

# CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETOS REFRAATÓRIOS PARA SHOTCRETE<sup>1</sup>

Marco Antônio Quintela<sup>2</sup>  
Epitácio Pessoa Ponce de Lion<sup>3</sup>  
Afonso Pereira Salgado<sup>4</sup>  
Victor Carlos Pandolfelli<sup>5</sup>

## Resumo

Há vários anos, a indústria de refratários, juntamente com o setor siderúrgico, tem direcionado esforços para prolongar a vida dos revestimentos para panela, carro torpedo, canal de corrida, convertedor, etc. Dentre as várias alternativas, os reparos intermediários sistemáticos, empregando-se modernas técnicas de aplicação de concretos, têm despertado grande interesse pelas suas vantagens potenciais. Em especial, a projeção a úmido de concreto refratário, conhecida como *wet-shotcrete* ou simplesmente *shotcrete*, destaca-se pela combinação de altas taxas de aplicação e baixo custo. Além disto, as propriedades de concretos aplicados por *shotcrete* são próximas às de produtos moldados por vibração. Neste contexto, são apresentados e discutidos os resultados de testes laboratoriais empregados para caracterização de seis concretos para *shotcrete*, visando dar suporte à implementação desta técnica na Usiminas. Os resultados dos testes laboratoriais, alguns deles inovadores, permitiram definir critérios para seleção destes materiais e devem contribuir para o sucesso da implementação desta técnica.

**Palavras-chave:** Concretos; Refratários; *Shotcrete*.

## CHARACTERIZATION OF REFRACTORY CASTABLES FOR SHOTCRETE

### Abstract

The refractories producers and steel industries are continuously placing efforts to increase the life of refractories for steel ladles, torpedo cars and BOF. The systematic repairs using modern techniques for installation of castables have become attractive due to their potential benefits. In special the wet gunning called shotcrete has gained importance due to high installation rates and low cost. In addition, the castables shotcrete properties are similar to those of preshaped refractories. This paper presents and discusses the results of laboratory tests used for characterizing six castables for shotcrete, aiming to support the implementation of this technique at Usiminas. The tests used, some of them innovative, allowed to define criteria for selection of these materials which would be a valuable tool for implementation of this process.

**Key words:** Castable; Refractories; Shotcrete.

---

<sup>1</sup> Trabalho apresentado no XXXVII Seminário de Aciaria - Internacional, 21 a 24 de maio de 2006, Porto Alegre, RS

<sup>2</sup> Membro da ABM; Engenheiro Mecânico, MSc; Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas; Ipatinga, MG.

<sup>3</sup> Membro da ABM; Engenheiro Siderúrgico, Gerência de Manutenção de Refratários e Civil, Usiminas; Ipatinga, MG.

<sup>4</sup> Membro da ABM; Técnico Metalúrgico, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas; Ipatinga, MG.

<sup>5</sup> Membro da ABM; Engenheiro de Materiais, PhD; Professor Adjunto do Departamento de Engenharia de Materiais, UFSCar; São Carlos, SP.

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria de refratários tem concentrado esforços para o desenvolvimento de novas técnicas de aplicação de concretos refratários, que possam combinar alta taxa de aplicação e baixo custo, sem comprometer, de forma apreciável, as propriedades finais destes materiais. Os métodos versáteis e automatizados, tais como bombeamento de concretos auto-escoantes e projeção a úmido de concreto, têm despertado grande interesse por parte deste setor para substituir, pelo menos parcialmente, as tradicionais técnicas de moldagem de concreto por vibração<sup>(1-3)</sup>.

Seguindo esta tendência, a Usiminas está se preparando para implementar, em 2006, a técnica de *shotcrete* para reparos e recobrimento do revestimento para carros torpedo e reparos em canais de corrida. Esta técnica poderia ser implementada por meio de terceirização deste serviço, que tradicionalmente inclui os concretos da contratada, ou a partir da aquisição do sistema de bombeamento, o que flexibiliza o emprego de materiais de diferentes fornecedores. Particularmente, a Usiminas optou pelo investimento na máquina de projeção e aquisição dos concretos, visando reduzir a dependência de terceiros e, também, promover o progresso mais acelerado da tecnologia dos materiais nacionais para *shotcrete*. Adicionalmente, com a aquisição do equipamento para projeção, abre-se oportunidade para se estender o emprego desta técnica no revestimento e/ou reparo de outros vasos metalúrgicos.

Neste sentido, a Usiminas deu início a uma caracterização sistêmica, por meio de testes laboratoriais, de seis concretos comerciais para projeção a úmido, tipicamente empregados para reparos em carros torpedo e canais de corrida. Tais materiais foram caracterizados em termos de propriedades físicas e químicas, que visaram simular os principais fatores e solicitações que afetam o desempenho destes materiais, tais como corrosão por escória e aderência a quente do concreto no substrato.

## 2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram moldados blocos nas dimensões de 915 mm x 915 mm x 100 mm, com auxílio de fôrmas metálicas inclinadas a 90° em relação ao solo, empregando-se uma máquina industrial para projeção. Os corpos-de-prova para determinação das propriedades físicas e químicas foram extraídos dos blocos de concretos (tabela 1), os quais foram, posteriormente, secos a 110°C durante 24 horas e, subseqüentemente, submetidos à coqueificação em diferentes temperaturas, conforme os testes ou análises.

**Tabela 1.** Composição química dos concretos para *shotcrete* conforme suas folhas de dados técnicos (% em massa).

Denominação	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	72,0 a 76,0	65,0	64,0 a 70,0	65,0	56,9 a 61,9	63,1 a 68,1
SiC + C	18,0	22,0	20,0 a 27,0	10,6 a 15,1	24,7 a 29,2	-
SiO <sub>2</sub> (máximo)	5,5	6,0	7,0	19,6	4,6	31,0
CaO(máximo)	-	-	2,0	1,8	1,4	2,5

### 2.1 Densidade de Massa Aparente e Porosidade Aparente

A densidade de massa aparente (d.m.a.) e a porosidade aparente (p.a.) foram determinadas em corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm x 50 mm, secos a 110°C e coqueificados a 1000°C, 1200°C e 1450°C durante 5 horas.

## 2.2 Variação Linear Dimensional

A variação linear dimensional (v.l.d.) foi medida em corpos-de-prova prismáticos (40 mm x 40 mm x 160 mm). O teste foi efetuado a 1450°C, em caixa de coque, durante 10 horas.

## 2.3 Resistência à Flexão a Quente

A resistência à flexão a quente foi medida nas temperaturas de 1000°C, 1200°C e 1450°C em atmosfera de N<sub>2</sub>. O teste foi efetuado em corpos-de-prova prismáticos (25 mm x 25 mm x 150 mm) previamente coqueificados nas respectivas temperaturas durante 5 horas.

## 2.4 Resistência ao Ataque por Escória

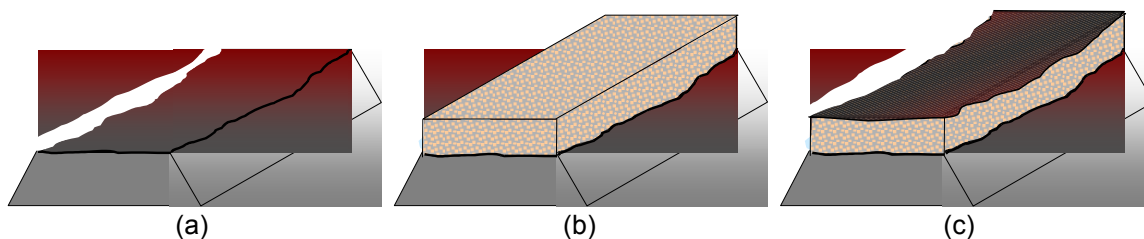
A resistência ao ataque por escória foi avaliada por meio de teste efetuado em forno rotativo, envolvendo corpos-de-prova de seção trapezoidal nas dimensões de (88 mm; 68 mm) x 30 mm x 190 mm. O teste foi realizado entre 1500°C e 1550°C, utilizando-se escória típica de altos-fornos.

Para avaliar o comportamento dos concretos frente ao gusa + escória, foi efetuado teste em forno a indução, na temperatura de aproximadamente 1550°C durante 2 horas.

O índice de desgaste foi determinado com base na área corroída correspondente à seção longitudinal dos corpos-de-prova.

## 2.5 Aderência a Quente do Concreto

Para avaliar a aderência a quente dos concretos no substrato (tijolo), foi desenvolvida uma nova metodologia, que consistiu em efetuar, previamente, o ataque por escória de corpos-de-prova de tijolo de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-C. Posteriormente, a superfície atacada foi recoberta com uma camada dos concretos S2, S3, S4 e S6 sem adição de acelerador de pega (Figura 1).



**Figura 1.** Representação esquemática dos corpos-de-prova para avaliar a aderência: corpo-de-prova de tijolo após ataque por escória (a), recobrimento da superfície do corpo-de-prova do tijolo (b) e corpo-de-prova de tijolo e concreto após ataque por escória (c).

Após cura e secagem, o conjunto foi submetido novamente ao ataque por escória, efetuando-se 3 ciclos de aquecimento a 1500°C durante 40 minutos e resfriamento por meio de fluxo de ar até cerca de 800°C. Posteriormente, os corpos-de-prova foram seccionados na direção transversal para avaliação qualitativa e quantitativa da aderência dos concretos no substrato. A aderência do concreto foi medida por meio da resistência à flexão a 1200°C de corpos-de-prova de 25 mm x 25 mm x 50 mm extraídos do volume cuja junta entre o concreto e tijolo divide simetricamente o comprimento da amostra.

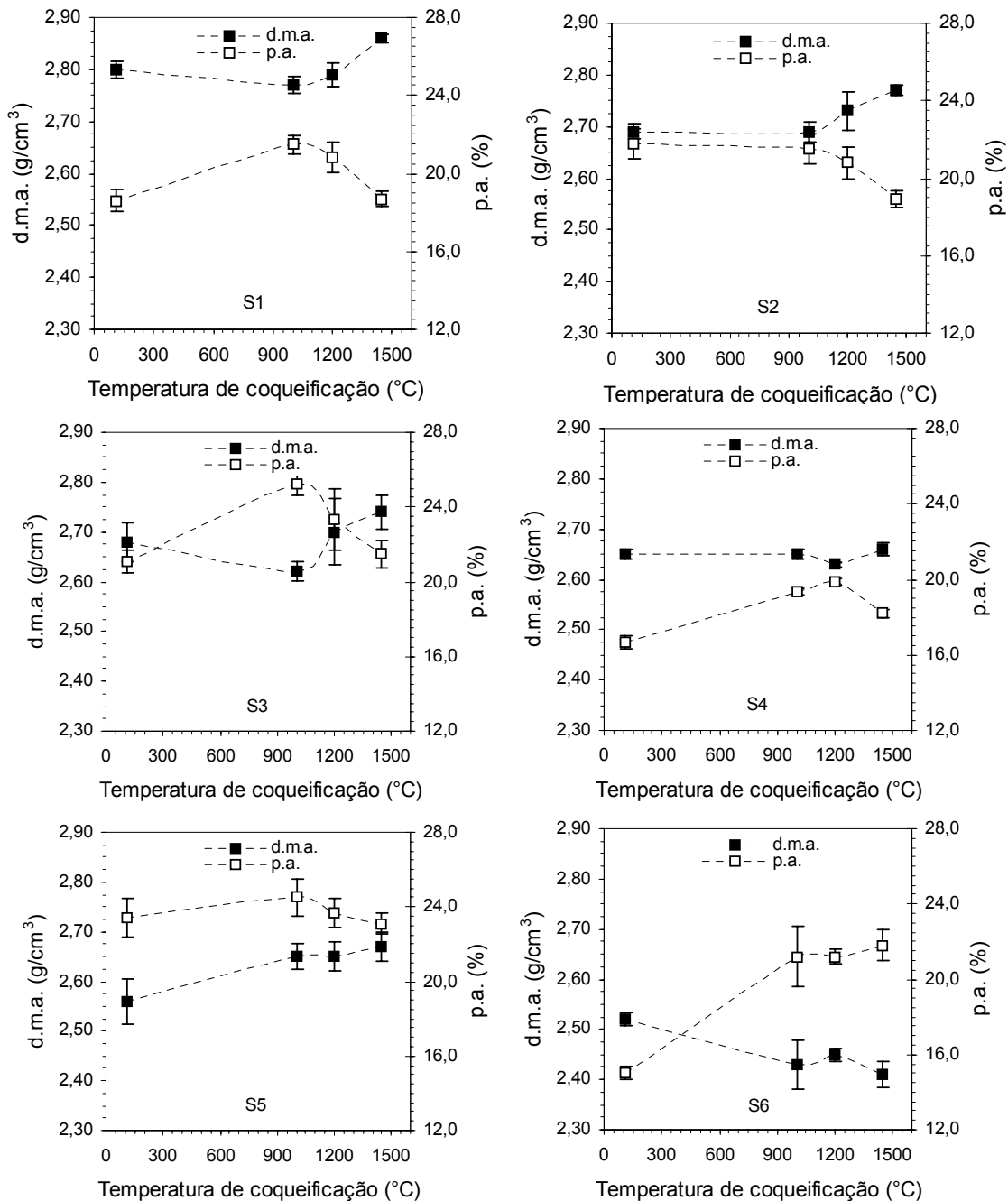
Para melhor entendimento do mecanismo de aderência do concreto no

substrato após corrosão por escória, foram retiradas amostras na região correspondente à junção do concreto com o tijolo para caracterização microestrutural.

### 3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1 Densidade de Massa Aparente e Porosidade Aparente

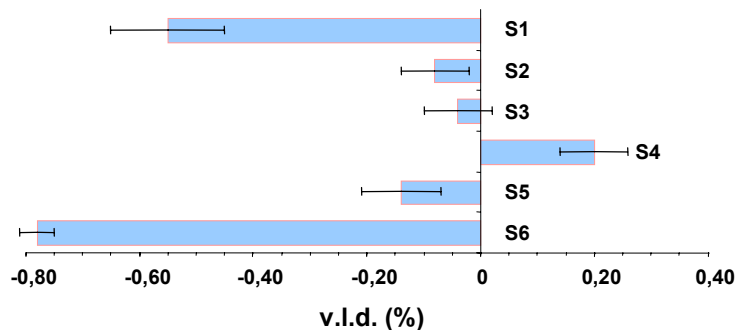
De uma forma geral, acima de 900°C, a porosidade e a densidade aparente de concreto com alto teor de alumina tendem a reduzir e aumentar, respectivamente, em virtude das ligações cerâmicas desenvolvidas (Figura 2), apesar deste comportamento não ter sido nitidamente observado nos concretos S4 e S6.



**Figura 2.** Densidade de massa aparente (d.m.a.) e porosidade aparente (p.a.) em função da temperatura de coqueificação ( $\bar{x} \pm \sigma_{n-1}$ ).

### 3.2 Variação Linear Dimensional

Os resultados do teste para medida da variação linear dimensional após coqueificação a 1450°C durante 10 horas (Figura 3) apontaram para pequenos valores de retração dos concretos S2, S3 e S5, e consideráveis valores para os S1 e S6. Ao contrário, o concreto S4 apresentou pequena expansão.

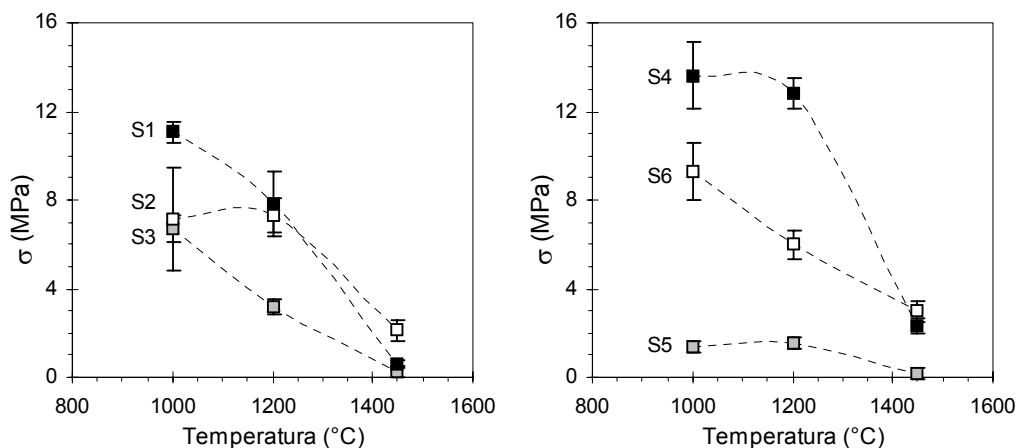


**Figura 3.** Variação linear dimensional (v.l.d.) após coqueificação dos corpos-de-prova a 1450°C durante 10 horas ( $\bar{x} \pm \sigma_{n-1}$ ).

Presume-se que o concreto que possui variação linear negativa expressiva possa exibir maior trincamento em escala industrial, após resfriamento do revestimento, provocado pela retração generalizada da superfície exposta a temperatura de aproximadamente 1450°C.

### 3.3 Resistência à flexão a quente



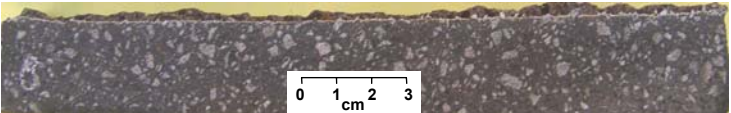



A Figura 4 mostra o comportamento da resistência à flexão em função da temperatura de corpos-de-prova coqueificados nas respectivas temperaturas. Presume-se que redução da resistência mecânica a altas temperaturas decorra, em parte, da presença de SiO<sub>2</sub>, especialmente microssilica, e CaO, contido no cimento de aluminato de cálcio, que reagem formando fases de baixa refratariedade, tais como anortita (CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>) e guelénita (2CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.SiO<sub>2</sub>)<sup>(4)</sup>. Além disso, nos concretos aplicados por *shotcrete*, a presença de acelerador de pega pode exercer influência negativa na resistência mecânica a quente destes materiais<sup>(2)</sup>.



**Figura 4.** Resistência à flexão ( $\sigma$ ) em função da temperatura de teste ( $\bar{x} \pm \sigma_{n-1}$ ).

### 3.4 Resistência ao ataque por escória

Os resultados dos testes para avaliar a resistência ao ataque por escória em forno rotativo (Figura 5), cuja atmosfera é predominantemente oxidante, apontaram para o superior desempenho dos concretos S1 e S3, os quais apresentaram índices de desgaste semelhantes entre si. Os concretos S4 e S6, por sua vez, apresentaram índices de desgaste semelhantes e relativamente elevados, provavelmente afetados negativamente pelo alto teor de  $\text{SiO}_2$  e pela considerável quantidade de  $\text{CaO}$ , proveniente do cimento de aluminato de cálcio, destes materiais.




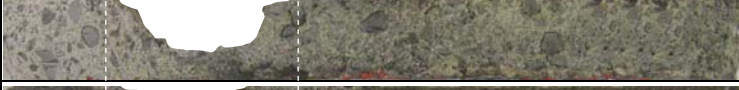

Nome	Seção longitudinal	Desgaste (%)
S1		$17 \pm 0,7$
S2		$20 \pm 2,5$
S3		$14 \pm 0,6$
S4		$29 \pm 2,0$
S5		$22 \pm 0,7$
S6		$31 \pm 3,1$

**Figura 5.** Índice de desgaste e fotografia das seções longitudinais dos corpos-de-prova dos concretos após teste de ataque por escória em forno rotativo.

Os resultados do teste efetuado em forno a indução indicaram que o desgaste dos corpos-de-prova na região em contato com gusa líquido não foi significativo, o que impediu quantificar o ataque nesta zona (figura 6). Em virtude de limitações com relação ao número de amostras no teste, somente foram avaliados os corpos-de-prova dos concretos S1, S2, S3 e S6, além de corpos-de-prova de tijolo de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$  para carro torpedo, empregado como referência.

Na zona corresponde à linha de escória, houve considerável corrosão. O concreto S6, que não possui SiC e contém alto teor de  $\text{SiO}_2 + \text{CaO}$ , apresentou maior desgaste. Os concretos S1, S2 e S3, que contêm alto teor de SiC + C (superior a 18,0%), apresentaram índices de desgaste semelhantes e relativamente próximos ao do tijolo de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$ . Embora o concreto S5 não tenha sido avaliado no teste em forno a indução, quando se considera a quantidade de SiC + C (superior a 24,7%) e o desgaste deste material no teste de corrosão em forno rotativo, que foi equivalente ao do concreto S2, presume-se que este concreto deva apresentar desempenho semelhante ao dos concretos S1, S2 e S3.


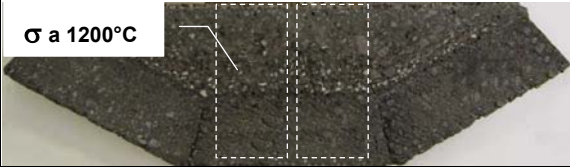
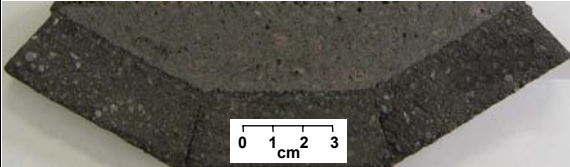
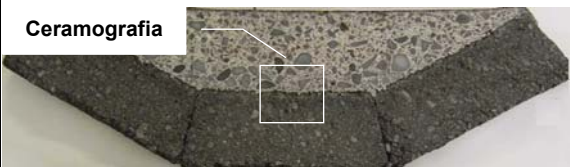
Além disto, para as condições estudadas, não se observou correlação entre o índice de desgaste e a porosidade aparente após coqueificação a 1450°C. Do mesmo modo, não houve indicativos de que a resistência à flexão a 1450°C tenha exercido influência significativa no índice de desgaste destes materiais.

Nome	Seção longitudinal		Desgaste (%)
	Escória	Gusa	
S1			10 ± 1,1
S2			13 ± 0,9
S3			12 ± 1,6
S6			27 ± 1,9
Tijolo de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiC-C			8 ± 0,9

**Figura 6.** Índice de desgaste e fotografia das seções longitudinais dos corpos-de-prova dos concretos após teste de ataque por escória em forno a indução.

### 3.5 Aderência a Quente do Concreto

A Figura 7 mostra a seção transversal dos corpos-de-prova após o teste de ataque por escória em forno rotativo, com ciclagem térmica (3 ciclos). São apresentados também os resultados de resistência à flexão ( $\sigma$ ) a 1200°C de amostras retiradas ao longo da espessura do concreto + tijolo, juntamente com os valores de  $\sigma$  a 1200°C dos concretos, conforme item 3.3. Em virtude de limitações com relação ao número de amostras no ensaio, foram avaliados somente os corpos-de-prova dos concretos S2, S3, S4 e S6.

Nome	Seção transversal	$\sigma$ a 1200°C (MPa)	
		Concreto + tijolo	Concreto
S2		3,0 ± 0,3	7,3 ± 0,8
S3		2,9 ± 0,9	3,2 ± 0,3
S4		3,5 ± 0,8	12,8 ± 0,7
S6		3,3 ± 0,2	6,0 ± 0,6

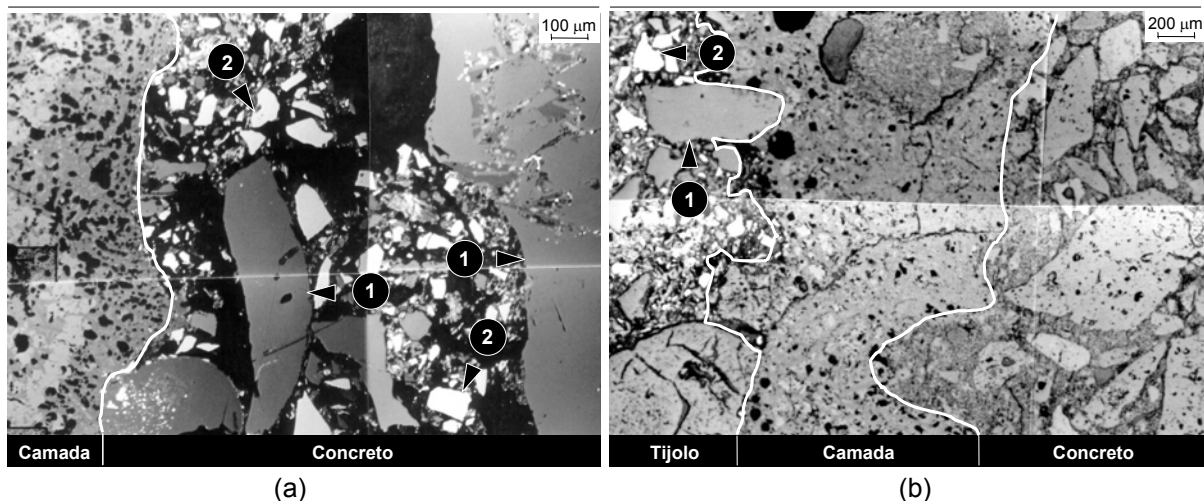
**Figura 7.** Resistência à flexão a 1200°C e fotografia das seções transversais dos corpos-de-prova após teste para avaliar a aderência dos concretos (3 ciclos térmicos: escória 1500°C  $\leftrightarrow$  fluxo de ar até 800°C).

O aspecto da seção transversal dos corpos-de-prova após o teste indicou, qualitativamente, a adesão do concreto sobre a superfície do tijolo de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$ , mesmo após 3 ciclos térmicos de aquecimento (escória 1500°C) e resfriamento (fluxo de ar até 800°C). Já os resultados de resistência à flexão a quente de corpos-de-prova extraídos destas amostras mostraram que, para as condições estudadas, a aderência a quente não apresentou variação significativa entre os diferentes concretos. Os concretos S2, S4 e S6, que possuem alta resistência à flexão a 1200°C (figura 4), apresentaram baixos valores de resistência mecânica neste teste. Além disto, a fratura no teste para avaliar a resistência à flexão a 1200°C ocorreu sempre na junção entre o concreto e tijolo. Conseqüentemente, infere-se que a aderência do concreto seja fortemente influenciada pelas características superficiais do substrato (tijolo + escória), tais como espessura e homogeneidade da camada formada na superfície do tijolo, composição química, molhabilidade e refratariedade desta camada.

Com relação às análises ceramográficas dos concretos S2, S3, S4 e S6, a Figura 8 mostra uma fotomicrografia típica de um campo envolvendo a camada de escória e o concreto S2 (figura 8a) e uma fotomicrografia típica de um campo que engloba o tijolo de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$ , o concreto e a camada de escória (figura 8b), a qual evidencia a intensa corrosão da matriz do tijolo. Conseqüentemente, parte dos agregados de alumina eletrofundida, que possuem superior resistência à corrosão, é arrancada pela escória líquida. Como resultado da pronunciada corrosão da matriz do tijolo, que inclui a oxidação do  $\text{SiC} + \text{C}$ , a área superficial do tijolo e sua molhabilidade aumentam. Acredita-se que esta seja uma das principais razões para aderência da camada do produto da dissolução do refratário e escória na superfície atacada do tijolo. Adicionalmente, para as condições estudadas, o aspecto



microestrutural destas amostras indicou que a camada de escória entre o tijolo e o concreto possui elevada porosidade e espessura de até 2 mm, representando um problema potencial.



**Figura 8.** Fotomicrografia de um campo envolvendo a camada de escória e o concreto S2 (a) e fotomicrografia de um campo envolvendo o tijolo de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$ , a camada de escória e o concreto S6 (b):  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (1) e SiC (2).

Em síntese, para as condições estudadas, a combinação dos resultados de resistência à flexão a  $1200^\circ\text{C}$  com a análise ceramográfica apontou para boa adesão do concreto na superfície atacada de tijolos de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$ , embora a interface, em virtude de suas características (alta porosidade e baixa refratariedade), seja o elo mais fraco do conjunto.

## 5 CONCLUSÕES

O emprego de máquina industrial para projeção de concretos demonstrou ser um importante recurso para preparação de corpos-de-prova e visou simular as variáveis de processo e as características finais dos concretos aplicados por projeção a úmido (*shotcrete*).

Embora os benefícios da projeção a úmido de concretos refratários sejam amplamente divulgados, o desenvolvimento de metodologias laboratoriais para prever o comportamento destes materiais em escala industrial ainda é incipiente e demanda um esforço adicional. Neste sentido, foi desenvolvida na Usiminas uma metodologia para simular a aderência a quente do concreto no substrato, que, em conjunto com outras técnicas empregadas, proporcionou uma adequada caracterização dos concretos.

Para as condições estudadas, os resultados de ensaios laboratoriais indicaram que não houve correlação entre o índice de desgaste e a porosidade aparente após coqueificação a  $1450^\circ\text{C}$ . Do mesmo modo, não houve indícios de que a resistência à flexão a  $1450^\circ\text{C}$  tenha exercido influência significativa no índice de desgaste por corrosão destes materiais. Com relação à variação linear dimensional após coqueificação a  $1450^\circ\text{C}$ , os concretos S1 e S6 apresentaram consideráveis valores de retração, o que pode requerer, para equipamento com operação intermitente, ajustes adicionais nas formulações destes concretos. Nos testes para avaliar a resistência ao ataque por escória, os concretos S1, S2, S3 e S5 apresentaram superior desempenho. Por sua vez, a aderência a quente do concreto, que também é crucial, foi influenciada pelas características superficiais do substrato e apresentou comportamento semelhante para os materiais estudados.

Na seleção dos concretos, foi considerado um compromisso entre as propriedades físicas e químicas. No entanto, o critério julgado de maior importância para o superior desempenho industrial destes materiais foi a resistência ao ataque por escória, juntamente com a resistência ao dano por choque térmico, que será apresentada e discutida em futuros trabalhos.

Em síntese, para as condições estudadas, a combinação dos resultados de testes laboratoriais forneceu indicativos de que os concretos S1, S2, S3 e S5 sejam aqueles com maior potencial para reparos em carros torpedo e canais de corrida.

## REFERÊNCIAS

- 1 ALLEN, W. G. Advanced equipment systems for refractory placement. In.: INTERNATIONAL TECHNICAL CONFERENCE ON REFRACTORIES, 2<sup>nd</sup>., 1997, New Orleans. **Proceeding...** New Orleans, 1997, v. 2, p. 523-530.
- 2 MARQUES, Y. A.; PILEGGI, R. G.; VALENZUELA, F. A. O.; BRAULIO, M. A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Setting additives influence on the thermomechanical properties of wet shotcrete refractory castable matrices. **American Ceramic Society Bulletin**, p. 9201-9206, 2005.
- 3 PILEGGI, R. G.; STUART, A. R.; INOCENTINNI, M. D. M.; PANDOLFELLI, V. C. Concretos de alto desempenho - Um novo conceito em refratários. **Cerâmica**, v. 48 (305), p. 17-21, 2002.
- 4 BANERJEE, S. **Monolithic refractories**, 1<sup>ed</sup>, Westerville, USA, The American Ceramic Society, 1998, 311 p.