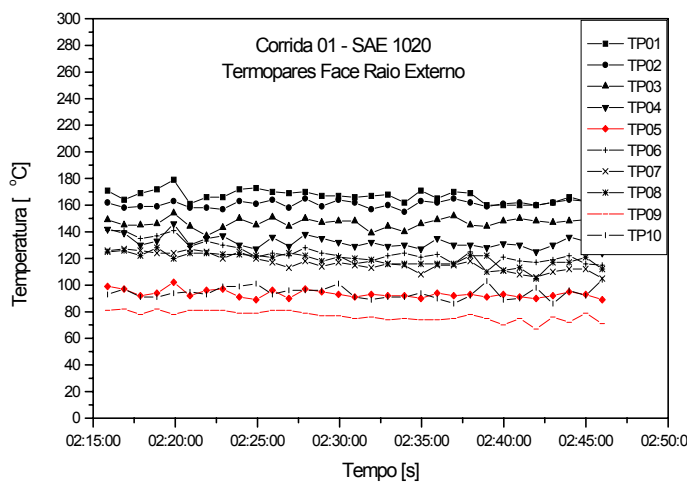
Os valores dos coeficientes de transferência de calor ao longo do comprimento do molde podem ser observados nas Figuras 6 e 7 para as duas corridas analisadas e as três faces do molde. Conforme pode ser visto, a variação nos valores dos coeficientes são bastante significativas, principalmente quando se compara as diferentes faces e as diferentes corridas, sendo que cada aço apresenta um comportamento particular, o qual depende essencialmente da composição química do aço, condições operacionais de lingotamento e posição ao longo do molde.

4. Conclusões

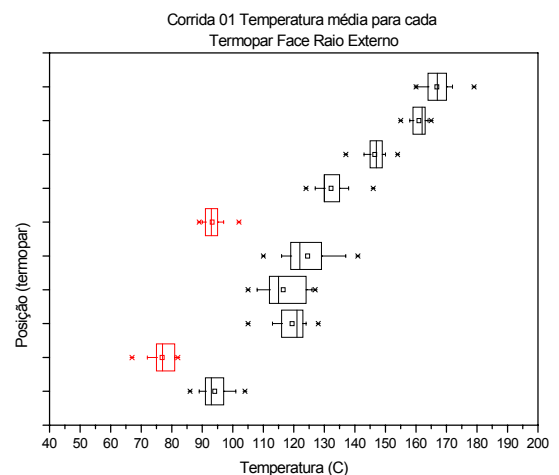
Diante dos resultados obtidos pelo modelo matemático proposto e suas comparações com resultados obtidos pelos termopares posicionados nas paredes do molde parabólico da máquina de lingotamento contínuo da siderúrgica Aços Finos Piratini – Gerdau Aço Minas, conclui-se que:

- o projeto e construção dos sistema de termopares demonstrou ser eficiente e versátil para a monitorização da temperatura do molde durante o lingotamento;
- os resultados obtidos durante as corridas permitem análises das etapas de início, meio e fim das corridas;
- o comportamento térmico do molde sofre influencia direta dos parâmetros operacionais, do tipo de aço lingotado, e da região ao longo do comprimento do molde, bem como das diferentes faces do molde;
- os valores médios das temperaturas da parede do molde ao longo do comprimento permitem a determinação dos coeficientes globais de transferência de calor metal/molde para as diferentes corridas monitoradas;
- melhores resultados e conclusões serão obtidos com as análises das outras corridas monitoradas, objetivando o desenvolvimento de um banco de dados com os valores dos coeficientes de transferência de calor no molde.

a)



b)



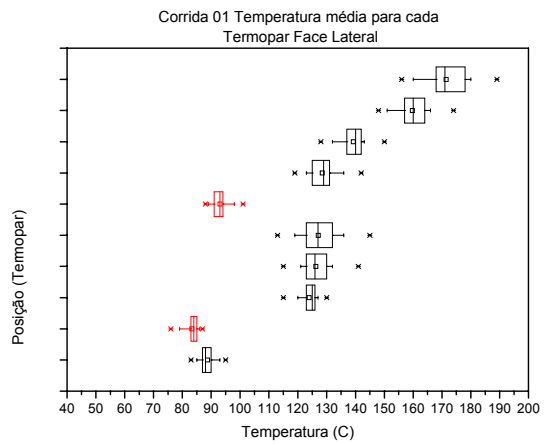
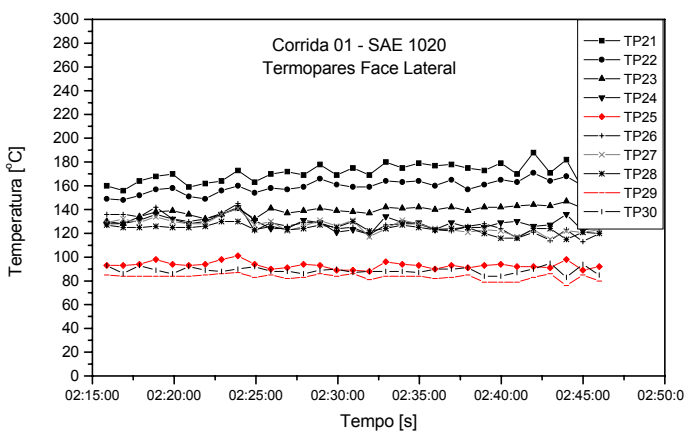
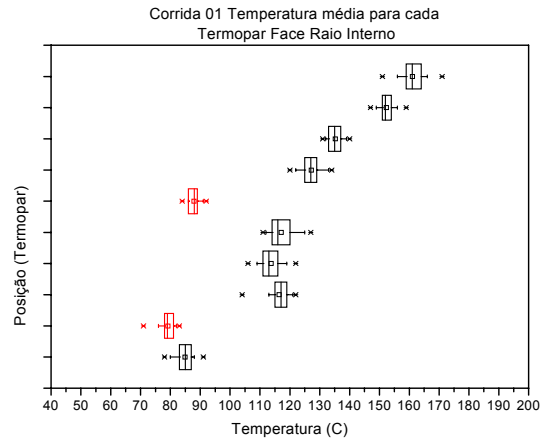
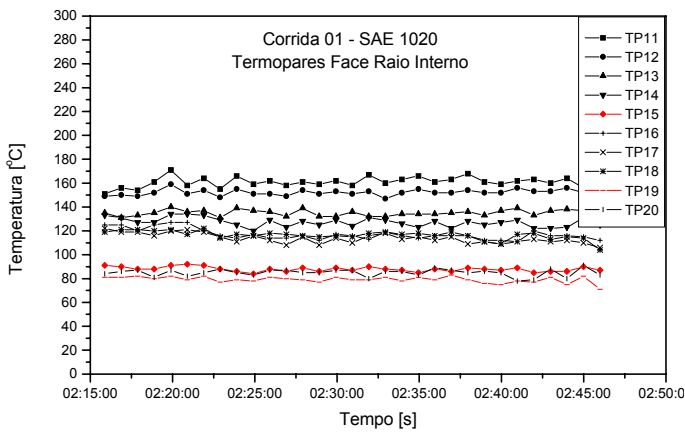
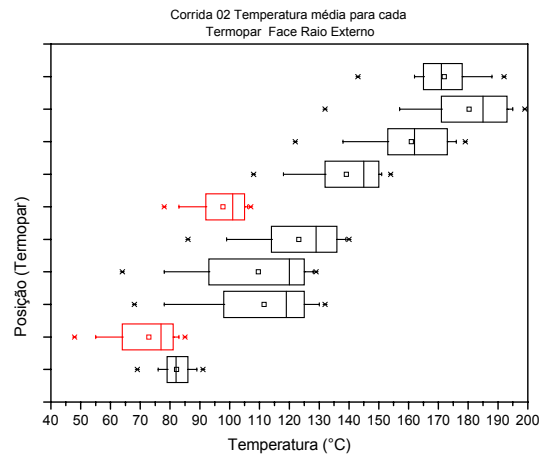
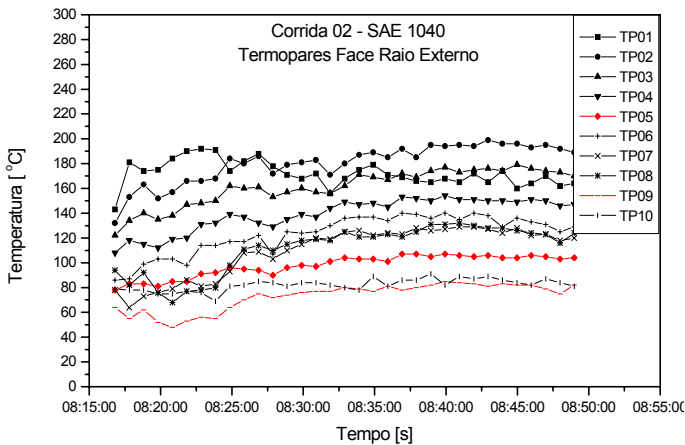


Figura 4. Resultados experimentais de temperaturas obtidas pelos termopares nas três faces do molde. Corrida 01. Seção 240 mm. Molde Parabólico. (a) temperatura versus tempo para cada termopar, (b) temperaturas médias versus posição de cada termopar.

a)

b)



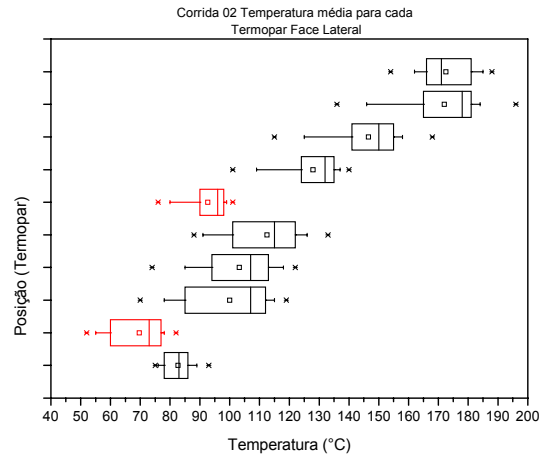
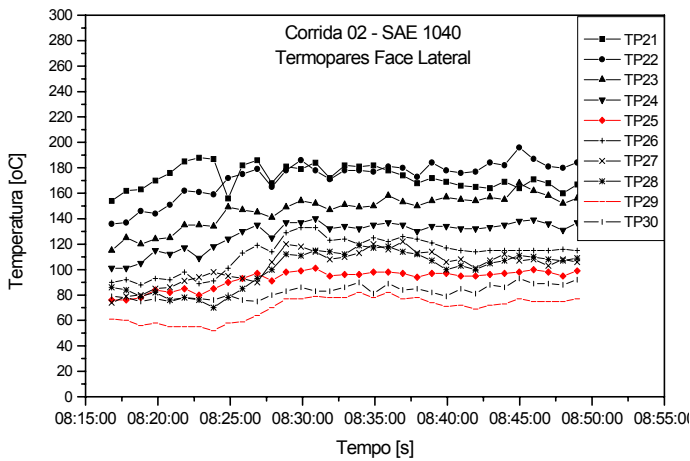
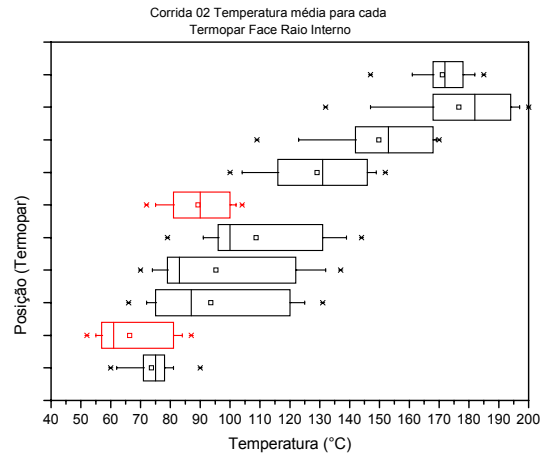
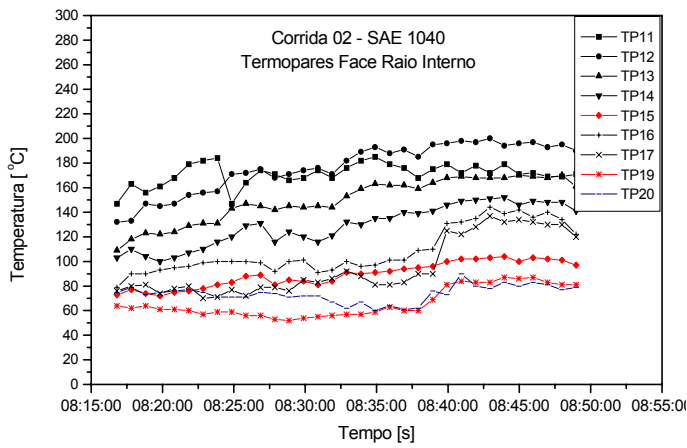
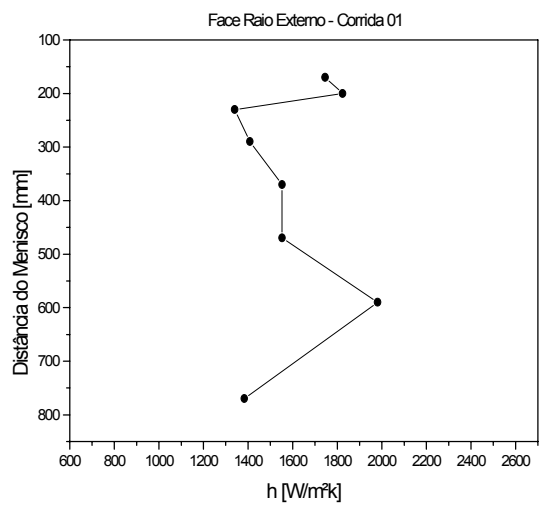
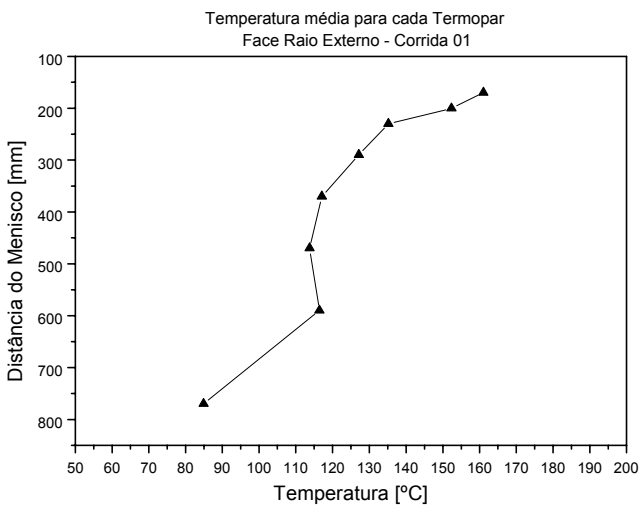


Figura 5. Resultados experimentais de temperaturas obtidas pelos termopares nas três faces do molde. Corrida 02. Seção 240 mm. Molde Parabólico. (a) temperatura versus tempo para cada termopar, (b) temperaturas médias versus posição de cada termopar.



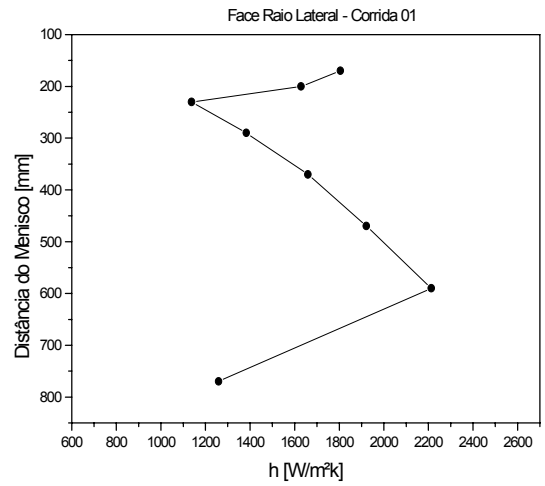
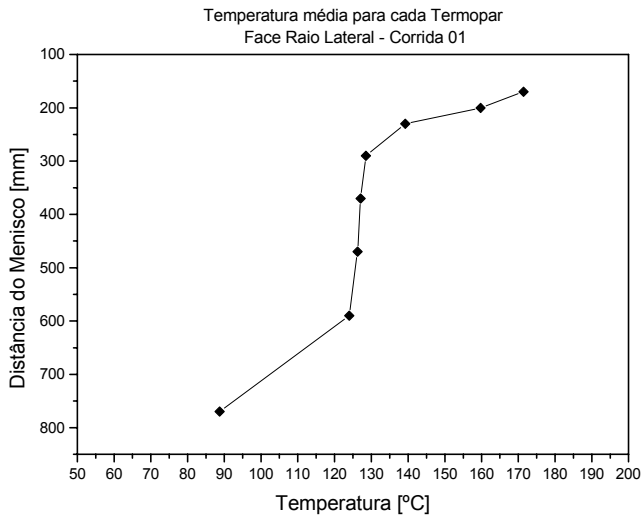
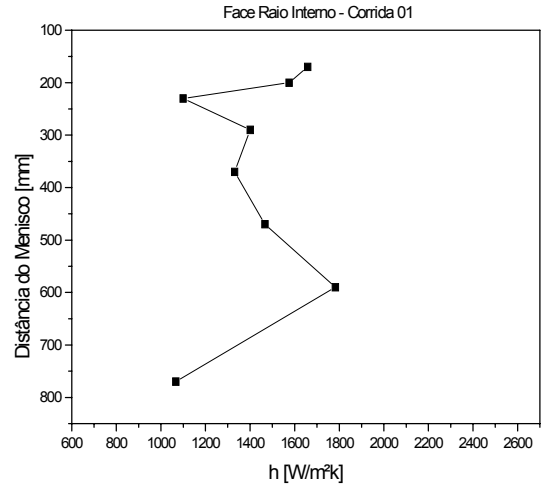
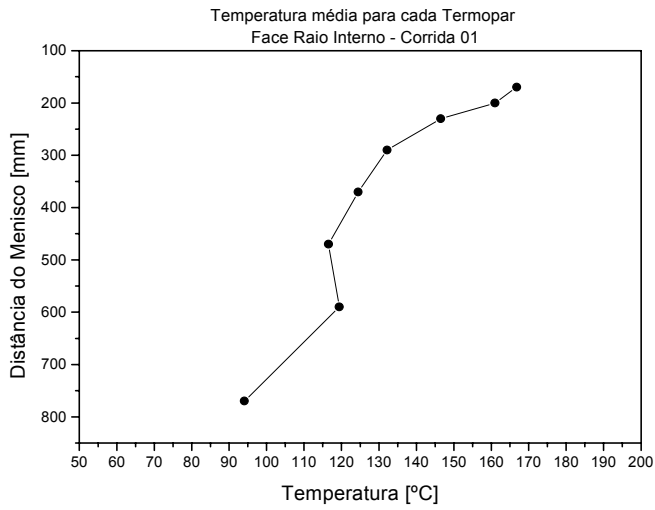
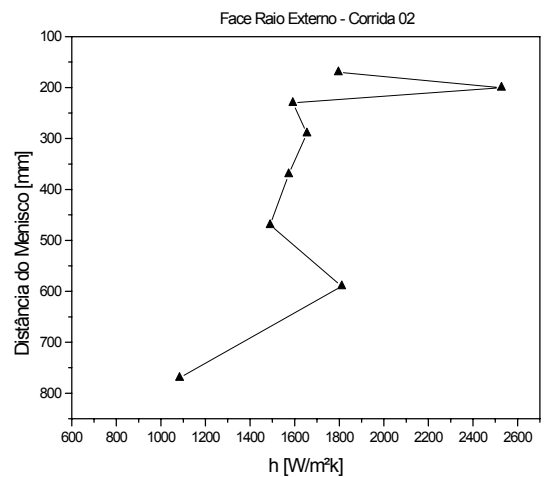
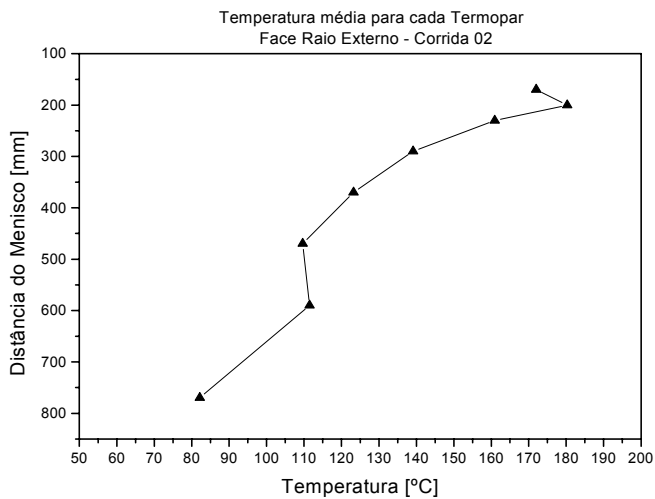


Figura 6. Temperaturas médias dos termopares ao longo do molde e valores dos coeficientes de transferência de calor na interface metal/molde ao longo do comprimento do molde. Corrida 01. Seção 240 mm. Molde Parabólico. (a) raio externo, (b) raio interno, (c) lateral.



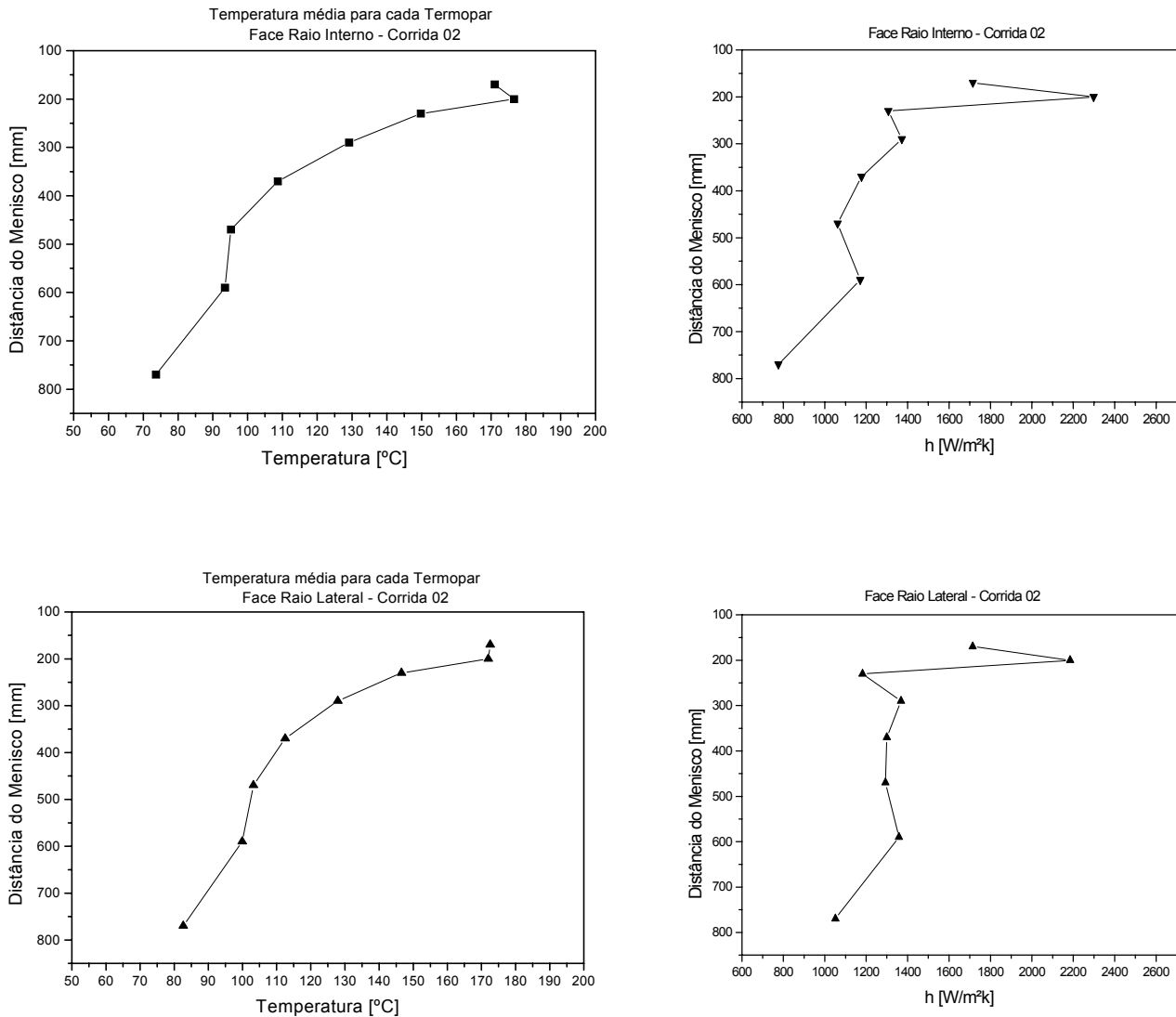


Figura 7. Temperaturas médias dos termopares ao longo do molde e valores dos coeficientes de transferência de calor na interface metal/molde ao longo do comprimento do molde. Corrida 02. Seção 240 mm. Molde Parabólico. (a) raio externo, (b) raio interno, (c) lateral.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), da FAPERGS (Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul), e da Aços Finos Piratini/RS – Grupo Gerdau Aço Minas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 SANTOS, C.A.; QUARESMA, J.M.V.; GARCIA, A. Determination of transient interfacial heat transfer coefficients in chill mold castings. **Journal of Alloys and Compounds**, v.319, n.1-2, p. 174-186, 2001.
- 2 SANTOS, C.A.; SIQUEIRA, C.A.; QUARESMA, J.M.V.; SPIM, J.A.; GARCIA, A. Metal/mold heat transfer coefficients during horizontal and vertical unsteady-state solidification of Al-Cu and Sn-Pb alloys. **Journal of Inverse Problems in Science and Engineering**, v. 12, n. 3, p. 279-296, 2004.

BIBLIOGRAFIA

- 1 KUMAR, S.; MEECH, J.A.; SAMARASEKERA, I.V.; BRIMACOMBE, J.K. Knowledge engineering an expert systems to troubleshoot quality problems in the continuous casting of steel billets. **Iron & Steelmaker**, v.20, n.9, p. 29-36, Sept.1993.
- 2 BRIMACOMBE, J.K. The challenge of quality in continuous casting processes. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v.30A, n.?, p.1899-1912, 1999.
- 3 FILIPIC, B.; SALER; V. Evolutionary optimization of process parameters in continuous casting of steel. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF DESIGN TO MANUFACTURE IN MODERN INDUSTRY, 3., 1997. Slovenia. **Proceedings...** Slovenia: 1997. p. 67-74.
- 4 FILIPIC, B., SALER; V. Evolving parameter setting for continuous casting of steel. In: EUROPEAN CONGRESS ON INTELLIGENT TECHNIQUES AND SOFT COMPUTING – EUFIT'98, 6., 1998, Aachen, Germany. **Proceedings...** Germany: Verlag Mainz, 1998. p. 444-449.

MONITORING OF A PARABOLIC MOLD TEMPERATURE IN A CONTINUOUS CASTER

*Hildo Valmir do Nascimento
Lauri Luiz de Mello
Paulo Carvalho Fernandes
Carlos Raimundo Frick Ferreira
Carlos Alexandre dos Santos
Jaime Alvares Spim*

Abstract

The goal of this project was to develop a tool to monitor the temperature in a 240 x 240 mm CC copper mould. The monitoring was done in the mould walls during casting and at the bloom surface just below the mould exit. With the data acquired from the tests an inverse heat conduction model was developed in order to get the real heat transfer coefficient in the mould. 30 thermocouples were used, placed at various strategic positions. A data acquisition was applied to get the temperatures readings. The data collected and computed with InALC were in a good agreement. With results of this project it will be possible to improve the productivity and the quality of the CC product.

Key-words: Continuous Casting, Heat Transfer Coefficient, Monitorizing Mold.