

## DESENVOLVIMENTO DE TIJOLOS REFRAATÓRIOS PARA CARROS TORPEDO\*

Ricardo Israel do Couto<sup>1</sup>  
Braulo Silvano Hemétrio<sup>2</sup>  
Roselaine Goncalves Magalhães<sup>3</sup>  
Marco Antônio Quintela<sup>4</sup>

### Resumo

Desde a última década, a Usiminas e os fabricantes de refratários, têm concentrado esforços para prolongar a vida do revestimento refratário para carro torpedo. Em 2003, a vida média do revestimento correspondia ao transporte de cerca de 300.000 toneladas de gusa. Na ocasião, foram desenvolvidos vários estudos para determinar os mecanismos de desgaste dos refratários. A ideia era desenvolver materiais, métodos e práticas de reparos para prolongar a vida do revestimento. O progresso foi substancial, principalmente com o desenvolvimento de tijolos de alto desempenho. Em 2015, um dos carros torpedo encerrou a campanha com mais de 1.000.000 toneladas e disponibilidade de 95% para operação. Contudo, o ciclo virtuoso foi recentemente interrompido com o desgaste pronunciado dos tijolos que compõem o revestimento do teto. Os resultados de estudos mostraram que o desgaste anormal dessa região está associado primordialmente à oxidação do carbono. Nesse contexto, é apresentado o desenvolvimento de tijolos do sistema  $Al_2O_3-SiC-C$  de alto desempenho para carro torpedo. Os principais propósitos são preservar a segurança operacional, aumentar a produtividade e reduzir as necessidades de manutenção refratária.

**Palavras-chave:** Refratário; Carro torpedo; *Shotcrete*.

## DEVELOPMENT OF REFRACTORIES FOR TORPEDO LADLES

### Abstract

Since the last decade, Usiminas has concentrated efforts to extend the life of  $Al_2O_3-SiC-C$  bricks for torpedo ladles. In 2003, the refractory life was about 300,000 t of hot metal. At the time, many studies were developed to investigate the refractory wear mechanisms. The idea was to develop materials, and repair methods and practices to improve the life of the lining. Substantial progress has been observed, especially with the development of high performance bricks. In 2015, the lining campaign reached 1,000,000 t of hot metal and availability of 95%. However, abnormal wear of the roof bricks has been observed recently which was related with carbon oxidation. In this context, this paper presents the development of high performance bricks for the torpedo ladles. The main purposes are to preserve operational safety, increase productivity and reduce refractory maintenance.

**Keywords:** Refractory; Torpedo ladle; *Shotcrete*.

<sup>1</sup> Engenheiro Civil, Coordenador de Manutenção de Refratários, Usiminas, Ipatinga, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro de Materiais, Supervisor de Manutenção de Refratários, Usiminas, Ipatinga, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheira de Materiais, Técnica de Pesquisa, Usiminas, Ipatinga, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro Mecânico, M.Sc., MBA, Ipatinga, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

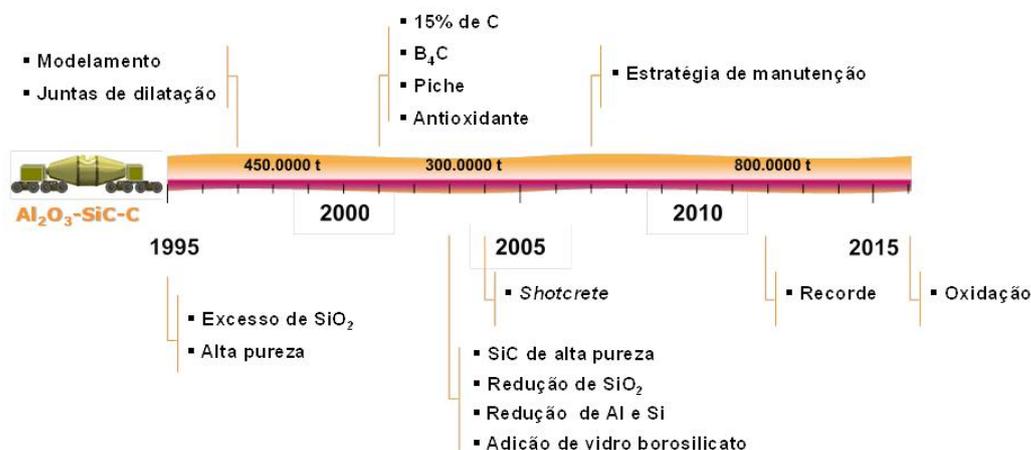
Na Usiminas - Ipatinga, assim como em outras grandes siderúrgicas, os carros torpedo são revestidos com tijolos de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$ . Desde o início da implantação destes tijolos, a campanha do revestimento experimentou substancial progresso. Em 2003, foi registrada considerável queda no desempenho do revestimento, com vida média correspondente ao transporte de 300.000 toneladas de gusa. O aumento no consumo específico de refratários foi atribuído à propagação de trincas e lascamento pronunciados dos tijolos. Na ocasião, foram desenvolvidos vários estudos para a determinação dos mecanismos de desgaste dos refratários. O propósito era desenvolver materiais, métodos e práticas de reparos para prolongar a vida do revestimento.

Através dos estudos, foram verificadas mudanças nas variáveis de processos e práticas metalúrgicas que impuseram solicitações adversas aos refratários para carro torpedo. O processo de dessulfuração de gusa foi parcialmente transferido dos carros torpedo para as painéis de gusa com ganhos operacionais significativos. Além disso, a temperatura média de vazamento do gusa nos altos-fornos da Usiminas aumentou significativamente. A vantagem imediata foi a redução da quantidade de cascão sobre o revestimento para carro torpedo e, portanto, aumento na capacidade para transporte de gusa. Por outro lado, o efeito negativo foi a eliminação da camada protetora de escória formada sobre a superfície do refratário, que alterou as condições térmicas do revestimento.

Nesse período, as estratégias para anular os impactos negativos da dinâmica das práticas e processos metalúrgicos compreenderam:

- Desenvolvimento de tijolos de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$  de alta resistência à corrosão e ao dano por choque térmico;
- Caracterização e seleção de concretos de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$  para recobrimento dos tijolos pela técnica de *shotcrete*;
- Adequação do plano de manutenção preventiva.

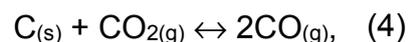
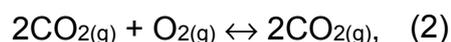
Os resultados desses esforços proporcionaram progresso substancial até 2015. Na ocasião, um dos carros torpedo encerrou campanha com mais de 1.000.000 toneladas de gusa transportado e disponibilidade de 95% para operação. Na Figura 1 é apresentada uma cronologia com a evolução da vida do revestimento.



**Figura 1.** Representação esquemática da evolução da vida dos refratários para carro torpedo e medidas adotadas para prolongar a campanha do revestimento.

Entretanto, o ciclo virtuoso foi interrompido em 2016. Modificações nas variáveis dos processos provocaram desgaste pronunciado dos tijolos do teto. Os resultados dos estudos mostraram que o desgaste anormal dessa região está associado à oxidação pronunciada do carbono do tijolo.

Os principais componentes que contribuem para elevar a vida dos tijolos para carros torpedo são a grafita, o carbetto de silício e o ligante. Segundo a literatura [1-3], o carbono na estrutura de lâminas hexagonais empilhadas (grafita) apresenta algumas propriedades importantes, tais como: baixo coeficiente de expansão térmica, elevada condutividade térmica, estrutura cristalina flexível, além de boas propriedades mecânicas e boa compressibilidade na direção perpendicular aos planos grafenos, permitindo às grafitas absorver a expansão da vizinhança. Outra propriedade importante é a reduzida energia superficial, que o torna não molhável por uma grande variedade de líquidos. A baixa molhabilidade da grafita confere ao refratário maior resistência ao ataque químico. Dessa forma, os refratários contendo carbono possuem alta resistência à corrosão por escória e elevada resistência ao dano por choque térmico. Porém, a grafita é susceptível à oxidação em temperaturas acima de 600°C (Equações de 1 a 4) [1,4].



A oxidação do carbono leva à perda de resistência mecânica em decorrência do aumento da porosidade e quebra da ligação proporcionada pela resina fenólica. Além disso, a descarbonetação aumenta a molhabilidade do refratário, que, juntamente com a porosidade elevada, acelera o desgaste por corrosão e erosão [5]. Assim, a Usiminas redirecionou esforços para entender os mecanismos de desgaste dessa região, desenvolvendo estudos para avaliar e selecionar tijolos com propriedades adequadas às variáveis operacionais e práticas metalúrgicas vigentes com o objetivo de reestabelecer o alto desempenho do revestimento para carro torpedo.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Embora as outras estratégias, tais como: (i) adequação do plano de manutenção refratária e (ii) adoção de prática para recobrimento dos tijolos com concreto (*shotcrete*), tenham concorrido também para aumentar a vida do revestimento, a proposta desse artigo é apresentar e discutir as metodologias de ensaios e análises para desenvolver e caracterizar seis tijolos do sistema Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-C, denominados de A a F, para carro torpedo (Tabela 1). São apresentados também os resultados industriais relativos às modificações efetuadas ao longo dos anos recentes.

Tabela 1. Tijolos avaliados

Tijolos	Composição	Alterações propostas	Característica objetivada
A	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiC-C	Tijolo convencional	-
B	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiC-C	Tijolo convencional	-
C	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiC-C	Tijolo convencional	-
D	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiC-C	Tijolo desenvolvido com adição de fase extra visando maior tenacidade	Maior resistência ao dano por choque térmico
E	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiC-C	Tijolo proposto com redução do teor de carbono e incorporação de espinélio (fornecedor 1)	Maior resistência à oxidação e ataque químico
F	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiC-C	Tijolo proposto com redução do teor de carbono e incorporação de espinélio (fornecedor 2)	Maior resistência à oxidação e ataque químico

Os corpos de prova para a determinação das propriedades físicas e químicas foram retirados dos tijolos por meio de ferramenta diamantada refrigerada a água. As amostras foram secas em estufa a 110°C durante 24 h e, posteriormente, coqueificadas conforme o teste ou análise.

## 2.1 Choque Térmico

A resistência à propagação de trincas foi avaliada em forno a indução, em corpos de prova prismáticos (40 mm x 40 mm x 160 mm), previamente coqueificados a 1000°C durante 5 h. O experimento consistiu na imersão de cerca de 50% do comprimento do corpo de prova em gusa líquido a 1550°C durante 60 s. Em seguida, o corpo de prova foi resfriado subitamente em água durante 30 s e, posteriormente, a temperatura ambiente. A resistência ao dano por choque térmico foi determinada por meio da quantidade e tamanho de trincas formadas na seção longitudinal dos corpos de prova.

## 2.2 Oxidação

O ensaio para avaliar a resistência à oxidação foi efetuado na temperatura de 1400°C por 30 min, em amostras cilíndricas (25 mm de diâmetro x 40 mm de altura), previamente coqueificadas a 1400°C durante 5 h. As amostras após o ensaio foram moídas e destinadas à análise química de carbono total. O índice de oxidação foi determinado pela relação entre o carbono final e o inicial [6].

## 2.3 Ataque por Escória

A resistência ao ataque por escória foi avaliada por meio de testes efetuados em forno rotativo, em corpos de prova de seção trapezoidal nas dimensões de (88 mm ; 68 mm) x 30 mm x 190 mm, cujo arranjo produz uma figura de seção poligonal. Os testes foram realizados entre 1500°C e 1550°C por 8 h, com escórias típicas de alto-forno.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Choque Térmico

Na Figura 2 é apresentado o aspecto de tijolos de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$  após 147.000 toneladas de gusa transportado evidenciando trincas e o lascamento generalizados de um revestimento avaliado em 2003.

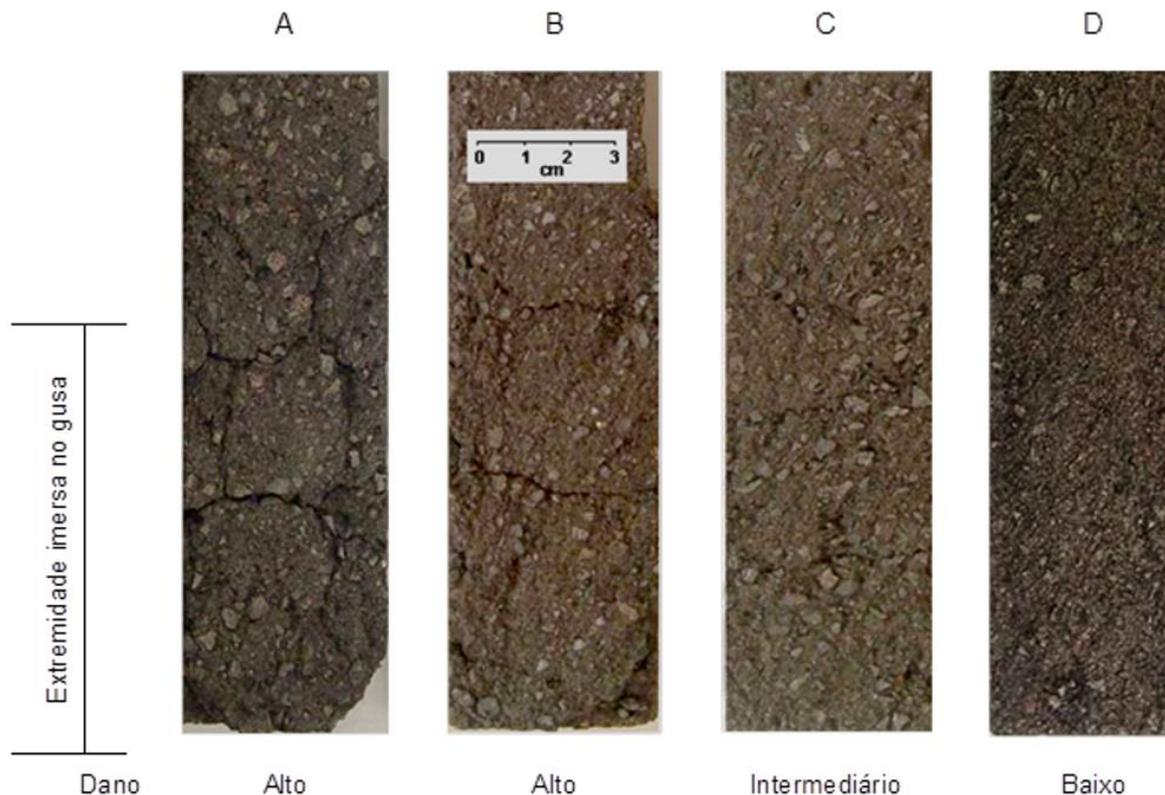


**Figura 2.** Fotografia da superfície do revestimento refratário para carro torpeda após 147.000 toneladas de gusa transportado.

Na Figura 3 é apresentado o aspecto da seção longitudinal dos corpos de prova dos tijolos desenvolvidos na época (A a D) após o ensaio para avaliar a resistência ao dano por choque térmico. Os tijolos A e B apresentaram elevada densidade de trincas. O tijolo C exibiu dano intermediário. Já o tijolo D, desenvolvido em conjunto com a Usiminas, que contém um quarto componente, caracterizou-se por elevada resistência à propagação de trincas [7].

Considerando o desgaste provocado primordialmente pela propagação de trincas e lascamento generalizado dos tijolos, os carros torpeda foram revestidos com o tijolo D a partir de 2005.

Nos anos seguintes, os resultados industriais indicaram progresso substancial, com o controle do desgaste do revestimento por propagação de trincas. Imediatamente, os reflexos positivos foram percebidos no aumento significativo da vida do revestimento e segurança operacional.



**Figura 3.** Fotografia da seção longitudinal dos corpos de prova dos tijolos de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$  após o teste de choque térmico em forno a indução (5 ciclos térmicos: gusa  $1550^\circ\text{C}$  x 60s  $\leftrightarrow$  água  $30^\circ\text{C}$  x 30s).

Com relação ao tijolo D, a estratégia foi incorporar uma fase extra e ajustar as demais para aumentar energia total de fratura ( $\gamma_{\text{wof}}$ ) e reduzir a energia de deformação elástica armazenada no refratário no instante da fratura. A energia de deformação elástica é governada pela razão  $\sigma^2/E$ , em que:  $\sigma$  é tensão de fratura e  $E$  é o módulo de elasticidade.

Em virtude da complexidade na determinação de  $\gamma_{\text{wof}}$  (Equação 5) e de  $E$  em altas temperaturas para refratários contendo carbono, o desenvolvimento foi conduzido no sentido de avaliar os efeitos da fase extra na resistência à propagação de trincas [8-10].

$$\gamma_{(\text{wof})} = \gamma_0 + \gamma_p + \gamma_R + \gamma_{\text{IR}} \quad (5)$$

Em que:  $\gamma_0$  é a energia de superfície para quebrar as ligações químicas,  $\gamma_p$  a energia dissipada pela microdeformação plástica na ponta da trinca,  $\gamma_R$  a energia média resultante da interação entre a trinca e a microestrutura e  $\gamma_{\text{ir}}$  fornece uma ideia dos processos de deformação irreversível que dissipam energia, por exemplo, *creep* promovido pelo fluxo viscoso no volume à frente da ponta da trinca [8-12].

A fase extra adicionada ao tijolo de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-C}$  aumentou a resistência à propagação de trincas. Os mecanismos adicionais de tenacificação resultaram essencialmente do aumento do raio de curvatura da ponta da trinca e alongamento de *bridging* no rastro da trinca[1], contemplados nos termos  $\gamma_p$  e  $\gamma_R$ , respectivamente.

Simultaneamente, o fluxo viscoso no volume à frente da ponta da trinca também dissipa energia, contribuindo para o termo  $\gamma_r$  [8-10].

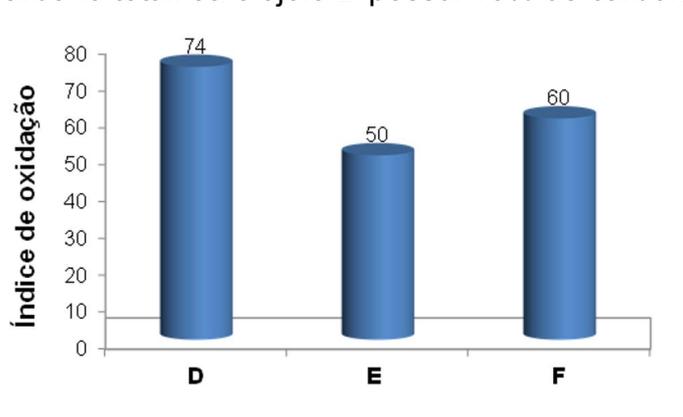
De forma geral, a redução da quantidade de antioxidantes (Al e Si) proporciona microestrutura menos rígida, com vantagens na atenuação da força motriz para a propagação de trincas. Por outro lado, a resistência à oxidação é normalmente afetada negativamente. A adequação da composição química, especialmente a quantidade e tipos de antioxidantes, depende das variáveis de processos e dos mecanismos de desgaste preponderantes.

### 3.2 Oxidação

A partir de 2015, alterações nas variáveis de processos e práticas metalúrgicas associadas à produção de gusa impuseram desafios extras. O índice de dessulfuração de gusa em carro torpedo reduziu e a temperatura do gusa aumentou consideravelmente. Assim, o desempenho do revestimento foi significativamente afetado pela oxidação pronunciada do carbono dos tijolos do teto. Conseqüentemente, o consumo específico de refratário, que se comportava num patamar confortável, passou a despertar mais interesse.

A oxidação do carbono dos tijolos do teto é o principal mecanismo de desgaste que concorre atualmente para reduzir a vida do revestimento. Por essa razão, os esforços foram redirecionados para desenvolver e caracterizar tijolos de alta resistência à oxidação. Foram propostos dois tijolos, denominados E e F, formulados para desempenhar alta resistência à oxidação, os quais foram comparados com o tijolo D de uso normal há mais dez anos.

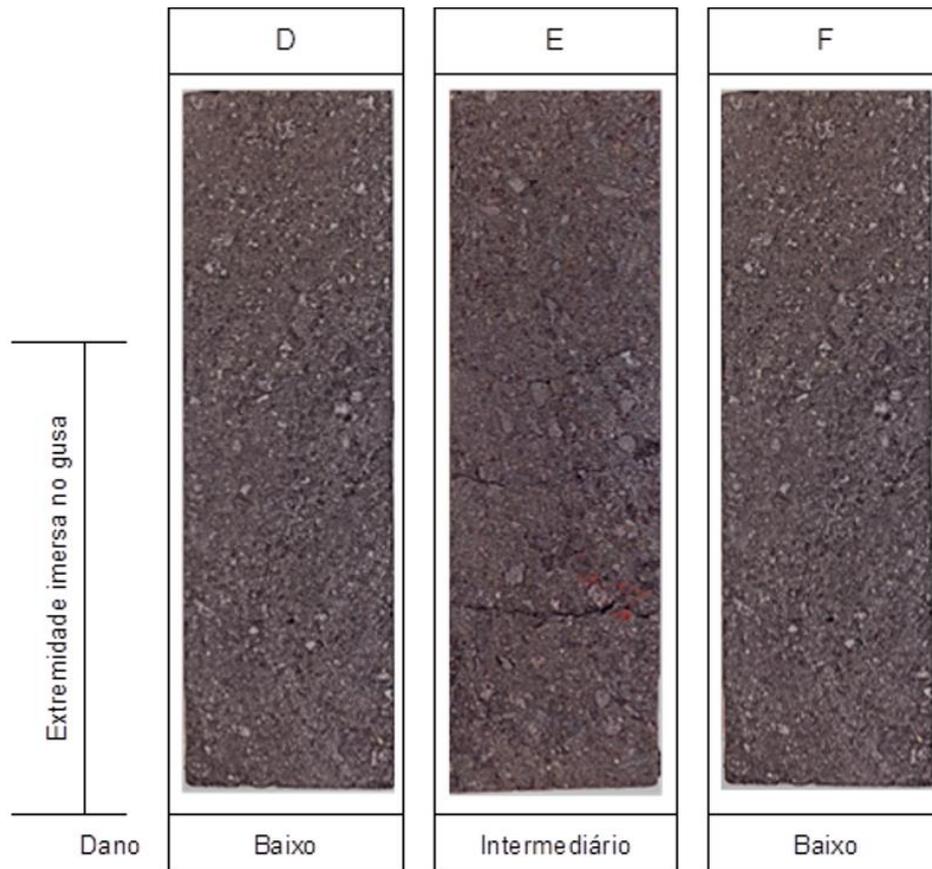
Os resultados de ensaios para a determinação da resistência à oxidação a 1400°C mostraram que o tijolo D exibiu superior índice de oxidação, acompanhado do tijolo F. O tijolo E apresentou menor índice de oxidação (Figura 4). Os tijolos E e F contêm cerca de 10% de carbono total. Já o tijolo D possui 16% de carbono total.



**Figura 4.** Índice de oxidação dos tijolos D, E e F após o ensaio a 1400°C por 30 min.

Em princípio, o tijolo ideal para o teto de carro torpedo deve apresentar alta resistência à oxidação, sem comprometer, por outro lado, a resistência ao dano por choque térmico. Portanto, foram realizados ensaios adicionais para determinar a resistência à propagação de trincas dos tijolos E e F. O tijolo D, de uso normal, foi utilizado como referência (Figura 5).

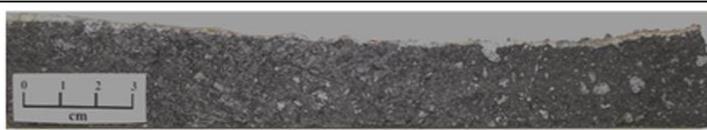
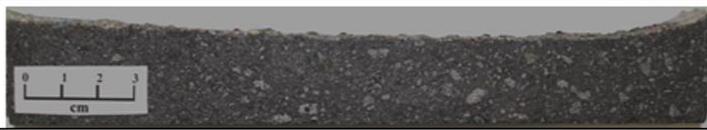
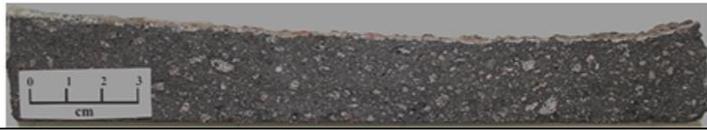
De uma forma geral, os tijolos D e F exibiram maior resistência ao dano por choque térmico. Já o tijolo E, que apresentou superior resistência à oxidação, exibiu maior deterioração estrutural.



**Figura 5.** Fotografia da seção longitudinal dos corpos de prova dos tijolos D, E e F após o teste de choque térmico (5 ciclos térmicos: gusa 1550°C x 60s ↔ água 30°C x 30 s).

### 3.3 Ataque por Escória

Para auxiliar na seleção dos tijolos, foi avaliada também a resistência ao ataque por escória em forno rotativo (Figura 6). Os resultados de corrosão mostraram que não houve diferença significativa entre os tijolos.

Tijolo	Fotografia da seção longitudinal	Desgaste (%)
D		13 ± 2
E		11 ± 1
F		12 ± 2

**Figura 6.** Fotografia da seção longitudinal dos corpos de prova dos tijolos D, E e F após o teste de ataque por escória realizado entre 1500°C e 1550°C por 8 h.

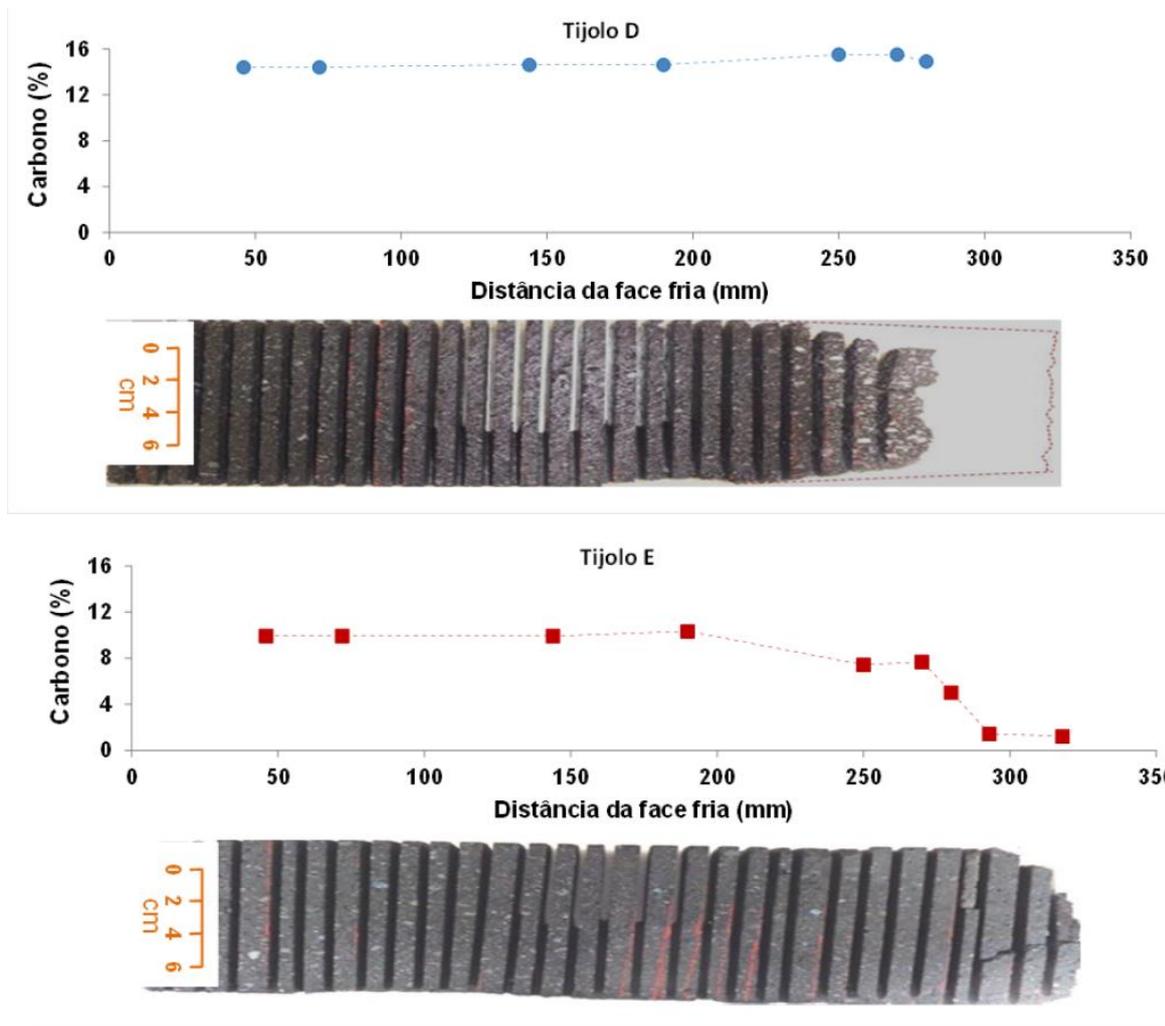
### 3.4 Experiência Industrial

Considerando que o desgaste para teto seja primordialmente afetado pela oxidação do carbono, o tijolo E, que exibiu alta resistência à oxidação e à corrosão por escória, foi selecionado para experiência industrial. O teto de um carro torpedo foi revestido, simetricamente na direção longitudinal, com o tijolo D, de uso normal, e com o tijolo E. Assim, os tijolos foram expostos a condições industriais semelhantes durante o transporte de 35.000 toneladas de gusa.

Na Figura 7 é apresentado o aspecto de amostras dos tijolos D e E relacionando o teor de carbono ao longo da espessura após a referida experiência. A espessura inicial do revestimento para teto é 343 mm. Os comprimentos remanescentes dos tijolos D e E foram equivalentes a 284 e 325 mm, respectivamente, ou seja, o desgaste do tijolo E (18 mm) foi significativamente inferior ao do tijolo D (59 mm). Aparentemente, não foram observadas trincas e infiltração de gusa ou escória em ambos os tijolos. As quantidades de carbono residual ao longo do comprimento dos tijolos sugeriram efeitos mais severos da oxidação para o tijolo E. Porém, o menor comprimento e elevada quantidade de carbono na face quente do tijolo D indicaram maior taxa de desgaste, que, provavelmente, foi favorecida pela oxidação do carbono.

As camadas oxidadas são frágeis e, portanto, facilmente removidas pela movimentação do gusa e escória líquidos. Essa análise concorda com o alto índice de oxidação do tijolo D nos ensaios laboratoriais. Além disso, a resistência à propagação de trincas do tijolo D é superior a do tijolo E, ou seja, o desgaste pronunciado do tijolo D não foi causado por lascamento. Dessa forma, a combinação dos resultados sugeriu que o desgaste mais pronunciado do tijolo D tenha sido provocado essencialmente pela oxidação pronunciada do carbono da face quente.

Os esforços envolvendo a Usiminas e os fabricantes de refratários trouxeram progresso substancial ao longo dos anos. Atualmente, os resultados industriais com o tijolo E são animadores e reforçam a importância do desenvolvimento contínuo em refratários, para fazer frente à dinâmica das práticas metalúrgicas e variáveis de processos.



**Figura 7.** Quantidade carbono total ao longo dos tijolos D e E retirados da região do teto de um carro torpedo após o transporte de 35.000 t de gusa.

#### 4 CONCLUSÃO

Os esforços trouxeram progresso substancial em termos de tijolos para revestimento de carro torpedo ao longo dos últimos anos. Foi desenvolvida uma geração de tijolos contendo um quarto componente, que combina alta tenacidade à fratura e boa resistência à corrosão. Os reflexos positivos foram imediatamente percebidos ao longo dos anos com o aumento significativo da vida do revestimento. A quantidade de gusa transportado nas campanhas saltou de 300.000 toneladas para mais de 1.000.000 de toneladas.

Os resultados industriais com os tijolos de alta resistência à oxidação têm sido animadores. O tijolo desenvolvido apresentou um desgaste cerca de três vezes menor que o tijolo de uso normal (18 mm contra 59 mm).

De uma forma geral, os resultados mostraram que a contínua investigação das variáveis de processos e práticas metalúrgicas, juntamente com análise das propriedades dos refratários, é crucial para determinar, com clareza e agilidade, as principais causas de desgaste prematuro de refratários para carro torpedo. Além disso, o desenvolvimento conjunto de refratários de alto desempenho, com propriedades adequadas para suportar as solicitações vigentes na Usiminas, é essencial para manter a produtividade e a segurança operacional.

## REFERÊNCIAS

- 1 EWAIS, E. M. M. Carbon based refractories. Journal of the Ceramic Society of Japan, v.112, n.10, p.517-532, 2004.
- 2 BITENCOURT, C.; PANDOLFELLI, V. Refratários contendo carbono: propriedades, características e variáveis em sua composição. Cerâmica, São Carlos, n. 59, p. 84-114, 2013.
- 3 MOCHIDA, I. Roles of carbons in composite refractories for better properties. Taikabutsu Overseas, v.8, n.4, p.36-47.
- 4 FILHO, G.; QUINTELA, M. Refratários para carros torpedo. Curso refractarios en In Industria Siderúrgica. Embú, SP: ALAFAR. 1994. p. 602-624.
- 5 LUZ, P.; PANDOLFELLI, V. Artigo revisão: atuação dos antioxidantes em refratários contendo carbono. Cerâmica, São Carlos, n. 53, p. 334-344, 2007.
- 6 QUINTELA, M. A.; PESSOA, C. A.; RODRIGUES, J. A.; PANDOLFELLI, V. C. A novel methodology for evaluating the oxidation resistance of carbon-containing refractories. Refractories Applications and News, Rolla, v. 7 n. 1, p. 16-19, 2002.
- 7 SHIMADA, K.; DOI, A.; KONO, K. Development of refractories for torpedo ladles with hot metal pretreatment. In.: PROCEEDING OF 2ND INTERNATIONAL TECHNICAL CONFERENCE ON REFRACTORIES, 1987, BIENNIAL, Tokyo, Japan, p. 266-280.
- 8 SAKAI, M. Fracture mechanics of refractories materials. Taikabutsu Overseas, v. 8, n. 2, p. 4-12, 1988.
- 9 BRADT, R. C. Fracture measurements of refractories: past, present, and future. Ceramic Bulletin, v. 67, n. 7, p. 1176-1178, 1988.
- 10 RODRIGUES, J. A.; SANTOS, S. F.; PANDOLFELLI, V. C. Brittle-ductile transition of an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> refractory material. In.: 4th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCES IN REFRACTORIES FOR THE METALLURGICAL INDUSTRIES, 8, 2004, Hamilton, Ontario. Proceedings of Canada: Canadian Metallurgical and Materials, 2004, p. 617-629.
- 11 HASSELMAN, D. P. H. Unified theory of thermal shock, fracture initiation and crack propagation in brittle ceramics. Journal America Ceramic Society, v. 52, n. 11, p. 600-604, 1969.
- 12 HOMENY, J.; BRADT, R. C. Thermal shock of refractories. Published by Plenum Publishing Company, New York, 1980. Edited by Hasselman, D. P. H.; Heller, R. A, p. 1-21, 1980.