

METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE ARGAMASSAS REFRAATÁRIAS¹

Sávia Cristina Lacerda Poubel Bastos²

João Filipe Cavalcanti Leal³

Marco Antônio Quintela⁴

Resumo

O desgaste acentuado de juntas de argamassa refratária representa um problema potencial para revestimento de vasos metalúrgicos uma vez que propicia o aumento da área superficial do revestimento e induz o desgaste acelerado dos tijolos. O grande desafio nessa área é desenvolver e explorar metodologias de ensaios que sejam capazes de simular os processos industriais e, dessa forma, criar condições para selecionar e desenvolver argamassas de alto desempenho. Nesse contexto, é apresentada e discutida a metodologia desenvolvida na Usiminas para determinação da resistência ao desgaste de argamassas refratárias e os resultados de testes laboratoriais destinados à caracterização de duas argamassas para assentamento de tijolos para carros torpedo. O objetivo principal é estimular e auxiliar os fabricantes de refratários para o desenvolvimento de materiais com propriedades especiais para fazer frente às variáveis de processos e práticas metalúrgicas vigentes na Empresa.

Palavras-chave: Argamassa; Carro torpedo; Refratário.

METHODOLOGY TO EVALUATE REFRACTORY MORTARS

Abstract

The performance of refractory mortars has a great influence on the brick wear used for refractory lining of metallurgical vessels. The joint wear contributes to increase the contact surface between refractory and slag accelerating refractory lining wear. This paper presents and discusses a novel methodology developed at Usiminas for characterizing of refractory mortars. The approach aimed to simulate and predict the behavior of mortars which should be a valuable tool on selecting suitable mortars and encouraging the refractory industry for the development of special materials.

Key words: Mortar; Torpedo car; Refractory.

¹ *Contribuição técnica ao 40º Seminário de Aciaria – Internacional, 24 a 27 de maio de 2009, São Paulo, SP, Brasil.*

² *Membro da ABM; Engenheira de Materiais, M.Sc.; Superintendência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas; Ipatinga, MG.*

³ *Membro da ABM; Técnico Metalúrgico, Superintendência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas; Ipatinga, MG.*

⁴ *Membro da ABM; Engenheiro Mecânico, M.Sc.; Superintendência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas; Ipatinga, MG.*

1 INTRODUÇÃO

Assim como em outras grandes siderúrgicas, os carros torpedo na Usiminas são revestidos com tijolos do sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$, os quais têm experimentado substancial progresso para fazer frente às novas e severas solicitações metalúrgicas. Entretanto, o desgaste acentuado de juntas entre anéis, conhecido como desgaste de juntas, tem impedido um progresso mais substancial do desempenho desse revestimento. Certamente, as propriedades de argamassas empregadas no assentamento dos tijolos têm influência direta no desempenho do revestimento. Por exemplo, a baixa resistência ao ataque por escória e metal líquidos de argamassas favorece o desgaste de junta entre tijolos e provoca aumento significativo da área superficial do revestimento.⁽¹⁻⁵⁾

Com o objetivo de estimular e auxiliar o desenvolvimento de argamassas de alto desempenho foi desenvolvida na Usiminas uma metodologia para determinar a resistência ao desgaste de argamassas refratárias. O método adotado possibilita não apenas quantificar o desgaste, mas, também, caracterizar o aspecto da estrutura deteriorada. Nesse contexto, são apresentados e discutidos a metodologia para determinação da resistência ao desgaste de argamassas refratárias e os resultados de testes laboratoriais destinados à caracterização de duas argamassas para assentamento de tijolos para carros torpedo.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia consiste na avaliação da resistência ao ataque por escória em forno rotativo de corpos-de-prova de tijolos refratários que representam o processo a ser simulado. Nesse caso, foram avaliadas argamassas do sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ de uso convencional e uma com adição de MgO , ambas contendo SiC , denominadas “A” e “B”, respectivamente, empregadas no revestimento de tijolos de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$ para carro torpedo. A argamassa “B” foi fabricada em caráter experimental por um fornecedor nacional.

Além da resistência ao desgaste, foram determinadas as principais propriedades físicas de corpos-de-prova das argamassas, os quais foram confeccionados e coqueificados conforme os testes de massa específica aparente, porosidade aparente e distribuição de tamanho de poros.

2.1 Composição Mineralógica E Microscopia Eletrônica De Varredura (Mev)

A composição de fases foi determinada em amostras das argamassas após secagem a 110°C durante 24 horas e após coqueificação a 1.400°C durante cinco horas. Além disso, foram efetuadas análises empregando-se os recursos de EDS (espectrometria por dispersão de energia) para melhor caracterizar a formação de espinélio em amostras coqueificadas a 1.400°C durante 5 horas.

2.2 Massa Específica Aparente e Porosidade Aparente

A massa específica aparente (m.e.a.) e porosidade aparente (p.a.) das argamassas foram determinadas em corpos-de-prova cúbicos (40 mm x 40 mm x 40 mm) coqueificados a 1.000°C, 1.200°C e 1.400°C durante 5 horas.

2.3 Distribuição do Tamanho de Poros

A distribuição do tamanho de poros das argamassas foi determinada em corpos-de-prova cúbicos (15 mm x 15 mm x 15 mm) coqueificados a 1.400°C durante cinco horas, empregando-se os recursos de porosimetria de mercúrio.

2.4 Resistência ao Desgaste por Escória

A resistência ao ataque por escória foi avaliada por meio de testes efetuados em forno rotativo, em corpos-de-prova de tijolos de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$ nas dimensões de (88 mm; 68 mm) x 30 mm x 190 mm, na temperatura de 1.500°C, durante sete horas, utilizando-se escória típica de alto-forno.

Na direção longitudinal dos corpos-de-prova, foi confeccionado um entalhe plano de 3 mm de espessura e 29 mm de profundidade, que foi preenchido com as argamassas mencionadas (Figura 1). Após ensaio de ataque por escória, a corrosão e penetração de escória na junta de argamassa foram determinadas com auxílio de microscopia eletrônica de varredura.



Figura 1. Fotografias do corpo-de-prova de tijolo $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$ para ensaio de ataque por escória em forno rotativo: (a) superfície sujeita à corrosão evidenciando o entalhe; e (b) seção transversal do corpo-de-prova destacando o entalhe com argamassa.

Para melhor entendimento dos resultados, o desgaste de juntas provocado pela erosão e corrosão por escória foi determinado a partir de 5 subamostras retiradas ao longo do comprimento dos corpos-de-prova de tijolo de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$ (Figura 2).

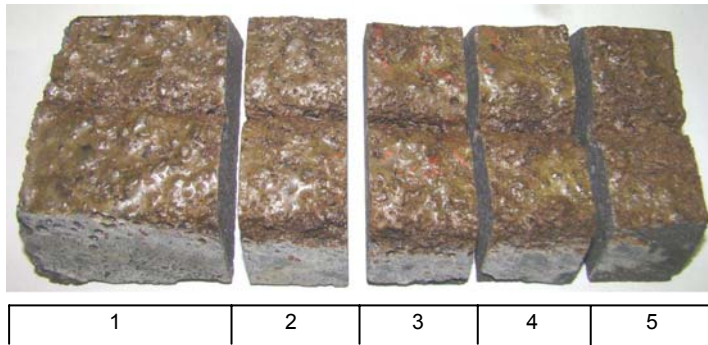


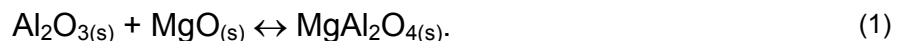
Figura 2. Fotografia de um corpo-de-prova de tijolo de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$ após teste de ataque por escória em forno rotativo evidenciando 5 subamostras para análise do desgaste.

A profundidade de penetração de componentes da escória na junta de argamassa foi, por sua vez, investigada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), empregando-se os recursos de EDS.

3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1 Composição Mineralógica e Microscopia Eletrônica

Em princípio, a adição de MgO à argamassa tem o propósito de promover a formação de espinélio (MgAl_2O_4) *in situ*, a qual se torna mais pronunciada em temperaturas superiores a 1.200°C .⁽⁶⁾ Particularmente, a formação de espinélio pela reação sólido/sólido direta entre o $\text{MgO}_{(s)}$ e o $\text{Al}_2\text{O}_{3(s)}$ (equação 1) produz uma variação linear dimensional positiva de cerca de 2,45%. A expansão volumétrica permanente balanceada pode contribuir no sentido de fechar as juntas entre tijolos e, dessa forma, minimizar o ataque de juntas.



Os resultados de composição mineralógica confirmaram a presença de MgO na argamassa “B” após secagem a 110°C durante 24 horas (Tabela 1). A presença das linhas de difração de raios-X do MgAl_2O_4 e o desaparecimento das linhas de difração de raios-X do MgO, para a argamassa “B” coqueificada a 1.400°C durante cinco horas, reforçaram a hipótese de intensa formação de espinélio para as condições térmicas estudadas. Por sua vez, a formação de Si_3N_4 , em ambas as argamassas, decorreu do processo de coqueificação dos corpos-de-prova.

Tabela 1. Composição mineralógica das argamassas “A” e “B”

Denominação	Argamassa “A”		Argamassa “B”	
	110°C	1400°C	110°C	1400°C
Fases				
C	F	F	F	F
Al ₂ O ₃	F	F	F	F
SiC	F	F	F	F
Si ₃ N ₄		F		F
MgO			F	
MgAl ₂ O ₄				F

F - fase presente

Os resultados de mapeamento por raios-X do Mg, Al e O de um campo da amostra da argamassa “B” coqueificada a 1.400°C durante cinco horas (Figura 3) confirmaram a expressiva formação de espinélio.

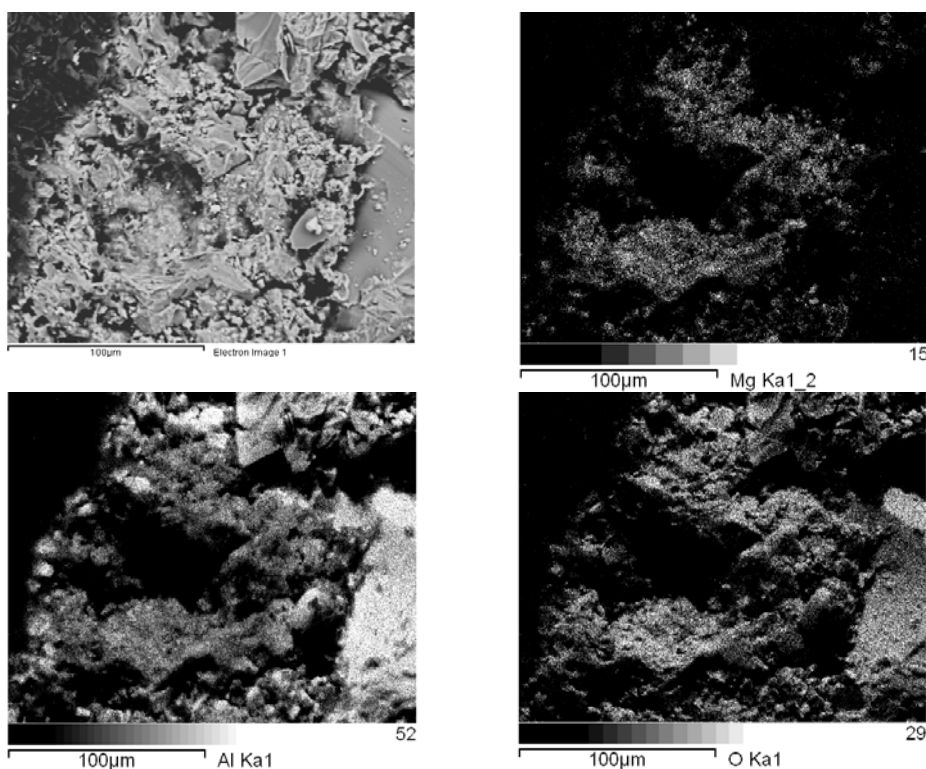
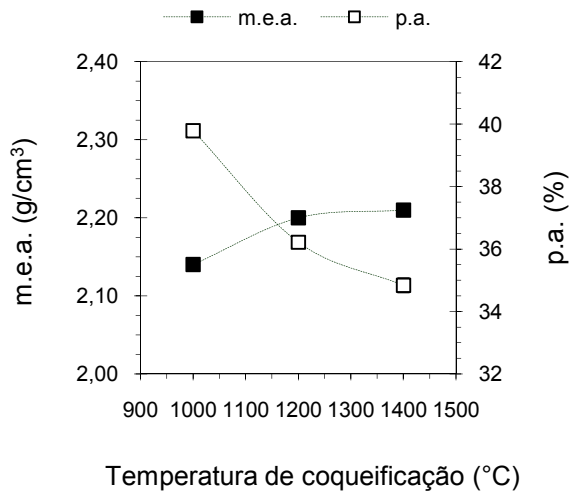


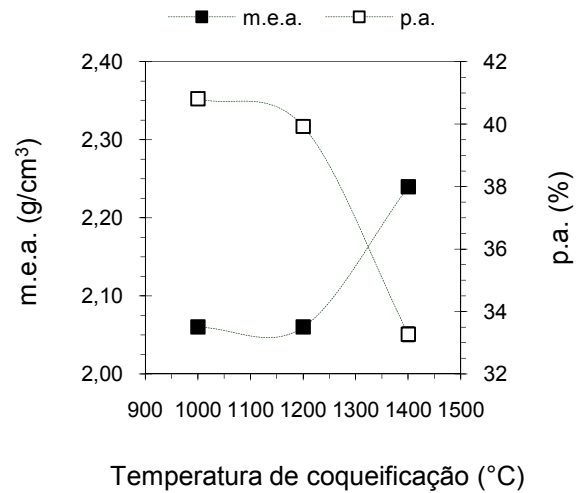
Figura 3. Fotomicrografia e mapeamentos por raios-X (Mg, Al e O) de amostra da argamassa “B” após coqueificação a 1400°C durante 5 horas.

3.2 Massa Específica Aparente e Porosidade Aparente

A Figura 4 mostra o comportamento da massa específica aparente e porosidade aparente das argamassas “A” e “B” em função da temperatura de coqueificação dos corpos-de-prova.



(Argamassa "A")



(Argamassa "B")

Figura 4. Comportamento da massa específica aparente e porosidade aparente em função da temperatura de coqueificação dos corpos-de-prova ($\bar{x} \pm \sigma_{n-1}$).

Os resultados sugeriram que a maior massa específica aparente e menor porosidade aparente da argamassa "B", após coqueificação a 1.400°C, sejam atribuídas, em parte, à expansão volumétrica decorrente da formação de espinélio, que contribuiu para uma estrutura mais compacta.

3.3 Distribuição do Tamanho de Poros

As curvas de distribuição de tamanho de poros indicaram que as argamassas "A" e "B", após coqueificação a 1.400°C durante cinco horas, apresentaram diâmetro de poros em maior frequência entre cerca de 1 μm e 4 μm (Figura 5). Embora as argamassas sejam semelhantes em termos de diâmetro de poros, a argamassa "B" apresentou menor frequência de poros para a classe mencionada. Essa característica, juntamente com a menor porosidade aparente, contribuiu para reduzir a permeabilidade e área superficial da argamassa "B".

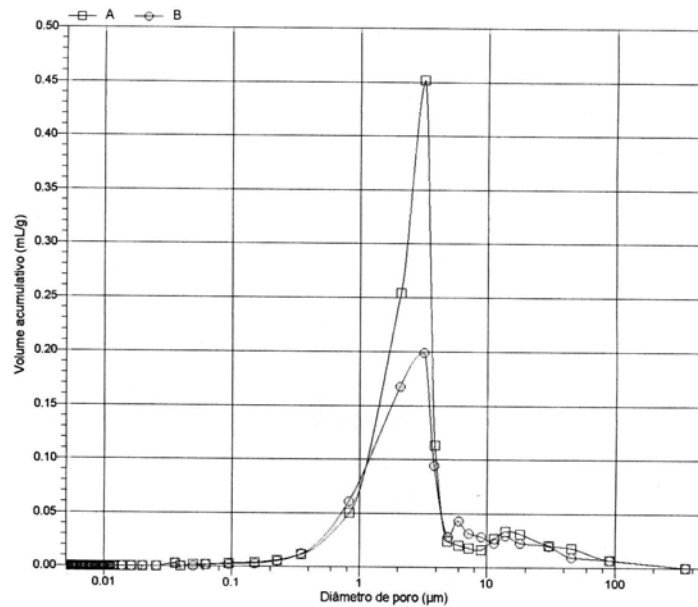


Figura 5. Curvas de distribuição de tamanho de poros para as argamassas “A” e “B” após coqueificação a 1400°C durante 5 horas.

3.4 Resistência ao Desgaste por Escória

O índice de desgaste decorrente dos testes de ataque por escória foi determinado com base num campo da seção transversal dos corpos-de-prova, que englobou a junta de argamassa e parte do tijolo de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$ (Figuras 6 e 7). A significativa variação do índice de desgaste ao longo do comprimento do corpo-de-prova foi atribuída ao método de ensaio para avaliar a resistência ao ataque por escória. Por essa razão, são confrontados os resultados de índice de desgaste de seções transversais semelhantes ao longo do comprimento do corpo-de-prova do tijolo.

Denominação	Fotografia da seção transversal				
Argamassa “A”					
Subamostra	1	2	3	4	5
Desgaste (%)	$26,5 \pm 0,3$	$33,7 \pm 0,1$	$40,4 \pm 0,4$	$40,7 \pm 0,1$	$41,2 \pm 0,1$

Figura 6. Índices de desgaste e fotografias de campos das seções transversais dos corpos-de-prova da argamassa “A” após teste de ataque por escória em forno rotativo.






Denominação	Fotografia da seção transversal				
Argamassa "B"					
Subamostra	1	2	3	4	5
Desgaste (%)	$23,5 \pm 0,1$	$27,3 \pm 0,3$	$29,9 \pm 0,1$	$34,2 \pm 0,1$	$34,3 \pm 0,4$

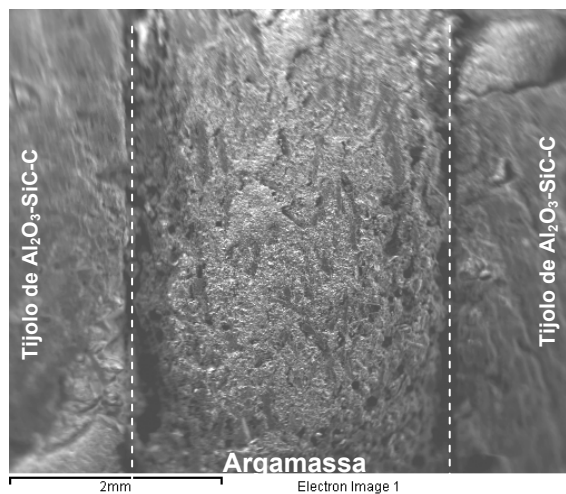
Figura 7. Índices de desgaste e fotografias de campos das seções transversais dos corpos-de-prova da argamassa "B" após teste de ataque por escória em forno rotativo.

Os resultados indicaram que o desgaste foi mais pronunciado no sentido da extremidade do corpo-de-prova de tijolo de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$ que corresponde à subamostra 5. Esse comportamento é devido ao ângulo da chama do maçarico utilizado para manter as condições térmicas do ensaio de ataque por escória, que implica em maior temperatura e erosão no sentido da extremidade correspondente à subamostra 5. Entretanto, o gradiente de desgaste propicia uma excelente oportunidade para melhor explorar os resultados dos testes. Nesse sentido, quando se compara os resultados de desgaste para subamostras referentes às seções equidistantes com relação às extremidades, a argamassa "B", que contém MgO , apresentou melhor desempenho. Por exemplo, o desgaste para as subamostras 1 e 5 da argamassa "A" é, respectivamente, de 13% e 20% superior ao das subamostras 1 e 5 da argamassa "B". Além disso, o gradiente de desgaste, referente às subamostras 1 e 5 das argamassas "A" e "B" é, respectivamente, de 55% e 46%, o que representa mais uma vantagem em termos de desempenho para a argamassa "B".

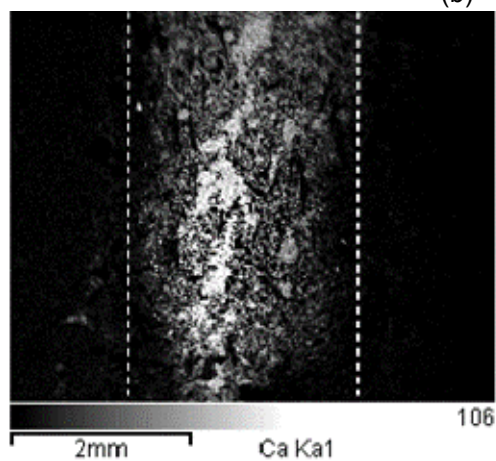
Além da determinação do índice de desgaste, foi também avaliada, por meio de microscopia eletrônica de varredura, a infiltração de componentes da escória na argamassa remanescente na junta. As análises por EDS foram efetuadas em amostras extraídas de um campo que contempla a superfície de corrosão da argamassa e tijolo de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$ (Figuras 8 e 9). Os resultados de mapeamento por raios-X de Ca propiciaram determinar a profundidade afetada das argamassas remanescente pela escória. A maior intensidade de Ca indicou que houve maior penetração de escória na argamassa "A", ou seja, a argamassa "B" apresentou maior resistência à penetração por escória. Esse comportamento ganha importância quando se considera a menor porosidade aparente e menor intensidade de poros de diâmetro entre $1 \mu\text{m}$ e $4 \mu\text{m}$ da argamassa "B".



(a)



(b)



(c)

Figura 8. Fotografia de uma amostra da seção transversal do corpo-de-prova de tijolo de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$ evidenciando o desgaste de junta para a argamassa “A” (a); fotomicrografia por MEV do campo 1 referente à figura 8a (b) e mapeamento por raios-X (Ca) indicando a profundidade de penetração de componentes da escória na argamassa “A” (c).

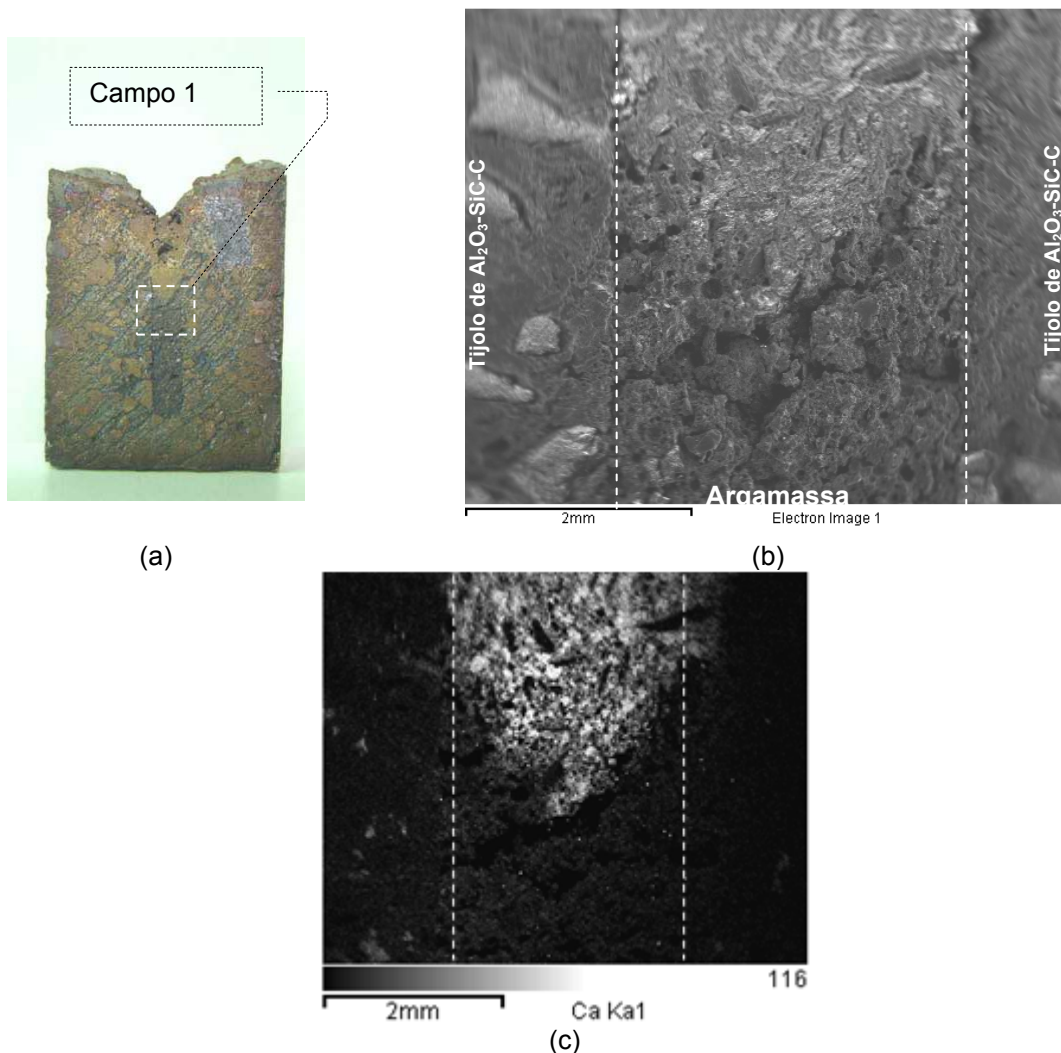


Figura 9. Fotografia de uma amostra da seção transversal do corpo-de-prova de tijolo de Al₂O₃-SiC-C evidenciando o desgaste de junta para a argamassa “B” (a); fotomicrografia por MEV do campo 1 referente à figura 9a (b) e mapeamento por raios-X (Ca) indicando a profundidade de penetração de componentes da escória na argamassa “B” (c).

4 CONCLUSÕES

O método desenvolvido na Usiminas para avaliar a resistência ao desgaste de juntas de argamassa visa simular os processos industriais com o propósito de determinar o índice de desgaste da junta de argamassa e investigar a eventual penetração de componentes da escória na junta de argamassa. Por essa razão, a metodologia representa uma alternativa para determinação da deterioração de juntas de argamassa, sendo valiosa na seleção e desenvolvimento de argamassas para revestimento refratário exposto a líquidos de metal e/ou escória, tais como aquele destinado aos carros torpedo.

Com relação às argamassas propostas para tijolos de Al₂O₃-SiC-C para carros torpedo, os resultados dos testes laboratoriais indicaram que a argamassa “B”, que contém MgO, apresentou superior desempenho. Houve fortes indicativos de que o

menor desgaste dessa argamassa decorra, em parte, da formação de espinélio *in situ*, que implica, por sua vez, em considerável expansão volumétrica. A formação de espinélio, para a argamassa “B” após coqueificação a 1400°C durante 5 horas, propiciou uma estrutura menos permeável em virtude da menor porosidade aparente e menor quantidade de poros de pequeno diâmetro, quando se considera uma argamassa similar livre de MgO (argamassa “A”).

REFERÊNCIAS

- 1 SÁ, G.M. *Lascamento de refratários para revestimentos de carros torpedo*. 2006. 111f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.
- 2 HIROTA, T.; SKAGUCHI, M.; OGUCHI, Y. Deformation behavior under load of Al₂O₃-SiC-C bricks for torpedo cars. *Taikabutsu Overseas*, v. 15, n. 2, p. 42-7, 1995.
- 3 SHIMADA, K.; DOI, A.; KONO, K. Development of refractories for torpedo ladles with hot metal pretreatment. In.: INTERNATIONAL TECHNICAL CONFERENCE ON REFRACTORIES, 2., 1987, Tokyo, Japan. *Proceedings*. [S.n.t.]. p. 266-80.
- 4 CORREA FILHO, G.; CORRÊA FILHO, J.R.; LAGE, I.J. Avaliação de argamassas para carro torpedo. In: SEMINÁRIO SOBRE FUSÃO, REFINO E SOLIDIFICAÇÃO DOS AÇOS, 27., 1996, Belo Horizonte, MG. *Anais...* São Paulo: ABM, 1996. p. 791-800.
- 5 SÁ, G.M.; QUINTELA, M.A.; VALADARES, A.J.; CARDOSO, A.V. Efeitos dos antioxidantes metálicos nas propriedades de tijolos de Al₂O₃-SiC-C. In: SEMINÁRIO DE ACIARIA, 38., 2007, Belo Horizonte, MG. *Anais...* São Paulo: ABM, 2007. p. 539-49.
- 6 MINATO, K.; NISHIHARA, K.; TANAKA, Y. Development of Al₂O₃-MgO-C bricks. *Shinagawa Technical Report*, v. 33, p. 163-70, 1990.