

# Conservação de energia em fornos de cozimento de anodo

## *(Energy saving in anode baking furnaces)*

P. R. T. Tiba<sup>1</sup>, B. H. Teider<sup>2</sup>, J. B. Gallo<sup>2</sup>, M. C. Ferreira<sup>3</sup>, V. C. Pandolfelli<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Engenharia de Microestrutura de Materiais - GEMM, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de S. Carlos, Rod. Washington Luiz, km 235, C.P. 676, S. Carlos, SP 13565-905

<sup>2</sup>Alcoa Alumínio S.A., Área de Aplicações, Desenvolvimentos & VPE

<sup>3</sup>Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de S. Carlos, Rod. Washington Luiz, km 235, C.P. 676, S. Carlos, SP 13565-905

tiba\_em03@yahoo.com.br, vicpando@power.ufscar.br

### Resumo

A tendência por unidades de produção mais sustentáveis vem obrigando a indústria de alumínio a adotar estratégias para reduzir o consumo de energia e minimizar a geração de resíduos. Procedimentos nesta direção têm sido implementados em fornos de cozimento de anodo, onde alguns aprimoramentos têm permitido a redução no consumo de energia. Entretanto, sabe-se que durante a etapa de queima do anodo, elevada quantidade de calor é ainda dissipada para o ambiente, aumentando os custos com energia. Desta forma, o presente trabalho tem por objetivo apresentar alternativas de redução do consumo de combustível do forno de cozimento de anodo considerando, para isto, o transporte de calor das câmaras de combustão desde as paredes refratárias até o bloco de carbono, passando pelo coque fluido. Os resultados aqui obtidos indicam que uma possível mudança da distribuição do tamanho de partículas do coque, bem como, a adição de uma manta isolante no topo do forno pode aperfeiçoar o desempenho do sistema quando o foco é sustentabilidade e otimização do processo.

**Palavras-chave:** alumínio, refratário, anodo.

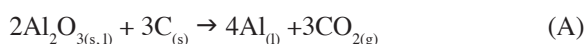
### Abstract

*The trend for sustainable production units induced the aluminum industry to adopt strategies of reducing the energy consumption and waste generation. In this sense, several procedures have been carried out in the anode baking furnace, reducing its energy consumption. However, during the carbon block thermal treatment, a great amount of heat is still released to the environment, increasing the energy cost. Therefore, the present work aims to show alternatives of reducing the anode furnace energy consumption considering the heat flow from the combustion chamber, via the flue wall and the fluid coke, till the anode. The results point out that a change in the fluid coke particle size distribution as well as placing an insulating blanket on the top of the furnace can optimize the anode furnace performance when the focus is sustainability and the process optimization.*

**Keywords:** aluminum, refractory, anode.

## INTRODUÇÃO

Em plantas Pre-Baked para cubas eletrolíticas, a etapa de cozimento de anodo representa um importante passo na produção do metal primário uma vez que o desempenho destes fornos influencia a qualidade do bloco de carbono consumido na reação de redução da alumina para o alumínio. Atualmente, este consumo encontra-se em níveis próximos a 334 kg de anodo por tonelada de metal produzido, considerando uma eficiência de 100% na reação [1]. Portanto, como forma de otimizar o consumo de carbono na reação de eletrólise (equação A), o anodo deve apresentar baixa reatividade ao ar, baixa permeabilidade, alta condutividade térmica e resistência mecânica, o que também contribui para uma maior estabilidade operacional das células eletrolíticas e, conseqüentemente, maior produtividade [2, 3].



De acordo com a literatura referente ao forno de anodo, verifica-se que, ao longo dos anos, vários esforços vêm sendo realizados com o objetivo de otimizar a qualidade do bloco, reduzir o custo de manutenção do equipamento, além de minimizar o elevado consumo de energia do mesmo [4, 5]. Nesta direção, pode-se citar o desenvolvimento de programas destinados ao controle mais preciso do processo [6, 7], a otimização do fluxo de calor nas paredes ou condutos refratários e o desenvolvimento de refratários de elevado desempenho [5, 8, 9]. No entanto, a queima do anodo ainda é considerada a etapa mais onerosa da produção do bloco devido aos elevados gastos com materiais refratários e, principalmente, com a quantidade de energia consumida pelo equipamento, tornando mais distante o plano para implantação de unidades sustentáveis [1]. O consumo de combustível pode ser considerado o principal parâmetro para verificar a eficiência do forno uma vez que esta variável está relacionada ao tipo de forno utilizado (aberto ou fechado),

às condições do refratário, ao projeto do forno, às práticas operacionais, ao controle do processo, à composição do anodo, à vedação do forno ou às infiltrações de ar, entre outros [4]. Portanto, reduzir este gasto parece ser uma tarefa bastante complexa, pois envolve a união de vários setores como a engenharia de processo, operação, pesquisa e desenvolvimento, logística, comercial. etc.

Considerando os fornos do tipo aberto, observa-se que o tratamento térmico na etapa de processamento do anodo ocorre por meio de duas fontes principais de energia térmica: combustível fóssil e voláteis do piche proveniente da composição do anodo verde. Estima-se que 40% da energia térmica total do equipamento estão relacionadas à queima destes voláteis, no entanto, estes valores dependem do projeto e operação de cada planta de anodo [3]. Portanto, caso não houvesse o reaproveitamento destes voláteis na forma de energia, provavelmente, a vida útil dos fornos de anodo estaria bastante comprometida nos dias atuais, devido a questões de sustentabilidade. Um importante aspecto é que o aumento do teor de piche na composição do anodo verde favorece a redução do consumo de combustível devido à maior disponibilidade de voláteis para a produção de energia. Entretanto, plantas de alto desempenho que apresentam processamento diferenciado dos blocos procuram reduzir o teor de piche devido aos danos decorrentes do uso desta matéria prima ao meio ambiente. Assim, torna-se necessário efetuar um balanço entre estas duas fontes de energia no sistema de forma a favorecer uma composição do anodo verde mais “limpa”, ou seja, com menor teor de piche possível sem que haja aumento do consumo de combustível no equipamento. No caso ideal, toda a energia térmica empregada no processo seria utilizada apenas para queimar os blocos de carbono. Entretanto, grande parte deste calor é usada para aquecer o ar, o revestimento refratário e o coque fluido, sendo que outra porção é desperdiçada nas superfícies laterais, no fundo e no topo do equipamento [3]. Assim, mesmo com vários aperfeiçoamentos tecnológicos, como mencionado anteriormente, o equipamento ainda possui várias frentes de melhorias a serem pesquisadas para torná-lo cada vez mais sustentável. O forno de anodo é constituído por várias seções de tijolos refratários, geralmente de 50% de alumina, onde nestas, o calor gerado pela queima do combustível e pelos voláteis do piche entre os condutos refratários é utilizado para cozer o anodo. Adicionalmente, parte desta energia é liberada ao ambiente pelo topo, lateral e o fundo ou base do forno, conforme observado na Fig. 1. Portanto, em um primeiro momento, ocorre à condução do calor pela parede refratária, alcançando o coque fluido. Este último possui duas funções principais no forno: evitar a oxidação do anodo e conduzir energia térmica até o anodo. Ao mesmo tempo, parte do calor total é dissipada ao ambiente pelo topo devido ao contato direto do coque fluido com o ambiente e parte é perdida pelas laterais e pelo fundo do forno. No entanto, neste caso, isolantes refratários são utilizados de forma a barrar esta condução de calor para o meio externo. Com isto, observa-se a elevada importância do refratário, do coque fluido e de mecanismos que evitem

a dissipação de calor para o ambiente, reduzindo o consumo de energia.

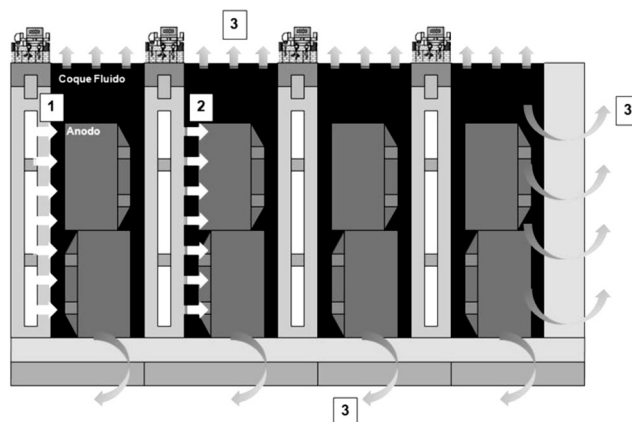


Figura 1: Ilustração esquemática do caminho percorrido pelo calor em uma seção do forno (1 - transporte de calor da câmara de combustão até o coque fluido através do refratário; 2 - energia térmica transferida ao anodo através do coque fluido; 3 - perda de calor pelas superfícies do forno).

[Figure 1: Heat path schedule in a furnace section (1 - heat transfer from the combustion chamber till the fluid coke through the refractory; 2 - thermal energy transferred till the anode through the fluid coke; 3 - heat losses at the external surfaces of the furnace).]

Com base nos aspectos abordados acima, o presente trabalho tem por objetivo apresentar alternativas para a redução do consumo de energia do forno, considerando três aspectos principais: 1 - parede refratária: verificar a influência das propriedades térmicas do tijolo como a condutividade térmica e a difusividade térmica no tempo de aquecimento da parede. Adicionalmente, simulações foram realizadas com o objetivo de entender a influência de uma possível redução da espessura do tijolo no consumo de energia do forno; 2 - coque fluido: por se tratar de partículas, a otimização do empacotamento do coque fluido no forno pode ser fundamental para diminuir os vazios que reduzem a condutividade térmica, por atuarem como isolantes térmicos. Com isto, almeja-se aumentar o fluxo de calor e, conseqüentemente, reduzir o consumo de energia por meio da variação da condutividade térmica do coque fluido; 3 - perdas de superfície: entender a influência de possíveis mecanismos que atuem como barreira ao transporte de calor para o ambiente, como a adição de uma manta isolante refratária no topo do forno.

## MATERIAIS E MÉTODOS

**Parede ou conduto refratário:** na seção do forno, a combustão ocorre entre as paredes refratárias ou na câmara de combustão (vide Fig. 1), sendo a radiação e a convecção os principais mecanismos de transferência de calor dos queimadores até as paredes. Esta energia é usada para aquecer os tijolos refratários da parede. Considerando a operação de um forno genérico, verifica-se que na primeira seção do Fire (unidade responsável pela queima dos

anodos - Fig. 2) ou primeira seção do pré-aquecimento, a temperatura da parede é aquecida de 200 °C a 400 °C e permanece nesta condição por 24 h, o que corresponde ao ciclo de queima do forno. Após este período, o Fire se movimenta uma seção e a anterior entra na segunda etapa da queima onde a temperatura varia de 400 °C a 600 °C e, assim por diante, conforme verificado na Tabela I [10]. Portanto, o Fire é composto por 3 seções de pré-aquecimento e 4 de aquecimento até que as paredes alcancem temperaturas próximas à 1250 °C, além das 6 seções de resfriamento do anodo (Fig. 2).

Tabela I - Temperatura da parede para cada etapa do cozimento do anodo.

[Table I - Flue wall temperature for each step of the anode baking schedule.]

	Temperatura inicial da parede (°C)	Temperatura final da parede (°C)
1º Seção	200	400
2º Seção	400	600
3º Seção	600	800
4º Seção	800	1000
5º Seção	1000	1200
6º Seção	1200	1250
7º Seção	1250	1250

Este aquecimento da parede ocorre no estado transiente, ou seja, a temperatura da mesma varia com tempo e, no caso estudado, a aproximação foi unidimensional, conforme mostra a Fig. 3.

A taxa de condução de calor através de uma parede sólida pode ser estimada pela lei de Fourier (equação B), na qual a quantidade de calor transferido (em módulo) é dependente da condutividade térmica do material, K, [W/mK], da área exposta, A, [m²], do gradiente de temperatura do material, dT, [K] e da dimensão característica na direção da troca de calor, dx, [m], no caso, a espessura da parede.

$$q = \left| kA \frac{dT}{dx} \right| \tag{B}$$

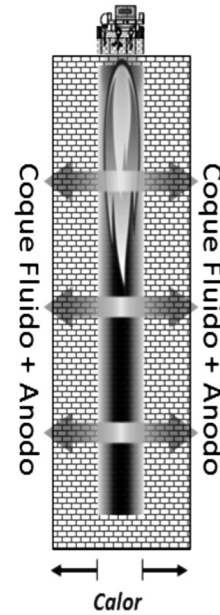


Figura 3: Fluxo de calor da parede refratária. [Figure 3: Heat transfer through the refractory wall.]

Para o regime transiente e unidirecional, efetua-se, primeiramente, o cálculo de coeficiente de Biot que nos fornece a direção para o cálculo do tempo de aquecimento da parede, conforme a equação C.

$$Bi = \frac{h \left( \frac{V}{A} \right)}{k} \tag{C}$$

onde h [W/m²K] é o coeficiente de transferência de calor superficial (a temperatura do meio ou da câmara de combustão utilizada nos cálculos foi 1500 °C e h foi estimado pelo software de simulação térmica descrito abaixo); V é o volume em m³ e A a área em m² e k a condutividade térmica do tijolo [W/mK]. Se o valor de Biot for menor que 0,1, a seguinte equação é utilizada para o cálculo:

$$\frac{T_0 - T_\infty}{T_1 - T_\infty} = e^{\left( \frac{hA}{\rho c V} \right) t} \tag{D}$$

onde T<sub>0</sub> é a temperatura no plano central da parede [°C], T<sub>∞</sub> é



Figura 2: Projeto do sistema de queima ou Fire. [Figure 2: Firing system design or Fire.]

a temperatura do ambiente que aquece a parede (câmara de combustão) [°C] e  $T_i$  é a temperatura inicial da parede [°C];  $\rho$  é a densidade do tijolo [g/cm<sup>3</sup>];  $c$  é o calor específico de material [cal/kg °C] e  $t$  é o tempo de aquecimento da parede [s]. Se o Biot for maior que 0,1, utilizam-se as cartas de Heisler [11, 12] que são ábacos que facilitam o cálculo do tempo de aquecimento da parede. Estes ábacos são representações gráficas de soluções analíticas complexas que fornecem o perfil de temperatura em meios sólidos. Os gráficos são apresentados em termos dos grupos adimensionais  $Bi^{-1}$ ,  $Fo$  e  $\theta$  (adimensional de temperatura), sendo definidos abaixo:

$$Bi^{-1} = \frac{k}{hL} \quad (E)$$

$$\theta = \frac{T_o - T_\infty}{T_i - T_\infty} \quad (F)$$

$$Fo = \frac{\alpha t}{L^2} \quad (G)$$

onde  $L$  corresponde à metade da espessura total da parede [m],  $\alpha$  é a difusividade térmica do refratário [m<sup>2</sup>/s] e  $t$  o tempo de aquecimento do mesmo [s]. Assim, com o valor de  $\theta$  e o inverso de Biot, encontra-se o número de Fourier que é dependente do  $\alpha$  do tijolo, da espessura da parede (no caso,  $L = 0,115$  m) e do tempo ( $t$ ). Como resultado da teoria, o tempo de aquecimento da parede com uma espessura  $L$  pode ser determinado [11-13]. Assim, simulações foram realizadas para 7 distintas composições de tijolos comerciais refratários [14] com o objetivo de verificar como as propriedades térmicas do refratário (condutividade térmica e difusividade térmica - Tabela II) influenciam o tempo de aquecimento da parede e, conseqüentemente, o consumo de energia.

Adicionalmente, verificou-se a dependência da espessura do tijolo no número de Fourier (equação G). Neste sentido, cálculos foram realizados reduzindo a espessura do tijolo de 0,115 m (situação atual) para 0,110 e 0,100 m, como forma de verificar a correlação desta variável no consumo

Tabela II - Propriedades térmicas dos tijolos densos comerciais.

[Table II - Thermal properties of commercial flue wall bricks.]

Composição	Condutividade térmica a 1250 °C (W/mK)	Difusividade Térmica a 1250 °C (m <sup>2</sup> /s)
A	2,08	6,12
B	2,14	4,73
C	2,50	6,87
D	2,25	6,40
E	2,08	5,90
F	1,97	5,70
G	2,17	5,00

de energia, conforme proposto [4].

**Coque fluido:** o fluxo de energia térmica da parede ao anodo ocorre por meio de dois mecanismos: por condução pelas partículas do coque de recobrimento e por radiação (coque e parede) devido à elevada temperatura de queima nas seções do Fire que antecedem o resfriamento dos blocos [11-13]. Uma analogia simplificada deste fluxo pode ser realizada por um sistema de circuito elétrico, conforme a Fig. 4. Considera-se como sistema ideal, um circuito onde não há resistências elétricas pelo caminho do fluxo. No caso estudado, o calor total que alcança o coque fluido é dissipado por meio de duas resistências térmicas principais antes de alcançar o anodo: a condução ( $r_1$ ) e a radiação entre as partículas de coque de recobrimento ( $r_2$ ). Com isto, para otimizar o fluxo de calor até o anodo, busca-se a minimização de cada resistência térmica.

Para o mecanismo de condução a base teórica utilizada é a Lei de Fourier conforme descrito na equação B. Sabe-se que o empacotamento de partículas do coque de recobrimento no forno influencia a sua condutividade térmica. Portanto, o termo mais apropriado seria condutividade térmica

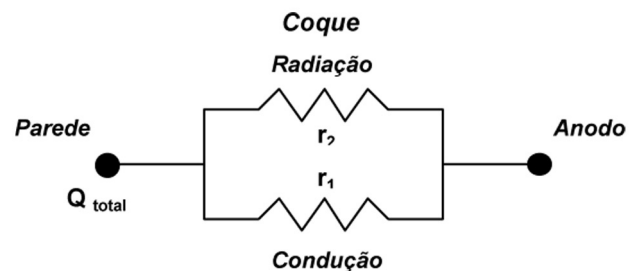


Figura 4: Analogia da transferência de calor por um circuito elétrico.

[Figure 4: Analogy of heat transfer by an electrical circuit.]

efetiva ou aparente. Este parâmetro considera a associação da condutividade térmica das partículas de coque e dos vazios deixados quando a distribuição das partículas não é otimizada. Já o cálculo da energia por radiação depende da emissividade do material ( $\epsilon$ ), da constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>), da área exposta ( $A$ ) em m<sup>2</sup> e das temperaturas da parede ( $T_s$ ) e do anodo ( $T_{viz}$ ) (K). A equação que rege este mecanismo pode ser expressa por [11]:

$$q_{rad} = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (H)$$

Assim, para uma possível otimização do fluxo de calor do coque fluido, o foco foi dado apenas no mecanismo por condução uma vez que os parâmetros envolvidos no transporte de calor por radiação são constantes (equação H). Neste sentido, simulações foram realizadas, variando a condutividade térmica efetiva do coque de 0,3 a 2,5 W/mK, inclusive para o valor de 0,74 W/mK que representa a condutividade térmica teórica do coque fluido [15]. Estes valores



de condutividade térmica foram sugeridos com o intuito de compreender a relação entre a distribuição do tamanho de partículas do coque (densidade efetiva do coque) e a eficiência de transporte de calor até o anodo na redução do consumo de combustível do forno, ou seja, como o aumento ou uma possível redução da condutividade térmica do coque influencia o gasto com energia. O cálculo do fluxo de calor foi realizado para cada seção de queima e a variação de temperatura do coque é apresentada na Tabela III. Adicionalmente, a emissividade sugerida é de 0,95 [15] e a área do fluxo de calor, 13,88 m<sup>2</sup>.

*Perda de energia térmica pelo topo do forno:* em fornos do tipo aberto, o ambiente fica em contato direto com o coque fluido, contribuindo para uma intensa troca térmica entre os meios. Com isto, elevada quantidade de calor deve

Tabela III - Temperatura da parede e do anodo em cada seção do Fire.

[Table III - Flue wall and anode temperatures for each section of the Fire.]

	Temperatura na interface entre a parede e o coque (°C)	Temperatura na interface entre o coque e o anodo (°C)
1° Seção	400	200
2° Seção	500	400
3° Seção	800	700
4° Seção	1000	900
5° Seção	1250	1100
6° Seção	1250	1180
7° Seção	1250	1200
8° Seção	1250	1200

ser fornecida ao sistema a fim de compensar estas perdas. Observam-se dois mecanismos de transporte de calor na dissipação de energia pelo topo: convecção, devido à troca de calor do coque com o ar do ambiente, e radiação, dependendo da temperatura do coque [11-13]. O primeiro depende basicamente das características do meio ambiente e da diferença de temperatura do ar e do coque, conforme ilustram as equações I e J [16].

$$q_{\text{conv}} = h_{\text{conv}} A(T_s - T_{\infty}) \quad (\text{I})$$

$$h_{\text{conv}} = 0,244V_{\text{ar}}^2 + 4,2195V_{\text{ar}} + 6,0506 \quad (\text{J})$$

onde  $h_{\text{conv}}$  é o coeficiente de convecção forçada [W/mK];  $A$  é a área exposta ao ambiente por seção (21,6 m<sup>2</sup>);  $T_s$  é a temperatura da superfície do coque (avaliada utilizando-se o software de simulação térmica descrito abaixo) e  $T_{\infty}$  a temperatura do ambiente (323K) e  $V_{\text{ar}}$  é a velocidade do ar no ambiente (2 m/s). Na radiação, parâmetros como coeficiente

de Stefan-Boltzmann, emissividade do coque e a temperatura do meio e da superfície são utilizados no cálculo (equação H). Entretanto, para o presente estudo, considerou-se apenas a convecção uma vez que a adição de uma manta isolante refratária de 51 mm de espessura com condutividade térmica de 0,1 W/mK no topo do forno será predominantemente eficaz para atenuar tal mecanismo de transporte de calor. É importante destacar que estes cálculos foram realizados por meio do software de simulação térmica desenvolvido em parceria entre o Grupo de Engenharia de Microestrutura de Materiais da UFSCar e a Alcoa Alumínio S.A. de Poços de Caldas. Este considera um regime estacionário para o transporte de calor, sendo que por meio das propriedades térmicas dos materiais e das condições do meio (temperatura de face quente, temperatura ambiente e velocidade do ar), pode-se estimar o fluxo de calor perdido para o ambiente.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

*Parede refratária:* a partir das propriedades térmicas de 7 composições de tijolos comerciais (Tabela II) e das condições de contorno para as equações descritas na metodologia, estimou-se o tempo de aquecimento para cada seção do Fire, bem como o valor total para a queima do anodo, ou seja, a soma do tempo de todas as seções do Fire, conforme observado na Tabela IV. Um aspecto importante a destacar é que para todos os materiais o número de Biot foi maior que 0,1 e, portanto, as cartas de Heisler foram utilizadas para os cálculos.

Tomando como referência a composição A que é a composição atualmente utilizada no conduto, observa-se uma redução do tempo total de aquecimento da parede refratária caso o produtor de alumínio faça a opção pelas composições C e D. O tempo total de aquecimento nas 6 seções do Fire foi reduzido em 11 min na comparação entre as composições A e C, devido aos distintos valores, tanto da condutividade térmica quanto da difusividade térmica dos materiais, sendo que esta última possui correlação direta com a taxa de aquecimento do material. No entanto, mesmo os materiais C e D apresentando menor tempo para aquecer a parede, torna-se fundamental compreender se este tempo é efetivamente relevante para a economia de energia do forno. Considerando que o equipamento gasta em média 300 L de combustível por hora por Fire, uma redução média de 11 min por seção no tempo de aquecimento do tijolo equivale a 55 L de combustível. Sabendo-se que um Fire realiza 23 queimas no ano, a economia total por ano equivale a aproximadamente 1300 mil litros de combustível. Em um forno contendo 4 Fires, a porcentagem de redução de custo devido à mudança da composição do tijolo da parede refratária e, conseqüentemente, a redução do tempo de aquecimento encontra-se em valores próximos a 0,023% do total de combustível consumido no ano. Considerando a aplicação, verifica-se que esta redução é irrelevante para o processo uma vez que a variação do consumo de energia em função do tempo é consideravelmente maior que este valor. Portanto, mesmo se o equipamento tivesse o consumo de

Tabela IV - Tempo de aquecimento das composições comerciais expressa em min.  
 [Table IV - Heating time for the commercial compositions in min.]

Composição	1° Seção	2° Seção	3° Seção	4° Seção	5° Seção	6° Seção	Total (min)
A	36	36	27	27	27	18	171
B	35	35	35	47	47	23	222
C	24	24	24	32	32	24	160
D	26	26	26	34	34	17	163
E	28	28	28	37	37	18	176
F	29	29	29	39	39	19	184
G	33	33	33	44	44	22	209

energia reduzido devido a esta mudança, seria praticamente impossível garantir que esta estaria relacionada com a mudança da composição do tijolo (redução do tempo de aquecimento) devido à elevada complexidade de operação do forno. Entretanto, é importante destacar que este raciocínio pode ser aplicado a outros equipamentos que envolvam refratários. A escolha por refratários que apresentem propriedades térmicas diferenciadas permite a redução do tempo de aquecimento do revestimento utilizado em cadinhos de transporte de alumínio líquido, contribuindo para a economia de energia do processo [17]. Em relação à redução da espessura do tijolo, observa-se que a mudança de 0,115 m para 0,110 m e 0,100 m, reduz o tempo de aquecimento da parede em média de 17 e 27 min, respectivamente. Assim, ao se considerar este efeito ao longo do ano e para um forno contendo 4 Fires, verifica-se uma redução aproximada de 0,48% e 0,76% no total de energia consumida. Segundo os autores do presente trabalho, o custo-benefício em reduzir a espessura do tijolo para a conservação de energia não é favorável uma vez que o gasto para tal mudança influenciaria diretamente nos custos gerais (mudanças no projeto do equipamento), no consumo de coque fluido, na operação do forno, além do desenvolvimento de composições de alto desempenho pelo produtor de refratário. Portanto, para a implementação de tal alternativa, estudos adicionais devem ser realizados, considerando os aspectos acima mencionados.

**Coque fluido:** de acordo com a literatura, a condutividade térmica aparente do coque é de 0,74 W/mK [15]. Portanto, entender o motivo pelo qual este material possui condutividade térmica tão baixa é o primeiro passo para a conservação de energia. Sabe-se que uma das funções do coque conforme mencionado anteriormente é promover que o máximo de energia térmica possível alcance os anodos. No entanto, uma parcela deste calor é perdido para atmosfera pelo topo do forno, conforme ilustra a Fig. 5.

Neste sentido, alguns pontos devem ser considerados: por um lado, o aumento da condutividade térmica do coque por meio da otimização de sua granulometria intensifica o fluxo de calor até o anodo. Em contrapartida, a troca de energia térmica entre o coque e o ambiente também é mais intensa devido ao aumento da temperatura da superfície do topo. Com isto, um balanço entre estes valores deve ser

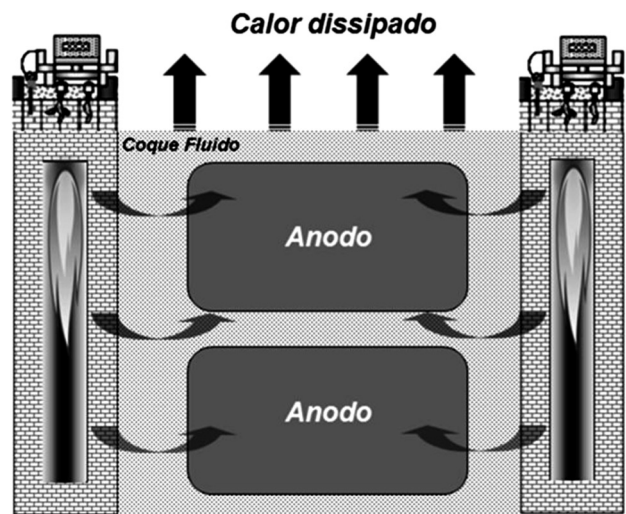


Figura 5: Calor dissipado durante o aquecimento da parede refratária, coque fluido e anodo.

[Figure 5: Heat loss during the flue wall, fluid coke and anode heating.]

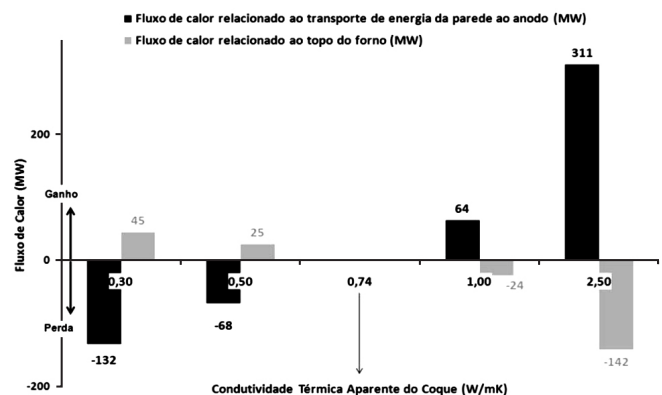


Figura 6: Balanço do fluxo de calor em função da condutividade térmica aparente do coque fluido.

[Figure 6: Heat flow balance as a function of the apparent thermal conductivity of the fluid coke.]

realizado, conforme a Fig. 6.

Pelo balanço térmico (Fig. 6), observa-se que uma possível redução da condutividade térmica do coque fluido de 0,74 W/mK para 0,30 ou 0,50 W/mK não favorece a conservação

de energia uma vez que a quantidade de energia térmica conservada no topo (coluna em cinza) é menor que a perda de calor verificado da parede ao anodo (coluna em preto). Por outro lado, se a condutividade térmica do coque fluido for elevada para 1,00 ou 2,50 W/mK, o calor transferido da parede ao anodo (coluna em preto) é maior que a perda de energia do topo (coluna cinza) e, portanto, a conservação de energia será alcançada. Os valores apresentados na Fig. 6 referem-se à situação padrão ou condutividade térmica de 0,74 W/mK, ou seja, caso haja redução da condutividade térmica do coque para 0,5 W/mK, o fluxo de calor da parede para o anodo será reduzido em 68 MW, enquanto a quantidade de energia conservada no topo será de 25 MW. Portanto, no balanço final, não ocorre conservação de calor uma vez que a perda é superior (25-68 KW) em relação à condição padrão. Este mesmo raciocínio pode ser aplicado às demais condições. Adicionalmente, o aumento da condutividade térmica do coque fluido devido à otimização do empacotamento do mesmo requer algumas mudanças na operação no forno. Inicialmente, um estudo da distribuição do tamanho de partículas do coque deve ser realizado com o objetivo de reduzir os vazios presentes. Em seguida, adaptações devem ser efetuadas no controle da granulometria do coque recebido pelo fornecedor e nos silos responsáveis por garantir à correta distribuição do tamanho de partículas do coque fluido no forno. Além disto, a temperatura do topo do forno pode aumentar, o que resultaria em um ambiente mais severo ao operador, prejudicando a segurança do mesmo. Desta forma, para o cálculo real do custo deste projeto, todas as abordagens acima devem ser levadas em consideração. A condição ótima ocorreria quando se utiliza uma formulação de coque com elevada condutividade térmica entre o conduto refratário e o anodo, e outra composição de baixa condutividade térmica acima do anodo de forma a minimizar a dissipação de energia neste sentido. Porém, esta é uma situação ainda hipotética.

*Perda de energia térmica pelo topo do forno:* como mencionado anteriormente, fornos do tipo aberto apresentam troca excessiva de calor entre o coque fluido no topo e o ambiente. De acordo com as simulações térmicas, a adição de uma manta isolante de 0,1 W/mK reduziria em 52,56% a energia térmica perdida por Fire, ou seja, uma economia de aproximadamente 12 KW/m<sup>2</sup> (diferença do fluxo de calor perdido no topo do forno sem e com a manta) em cada queima do Fire. Sabendo-se que este realiza 23 queimas em um ano e que o poder calorífico do combustível é de 38,2 MJ por litro, observa-se que o potencial máximo de redução seria de 4% do total consumido na planta. É importante destacar que este é o valor máximo teórico de conservação de energia o qual depende de uma série de fatores, tais como a operação e o projeto do forno. Adicionalmente, verifica-se que este projeto requer mudanças apenas na operação do forno. Observa-se que as ações de colocar e retirar a manta do topo do sistema devem ser inseridas no processo de operação do forno e, se realizadas da forma correta, podem efetivamente contribuir para a conservação de energia.

## CONCLUSÕES

A conservação de energia envolve uma análise sistêmica considerando o projeto e a operação do forno, o conhecimento técnico em refratários e a teoria de transferência de calor, além do entendimento das necessidades do produtor de alumínio. De acordo com o presente trabalho, a alternativa em adicionar uma manta isolante refratária no topo do forno representa a melhor relação custo-benefício, já que o potencial de redução de energia é bastante elevado, segundo os cálculos realizados, e não há mudanças bruscas no projeto do forno, apenas na operação do mesmo. As demais hipóteses envolvendo a composição e a dimensão (espessura) do tijolo refratário que compõem o conduto, bem como a otimização da distribuição do tamanho de partículas do coque fluido, aparentemente não são as mais indicadas quando o foco é de conservar energia a baixo custo e curto prazo. Isto ocorre devido ao alto custo de implementação além das elevadas alterações tanto na operação quanto no projeto do forno. Adicionalmente, caso o produtor de alumínio opte por manter o mesmo consumo de energia e inserir a manta no topo, uma maior quantidade de energia térmica será fornecida ao anodo, contribuindo para o aumento da qualidade do bloco e, conseqüentemente, maior eficiência nas cubas eletrolíticas. Como resultado, o produtor de alumínio poderá elevar os seus níveis de produção de metal primário sem que haja elevados investimentos, tanto no processo quanto nas práticas de operação. Sendo assim, a correta utilização dos materiais refratários encontrados no sistema proporciona além de redução nos custos da empresa, uma planta mais sustentável e oportunidades de melhorias no processo de produção do alumínio primário, tornando a empresa mais competitiva a longo prazo.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudo e à Alcoa Alumínio S.A. pelo apoio dado no estudo. O suporte da Eng. Lídia R. G. Gonçalves na parte experimental também é reconhecido pelos autores.

## REFERÊNCIAS

- [1] F. Goede, *Refurbishment and modernization of existing anode baking furnaces*, Light Metals (2007) 973-976.
- [2] D. Beach, R. Coetzee, M. Lyle, D. Fantin, H. Gay, P. Ahieu, *Proven control philosophy and operation for anode baking process*, Light Metals (2007) 953-957.
- [3] B. J. Racunas, *Anode baking furnace thermal balance*, Light Metals (1980) 525-530.
- [4] J. Bigot, M. Gendre, J. C. Rotger, *Fuel consumption: a key parameter in anode baking furnaces*, Light Metals (2007) 965-968.
- [5] A. X. Rolf, *Measures to improve carbon baking*, Light Metals (1992) 739-745.
- [6] D. S. Severo, V. Gusberti. E. C. V. Pinto, *Advanced 3D*

*modelling for anode baking furnaces*, Light Metals (2005) 697-702.

[7] F. Keller, U. Mannweiler, D. Severo, *Computational modeling in anode baking*, Light Metals (2006) 1-12.

[8] M. Gendre, J. C. Rotger, Y. E. Ghaoui, N. Mathieu, *A breakthrough in anode baking furnace fluewall design*, Light Metals (2007) 969-972.

[9] D. Maiwald, W. Leisenberg, *The development of anode baking furnace technology from past to future*, Light Metals (2007) 947-951.

[10] “Manual de operação dos fornos de cozimento de anodos”, Alumar, Doc. Int. (2004) 1-17.

[11] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, “Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”, 5<sup>o</sup> Ed., LTC, Rio de Janeiro, Brasil (2003) 36-99.

[12] J. P. Holman, “Transferência de Calor”, McGraw-Hill,

S. Paulo, SP (1983) 25-64.

[13] J. H. Lienhard IV, J. P. Lienhard, “A Heat Transfer Textbook”, 3<sup>a</sup> Ed., Cambridge, EUA (2002) 139-265.

[14] P. R. T. Tiba, B. H. Teider, J. B. Gallo, V. C. Pandolfelli, *Seleção de refratários para fornos de cozimento de anodo*, Cerâmica 55, 333 (2009) 113-119.

[15] F. Keller, P. O. Sulger, “Baking of anodes for the aluminum industry”, 1<sup>st</sup> Ed., R&D Carbon Ltd., Sierre, Suíça (2008) 486.

[16] H. W. Hoffmeister, “Refractory Engineering: Materials-Design-Construction”, 2<sup>nd</sup> Ed., Vulkan-Verlag, Essen, Alemanha (2004) 134-140.

[17] P. Bonadia, M. A. L. Braulio, J. B. Gallo, V. C. Pandolfelli, *Refractory selection for long-distance molten-aluminum delivery*, Am. Ceram. Soc. Bull. 85, 8 (2006) 9301-9309.

(Rec. 13/03/2010, Ac. 07/05/2010)