

Análise sistêmica para seleção de refratários para transporte de alumínio líquido

(Systemic analysis for refractory selection for molten aluminum transportation)

M. A. L. Braulio¹, P. Bonadia², J. B. Gallo², V. C. Pandolfelli¹

¹Grupo 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

²Departamento de Aplicações e Desenvolvimento, Alcoa Alumínio S.A.

Rod. Poços-Andradas, km 10, Poços de Caldas, MG, Brasil

g218626@polvo.ufscar.br; vicpando@power.ufscar.br

Resumo

As vantagens econômicas decorrentes da comercialização de alumínio líquido por meio de cadinhos ressaltam a importância da correta seleção dos revestimentos refratários, a fim de otimizar o processo. Uma primeira etapa na seleção se relaciona ao estudo da composição química do refratário e a busca por soluções que reduzam a corrosão. Para tanto, é fundamental a escolha de composições contendo óxidos termodinamicamente estáveis e aditivos anti-molhantes, os quais colaboram para o aumento da vida útil do revestimento. Além do aspecto químico, o controle da distribuição de tamanho de poros é outra variável relevante quando se procura retardar a infiltração do metal fundido no material. Como, durante a operação, o revestimento está sujeito a uma variedade de mecanismos de desgaste, as propriedades mecânicas dos refratários também devem ser consideradas, além das características físicas que influenciam diretamente na carga útil para o transporte. Adicionalmente, os aspectos de transferência de calor, tais como cálculos de fluxo de calor e temperatura da face fria, podem ser realizados simulando-se as respostas que diferentes propostas de revestimento trariam, sem a necessidade de experiências ou riscos, quando aplicados em escala industrial. Desta forma, uma análise sistêmica para a escolha do revestimento foi desenvolvida, a qual busca englobar todos os fatores que interferem no desempenho do cadinho e na análise econômica, visando-se encontrar a melhor alternativa para conservação de energia, e aumento da vida útil e da capacidade de carga.

Palavras-chave: alumínio, refratário, cadinho.

Abstract

The growing interest in molten aluminum transportation, due to economic reasons, highlights the importance of the correct refractory lining selection for the ladles used in this operation. The chemical composition of the refractory and the search for solutions that reduce the corrosion are the first topics to be addressed. For this purpose, it is of utmost importance to select thermodynamically stable oxides and anti-wetting containing refractories, in order to extend ladle lining life. Besides the chemical approach, another central issue to delay the infiltration of molten aluminum is the control of the pore size distribution. However, the material is also subjected to wear mechanisms, e.g. during the cleaning operation. For that reason, it is also necessary to consider the mechanical strength, as well as physical properties that may consequently affect the maximum load of transported aluminum. Furthermore, heat transfer parameters, such as heat flow and cold face temperature, should also be assessed to compare different proposals, before industrial scale testing. Thus, to choose the best lining, a systemic analysis that takes into account all of the intervening factors in the ladle performance and in economic aspects was made, aiming to select the best alternative in terms of energy saving, life expectancy and aluminum capacity availability.

Keywords: aluminum, refractory, ladle.

INTRODUÇÃO

A garantia da otimização do processo de transporte de alumínio líquido em cadinhos passa pela análise e seleção de materiais refratários que revestem estes equipamentos. A busca pelo melhor material disponível se caracteriza por

uma análise sistêmica, que engloba o estudo de diversos fatores, tais como comportamento termodinâmico dos óxidos em contato com o banho, a microestrutura do material, suas propriedades mecânicas, as características físicas e o balanço térmico. De acordo com Beelen e Bol [1], os mecanismos de desgaste podem ser subdivididos

em: ataque químico; impacto mecânico durante a limpeza; e choque térmico, devido aos ciclos de carregamento e descarregamento de metal. Deste modo, há a necessidade de se buscar um equilíbrio entre todos os requisitos para que o melhor material seja selecionado.

Siljan e cols. [2, 3] mostraram que os revestimentos refratários mais comumente utilizados para contato com alumínio líquido são passíveis de ataque pelo metal fundido, sendo, desta forma, necessário minimizar a possibilidade de infiltração, por exemplo, através do controle da distribuição do tamanho de poros e pelo uso de agentes anti-molhantes. Assim, os materiais a serem selecionados devem, antes de tudo, atender a requisitos microestruturais e de estabilidade termodinâmica.

Após esta primeira etapa de seleção, torna-se importante averiguar se o material possui propriedades termo-mecânicas adequadas, uma vez que durante o uso estará exposto a vários fatores de degradação [4] dentre os quais se destacam a operação de limpeza e a ciclagem térmica. Além disso, características físicas, como a densidade do material, conjuntamente com as características de projeto do cadinho, como altura, diâmetro externo e espessura do refratário, devem também ser consideradas. Dispondo destas informações, torna-se possível estimar valores como o volume útil disponível para o transporte de alumínio e o peso total do sistema carcaça - revestimento - metal. Adicionalmente, pelo fato desses valores estarem relacionados com a massa de material refratário e com a área externa do cadinho, os mecanismos de transferência de calor necessitam ser considerados. O conhecimento destes mecanismos, por sua vez, é de grande relevância, já que o tempo de pré-aquecimento e a garantia de entrega de metal no estado líquido são pré-requisitos para a viabilidade do processo de transporte.

Embora autores como Fergusson [5] e Allen [6] tenham abordado alguns tópicos referentes ao transporte de calor nos refratários, buscou-se neste estudo o entendimento mais abrangente dos principais aspectos térmicos para caracterizar os materiais. Desta forma, foi criado um processo iterativo de simulação, capaz de fornecer as informações térmicas mais relevantes para o projeto de cadinhos, concluindo assim a análise sistêmica do revestimento refratário.

Propriedades químicas e microestruturais dos refratários

Uma eficiente maneira de se avaliar o comportamento termodinâmico dos óxidos refratários frente ao alumínio é a utilização da termodinâmica. Esta ferramenta proporciona a avaliação da tendência dos óxidos componentes dos refratários reagirem com o alumínio. Neste sentido, um importante indicativo a ser considerado é a energia livre de Gibbs (ΔG), que indica o grau de estabilidade dos óxidos em relação ao metal, ou seja, quanto mais negativo o valor de ΔG , mais estável o óxido e menor a tendência do alumínio reduzi-lo. A Fig. 1 apresenta de forma esquemática a série

eletroquímica dos metais [2] onde materiais como o MgO são estáveis quimicamente em relação ao alumínio, uma vez que possuem menores ΔG . Já materiais contendo, por exemplo, SiO_2 ou P_2O_5 , possuem alta afinidade química com o metal. No entanto, refratários contendo óxidos termodinamicamente instáveis não necessariamente são atacados pelo metal, devido a ação de outros mecanismos que reduzem a infiltração. Por exemplo, os tijolos quimicamente ligados compostos por P_2O_5 resistem à corrosão por possuírem poros muito pequenos.

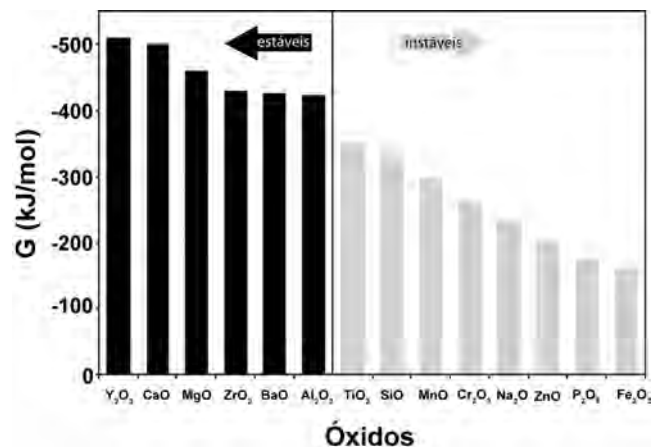


Figura 1: Estabilidade dos óxidos frente ao alumínio [2]. A linha divisória indica a separação entre os óxidos termodinamicamente estáveis e instáveis em relação ao alumínio.

[Figure 1: Stability of refractories oxides by molten aluminum [2]. Al thermodynamically stable and unstable oxides are separated by the line.]

Outro exemplo é o dos materiais contendo SiO_2 que apresentam uma forte tendência a reagir com o alumínio, porém, dada a excelente razão custo/benefício, os refratários sílico-aluminosos são os mais utilizados para contato com este metal.

Para que a corrosão venha a ocorrer é necessário que dois fenômenos atuem simultaneamente: além dos óxidos serem reduzidos pelo alumínio, as espécies reagentes devem estar em contato. Considerando-se que o alumínio é capaz de molhar a maioria dos óxidos refratários, é imprescindível alguma outra forma de conter a penetração de metal. Neste contexto, uma das possibilidades de melhoria da resistência química consiste na adição de aditivos anti-molhantes. Os agentes anti-molhantes apresentam como principais funções a redução da molhabilidade e/ou da reatividade dos refratários com o metal [7]. Para este propósito, as substâncias mais usadas são o sulfato de bário (BaSO_4) e o fluoreto de cálcio (CaF_2), entre outros [8]. A principal limitação no uso de agentes anti-molhantes envolve a perda de seu efeito a partir de certas temperaturas. A literatura [8] indica que estes valores são de 1100 °C para o BaSO_4 e 1250 °C para o CaF_2 , o que não chega a ser tão preocupante

no caso de cadinhos, onde as temperaturas de trabalho são relativamente menores. Do ponto de vista do metal, não só é importante verificar a influência do seu constituinte principal (alumínio) como também dos elementos de liga (Mg, Ca, Si, Fe) que são adicionados. De acordo com Tassot e Flessner [9], algumas dificuldades podem surgir já que alguns destes elementos são passíveis de oxidação pela forte afinidade com o oxigênio (Fig. 1). Siljan e co-autores [2] alertam para o fato desses elementos também poderem reagir com os óxidos dos refratários, como ocorre com o magnésio que, em contato com a alumina, leva a formação de espinélio, ocasionando uma reação expansiva, além do magnésio reduzir a viscosidade do alumínio, colaborando para aumentar a suscetibilidade à infiltração.

A termodinâmica se mostra muito eficaz para prever o comportamento dos refratários ao contato com o alumínio, sendo um guia inicial na busca do melhor material. Entretanto, como muitas vezes a solução química ideal é difícil ou onerosa, surge a necessidade de se considerar outros meios para retardar a infiltração do metal. Para atender a esta finalidade, torna-se essencial a análise dos aspectos microestruturais, tornando-se como referência a distribuição de tamanho de poros.



Figura 2: Estágios de infiltração de metal [11]. O ponto F indica a pressão crítica na qual poros pequenos são insuficientes para conter a penetração de metal.

[Figure 2: Molten metal penetration stages [11]. The point F shows the critical pressure where the penetration can not be stopped by small pores.]

Diversos autores [3, 10-12] alertam para a possibilidade de se evitar a infiltração por meio da redução do tamanho de poros, diminuindo assim a área de contato entre o alumínio e o refratário. Neste aspecto, deve-se atentar ao diâmetro médio de poro, que deve ser o menor possível, e a busca por uma curva de distribuição de tamanho de poros estreita, a fim de garantir uma pequena variabilidade dos diâmetros de poro em relação ao valor médio.

De acordo com Matsushita e cols. [11], resultados experimentais indicaram que a profundidade de infiltração aumenta gradualmente com o tempo de exposição do metal, devido à redução do ângulo de contato com o decorrer do tempo e o conseqüente aumento da pressão capilar nos poros. Durante a penetração de metal, podem ser considerados dois estágios distintos, conforme indicado na Fig. 2 [11]. No primeiro estágio, o caminho de infiltração de metal é interrompido ao se encontrar poros pequenos o suficiente para um determinado valor de pressão ferrostática e capilar. Para este caso, a melhor forma de se controlar a penetração é justamente pela redução dos tamanhos de poros. Já em um segundo estágio, a partir de um certo valor de pressão crítica, a taxa de infiltração passa a aumentar rapidamente. Sendo assim, o controle químico deve ser acionado com o uso de aditivos anti-molhantes e a conseqüente redução da queda do ângulo de molhamento ao longo do tempo. Assim, essas duas soluções conjuntamente colaboram para que a infiltração seja evitada, pois aumentam o valor da pressão crítica (ponto F) necessária para uma extensa e rápida penetração de metal.

Deste modo, os conhecimentos termodinâmicos e microestruturais dos materiais são o ponto de partida na busca da melhor solução para o uso de refratários no contato direto com o metal fundido.

Propriedades térmicas

Três momentos distintos são identificados durante o processo de transporte de alumínio fundido: o pré-aquecimento e preenchimento do cadinho, a movimentação do metal líquido até o cliente e o retorno do cadinho vazio para início de um novo ciclo. Para melhor entendimento destas situações pode-se recorrer a uma analogia com o sistema elétrico [13] (Fig. 3). Neste caso, a diferença de temperatura representa a diferença de potencial, o fluxo de calor é o análogo da corrente elétrica, a capacitância térmica substitui a capacitância elétrica, e a resistência térmica equivale à resistência elétrica.

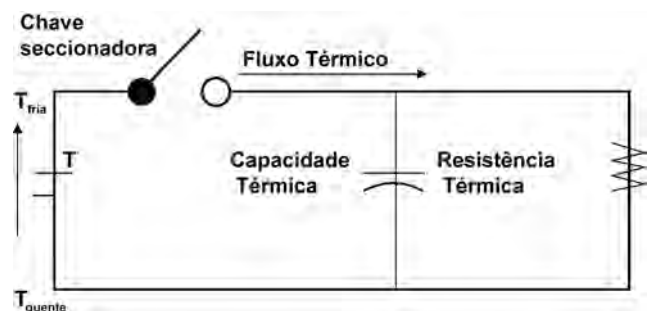


Figura 3: Sistema térmico análogo ao sistema elétrico. [Figure 3: Thermal - electrical systems analogy.]

Antes que o alumínio líquido possa ser transportado, o revestimento refratário do cadinho deve estar em uma temperatura de equilíbrio para que não venha a sofrer choque térmico e não ocasione o resfriamento do metal. Portanto, torna-se necessária uma etapa de pré-aquecimento, que é caracterizada por um estado não-estacionário, uma vez que as temperaturas nos refratários são fortemente alteradas ao longo do tempo. Para o esquema apresentado na Fig. 3, este momento equivaleria ao fechamento da chave seccionadora e, havendo uma diferença de temperatura (decorrente da temperatura fria dos revestimentos e da temperatura quente da fonte geradora de calor), parte do calor recebido seria armazenada (no capacitor), implicando no aumento de temperatura do material, e parte seria transmitida através da resistência, isto é, através do refratário. Continuando este processo, o equilíbrio é atingido quando o capacitor é totalmente carregado (ou seja, a capacidade de armazenamento de calor do refratário é satisfeita), tornando o cadinho apto a receber o metal. Uma variável importante relacionada ao pré-aquecimento é a difusividade térmica [6] (Equação A) que é um indicativo da velocidade de transporte de calor pelo material. Quanto maior o seu valor, mais rápido é possível aquecer o revestimento refratário, pois maior a velocidade em que o sistema entra em equilíbrio com o meio.

$$a = \frac{k}{\rho \cdot c} \quad (A)$$

onde a = difusividade térmica (m^2/h), k = condutividade térmica ($W/m.K$), ρ = densidade (kg/m^3) e c = calor específico ($W/h.kg.K$).

No aspecto prático, refratários menos densos são os mais adequados, uma vez que resultam em uma menor quantidade de massa a ser aquecida, além de elevada resistência térmica, levando a menores custos de pré-aquecimento e redução do “lead-time” de produção. Adicionalmente, a diminuição do peso total do cadinho, reduz os custos relacionados ao frete.

Indiretamente, para se comparar o tempo que os materiais levariam para ser aquecidos, pode-se recorrer ao cálculo do calor armazenado conforme estabelecido pela Equação B. Quanto maior a quantidade de calor que o sistema necessita, mais demorado o seu aquecimento. Nesta equação, o termo “ $m \cdot c$ ” representa a capacitância do capacitor.

$$q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (B)$$

onde q = calor armazenado em cada camada de revestimento (kcal), m = massa (kg), c = calor específico (kcal/kg.K) e ΔT = diferença de temperatura média entre o estado inicial e final (K).

Durante o transporte de alumínio líquido, a perda de temperatura no sistema real é relativamente pequena. Sendo assim, pode-se assumir que o comportamento térmico dos revestimentos é próximo ao estacionário, sem mudança no gradiente térmico do revestimento em função do tempo.

Pela analogia com o sistema elétrico, nesta etapa a chave do sistema continuaria fechada, sendo que o alumínio fundido passaria a ser a fonte de calor para o revestimento. Assim, o fluxo de calor seria determinado somente pela condutividade térmica e pelos coeficientes de transferência de calor de convecção e de radiação. Na Equação C esta relação é apresentada, para paredes cilíndricas [14]. Para o fundo e para a tampa do cadinho, o cálculo é realizado por meio de algumas alterações no denominador da equação, devido às diferentes geometrias dessas regiões e aos distintos coeficientes de transferência de calor, conforme indicado em extensa literatura [5, 13, 15, 16]. Este denominador é conhecido como resistência térmica.

$$Q = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot H \cdot r_i \cdot h_i} + \sum \left[\frac{\ln \left[\frac{r_{n+1}}{r_n} \right]}{2 \cdot \pi \cdot H \cdot k_i} \right] + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot H \cdot r_e \cdot h_e}} \quad (C)$$

onde, Q = calor transportado (W), T_i = temperatura interna (K), T_e = temperatura externa (K), H = altura do cadinho (m), r_i = raio interno (m), h_i = coeficiente de transferência de calor na superfície interna ($W/m^2.K$), r_n = raio interno da camada i (m), k_i = condutividade térmica do material da camada i ($W/m.K$), r_e = raio externo (m) e h_e = coeficiente de transferência de calor na superfície externa ($W/m^2.K$).

Utilizando-se um processo iterativo, e considerando-se um valor inicial de temperatura de face fria, é possível calcular o fluxo de calor e, subseqüentemente, de acordo com a resistência térmica de cada material usado no revestimento, as temperaturas nas interfaces das camadas [16]. De posse do perfil térmico e dependendo da temperatura de solidificação do metal, o ponto de congelamento é encontrado, indicando a distância em que o metal congelaria em relação à carcaça do cadinho. Obviamente, quanto maior a distância da carcaça, mais seguro é o transporte de alumínio líquido e menor a probabilidade de deformação da estrutura metálica e, eventualmente, da ruptura do refratário.

Outro fator importante a ser considerado é a taxa de perda de temperatura do alumínio, em função da velocidade de transporte, calculada de forma aproximada por:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{(Q' \cdot A)_{\text{parede+fundo+tampa}}}{m_A \cdot c_A} \quad (D)$$

em que $\Delta T / \Delta t$ = taxa de perda de temperatura ($^{\circ}C/h$), Q' = fluxo térmico (W/m^2), A = área de troca de calor (m^2), m_A = massa de alumínio (kg) e c_A = calor específico do alumínio líquido ($W/h.kg.K$).

Deste modo, quatro são os fatores que podem ser utilizados para melhor entendimento do comportamento térmico no momento de transporte: a temperatura externa

da face fria, o fluxo de calor, o ponto de congelamento e a taxa de perda de temperatura do alumínio. Portanto, o melhor conjunto de materiais refratários é aquele que resulta preferencialmente na menor temperatura de face fria, mostrando um melhor isolamento; no menor fluxo de calor, implicando em menos troca térmica; na maior distância de congelamento em relação à carcaça (maior valor de ponto de congelamento), indicando condições mais seguras; e na menor taxa de perda de temperatura, garantindo a entrega de metal em temperaturas mais elevadas.

Após a análise de todas estas variáveis, surge a necessidade de se considerar o retorno do cadinho após o metal ser vertido. Seguindo a analogia com o sistema elétrico, esta etapa corresponde à abertura da chave, uma vez que a fonte quente é eliminada. Para esta situação, o sistema volta para uma condição dinâmica e o calor armazenado pelos refratários passa a ser perdido para o meio. Da mesma forma que uma difusividade elevada ocasiona um pré-aquecimento rápido, o resfriamento do material também será acelerado. Porém, um material com alta difusividade, apesar de chegar mais frio, necessitará de menos tempo para retornar a situação de equilíbrio, sendo então mais vantajoso o uso de materiais que atendam a este requisito.

Propriedades termo-mecânicas

Na análise sistêmica, outra consideração importante se refere ao comportamento mecânico, uma vez que os materiais refratários podem sofrer desgastes pela ação da corrosão, por abuso mecânico e choque térmico [17]. De uma forma geral, materiais que apresentam maior estabilidade química colaboram para que os danos mecânicos sejam reduzidos, pois as exigências serão menos severas, por exemplo, pela menor necessidade de limpeza do cadinho. Nos materiais refratários são fortes as interações entre as características químicas, físicas, térmicas e mecânicas. Por exemplo, ao serem corroídos, os refratários podem perder a habilidade inicial de resistir à propagação de trincas e, paralelamente, materiais degradados por choque térmico ou desgaste mecânico podem ter sua resistência à corrosão reduzida [18]. O ataque químico pode também levar a alterações de volume, gerando tensões e ocasionando trincas no revestimento. Adicionalmente, gradientes de temperatura são fontes de geração de tensões que podem ocasionar o choque térmico.

De acordo com Ratle e co-autores [4], considerando-se apenas a resistência ao impacto, os materiais para contato com alumínio são selecionados geralmente por comparações entre seus módulos de ruptura (MOR). Tal comparação, no entanto, é insuficiente para a otimização da resistência ao choque térmico (RCT).

Existem duas maneiras de se controlar a RCT: impedindo que uma trinca se inicie e / ou limitando a sua propagação. Um material com elevada resistência mecânica resistirá bem ao início da trinca, porém, caso esta se inicie, sua propagação

será catastrófica. O melhor compromisso entre resistência ao impacto e resistência ao choque térmico para materiais refratários é obtido pelo uso do seguinte parâmetro [4]:

$$\sigma \cdot R_{st} = \frac{\sigma \cdot (\gamma_{wof})^{1/2}}{\alpha \cdot (E)^{1/2}} \quad (E)$$

em que σ = tensão de fratura (Pa), R_{st} = resistência a propagação de trinca [$(\gamma_{wof})^{1/2} / (\alpha \cdot E^{1/2})$], γ_{wof} = energia de fratura (J/m²), α = coeficiente de expansão térmica (°C⁻¹) e E = módulo de elasticidade (Pa).

Assim, a seleção de materiais com boa resistência ao impacto e ao choque térmico direciona a busca por refratários com elevado módulo de ruptura (σ), o que favorecerá simultaneamente a resistência ao impacto e ao início da trinca, e alta resistência à propagação de trinca (R_{st}), alcançada através de uma elevada energia de fratura (γ_{wof}) e / ou baixos coeficiente de expansão térmica (α) e módulo elástico (E). Algumas das formas de se obter elevada energia de fratura são [4]: (1) promover deflexão da trinca, pelo uso de agregados de granulometria grosseira; e (2) causar a ramificação da trinca, através de uma matriz composta por materiais com coeficientes de expansão térmica distintos e / ou anisotrópicos.

Parâmetros de projeto

Aspectos de projeto podem ser obtidos considerando-se as densidades e as espessuras dos materiais, a altura interna útil e o diâmetro externo do cadinho. Indicativos como a carga útil de alumínio, o peso do revestimento e a carga total do sistema (alumínio - refratários - carcaça), são extremamente relevantes, pois interferem diretamente na logística e na oferta do produto. Todos estes indicativos podem ser facilmente obtidos através das características geométricas do cadinho.

A capacidade máxima de alumínio transportado é obtida pelo peso do sistema alumínio - refratários - carcaça, em relação à carga máxima permitida para transporte e a limitação de equipamentos como ponte rolante. Como o peso do cadinho é determinado principalmente pelo revestimento utilizado e pela sua carcaça, uma maneira de se aumentar o volume útil de metal é pela redução da espessura de refratário ou por alterações nas dimensões da carcaça. Algumas vezes, porém, o volume de metal desejado pelo usuário pode ser inferior a máxima carga possível, devido a alguma restrição, como, por exemplo, o tamanho dos fornos que recebem o alumínio [14]. Deste modo, durante o projeto, é importante o conhecimento das necessidades do cliente, uma vez que se o acréscimo de volume útil não for necessariamente buscado, pode-se, então, obter vantagens em termos de isolamento térmico e aumento da distância de transporte, através da redução da perda térmica.

Peterson e Blagg [14] ainda alertam para o fato de

minimização da perda de calor ocasionar prejuízos em termos de aumento de peso do revestimento, quando a escolha é utilizar um refratário de maior espessura, ou redução da resistência mecânica, ao se optar pelo uso de materiais isolantes porosos. Assim, deve existir um comprometimento na busca por um alvo que atenda os requisitos de máximos fluxo de calor e peso de revestimento permissíveis, considerando-se a melhor quantidade de metal a ser transportada.

MATERIAIS E MÉTODOS

Diversas combinações de materiais refratários, considerados quimicamente adequados para contato com alumínio líquido, podem ser realizadas com a intenção de se maximizar o volume útil de alumínio e aumentar o tempo de vida do revestimento. Neste estudo, será apresentado um exemplo de como proceder nesta situação, utilizando-se um processo de simulação. Para tal finalidade, foram escolhidas três abordagens distintas, conforme ilustra a Tabela I.

A proposta A consiste em uma abordagem tradicional baseada em tijolos, o que traria algumas vantagens como alta resistência ao impacto e desvantagens como a presença de juntas e elevada massa. Já as propostas B e C, de acordo com modelos da literatura [9], são fundamentadas em concretos refratários, apresentando vantagens como a ausência de juntas e menor massa, porém requisitando cuidados na secagem e na sinterização. Como pode ser observado na tabela, a proposta B é composta, na região do fundo, por um material denso que possui maior resistência mecânica do que os materiais usados em C, devido à preocupação com o impacto e abrasão.

Neste estudo, foi dada atenção especial aos revestimentos da parede do cadinho, uma vez que esta região representa o maior volume de refratários e a maior superfície para troca térmica com o meio externo. Os dados gerais que foram utilizados inicialmente para verificação de aspectos térmicos

e das características de projeto são: velocidade do ar = 0 m/s; temperatura ambiente = 27 °C; temperatura da face quente = 800 °C; temperatura de congelamento = 630 °C; emissividade = 0,95; densidade do Al (líquido) = 2,3 g/cm³; altura útil interna = 1,64 m e raio externo = 1,09 m.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O comportamento térmico dos três conjuntos de materiais pode ser analisado primeiramente em relação à temperatura externa, ao fluxo térmico e ao ponto de congelamento. Como pode ser observado na Fig. 4, o melhor resultado em termos de menor temperatura de face fria e de menor fluxo de calor é obtido para o conjunto C. Nesta figura também fica claro o efeito negativo do uso de uma única camada de concreto na parede sem uma camada posterior de isolante (caso B), tornando a temperatura externa e o fluxo de calor muito alto. Em relação à proposta C, o conjunto A se mostrou um pouco inferior para estas duas características, porém, em termos de ponto de congelamento seu resultado foi bem pior, estando

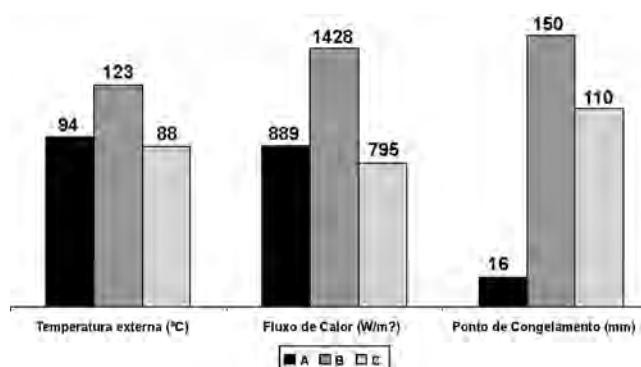


Figura 4: Características térmicas da parede dos três conjuntos. O ponto de congelamento representa a distância em relação à carcaça.

[Figure 4: Thermal features of the wall for the three distinguished design sets. The distance to the steel shell is highlighted by the freezing point.]

Tabela I - Materiais escolhidos e espessuras das camadas.

[Table I - Layers' thickness of the chosen refractory materials.]

	A	B	C
PAREDE	2 camadas de tijolos (114 e 69 mm) e 1 camada de isolante (17 mm)	1 camada de concreto semi-isolante (200 mm)	1 camada de concreto semi-isolante (100 mm) e 1 camada de isolante (100 mm)
FUNDO	2 camadas de tijolos (114 e 69 mm) e 1 camada de isolante (17 mm)	1 camada de concreto denso (200 mm)	1 camada de concreto semi-isolante (120 mm) e 1 camada de isolante (80 mm)
TAMPA	1 camada de concreto semi-isolante (125 mm) e 1 camada de fibra cerâmica (25 mm)	1 camada de concreto semi-isolante (150 mm)	1 camada de concreto semi-isolante (90 mm) e 1 camada de isolante (60 mm)

localizado a 16 mm da carcaça num sistema de refratários de 200 mm. Além disso, foi realizada uma simulação para uma velocidade de 80 km/h, visando-se analisar a taxa de perda de temperatura. Nesta situação, a proposta C apresentou-se mais adequada: 10,5 °C/h, contra 11,9 °C/h de A e 21,8 °C/h de B. Balanceando-se estes resultados, nota-se que a proposta C mostrou-se como a mais promissora dentre as três, no que se refere ao comportamento térmico.

Em relação ao calor armazenado total, o fato dos conjuntos B e C serem compostos por concretos semi-insolantes, menos densos do que os tijolos de A, levou a valores de calor bem menores, conforme dados da Fig. 5. Percebe-se ainda claramente as vantagens do conjunto C em termos de menor peso de revestimento e conseqüente valor da carga total. Estes valores proporcionam uma participação de carga viva de 58% no uso do conjunto C, contra 50% para A e 52% para B. Adicionalmente, como a legislação da rodovia restringe o peso máximo de transporte, a escolha do refratário é importante no sentido de que materiais mais leves podem levar a um diferente projeto de carcaça (com maiores altura e diâmetro), implicando no aumento do volume disponível de transporte para metal. Os tijolos da proposta A provavelmente apresentam boa resistência ao impacto, porém baixa resistência ao choque térmico, devido a um baixo valor de energia de fratura e elevado módulo de elasticidade. Este baixo valor de R_{st} , juntamente com o alto calor armazenado e baixa difusividade térmica, pode resultar em um longo tempo de pré-aquecimento, pois, além da menor velocidade de transmissão de calor, são necessários cuidados para que o material não sofra o choque térmico. Já para os concretos dos casos B e C, a situação é oposta, ou seja, a resistência ao impacto é relativamente baixa, mas com maior resistência ao choque térmico, apresentando, desta forma, um pequeno tempo de pré-aquecimento ao custo de um maior cuidado na operação de limpeza. Assim, esta segunda abordagem é mais adequada uma vez que as empresas buscam cada vez mais a redução dos tempos das operações, garantindo

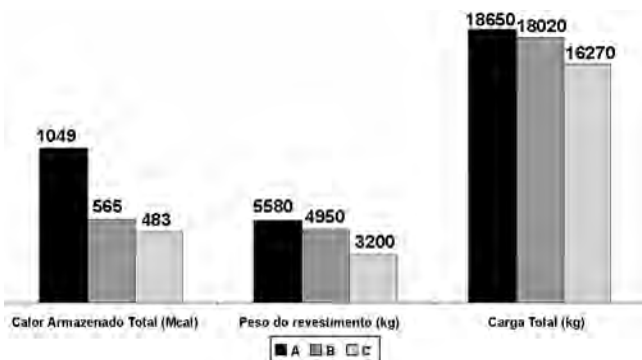


Figura 5: Características adicionais referentes ao cadinho. [Figure 5: Crucible parameters - Total Heat Storage, Lining Weight and Total Load.]

maior flexibilidade e agilidade no atendimento aos clientes.

Muitos fatores interferem diretamente no comportamento térmico dos revestimentos do cadinho. Dentre eles, destacam-se a velocidade de transporte (equivalente à velocidade de convecção), o coeficiente de transferência de calor (h) e a espessura total de material refratário.

O efeito da alteração na velocidade e conseqüente mudança nos valores do coeficiente de transferência de calor podem ser visualizados na Fig. 6. Um pequeno aumento de velocidade de transporte é capaz de causar grandes variações na temperatura de face fria e no fluxo de calor. Esta variação é mais acentuada na região de velocidades mais baixas e tende a um patamar a medida que os valores de velocidades aumentam. O coeficiente de transferência de calor também é fortemente afetado pela velocidade, entretanto, a taxa de perda de temperatura do alumínio apresenta apenas uma pequena variação, indicando que a condutividade térmica dos refratários é o fator mais importante para se garantir o isolamento térmico.

A espessura total de revestimento também afeta significativamente o comportamento térmico e as características de projeto do cadinho. Para verificação do seu efeito foram consideradas duas situações: uma redução e um acréscimo de 10 mm em cada camada do material C (conjuntos C1 e C2, respectivamente). De acordo com a Fig. 7, nota-se que a redução da espessura leva a vantagens em termos de carga útil de alumínio, menor peso de revestimento e menor calor armazenado, porém prejudica o comportamento térmico pelo aumento da temperatura de face fria e do fluxo térmico. O aumento da espessura causa justamente o contrário: melhorias no comportamento térmico em detrimento de vantagens de projeto. Desta forma, cabe aos responsáveis pela seleção encontrar o equilíbrio entre estas duas situações, considerando-se a demanda por alumínio e questões logísticas, além de requisitos térmicos para garantir a

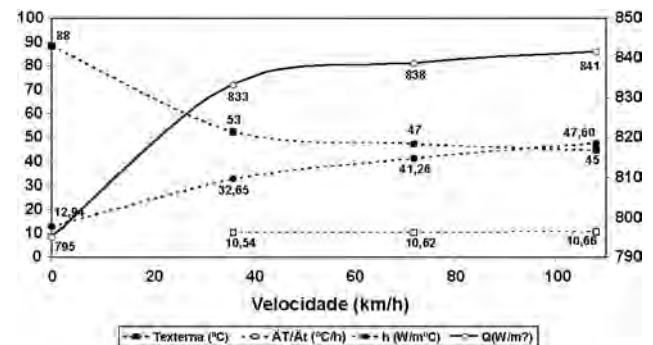


Figura 6: Efeito da velocidade do vento para o sistema C. [Figure 6: Wind speed effect for the lining assembling C.]

viabilidade do transporte, ou seja, a temperatura de face fria e o fluxo de calor máximos aceitáveis para assegurar o isolamento térmico e a segurança da operação.

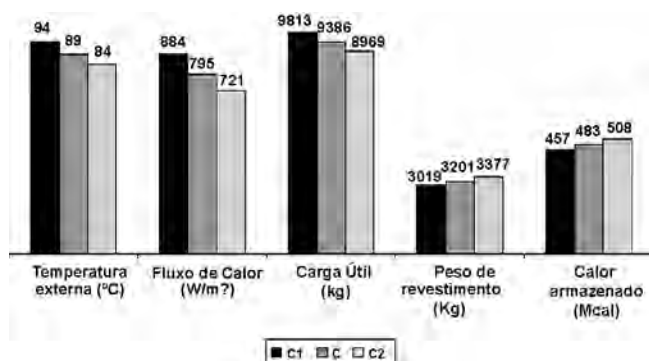


Figura 7: Efeito da espessura do refratário.
[Figure 7: Refractory lining thickness effect.]

CONCLUSÕES

A busca pelos materiais mais adequados envolve a análise de uma série de aspectos que, em conjunto, influenciam no desempenho dos refratários utilizados em cadinhos. Para garantir que a análise sistêmica seja plenamente realizada, os seguintes passos devem ser seguidos:

1. verificação dos aspectos químicos, procurando-se por óxidos termodinamicamente estáveis no contato com alumínio fundido e presença de aditivos anti-molhantes na composição do refratário;
2. análise das características microestruturais, visando-se encontrar os materiais que apresentem uma distribuição de tamanhos de poros estreita e com pequenos diâmetros;
3. observação dos parâmetros termo-mecânicos, na intenção de se maximizar a resistência aos danos ocasionados por abusos mecânicos e decorrentes de choque térmico;
4. simulações do comportamento térmico, na tentativa de se encontrar conjuntos de materiais que minimizem a temperatura de face fria, o fluxo térmico, o calor armazenado e a taxa de perda de temperatura;
5. estudo das características de projeto, envolvendo a busca por materiais menos densos e espessos, com o objetivo de se otimizar a logística de produção, maximizando o volume útil disponível para transporte e minimizando o peso de revestimento e, conseqüentemente, do sistema.

Todos estes aspectos estão, de um certo modo, correlacionados. Desta forma, deve haver um equilíbrio na busca pela melhor solução. Neste sentido, pode ser necessário adotar uma outra solução térmica que, embora não seja tão eficiente, apresente melhores propriedades termo-mecânicas. Os aspectos químicos e microestruturais, por sua vez, devem

ser atendidos da melhor forma possível, já que uma má seleção nestes dois fatores certamente leva a uma baixa vida útil de material e inviabiliza o processo de transporte. Assim, a função dos projetistas é verificar quais são as condições suficientes para atender cada quesito, garantindo que a operação de transporte seja eficaz, possibilitando a máxima oferta e o melhor fluxo de produção, resultando no melhor desempenho econômico possível.

AGRADECIMENTOS

A Alcoa Alumínio S.A. pelo suporte à pesquisa realizada.

REFERÊNCIAS

- [1] C. M. Beelen, L. C. G. M. Bol, Proc. Int. Colloquium Refract., Aachen, Alemanha (1995) 114.
- [2] O. J. Siljan, G. Rian, D. T. Pettersen, A. Solheim, C. Schøning, Proc. UNITECR'01, Cancun, Mexico (2001) 531.
- [3] O. J. Siljan, C. Schøning, Proc. UNITECR'01, Cancun, Mexico (2001) 551.
- [4] A. Ratle, V. C. Pandolfelli, C. Allaire, M. Rigaud, Brit. Ceram. Trans. **96**, 6 (1997) 225.
- [5] E. Ferguson, Proc. Adv. Refract. Metal. Ind. IV, M. Rigaud and C. Allaire, Eds., CIM, Canada (2004) 857.
- [6] A. W. Allen, Refract. Appl. News **10**, 1 (2005) 27.
- [7] C. Allaire, M. Guermazi, Proc. Light Metals, R. D. Peterson, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), (2000) 685.
- [8] S. Lecoointe, M. Schnabel, P. Meunier, Proc. UNITECR'01, Cancun, Mexico (2001) 1621.
- [9] P. Tassot, G. Flessner, Proc. Int. Colloquium Refract., Aachen, Alemanha (2004) 111.
- [10] T. Matsushita, T. Ohuchi, K. Mukai, I. Sasaka, J. Yoshitomi, Proc. UNITECR'01, Cancun, Mexico (2001) 1387.
- [11] T. Matsushita, K. Mukai, T. Ohuchi, I. Sasaka, J. Yoshitomi, J. Tech. Assoc. Refract. **24**, 2 (2004) 108.
- [12] M. Miyawaki, Y. Hongo, J. Tech. Assoc. Refract. **20**, 2 (2000) 115.
- [13] J. P. Holman, Transferência de Calor, McGraw-Hill do Brasil, S. Paulo, Brasil (1983) 118.
- [14] R. D. Peterson, G. G. Blagg, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), (2000) 857.
- [15] C. O. Benett, J. E. Myers, Quantidade de movimento, calor e massa, McGraw-Hill do Brasil, S. Paulo, Brasil (1978) parte 2.
- [16] Harbison-Walker Refractories, Modern Refractory Practice, 5th Ed., EUA (1992) UR5.
- [17] N. Ntakaburimvo, C. Allaire, Proc. Light Metals (2002) 752.
- [18] A. Innus, P. Rivard, Proc. Light Metals (2003) 779. (Rec. 27/06/2005, Ac. 21/10/2005)