

# O MODELO MATEMÁTICO DAS PANELAS DA CST <sup>(1)</sup>

Ney Francisco Ferreira <sup>(2)</sup>  
Bruno Rodrigues Henriques <sup>(3)</sup>  
Dagoberto Schubert Severo <sup>(4)</sup>

## RESUMO

Visando a redução do consumo de alumínio no aquecimento alumino-térmico no refino secundário e da perda de produtividade no lingotamento contínuo, a CST vem desenvolvendo um projeto intitulado “Controle Térmico da Aciaria”. A utilização de um modelo matemático dentro desse projeto objetiva compreender os fenômenos térmicos relacionados à panela. Dessa forma, as diferentes condições térmicas das panelas desde o final do lingotamento até o vazamento (panela sem aço) e a influência disso sobre as perdas térmicas do aço líquido são discutidas.

**Palavras chaves:** controle da temperatura do aço líquido, modelo matemático das panelas.

- 
- 1 Trabalho a ser apresentado no XXXIII Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais – Maio de 2002 – Santos, SP, Brasil.
  - 2 Engenheiro Mecânico, Dr., consultor técnico da SOLVER Engenharia.
  - 3 Engenheiro Metalúrgico, especialista em refino secundário da CST.
  - 4 Engenheiro Mecânico, diretor técnico da PCE Engenharia.

# 1 INTRODUÇÃO

O controle térmico do processo da aciaria pressupõe a limitação das temperaturas em cada etapa dentro de limites otimizados. Esse controle resulta na redução das temperaturas médias de operação e na conseqüente economia de energia e insumos relacionados ao aquecimento, redução do desgaste dos refratários e melhoria da qualidade do produto final resultado das melhores condições de solidificação. O controle térmico também tem importância no aumento da produtividade da aciaria uma vez que reduz as perdas de seqüência e a necessidade de redução de velocidade do lingotamento devido à temperaturas elevadas no distribuidor. Cada aciaria tem suas peculiaridades no que tange as necessidades de controle e os benefícios advindos.

A CST vem desenvolvendo um projeto intitulado “Controle Térmico da Aciaria” com dois objetivos principais: redução do consumo de alumínio no processo de aquecimento alumino-térmico no refino secundário e da perda de produtividade do lingotamento devido à temperaturas elevadas no distribuidor. Outros benefícios são esperados tais como a redução dos níveis de poluição e a perda de produtividade ocasionada pelo aquecimento e a melhoria na qualidade das placas. As ações tomadas visam reduzir os desperdícios de energia (utilização de tampa durante todo o ciclo da panela e o sincronismo das panelas fora do ciclo), melhoria no sincronismo da aciaria, substituição dos aquecedores de panela e o desenvolvimento de um modelo térmico automatizado para a previsão das perdas e, conseqüentemente, indicação das temperaturas objetivadas do processo.

O planejamento do modelo térmico da CST contempla uma etapa inicial de conhecimento dos fenômenos térmicos envolvidos no processo. Para isso foram realizadas atividades de medição onde destacam-se a instrumentação das panelas e distribuidores com termopares, o estudo do comportamento da temperatura do aço no distribuidor utilizando medição contínua e o levantamento de dados do processo.

Dentre as variáveis do controle térmico, a de mais difícil conhecimento é o estado térmico das panelas. Normalmente se utiliza como indicativo o tempo em que a panela ficou sem aço. Porém a utilização desse parâmetro pode representar erros significativos em termos de perdas térmicas do aço <sup>(1, 2)</sup>. No caso da CST, a presença ou não da tampa no período sem aço representa estados térmicos diferentes no momento do vazamento. Essa informação é necessária para o cálculo das perdas em cada etapa e o conseqüente estabelecimento das temperaturas visadas do processo.

Os fenômenos térmicos envolvidos na entrada e saída de calor das camadas refratárias são fundamentalmente dependentes do histórico das panelas. Os tempos de panela com aço, vazia com e sem tampa e aquecendo não tem relação linear com o estado térmico. Por isso é necessária a utilização de um modelo matemático das panelas que, após ajustado com a prática mediante a utilização dos resultados da instrumentação, possibilita a simulação de toda a gama de possibilidades históricas da panela a fim de quantificar o seu estado térmico no momento do vazamento.

Nesse trabalho é apresentado o modelo matemático das panelas da CST que foi desenvolvido com o objetivo de estabelecer o estado térmico das panelas nas diferentes situações possíveis da planta através de um parâmetro chamado de Índice de Encharque (IE) das panelas. A necessidade desse parâmetro parte do modelo térmico automatizado que calcula as perdas térmicas do aço líquido no processo.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Modelo Matemático

O modelo bidimensional com simetria axial em elementos finitos foi gerado e calculado no software comercial Algor. A malha de elementos finitos é apresentada na Figura 1.

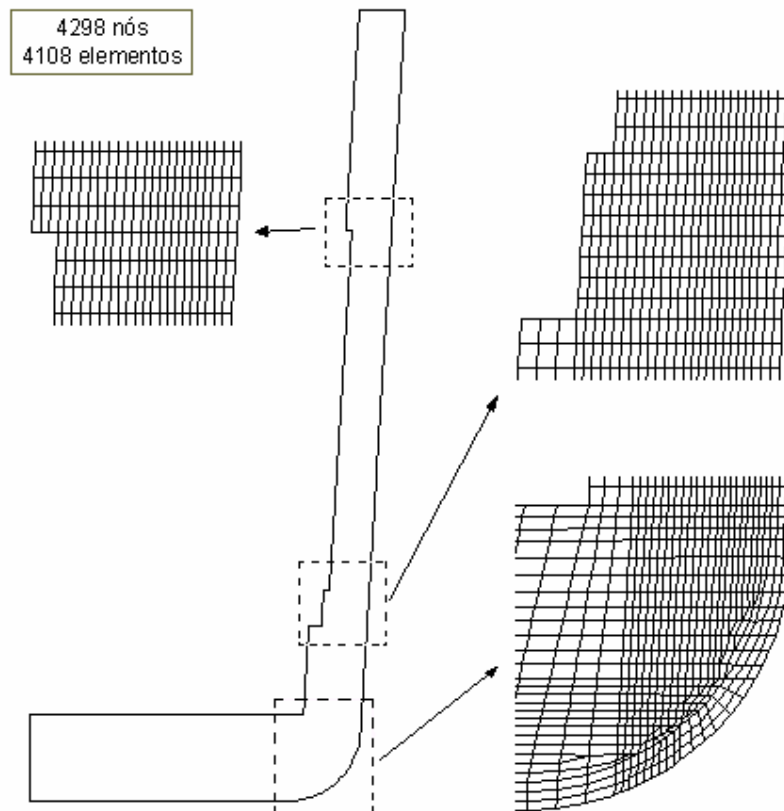


Figura 1 – Malha de elementos finitos.

A transferência de calor transiente e bidimensional através das paredes da panela calculada pelo modelo resulta nas temperaturas dos elementos ao final de cada etapa de cálculo. Um software desenvolvido especificamente para esse fim converte as temperaturas dos elementos em calor armazenado utilizando para isso a densidade e o calor específico dos materiais. Todas as propriedades dos materiais foram fornecidas pelo fabricante dos refratários.

O modelo possibilita simular as diferentes condições térmicas das panelas que são:

- Secagem e aquecimento;
- Resfriando vazia com tampa;
- Resfriando vazia sem tampa;
- Panela com aço;
- Panela lingotando.

## 2.2 Calibração do modelo

A calibração compreende o ajuste das diversas variáveis do modelo tais como coeficientes de troca por radiação e convecção para reproduzir as temperaturas medidas na planta. As temperaturas reais foram obtidas da instrumentação de uma panela com 22 termopares posicionados nas camadas refratárias em diferentes profundidades. A Figura 2 mostra as regiões instrumentadas e, em detalhe, o posicionamento dos termopares na altura média da parede e do fundo. Para o armazenamento das temperaturas foi utilizado um “data logger” acoplado na panela e o período de monitoramento foi de 224 horas (9,3 dias).

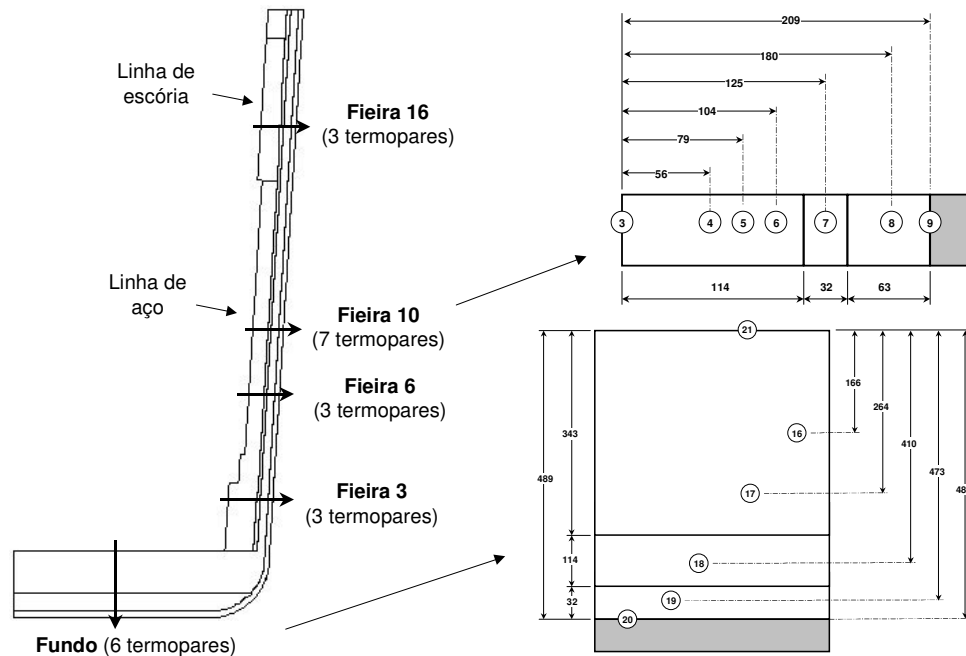


Figura 2 – Esquema da instrumentação da panela.

O período utilizado na calibração foi de 71,2 horas que compreenderam as etapas mostradas na Tabela 1. As etapas 3 a 6 foram experimentos realizados com a panela nova. As demais etapas fazem parte da rotina normal de entrada de panelas novas no processo.

ETAPA	DESCRIÇÃO	DURAÇÃO [min]
1	SECAGEM	480
2	AQUECIMENTO	394
3	S/ TAMPÁ (experiência)	63
4	AQUECIMENTO (experiência)	229
5	C/ TAMPÁ (experiência)	67
6	C/ TAMPÁ (hor)	50
7	C/ AÇO - 1a. Corrida	99
8	LINGOTAMENTO - 1a. Corrida	59
9	C/ TAMPÁ	26
10	S/ TAMPÁ	42
11	C/ TAMPÁ	9
12	S/ TAMPÁ	9
13	C/ AÇO - 2a. Corrida	77
14	LINGOTAMENTO - 2a. Corrida	41
15	C/ TAMPÁ	21
16	S/ TAMPÁ	30
17	C/ TAMPÁ	4
18	S/ TAMPÁ	9
TOTAL		1708

Tabela 1 – Etapas da calibração do modelo matemático.

As figuras 3 e 4 mostram a comparação entre as temperaturas medidas na instrumentação da panela e calculadas pelo modelo matemático.

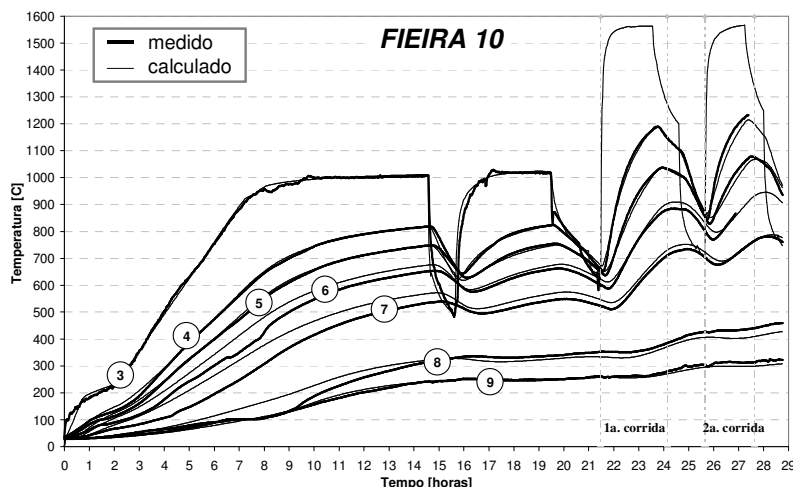


Figura 3 – Comparação entre as temperaturas medidas e calculadas para a fieira 10.

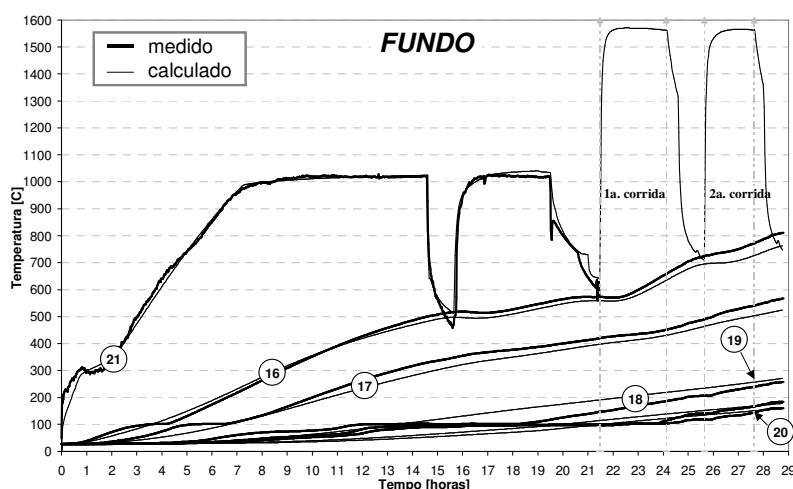


Figura 4 – Comparação entre as temperaturas medidas e calculadas para o fundo.

### 2.3 Ciclos padrões

Um ciclo padrão é necessário para, através da sua simulação repetidamente, possibilitar a análise do comportamento térmico das panelas quando da sua entrada no ciclo (panela nova ou fria retornando). Foram considerados dois ciclos:

*Ciclo Padrão 1 (CP1)* – os tempos desse ciclo foram obtidos de um levantamento de dados do processo e considera o período de manutenção da panela com a mesma destampada. Esta não é uma condição ideal e, por esse motivo, está sendo modificada a tampa para possibilitar a sua permanência durante as operações de manutenção das panelas.

*Ciclo Padrão 2 (CP2)* – é o ciclo térmico ideal por permanecer a panela sempre tampada.

A Tabela 2 mostra os tempos dos ciclos padrões simulados.

	Ciclo Padrão 1 (CP1)		Ciclo Padrão 2 (CP2)	
	etapa	tempo [min]	etapa	tempo [min]
SEM AÇO	resfriamento COM TAMPA	26	resfriamento COM TAMPA	103
	resfriamento SEM TAMPA	42		
	resfriamento COM TAMPA	31		
	resfriamento SEM TAMPA	4		
COM AÇO	vazamento	9	vazamento	9
	tratamento na panela	6	tratamento na panela	6
	transporte para o RS	30	transporte para o RS	30
	Refino Secundário	31	Refino Secundário	31
	transporte para o LC	20	transporte para o LC	20
	Lingotamento Contínuo	51	Lingotamento Contínuo	51

Tabela 2 – Tempos dos ciclos padrões.

## 2.4 Definição de Índice de Encharque das panelas (IE)

O modelo matemático calcula a quantidade de calor armazenado nas camadas refratárias. Quanto maior for o calor retido, melhor é o estado térmico da panela e, conseqüentemente, menor será a perda térmica do aço líquido. Portanto, o IE pode ser o próprio valor do calor armazenado. Outra forma é converter o calor armazenado na panela em temperatura do aço líquido (315 ton.). Essa conversão facilita a utilização desse índice como poderá ser verificado a seguir.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Entrada de panelas no ciclo

É normal a preocupação com a entrada no ciclo de panelas novas ou o retorno de panelas com período longo de resfriamento. Após alguns ciclos as panelas entram em regime e as perdas térmicas para os refratários se minimizam. A esse estágio de operação chamamos de Estado Dinamicamente Estável (EDE) e se caracteriza pela estabilidade das perdas térmicas do aço líquido para a panela nas diferentes etapas do processo.

Para verificar qual é o número de ciclos para a panela atingir o EDE e qual é a perda térmica adicional que antecede a esse estado, foi simulado a entrada de uma panela nova no ciclo. Foram realizadas duas simulações: dez ciclos do CP1 e dez ciclos do CP2. A Figura 5 mostra o IE resultante da simulação dos dois ciclos padrões.

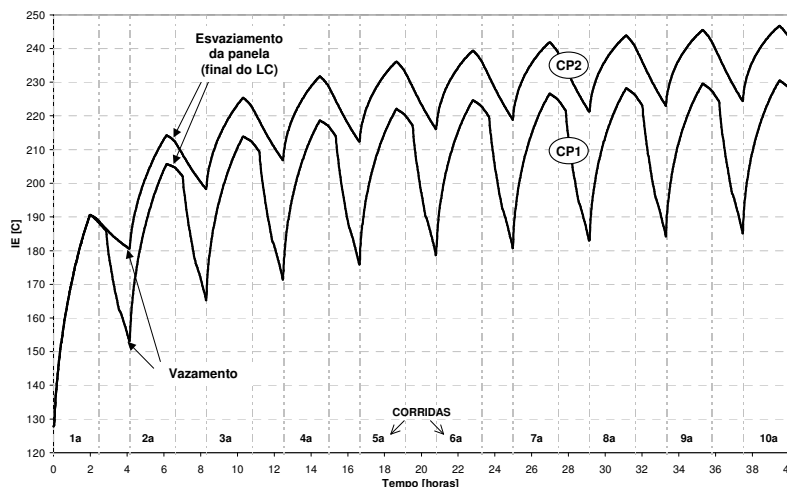


Figura 5 – Índice de Encharque durante os ciclos padrões.

A perda térmica para os refratários em uma corrida é o acréscimo do IE da panela que ocorre durante o período de contato do aço líquido com os refratários, ou seja, desde o vazamento até o final do lingotamento. As perdas térmicas das corridas simuladas são apresentadas na Tabela 3 para os dois ciclos padrões. Percebe-se que existe uma estabilização da perda a partir do terceiro ciclo. Após a panela atinge o EDE e as perdas térmicas se estabilizam.

CORRIDAS	PERDA TÉRMICA DA CORRIDA		DIFERENÇA	% REDUÇÃO
	CP1	CP2		
1	63	63	0	0
2	52	33	19	36
3	48	27	22	44
4	47	25	22	47
5	46	23	22	49
6	46	23	23	49
7	46	23	23	50
8	45	22	23	50
9	45	22	23	51
10	45	22	23	51

Tabela 3 – Perdas térmicas das corridas.

Apesar das perdas térmicas das corridas estabilizarem a partir do terceiro ciclo, o IE das panelas continua crescente como mostra a Figura 5. Isso ocorre devido à maior espessura dos refratários do fundo e pela dificuldade de troca térmica dessa região com o ambiente. Esse fenômeno pode ser melhor entendido quando analisamos as temperaturas dos refratários da parede e fundo (Figura 6) calculados na simulação do CP1. As temperaturas do fundo tendem a subir lentamente devido à sua maior inércia térmica enquanto que a parede atinge o EDE a partir do terceiro ciclo.

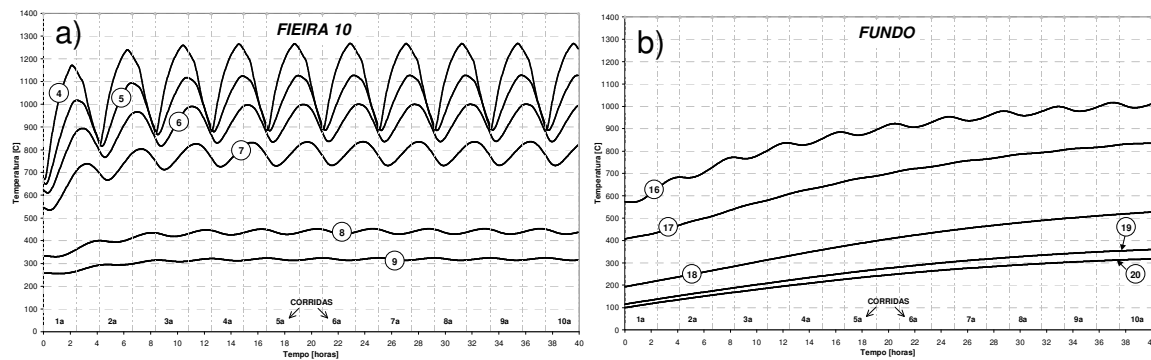


Figura 6 – Temperaturas da fieira 10 (a) e fundo (b) durante a simulação do CP1.

A comparação entre os dois ciclos padrões mostra a importância da tampa durante o período sem aço sobre as perdas térmicas que posteriormente ocorrem com o aço líquido. A utilização da tampa deixa a panela mais encharcada a ponto de reduzir as perdas do aço líquido em 50%. Outro ponto favorável é a elevação na quantidade total de calor armazenado na panela, o que aumenta o tempo que a panela pode ficar fora do ciclo sem a necessidade de aquecimento.

### 3.2 Aquecimento de Painéis

A Figura 7 mostra o aumento do IE das painéis com o tempo de aquecimento. Exemplo: o aquecimento de uma panela com um IE inicial de 133 por 5 horas representa um IE final de 155, valor 33% menor que o obtido no final do lingotamento para o caso do CP1 e 37% no caso do CP2.

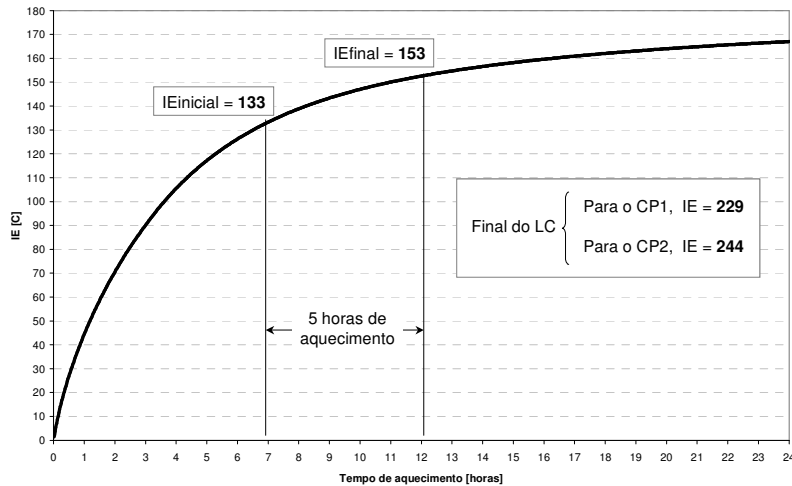


Figura 7 – IE durante o aquecimento de panelas e comparação com o IE após o LC.

### 3.3 Resfriamento da panela

O resfriamento das panelas durante o período sem aço ocorre de duas formas: com e sem tampa. Essas duas situações foram simuladas e são apresentadas na Figura 8. A queda do IE das panelas depende fundamentalmente dos tempos de resfriamento com e sem tampa.

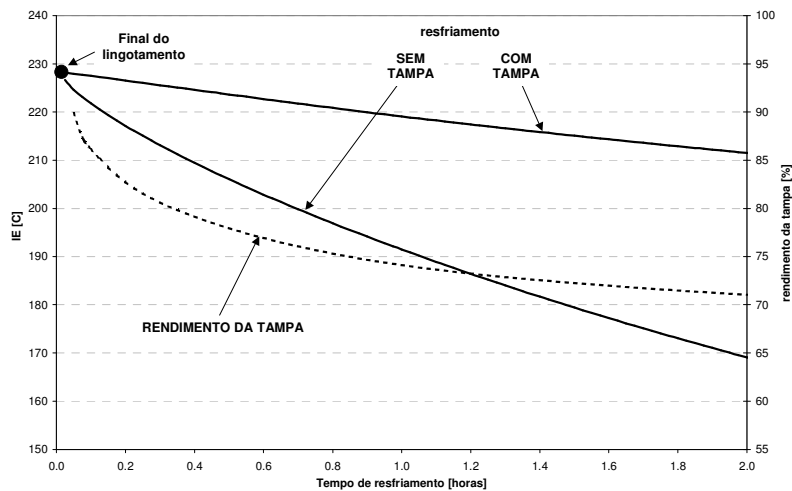


Figura 8 – IE para os resfriamentos após o final do lingotamento e rendimento térmico da tampa.

A tampa atua como um escudo para a radiação e mantém o ar aquecido dentro da panela reduzindo as perdas por convecção. A Figura 8 mostra o rendimento térmico da tampa ao longo do tempo de resfriamento. Para entendermos o que representa o rendimento da tampa, analisemos o resfriamento de duas horas. O IE da panela resfriada sem tampa reduz 58 graus (228 para 169) enquanto que na situação com tampa a redução é de 17 graus. A diferença é o que a tampa conseguiu reter e que pode ser representado pelo seu rendimento ( $41/58 = 71\%$ ).

### 3.4 Cálculo do IE das panelas fora do ciclo

As curvas de resfriamento com e sem tampa e aquecimento foram utilizadas para calcular o IE das diferentes situações possíveis dentro do período sem aço das panelas da

CST. Todas as possibilidades foram incorporadas em tabelas acessadas pelo modelo térmico que calcula a perda térmica do aço líquido. Dessa forma as panelas são classificadas em 5 categorias térmicas e acréscimos diferenciados de temperatura são realizados em cada uma das etapas do processo em função dessa classificação.

#### **4 CONCLUSÕES**

As conclusões relacionadas à realidade do processo da CST são:

- A utilização do modelo matemático na simulação de ciclos padrões típicos do processo da CST possibilitam a avaliação de diferentes práticas operacionais e perdas térmicas relacionadas.
- A utilização de tampa na panela durante todo o período sem aço reduz em torno de 50% das perdas térmicas do aço líquido para os refratários das panelas. Isso justifica a melhoria da tampa articulada para permitir a sua permanência durante os procedimentos de manutenção das panelas.
- As duas primeiras corridas de panelas frias precisam receber acréscimos às temperaturas visadas em cada etapa para suprir as perdas adicionais. Esse acréscimo é diferenciado dependendo se a panela fica com ou sem tampa durante a manutenção da mesma.
- O IE das panelas no final do lingotamento é em torno de 35% superior ao IE das panelas aquecidas (tempo mínimo de quatro horas de aquecimento).
- A eficiência da tampa em reter calor na panela vazia foi quantificada e o seu rendimento varia com o tempo de resfriamento da panela. Em duas horas de resfriamento a tampa consegue reter 71% do calor que seria perdido se a panela estive destampada.
- O comportamento do IE ao longo do tempo sem aço foi convertido em tabelas que são utilizadas pelo modelo térmico do processo para a classificação térmica das panelas.

O uso de um modelo matemático ajustado para as condições próprias de cada aciaria permite o estudo de diversas situações hipotéticas que seriam muito dispendiosas de serem criadas na prática. As informações obtidas a partir do estudo com o modelo matemático permitem o aperfeiçoamento dos padrões operacionais procurando a estabilização cada vez maior do processo e, por conseguinte, a melhoria no controle da temperatura do aço líquido.

#### **5 AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à CST pela divulgação dos resultados.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- 1 FERREIRA, N. F. Controle da Temperatura do Aço Líquido em uma Aciaria Elétrica. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, abril de 2000. 127p.
- 2 FERREIRA, N. F.; SILVA, L. R.M.; STROHAECKER, T. R.; VILELA, A. C. F.; BAS, J. Definição de Regras para o Aquecimento de Panelas da Gerdau – Aços Finos Piratini – Utilizando um Modelo Matemático. XXXO Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, Vitória, maio de 2000.

# **MATHEMATICAL MODEL OF CST LADLES**

## **ABSTRACT**

CST has been developing a project called “Steelmaking Process Thermal Control”, which aims to reduce, the aluminum consume during the aluminothermic heating in the secondary refining and the productivity loss during continuous casting.

The use of a mathematical model in this project comprises to understand the thermal phenomena related to the ladle. As a result of that, the different thermal conditions of the ladles from the end of continuous casting till the steel pouring(ladle without steel) and their influence on liquid steel thermal losses are discussed.

**Keywords: temperature control of liquid steel, mathematical model of ladles.**