

Refratários para o transporte do alumínio líquido: fundamentos, simulação e prática industrial

(Refractories for molten aluminum transportation: fundaments, simulation and industrial results)

D. Y. Miyaji¹, M. A. L. Braulio¹, P. Bonadia², J. B. Gallo², V. C. Pandolfelli¹

¹Grupo de Engenharia e 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

²Alcoa Alumínio S.A., Rodovia Poços-Andradas km 10, Poços de Caldas, MG
dym@polvo.ufscar.br, vicpando@power.ufscar.br

Resumo

Dentre as diversas tecnologias existentes na produção do alumínio primário, o transporte de alumínio líquido em cadinhos (capacidade 8 a 10 t) por longas distâncias (entre 100 e 200 km) tem se tornado uma opção lucrativa para produtores e clientes. Todavia, a escolha correta do refratário de revestimento do cadinho não é uma tarefa trivial, pois uma série de propriedades deve ser considerada de modo a maximizar seu desempenho. Com isso, um estudo teórico envolvendo termodinâmica, microestrutura, resistência termomecânica, propriedades térmicas e projeto torna-se necessário. Neste trabalho, procura-se conciliar essa teoria com a prática industrial por meio da caracterização de materiais comerciais e a simulação computacional em um software desenvolvido, sendo possível a previsão do comportamento de um cadinho durante sua operação. A partir do acesso a informações da empresa parceira deste estudo, foi possível o acompanhamento industrial obtendo-se maior detalhamento sobre as reais necessidades de um projeto de revestimento de cadinhos. Portanto, suportado por três pilares “teoria”, “simulação” e “prática industrial”, o presente trabalho tem o intuito de ser uma contribuição tecnológica no auxílio à seleção de refratários para revestimento de cadinhos no transporte do alumínio líquido.

Palavras-chave: transporte, alumínio, simulação, refratário

Abstract

Among the technologies developed for aluminum industries, the long distance (over 100 to 200 km) transportation of molten aluminum (over 8 to 10 t) in crucibles has become into an advantageous process for suppliers and customers. However, choosing crucible's lining is not an obvious task, because the materials properties must be considered to maximize performance. Thus, a systemic analysis involving design, thermodynamic, microstructure, thermal conduction and thermo-mechanical factors is required. This work aims to match these theoretical aspects, the industrial results, the laboratory characterization of materials and the computing simulations using a developed software. This software is able to predict the thermal behavior of the heated containers even under operation. Therefore, the three pillars named “theory”, “simulation” and “industrial results” used in the present work were applied in the selection of the refractory lining for the molten aluminum transportation crucible.

Keywords: transportation, aluminum, simulation, refractory

INTRODUÇÃO

Uma das formas de avanços tecnológicos nas indústrias é a otimização de processos e a logística da cadeia produtiva. Na indústria do alumínio, um exemplo é a seqüência de operações envolvidas desde a produção do alumínio primário nas cubas eletrolíticas até o setor de lingotamento. Nesse contexto, surge uma nova inovação que é o transporte do alumínio líquido em cadinhos por longas distâncias (100 a 200 km), tecnologia esta que não somente agrega valor ao metal, mas também reduz tempo e custos atrelados à produção e refusão [1]. Os clientes também são beneficiados com esse serviço em vários aspectos, pois o ganho em tempo

é recíproco. Além da redução do gasto energético na refusão de lingotes, a entrega do metal pode ser feita sob demanda o que reduz custos de estocagem. Dependendo do contrato firmado entre produtores e clientes, pode-se até entregar o metal com a composição desejada de elementos de liga [2]. É desejável, desse modo, que os cadinhos de transporte tenham o melhor desempenho possível, ou seja, durabilidade do equipamento e boa conservação da temperatura ao longo do transporte. Não somente isso, o cadinho de transporte também precisa se adequar às leis de rodagem em relação ao seu peso, fornecendo uma quantidade lucrativa de metal [2]. Assim, para aliar todas essas necessidades, a correta seleção de materiais refratários torna-se fundamental. Foi mostrado

que a escolha do material refratário para o revestimento de cadinhos de transporte deve ser feita de maneira sistêmica, relacionando os fatores termodinâmicos, microestruturais, termomecânicos, térmicos e até mesmo o projeto do revestimento [3].

Este trabalho procura validar essa teoria por meio da caracterização laboratorial de alguns refratários comerciais, procurando também simular o comportamento térmico do cadinho pelo uso de um software desenvolvido. De posse de alguns resultados industriais, finalmente, será possível correlacionar os dados obtidos e entender o real impacto das propriedades de cada material quando em operação.

A principal motivação para a realização do presente estudo foi, a princípio, a necessidade industrial. Durante o ciclo de operações da empresa parceira deste trabalho, percebeu-se que o pré-aquecimento do cadinho de transporte se tornou um gargalo do processo, dado seu tempo demasiadamente longo. Na busca de materiais mais eficientes nesse aspecto, um novo revestimento refratário foi escolhido. A seleção do material foi efetuada após uma elaborada análise sistêmica, a qual se mostrou eficaz pelos resultados positivos, gerando simultaneamente uma contribuição tecnológica [3]. A limitação antes existente quanto ao pré-aquecimento pôde ser contornada pelo uso de um material de maior difusividade térmica. Entretanto, na continuidade do trabalho, surgiram novas necessidades que mereceram igual atenção. Por meio das correlações propostas, procurou-se visualizar uma melhor perspectiva do real desempenho do refratário, para assim também prever o comportamento do cadinho em outras possíveis situações de sucesso ou falha.

Tipos de refratários para cadinhos de transporte de Al líquido

Refratários quimicamente ligados

Uma prática comum em unidades fabris do alumínio é a utilização de revestimentos refratários quimicamente ligados por fosfato [4], devido a sua boa resistência a corrosão pelo alumínio líquido [5]. Outra vantagem é a sua elevada resistência a erosão [6], tornando seu uso viável em cadinhos de transporte, uma vez que torna o revestimento capaz de suportar os abusos mecânicos de limpeza. De acordo com a literatura [7], seu poder ligante em refratários aluminosos vem da formação de um filme de fosfato de alumínio ao redor de cada partícula, sendo tal fenômeno uma consequência da dissolução da alumina pelo ácido fosfórico durante a fabricação desse refratário. No caso de materiais com maior teor de SiO_2 , pode ocorrer também a dissolução da sílica pelo ácido, cujo produto é um gel ligante. O endurecimento do material ocorre após a secagem em temperaturas adequadas. É destacado que, dentre alguns concretos refratários comerciais testados, o material fosfatado apresentou-se como o menos favorável à resistência por choque térmico, o que seria uma deficiência para sua utilização em cadinhos de transporte, já que sua ciclagem térmica ocorre com frequência [6].

Refratários termicamente semi-isolantes

Outro tipo de material também utilizado na indústria do alumínio e aplicado no revestimento de cadinhos de transporte são os semi-isolantes (ou semi-densos). É ressaltada a importância da seleção de refratários para o setor de lingotamento do alumínio quanto ao seu desempenho térmico [8]. Por exemplo, os refratários densos são preferidos para os canais de corrida de transferência do alumínio, onde o choque térmico e o ataque erosivo pelo metal são intensos. Entretanto, para situações em que o isolamento térmico é prioridade, como nos canais de corrida de lingotamento, um material mais isolante ou de baixa densidade torna-se necessário. No caso de um cadinho de transporte em que a conservação da temperatura do alumínio é relevante, o uso de refratários semi-isolantes tem sido uma interessante alternativa. Entretanto, por se tratar de um material de alta porosidade, sua resistência mecânica é relativamente baixa, sendo um ponto fraco na etapa da limpeza do revestimento durante paradas de manutenção.

Refratários contendo anti-molhantes ao alumínio líquido

Devido ao grande poder redutor do alumínio líquido sobre a maioria dos óxidos utilizados em refratários convencionais, uma maneira de se prolongar a vida útil do refratário neste aspecto é o uso de aditivos anti-molhantes como o BaSO_4 , CaF_2 e o AlF_3 [9-11].

Assim, o presente trabalho procurou avaliar experimentalmente um refratário comercial pré-formado quimicamente ligado e dois concretos refratários comerciais semi-isolantes, um deles contendo aditivos anti-molhantes, dado o potencial de aplicação oferecido por esses materiais. As vantagens e desvantagens dos mesmos foram comparadas avaliando-se os resultados obtidos e aqueles encontrados na literatura.

EXPERIMENTAL

Os materiais listados (Tabela I) abaixo tiveram seus nomes comerciais substituídos por siglas e, as suas composições químicas foram transcritas de suas fichas técnicas. T1 é um tijolo quimicamente ligado, enquanto CS1 e CS2 são concretos semi-isolantes, sendo CS2 um material com características anti-molhantes. Os números diferenciam os fabricantes de materiais de uma mesma classe.

Todos os concretos foram moldados nas dimensões específicas para cada ensaio e o tijolo T1 foi cortado com uma serra adiantada e retificado em um equipamento Ferdimat (modelo T42). O tempo de cura de todos os concretos foi 24 h em atmosfera saturada de umidade a 50 °C. Em seguida, os materiais foram secos em estufa a 110 °C por 24 h. A temperatura de queima recomendada pelos fabricantes foi 800 °C; entretanto, foram produzidos corpos de prova com tratamento térmico até 1050 °C para efeito de estudo. A queima dos corpos a 1050 °C com um patamar de 3 h foi efetuada a

Tabela I - Refratários de revestimento para contato com o alumínio fundido.

[Table I - Refractories lining for molten aluminum contact.]

	T1	CS1	CS2
Al ₂ O ₃	38~46	57,0	43,6
SiO ₂	48~56	34	44,9
Fe ₂ O ₃	>2,5	0,8	1,3
CaO	-	6,0	5
MgO	-	-	0,2
ZrO ₂	-	-	-
TiO ₂	-	-	1
álcalis	-	1,5	1,1
outros	-	-	2,5
LOI	-	-	0,4

A densidade e a condutividade térmica dos materiais foram obtidas experimentalmente e os resultados encontram-se na Figs 2 e 5, respectivamente; os dados da composição química utilizados no software são os mesmos da tabela.

[The values for density and the thermal conductivity of materials were obtained experimentally. They are presented in Figs. 2 and 5, respectively; the chemical composition used as input data for computing simulation is the same as these presented in the table above.]

uma taxa de 3 °C/min a partir de corpos calcinados a 600 °C/5 h. Este último procedimento visa minimizar o dano dos corpos de prova por explosão durante a primeira queima.

Para a avaliação da resistência mecânica, o módulo de ruptura foi obtido por flexão em três pontos em 5 corpos de prova na forma de paralelepípedo (150 x 25 x 25 mm³) em uma máquina de ensaios universal MTS modelo 810, com uma célula de carga de 50 kN. A distância entre os apoios foi 125 mm.

Optou-se por dois ensaios de análise microestrutural: o teste de imersão de Arquimedes (baseado na norma ASTM C830-88) [12] e o teste de permeabilidade em baixa temperatura, com equipamento desenvolvido pelo grupo de pesquisa do autor [13-15]. A permeabilidade foi calculada utilizando-se a equação de Forchheimer, a qual permite a obtenção das constantes k_1 e k_2 que se referem aos efeitos viscosos e inerciais de permeabilidade, respectivamente. Foi demonstrado que a Equação de Forchheimer é mais adequada para a avaliação de meios rígidos como os refratários [13-15].

O ensaio de ataque químico selecionado foi o de *cup-test*, baseando-se na sua efetividade [9, 16, 17]. A liga de alumínio utilizada foi a 7075 com uma adição de 4% de magnésio metálico, a qual foi inserida em cacinho refratário com dimensões 114 x 114 x 63 mm³, com uma cavidade de 50 mm diâmetro e o fundo distante 15 mm da base. Todo o sistema foi fechado com uma argamassa sílico-aluminosa comercial e uma lajota de concreto de alta alumina. A seguir, o sistema foi inserido em uma mufla (modelo EDG7000) e aquecido a 10 °C/min com patamar de 800 °C/72 h. Algumas peças também foram submetidas ao *cup-test* a 1000 °C/72 h. Os concretos CS1

e CS2 foram tratados termicamente a 800 °C/5 h para os ensaios a 800 °C. No ensaio a 1000 °C, CS1 e CS2 foram tratados termicamente a 1050 °C/3 h. Já o tijolo T1 sofreu apenas um tipo de tratamento térmico prévio (1000 °C/5 h), sendo submetido aos ensaios nas duas temperaturas e tempos citados.

A condutividade térmica dos materiais foi medida em um equipamento Netzsch 426 pelo método do fio paralelo, conforme a norma ISO 8894-2 [18]. Para isso, foram necessários corpos de prova nas dimensões 228 x 114 x 63 mm³. As simulações térmicas foram executadas em software desenvolvido pela empresa parceira deste trabalho em conjunto com o grupo de pesquisa do autor [3]. Como dados de entrada, foram necessários valores de condutividade térmica, densidade aparente, espessura de parede e composição química. O software também oferece a possibilidade de escolher a velocidade do vento no qual o cacinho pode estar submetido, estando essa variável associada a velocidade de deslocamento do veículo de transporte. Os dados de entrada utilizados se encontram na Tabela II.

A aquisição das informações industriais foi feita por meio do recebimento de relatórios periódicos sobre o teste de estanqueidade, paradas para manutenção e reparo de um cacinho revestido com o refratário CS2 como material de contato com o metal líquido.

Tabela II - Dados de entrada utilizados na simulação térmica.

[Table II - Input data for thermal simulation.]

	Parede (mm)	Fundo (mm)	Tampa (mm)
Refratário de Contato	90	120	90
Refratário Isolante	90	87	60
Velocidade do Vento	0 m/s		

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados da caracterização laboratorial

O ensaio mecânico dos refratários (Fig. 1) indicou que o concreto semi-isolante CS1 apresentou uma boa resistência mecânica a verde, sendo maior que a do material pré-formado T1 de maior densidade e menor porosidade. A alta resistência de CS1 provavelmente se deve ao poder ligante do cimento em sua composição, pois se nota uma acentuada queda após o tratamento a 800 °C, certamente devido à desidratação. Como consequência desse fenômeno, observou-se também o aumento da porosidade dos concretos após o tratamento térmico a 800 °C (Fig. 2).

Verificou-se que, no tratamento térmico em altas temperaturas, o refratário T1 possuía a maior das resistências

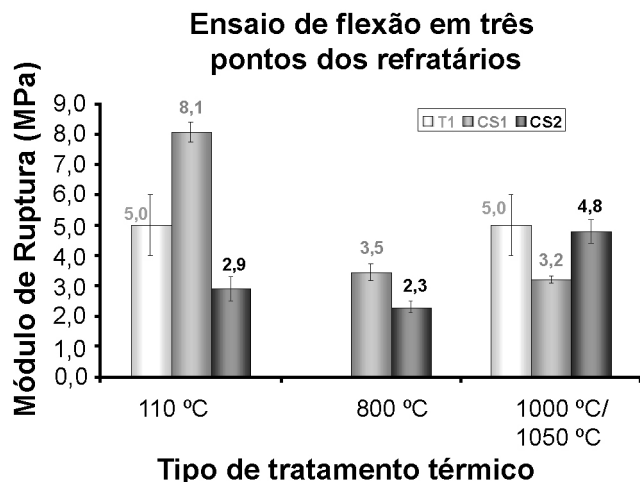


Figura 1: Módulo de ruptura de T1, CS1 e CS2 após as temperaturas de tratamento térmico. A temperatura de 1000 °C refere-se a T1 enquanto a de 1050 °C refere-se a CS1 e CS2.

[Figure 1: Modulus of rupture of T1, CS1 and CS2 after its thermal treatment. The temperature of 1000 °C refers to T1 whereas 1050 °C to CS1 and CS2.]

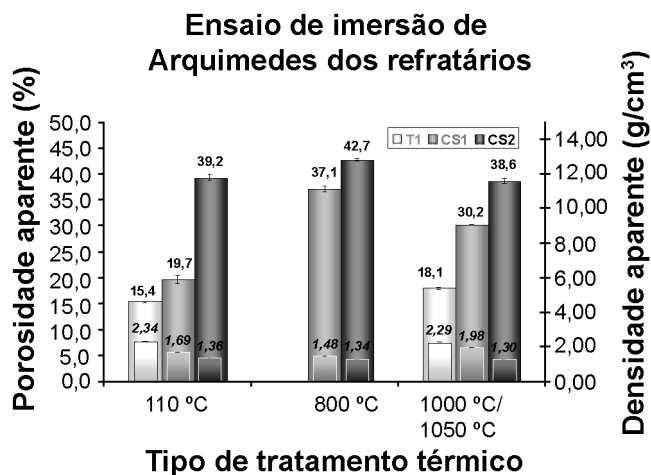


Figura 2: Porosidade aparente (normal) e densidade aparente (em itálico) de T1, CS1 e CS2 após as temperaturas de tratamento térmico. A temperatura de 1000 °C refere-se a T1 enquanto a de 1050 °C está relacionada a CS1 e CS2.

[Figure 2: Apparent porosity and apparent density (in italic) for T1, CS1 and CS2 after the thermal treatment. The temperature of 1000 °C refers to T1 whereas 1050 °C to CS1 and CS2.]

meccânicas seguida do CS2. Conforme foi visto na revisão bibliográfica deste trabalho, a grande desvantagem de um material semi-isolante seria sua baixa resistência ao abuso mecânico. Entretanto, o que se observa na Fig. 1 é uma resistência mecânica similar ao T1 após o tratamento térmico em alta temperatura. A princípio, poderia se pensar que o CS2 (tratado a 1050 °C) seria competitivo com o T1. Fez-se então um ensaio complementar de erosimetria a frio, baseado na norma NBR 13186:1994 [19], para se verificar a relação entre a resistência mecânica e resistência à erosão. Nesse ensaio, o refratário é submetido a um jato de partículas

de carbeto de silício sob uma determinada velocidade. A comparação entre T1 e CS2 é mostrada na Fig. 3. Na Tabela III constam os resultados numéricos do ensaio de erosão obtidos para todos os materiais.

Verifica-se dessa forma que o tijolo quimicamente ligado T1 [3, 6] é muito mais adequado no quesito relacionado à limpeza do cadinho, pois a erosão de CS1 foi bem mais elevada e o corpo CS2 furou.

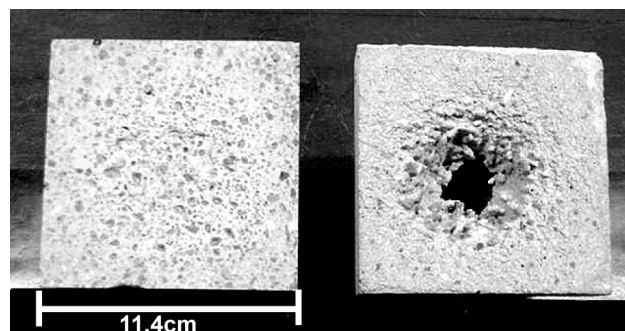


Figura 3: Corpos de prova T1 (esquerda) e CS2(direita) após o ensaio de erosimetria.

[Figure 3: Samples after erosion test. T1 is on the left and CS2 on the right.]

Tabela III - Erosão a frio dos três refratários analisados.

[Table III - Results for the cold erosion test of analyzed refractories.]

	Erosão (cm ³)
T1	6 ± 1
CS1	23 ± 4
CS2	Furou

Prosseguindo com a análise microestrutural do material, percebeu-se o progressivo aumento da permeabilidade para todos os materiais em função da temperatura de tratamento térmico (Fig. 4). Provavelmente, este fato está associado à perda dos agentes ligantes, sendo em T1 decorrente da decomposição de fosfato e nos concretos CS1 e CS2 da decomposição de hidratos do cimento. Na Fig. 4, observa-se também que os níveis de k_1 entre T1 e CS1 são muito semelhantes, estando CS2 cerca de uma ordem de grandeza mais elevada em cada temperatura de tratamento térmico. Esta já é uma evidência de que o material CS2 seria muito mais suscetível ao ataque intrusivo do alumínio. O elevado valor de k_2 de CS2 frente aos dos outros materiais também demonstra alta permeabilidade, significando uma baixa tortuosidade do meio poroso interconectado do material. Desse modo, se todos os refratários possuísem a mesma composição química, poder-se-ia afirmar que CS2 estaria mais sujeito ao ataque químico.

O ensaio de *cup-test* na Fig. 5 demonstra realmente que CS2 tratado tanto à 800 °C quanto a 1000 °C sofreu um ataque muito maior que os demais materiais, mesmo CS2 dispondo de aditivos anti-molhantes. Neste caso, atribui-se a facilidade

ao ataque muito mais devido aos aspectos microestruturais do que os aspectos químicos, pois a composição química de T1 é mais rica em sílica. Isto tornaria T1 termodinamicamente mais sujeito a corrosão [10, 11] mas, devido a sua microestrutura menos permeável, seu desempenho foi mais satisfatório que CS2. Adicionalmente, os resultados de *cup-test* demonstram que existe uma correlação maior entre o ataque químico com a permeabilidade do que com a porosidade, uma vez que tanto CS1 quanto T1 apresentaram

grande diferença na porosidade entre eles, mas não da permeabilidade. Um resultado similar sobre a penetração de alumínio líquido em refratários foi relatado [11]. Por meio de cálculos, são apresentadas estimativas em que, a partir de um raio crítico médio de poros, a penetração por alumínio aumenta significativamente. No presente trabalho, a diferença de uma ordem de grandeza na permeabilidade (CS2 comparado aos demais) foi suficiente para uma forte intrusão de metal.

A Fig. 6 é o resultado gráfico da medida da condutividade térmica dos refratários em função da temperatura de ensaio. Conforme previsto, as vantagens mecânicas e microestruturais oferecidas por T1 levam ao detrimento da condutividade térmica. De acordo com o gráfico, percebe-se que à medida que a temperatura do sistema se eleva, a condutividade de T1 aumenta. Neste caso, os concretos se mostram mais vantajosos, pois suas condutividades não aumentam em função da temperatura sendo também mais isolantes.

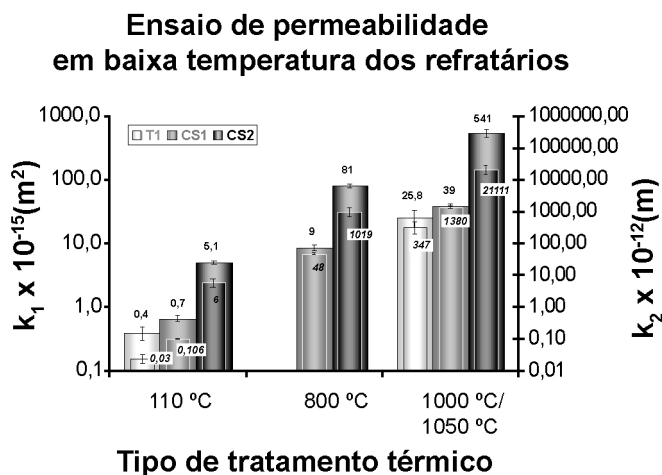


Figura 4: Constante de permeabilidade k_1 e k_2 (em itálico) de T1, CS1 e CS2 após as temperaturas de tratamento térmico. A temperatura de 1000 °C refere-se a T1 enquanto a de 1050 °C está relacionada a CS1 e CS2.

[Figure 4: Permeability constant k_1 and k_2 (in italic) for T1, CS1 and CS2 after its thermal treatment. The temperature of 1000 °C refers to T1 whereas 1050 °C to CS1 and CS2.]

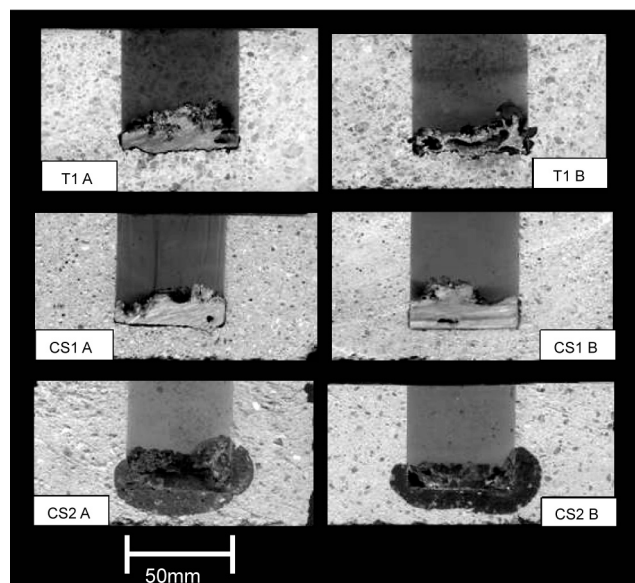


Figura 5: Ensaio de *cup-test* dos refratários com liga de Al 7075 + 4%Mg. A letra “A” indica ensaio a 800 °C por 72 h e “B” indica ensaio a 1000 °C por 72 h.

[Figure 5: *Cup-test* of refractories with a 7075 Al + 4%Mg alloy. The letter A refers to a test at 800 °C for 72 h. The letter B refers to a test at 1000 °C for 72 h.]

Ensaio de condutividade térmica pela técnica do fio quente

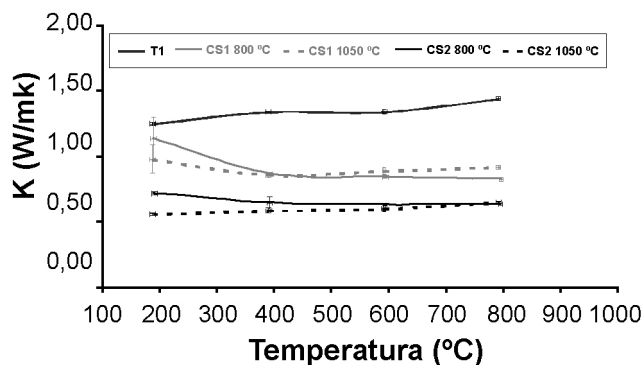


Figura 6: Ensaio de condutividade térmica dos materiais refratários. T1 foi previamente tratado termicamente a 1000 °C por 5 h. Os demais foram tratados termicamente a 800 °C por 5 h e 1050 °C por 3 h.

[Figure 6: Thermal conductivity evaluation for the refractory materials. T1 were previously heated at 1000 °C for 5 h. The other materials were heated at 800 °C for 5 h and at 1050 °C for 3 h.]

Os resultados experimentais obtidos até o momento permitiram a confirmação dos fundamentos teóricos envolvidos no transporte de alumínio líquido e, a microestrutura dos refratários foi o fator que teve maior influência nas propriedades. Considerando-se que a conservação da temperatura do cadinho seja uma prioridade, pode-se selecionar CS1 ou CS2 como materiais para revestimento. Porém, caso a resistência mecânica seja mais relevante, T1 torna-se o material mais apropriado. Percebe-se dessa maneira que existe certa dificuldade na seleção de refratários sob o ponto de vista quantitativo. Dessa maneira, a simulação computacional surge como uma ferramenta de correlação de propriedades e previsão do comportamento em operação, propiciando maior precisão para essa análise e escolha.

Resultados das simulações térmicas

Dispondo dos dados de entrada resultantes dos experimentos, foram feitas duas simulações térmicas envolvendo os três refratários T1, CS1 e CS2, com o objetivo de se avaliar quais são as implicações envolvidas na substituição de um material refratário. As variáveis estudadas foram a temperatura da face fria ou da parede externa do cadinho, ponto de congelamento (região no interior do revestimento onde a temperatura seja inferior a de fusão do metal), difusividade térmica e peso de revestimento. Os dados de condutividade térmica dos concretos CS1 e CS2 utilizados na simulação foram os mesmos obtidos do teste dos materiais queimados a 800 °C por 5 h. A temperatura de face fria é um indicativo da perda dinâmica térmica do cadinho. Quanto maior a temperatura de face fria, maior é a perda térmica. A localização do ponto de congelamento é uma importante informação de segurança do revestimento e do processo de transporte, pois, caso o ponto se situe muito próximo à carcaça, existe um grande risco de se danificar o revestimento isolante. Consequentemente, as chances de um vazamento de metal ao ambiente externo aumentam. O peso do revestimento é também um dado relevante ao se considerar o limite de carga máxima que um veículo pode transportar pelas estradas de rodagem. Finalmente, a difusividade térmica permite prever a velocidade de pré-aquecimento.

Na Fig. 7 observam-se as simulações do comportamento térmico para as paredes e o *backup* (revestimento isolante) compostos do mesmo material. Quanto maior é a condutividade térmica do revestimento, maior se torna a temperatura da face fria. Nota-se também que quanto

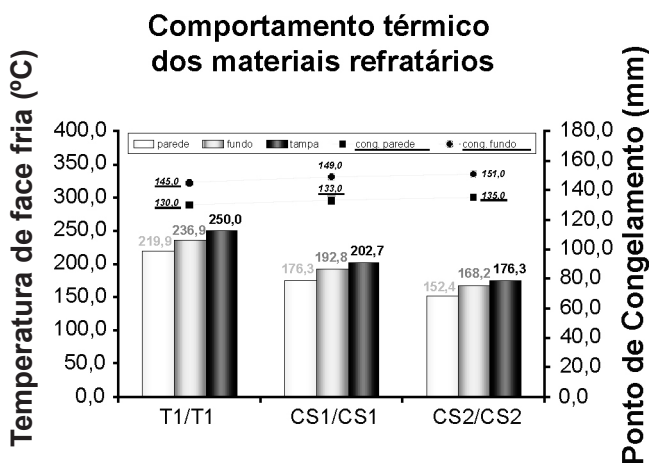


Figura 7: Simulação térmica dos refratários como se as duas camadas fossem compostas de um mesmo material. As siglas T1/T1, CS1/CS1 e CS2/CS2 indicam que tanto o revestimento de contato quanto o *backup* são constituídos de um mesmo material. Os concretos foram tratados termicamente a 800 °C por 5 h. [Figure 7: Thermal simulations assuming 2 linings of the same refractory material. T1/T1, CS1/CS1 and CS2/CS2 represent the name of material for lining and backup, respectively. The castables were previously heated at 800 °C for 5 h.]

mais isolante o material, mais distante se situa o ponto de congelamento em relação à carcaça metálica.

Do mesmo modo, a simulação foi feita em um sistema mais próximo do real para a verificação da influência de um material isolante comercial (Fig. 8). Os dados de entrada do material isolante foram obtidos de sua ficha técnica. Ao mesmo tempo em que a aplicação do *backup* promove a redução da temperatura de face fria, ocorre uma diminuição da diferença entre as mesmas. Nota-se também que os pontos de congelamento se situam mais próximos a carcaça, sendo o refratário T1 o mais desvantajoso entre os três materiais.

Na Tabela IV, para uma mesma espessura de revestimento, encontram-se os dados relacionados ao peso do sistema com o refratário de contato e o isolante. O uso dos concretos CS1 e CS2 apresentaria tempos menores de pré-aquecimento que T1, pois suas difusividades térmicas são superiores. Observando-se a Equação A [3], pode-se compreender a razão desse fenômeno.

$$a = k / \rho \cdot c \quad (A)$$

onde a é a difusividade térmica (m^2/h), k a condutividade térmica ($W/m.K$), ρ a densidade (kg/m^3) e c o calor específico ($W/h.kg.K$). Na relação apresentada pela Equação A, mesmo que as condutividades térmicas de CS1 e CS2 sejam menores que T1, seus calores específicos multiplicado pelas suas densidades resultam em denominadores de menor valor, fazendo com que a razão favoreça o aumento da difusividade.

Para todos os efeitos vistos, o material CS2 demonstrou-se mais vantajoso sob o ponto de vista produtivo, pois os resultados indicam a possibilidade de maximização de isolamento térmico, minimização do tempo de pré-aquecimento, segurança de operação (maior ponto de congelamento) e possibilidade do aumento do volume útil

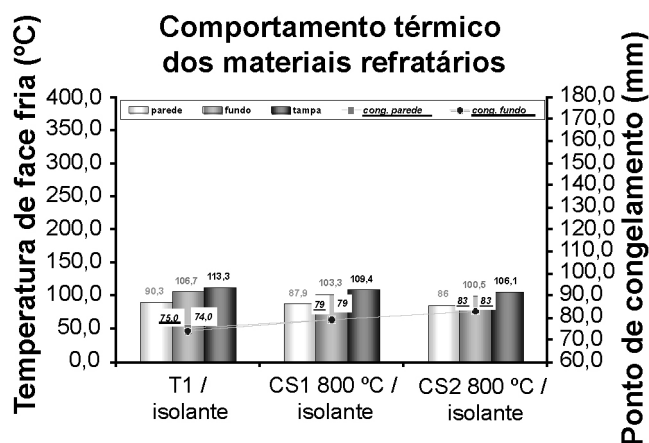


Figura 8: Simulação térmica dos refratários em contato com o alumínio líquido. Os concretos foram tratados a 800 °C por 5 h (os dados do isolante são de ficha técnica). [Figure 8: Thermal simulations of refractories (previously heated at 800 °C) in contact with molten aluminum. The backup information was obtained from the datasheet.]

Tabela IV - Resultados da simulação dos revestimentos quanto ao aspecto térmico e de projeto.

[Table IV - Numerical results of thermal simulations related to the design and thermal aspects.]

	Difusividade térmica da parede (m^2/s)	Peso do revestimento total (kg)
T1	1,50E-07	4005,3
CS1	1,90E-07	2811,3
CS2	2,00E-07	2599,7

(CS2 apresenta o menor peso na Tabela IV). Sabendo-se que a prioridade da empresa parceira deste trabalho esteve voltada nos mesmos aspectos, nota-se que a decisão tomada na escolha de CS2 como revestimento foi correta.

Finalmente, pode-se afirmar que a simulação computacional, aliada as propriedades dos materiais refratários de revestimento, gera as informações complementares mais adequadas para a previsão de sucesso da operação dos cadinhos. A seção a seguir apresenta o terceiro pilar do presente trabalho que é a prática industrial de um cadinho revestido com o material CS2 para a comparação da teoria com a prática.

Resultados industriais

Estudos anteriores [3] motivaram a empresa parceira deste trabalho a explorar novas possibilidades de instalação de refratários em cadinhos de transporte. O revestimento antigo de contato (T1) de um dos cadinhos de transporte foi substituído pelo refratário CS2. O desempenho do revestimento foi acompanhado desde então, sendo emitido um relatório a cada parada de manutenção e limpeza.

O funcionamento do cadinho revestido com o material CS2 iniciou-se com o teste de estanqueidade, no qual é feito um pré-aquecimento seguido do preenchimento por metal líquido. Todo o sistema fica sob observação por algumas

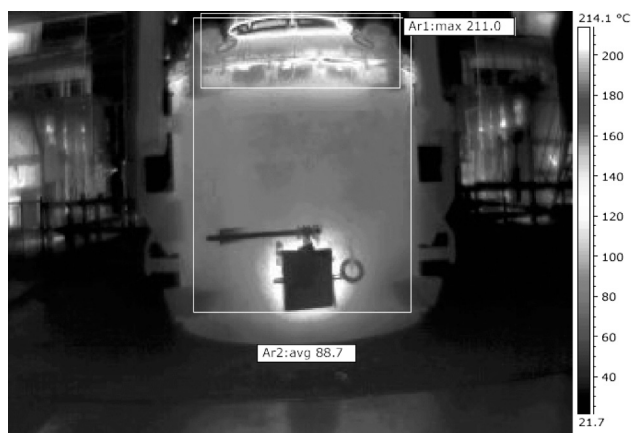


Figura 9: Termografia do cadinho revestido com CS2 como material de contato.

[Figure 9: External view of CS2 lined crucible by thermograph scanning.]

horas e é esvaziado na conclusão do teste. A termografia foi uma das técnicas empregadas na verificação de pontos quentes do revestimento. Na Fig. 9 (originalmente colorida), a barra vertical graduada no lado direito corresponde a um gradiente de cor correlacionado à temperatura. Nota-se que a carcaça do cadinho mostrou um bom isolamento do *backup*, pois não apresentou pontos demasiadamente quentes, exceto na junção da tampa e da válvula gaveta. Esse fato foi confirmado pelo software de análise gráfica utilizado. O resultado como um todo também indica que não houve falha no revestimento de contato (CS2) que levasse a penetração desastrosa de metal.

É interessante observar que, apesar dos testes experimentais (*cup-test*) terem indicado um resultado de infiltração severa, na prática, a microestrutura do concreto é pouco permeável. Provavelmente, isto se deve a maior severidade na qual é exposto o material durante o ensaio de *cup-test*, no qual o corpo de prova é homogênea-

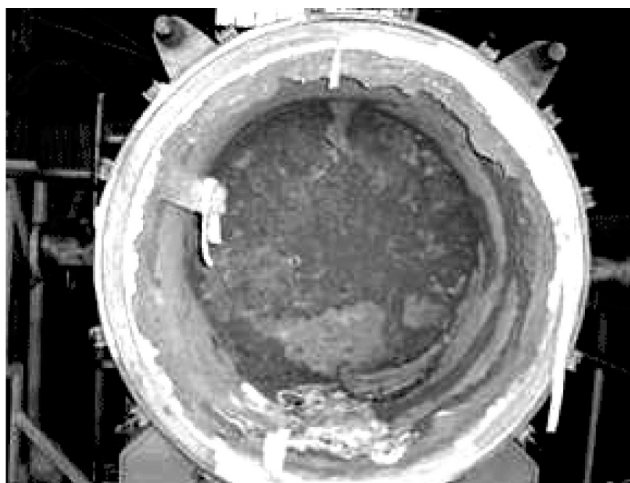


Figura 10: Vista do fundo do cadinho de transporte de alumínio líquido. À esquerda, antes da limpeza. À direita, após a limpeza.

[Figure 10: The bottom view of crucible's lining. On the left, the situation before the cleaning process. On the right, after cleaning.]

Tabela V - Dados de desempenho do cadinho revestido com CS2 em relação aos demais revestidos com material T1.

[Table V - CS2 lined crucible performance compared to T1 lined crucible.]

	Perda dinâmica (°C/h)	Tempo de pré-aquecimento (h)	Quantidade de metal transportado (ton)
Cadinho T1-1			
Mês1	14,92	5,24	6,97
Mês2	16,38	4,75	6,79
Cadinho T1-2			
Mês1	15,27	5,03	7,08
Mês2	16,15	4,85	7,09
Cadinho T1-3			
Mês1	15,03	6,06	7,06
Mês2	16,65	4,91	6,82
Cadinho CS3			
Mês1	13,67	4,35	7,70
Mês2	15,51	3,28	7,80

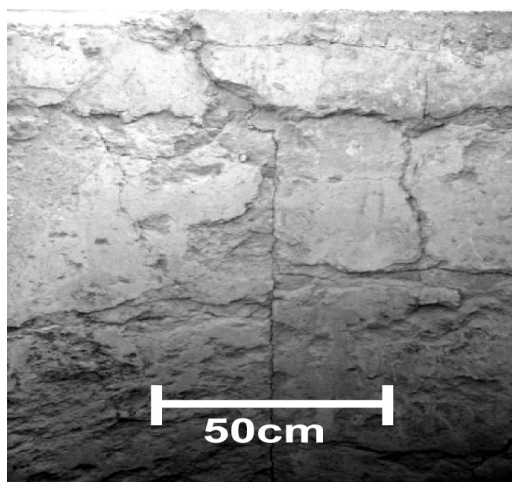
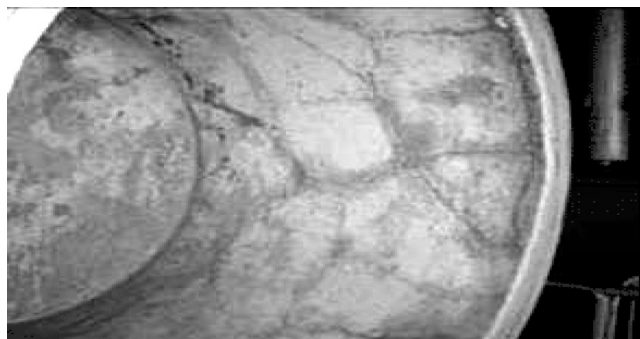


Figura 11: Acima: Vista do fundo do cadinho após a segunda manutenção. Embaixo: vista da parede do cadinho após 1 ano de uso. [Figure 11: Top, the bottom view of the crucible lining during its second cleaning process. Bottom, the crucible's lining after running one year.]

submetido a uma alta temperatura (800 °C e 1000 °C), ou seja, não existe perfil térmico. Outra diferença é a natureza da liga de Al utilizada a qual influencia nos efeitos cinéticos de reação, evidenciando-se que o concreto tem melhor efeito anti-molhante para o sistema real. Durante o período de 1 ano, foram feitas 5 paradas de manutenção. De uma maneira geral, notou-se que a limpeza para o seu reparo foi relativamente fácil (Fig. 10), pois o alumínio destacava-se facilmente do revestimento, o que indica a eficiência do agente anti-molhante na composição do concreto. Nos primeiros meses de funcionamento do cadinho, alguns ganhos já foram registrados como o de tempo de pré-aquecimento (Tabela V) e maior capacidade de transporte de metal (maior volume útil). É importante mencionar que o conjunto de refratários utilizado anteriormente por esse cadinho possuía uma maior espessura de refratários T1 e um *backup* à base de fibras cerâmicas, diferentemente do novo cadinho que utiliza um concreto isolante. Com um revestimento menos denso, foi possível realizar um projeto de cadinho com maior volume útil quando comparado aos cadinhos 1, 2 e 3 (revestidos com T1).

Foram também encontradas oportunidades de melhoria que muito contribuíram no entendimento do funcionamento global de um cadinho. Dentro do período citado de manutenções, ficou evidente a baixa resistência mecânica do revestimento monolítico evidenciadas nas trincas que progressivamente se tornavam mais visíveis a cada parada (Fig. 11). Outra notável melhoria feita foi a reforma do topo do cadinho pelo uso de um material mais denso com propriedades anti-molhantes (Fig. 12). A região anelar do topo sofreu, ao longo do tempo, um grande desgaste que chegou a ocasionar algumas infiltrações de alumínio por detrás do revestimento. Considerou-se esse fato como consequência de um efeito erosivo do metal, devido a sua movimentação durante o transporte. Consta na literatura [9, 20, 21] que o ponto triplo entre o contato do metal, ar e refratário é uma região fortemente susceptível ao ataque



Figura 12: Concretagem do topo do cadinho com material denso. [Figure 12: The top of crucible's lining repaired using dense refractory.]

corrosivo. Entretanto, acredita-se que esse fenômeno não seja o principal responsável pelo dano, pois não se observou a formação de coríndon que é o produto de reação desse tipo de desgaste corrosivo.

Verifica-se, portanto que a tecnologia envolvida na construção de um cadinho passa a envolver uma maior complexidade de projeto em que apenas um tipo de revestimento de contato não é suficiente para a otimização de todas as solicitações. Consequentemente, a exploração e combinação de novos materiais são possíveis, sempre buscando o melhor desempenho de acordo com as necessidades industriais. Este tipo de constatação dificilmente seria previsto por teoria ou simulação. Deste modo, a prática e o histórico industrial se tornam em fontes importantes de dados que completam os estudos.

CONCLUSÕES

No contexto da tecnologia que envolve o transporte de alumínio, uma análise sistêmica aliada à experimentação laboratorial, somada a simulação computacional e a resultados industriais permitiu um melhor entendimento de um cadinho de transporte de alumínio líquido. Verificou-se que apenas as propriedades dos materiais de revestimento são insuficientes para a previsão de um bom desempenho de um cadinho. A simulação se torna, portanto, na ferramenta fundamental para a solução dessa questão. Adicionalmente, o acompanhamento industrial relatado sistematicamente permite a visualização de fatos não detectáveis por teoria ou simulações. Baseando-se nesses argumentos, um estudo sistêmico de cadinhos de transporte do alumínio líquido foi possível, no qual um material comercial semi-isolante foi alvo de estudo e testes industriais. O uso de refratários semi-isolantes proporcionou uma diminuição no tempo de pré-aquecimento e diminuição do peso do revestimento (aumento do volume útil), conforme previsões em simulação computacional, cujos dados de entrada utilizados foram obtidos experimentalmente. Outros resultados experimentais das propriedades dos refratários possibilitaram o entendimento das limitações dos mesmos para determinadas solicitações como a resistência a erosão (desgaste gerado no processo de limpeza industrial), penetração e corrosão pelo alumínio líquido. O acompanhamento industrial proporcionou uma importante oportunidade de melhoria que foi o uso de diferentes materiais de contato (com Al) para funcionalidades específicas. Por exemplo, registrou-se a oportunidade de uso de materiais densos no revestimento do topo do cadinho, onde a ação erosiva do alumínio é muito mais severa que o fundo. Apesar do aumento da complexidade do projeto, isto permite a exploração de diversas outras combinações e materiais que possibilitam

avaliar novas relações de custo/benefício.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Alcoa Alumínio S.A. e ao CNPq pelo apoio dado no estudo. Agradecimentos adicionais a Bruno Dutra Carraro e Frederico Concon Leite pela ajuda na coleta de informações industriais.

REFERÊNCIAS

- [1] N. Freeman, J. D. Kelly, W. Zhang, J. L. Mann, Proc. Light Metals, The Minerals, Metals & Materials Society (2005) 843.
- [2] R. D. Peterson, G. G. Blagg, TMS, The Minerals, Metals & Materials Society (2000) 857.
- [3] M. A. L. Braulio, P. Bonadia, J. B. Gallo, V. C. Pandolfelli, Cerâmica 52, 323 (2006) 115.
- [4] Save your furnace and some money too, Modern Metals 56, 4 (2000) 571I.
- [5] M. H. O'Brien, M. Akinc, J. Am. Ceram. Soc. 73, 3 (1990) 491.
- [6] W. H. Gitzen, L. D. Hart, G. Maczura, Am. Ceram. Soc. Bull. 35, 6 (1956) 217.
- [7] W. D. Kingery, J. Am. Ceram. Soc. 33, 8 (1950) 239.
- [8] J. O. Marthinusen, M. Vicent, S. F. Ray, Proc. Int. Melt Quality Workshop 2001, Madrid, Spain (2001) p.25-26.
- [9] M. Allahevrdi, S. Afshar, C. Allaire, JOM TMS (1998) 30-34.
- [10] O. J. Siljan, G. Rian, D. T. Pettersen, A. Solhein, C. Shøning, Proc. UNITECR'01, Cancun, Mexico (2001) 531.
- [11] O. J. Siljan, C. Schøning, UNITECR'01, Cancun, Mexico (2001), 551.
- [12] American Society For Testing Materials, ASTM C 830-88, 15 (1991) 241.
- [13] M. D. M. Innocentini, A. R. F. Pardo, V. C. Pandolfelli, UNITECR'99, Berlim, Germany (1999) 93.
- [14] M. D. M. Innocentini, A. R. F. Pardo, V. R. Salvini, V. C. Pandolfelli, Am. Ceram. Soc. Bull. 78, 11 (1999) 64.
- [15] M. D. M. Innocentini, A. R. F. Pardo, V. R. Salvini, V. C. Pandolfelli, Am. Ceram. Soc. Bull. 78, 11 (1999), 64.
- [16] P. Bonadia, F. A. O. Valenzuela, L. R. Bittencourt, V. C. Pandolfelli, Am. Ceram. Soc. Bull. 84, 2 (2005) 6.
- [17] W. S. Resende, Ceramic News 6, 1 (2002) 57.
- [18] International Organization for Standardization 8894-2 (1990) 1.
- [19] NBR 13186:1994 - Materiais refratários densos - Determinação da resistência à erosão à temperatura ambiente.
- [20] S. Lecointe, M. Schnabel, P. Meunier, Proc. UNITECR'01, Cancun, Mexico (2001) 1621.
- [21] C. Allaire, M. Guermazi, Proc. Light Metals, TMS, The Minerals, Metals & Materials Society (2000) 685.
(*Rec.* 28/02/2008, *Ac.* 16/05/2008)