

## REVESTIMENTO DE TRABALHO MONOLÍTICO E CARBON FREE EM PANEAS DE AÇO DA TERNIUM BRASIL – PIONERISMO NO BRASIL E VANTAGENS \*

*Francisco Pereira Netto<sup>1</sup>  
Bruno Nery Stoco<sup>2</sup>  
Gilvan Nascimento de Souza<sup>3</sup>  
Haysler Apolinário Amoroso Lima<sup>4</sup>  
Vladnilson Peter de Souza Ramos<sup>5</sup>  
Douglas Fernando Galesi<sup>6</sup>*

### Resumo

Em um mercado dominado por tijolos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-C, o revestimento de trabalho de panela de aço monolítico e *CarbonFree* se apresenta como uma tecnologia disruptiva para um novo patamar de qualidade do aço e eficiência energética. O presente estudo relata a motivação para a implementação do primeiro fundo de panela de aço com revestimento monolítico concretado *in situ* no Brasil, e apresenta uma análise preliminar dos resultados e vantagens observadas. Uma panela da Ternium Brasil foi revestida com refratários de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO, e colocada em operação sem nenhuma necessidade de ajuste na operação da aciaria. A partir dos dados de processo e das medições a laser, calculou-se o desgaste do revestimento, bem como verificou-se a garantia de qualidade nos aços IF (interstitial free) e a maior preservação na temperatura do aço durante o refino secundário.

**Palavras-chave:** Revestimento monolítico; Revestimento carbon free; Panela de aço.

### MONOLITHIC AND CARBON FREE WORKING LINING FOR STEEL LADLES AT TERNIUM BRASIL – FIRST APPLICATION IN BRAZIL AND ADVANTAGES

### Abstract

In a market dominated by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-C bricks, a monolithic carbon free working lining becomes a disruptive technology for a new level in terms of steel quality and energetic efficiency. This study explains the motivation and implementation of the first Brazilian steel ladle lining monolithic bottom casted in place, and shows an analysis of the results and advantages observed. A Ternium Brasil steel ladle was assembled with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO refractories, and started to operate without any need to adjust the steel making operations. From the process data and the laser measurements, the wear of the refractory was calculated, the quality of interstitial free steel grades guaranteed and a greater preservation of steel temperature during secondary refinement confirmed.

**Keywords:** Monolithic working lining; Carbon Free lining; Steel ladle.

<sup>1</sup> Engenheiro Mecânico, Analista de Aplicação, Saint-Gobain, Vinhedo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, Consultor de refratários, Ternium Brasil, Itaguaí, RJ, Brasil.

<sup>3</sup> Arquiteto, Consultor de aciaria, Ternium Brasil, Itaguaí, RJ, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro Metalurgista, Coordenador de Engenharia de Aplicação, Saint-Gobain, Vinhedo, SP, Brasil.

<sup>5</sup> Engenheiro Químico, Gerente Técnico, Saint-Gobain, Vinhedo, SP, Brasil.

<sup>6</sup> Engenheiro de Materiais, Gerente de Aplicação e Desenvolvimento, Saint-Gobain, Vinhedo, SP, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A história das indústrias siderúrgica e de refratários muitas vezes se confunde devido à intensa relação de interdependência entre elas. Os avanços de tecnologia nestes ramos são provenientes de parcerias de sucesso que trazem benefícios para ambas as partes. No cenário atual isto não é diferente: enquanto a siderurgia é pressionada por parâmetros de qualidade final do aço cada vez mais estreitos e processos de produção cada vez mais ecológicos e otimizados, as indústrias de refratários vem se reinventando e buscando desenvolver soluções de maior valor agregado que possam trazer benefícios reais para seus clientes.

### 1.1 Revestimentos de trabalho monolíticos

Apesar da estreita relação de intercâmbio tecnológico entre o parque siderúrgico brasileiro e o japonês, no contexto de refratários de panela de aço há uma grande diferença entre os tipos mais empregados: enquanto no Brasil predominam os moldados, do outro lado do mundo já são utilizados os monolíticos há 40 anos. A principal motivação dos japoneses para esta transição é a redução de mão de obra necessária para a aplicação dos materiais não moldados, uma vez que esta é cara e escassa no país. Além disso, a possibilidade de recompor o revestimento desgastado aproveitando o remanescente (como já é realizado no Brasil em canais de corrida de altos fornos, por exemplo) leva a menores consumos de material. Por fim, os materiais monolíticos permitem um menor *lead time* de entrega e apresentam menores índices de sobra após a aplicação, o que leva a reduções de estoque e maior facilidade de operação da cadeia de suprimentos, tanto para o cliente quanto para o fornecedor.

O principal fator que impede a difusão desta tecnologia é o alto investimento inicial necessário em misturadores, moldes e eficiente controle de secagem. Sendo assim, a Saint-Gobain e a Ternium Brasil optaram por iniciar o desenvolvimento a partir do revestimento monolítico no fundo da panela, onde não são necessários moldes.

### 1.2 Revestimentos de trabalho *CarbonFree*

Abundante na superfície terrestre e extremamente versátil na formação de diversos compostos, o carbono é um elemento químico amplamente empregado na indústria de refratários por conferir a eles características interessantes durante a operação, como resistência ao choque térmico e diminuição da molhabilidade pelo aço e pela escória. No entanto, a aplicação deste elemento leva a consequências às vezes indesejadas, como o risco de contaminação do aço; aumento nas emissões de CO e CO<sub>2</sub>; e aumento da condutividade térmica. Neste contexto, há uma busca contínua dos refrataristas em desenvolver materiais alternativos que possuam as mesmas qualidades dos materiais com carbono, porém sem a presença deste.

#### 1.2.1 O problema do Pick-up.

Conforme citado por Gotoh [1] e Ramos [6], há uma grande tendência na indústria siderúrgica pelo aumento da produção dos chamados aços IF (interstitial free) ou ULC (ultra low carbon), com conteúdo de carbono bastante reduzido. Estes aços possuem propriedades excelentes de ductilidade e plasticidade, e são

especialmente desejáveis para aplicação na indústria automobilística, pois conferem maior segurança aos passageiros em caso de acidentes. Isso os torna aços de alto valor agregado e difícil fabricação, sendo necessário um refino secundário bem controlado.

Por esta característica marcante dos aços IF, qualquer contaminação de carbono pós-refino neste produto leva ao *downgrade* das placas fabricadas, ou seja, ele não atende mais às especificações desejadas e passa a ser um aço comum, de menor valor de mercado. Esta foi a principal motivação dos refrataristas ao desenvolver uma solução para revestimentos livres de carbono: evitar a possibilidade de contaminação do aço após refino com o carbono dos refratários, algo que acontece especialmente ao final de cada corrida conforme descrito por Lima [7].

### 1.2.2 O problema das emissões de gases estufa.

Não é segredo para ninguém a crescente e importante preocupação da indústria com a diminuição na emissão de gases estufa, seja pela qualidade do ar nas cidades, seja devido ao aquecimento global. No caso da combustão incompleta, tem-se ainda a questão da emissão de monóxido de carbono, gás extremamente tóxico que pode levar à morte. Conforme ilustrado por Maeda [3], também em relação à temática ecológica os refratários *Carbonfree* apresentam vantagem em relação a seus substitutos com carbono: um revestimento tradicional de panela de aço de 50 toneladas contendo 10% de carbono poderia levar à emissão de até 18 toneladas de CO<sub>2</sub> por campanha!

### 1.2.3 O problema da alta condutividade térmica.

Tanto por uma questão ambiental quanto por uma questão econômica, também é grande o interesse da indústria moderna em tornar-se mais eficiente energeticamente, ou seja, reduzir o desperdício de energia decorrente de qualquer processo de produção. Devido às altas temperaturas e altas massas de material aquecido durante o processo siderúrgico, também são altas as quantidades de calor cedidas para o ambiente. Estas geralmente são repostas pela queima de combustíveis de origem fóssil, fontes de energia não renováveis.

Com o intuito de minimizar as perdas térmicas durante o processo de refino secundário, uma das soluções de mais fácil implementação é a instalação uma camada de material isolante entre a carcaça de aço da panela e o revestimento de segurança. Porém, a aplicação desta configuração causa o aumento da temperatura média do refratário de trabalho, fazendo com que este apresente um desgaste mais acentuado conforme descrito por Tomiya [4]. A maior motivação para emprego desta tecnologia é a redução da temperatura de carcaça e conseqüente aumento da vida útil deste equipamento, função que o isolante desempenha eficientemente.

Uma solução alternativa passa a ser a redução na condutividade térmica do próprio revestimento de trabalho, o que não só diminui a temperatura de carcaça (Tomiya [2]), mas também reduz a temperatura média de todo o revestimento, roubando menos calor do aço líquido contido na panela conforme publicado por Gotoh [1] e Lima [7]. Para isto, é necessário eliminar o carbono contido na composição do refratário, uma vez que a presença deste elemento ocasiona um aumento significativo na condutividade térmica do material.

#### 1.2.4 O problema da resistência à corrosão.

Após o apresentado nos itens 1.2.1 a 1.2.3 deste artigo, fica claro que a viabilidade de revestimentos refratários sem carbono pode ser interessante para a siderurgia. O principal entrave para isto é a baixa resistência à corrosão dos materiais que existiam até o momento, como os tijolos de alta alumina por exemplo. Esta característica fazia com que a vida destes refratários fosse muito baixa, tornando-os inviáveis para a aplicação em processos atuais que possuem solicitações cada vez maiores. A reação de espinelização *in situ* foi descoberta como sendo um fenômeno interessante para combater este problema, proporcionando significativa resistência à corrosão e penetração de aço e escória para os refratários *Carbonfree*. Como apresentado por Gotoh[1] e Doi [5], o domínio desta técnica a nível micro estrutural permite a produção de materiais com alta densidade, os quais atingem níveis de resistência iguais ou superiores a seus substitutos com carbono.

## 2 DESENVOLVIMENTO

Devido à sua parceria de tecnologia com a Shinagawa Refractories, a Saint-Gobain foi pioneira na introdução dos tijolos para revestimento de trabalho de placas de aço *Carbonfree* no Brasil, com a produção e aplicação da chamada linha ALTIMA®. Ramos [6] relata os primeiros resultados e dificuldades desta implementação, bem como as soluções desenvolvidas e melhorias obtidas. Nesta análise, mostra que a região do fundo da placa é aquela que apresentava menor potencial para aumento de vida do revestimento.

Posteriormente a isto, foi desenvolvido um projeto em parceria com a Ternium Brasil, que enxergou a vantajosa disrupção proveniente da implementação dos refratários *Carbonfree*, bem como optou pelo pioneirismo na aplicação de refratários de trabalho monolíticos concretados diretamente na placa. O projeto do processo de instalação e os cálculos das consequências esperadas foram desenvolvidos cuidadosamente em parceria pelas duas empresas e uma universidade, com um mesmo objetivo de atingir um resultado satisfatório e sustentável. Foram conduzidos todos os ensaios de laboratório necessários, com o intuito de garantir a resistência mecânica e à corrosão dos refratários utilizados. O envolvimento de especialistas de ambas as partes foi crucial para os resultados que serão apresentados neste artigo.

### 2.1 Definição das condições térmicas padrão e primeiros cálculos

Na fase preliminar do projeto, foram aplicados métodos de simulação computacional seguidos de comparação com medições termográficas realizadas na própria Ternium Brasil, a fim de estimar com significativa precisão as consequências no processo que se esperava obter. Duas placas foram acompanhadas durante uma semana para o registro de suas temperaturas de carcaça, a fim de correlacionar estes dados com os dados de processo da usina e assim ajustar o modelo virtual de cálculo de temperaturas ao longo do tempo e consequentes perdas térmicas. A metodologia empregada vem sendo refinada em vários estudos desenvolvidos em um laboratório universitário especializado em refratários, como apresentado por Lima [7] e Santos [8].



## 2.2 Montagem da panela

Como primeiro passo deste projeto, sempre com a segurança operacional em primeiro lugar, optou-se por manter as regiões críticas do revestimento da panela: impacto e linha de escória com o tipo de material refratário com carbono já homologado na usina. O revestimento de trabalho do fundo foi feito em concreto de  $Al_2O_3$ - $MgO$ , e a linha de metal em tijolos da linha ALTIMA®. O revestimento permanente da panela foi aproveitado para este teste, sendo ele feito também em material monolítico.

### 2.2.1 Montagem do fundo

Para a montagem do fundo da panela, iniciou-se com a aplicação dos tijolos da região de impacto, da maneira usual já empregada em todos os equipamentos do tipo na usina. Após o fim desta etapa, os tijolos foram fixados em suas posições para que não se movessem ou abrissem juntas durante a operação de concretagem.

Como foi utilizado pela primeira vez um concreto como revestimento de trabalho, sentiu-se a necessidade de acompanhar com detalhes a operação de secagem, para garantir que os aquecedores da usina e a curva praticada expulsassem toda a água contida no material. Para isto, foram introduzidos 8 termopares posicionados em 4 pontos no fundo da panela, a fim de medir continuamente a temperatura na face fria do concreto durante o aquecimento.



**Figura 1: Tijolos do impacto montados no fundo da panela e termopares de controle instalados.**

Na etapa de concretagem, o material foi preparado em um misturador planetário de três pás posicionado ao lado da panela, previamente ajustado e limpo para evitar qualquer contaminação. Em seguida, o concreto foi despejado em *bigbags* para ser içado com a talha e introduzido na panela, sendo despejado no fundo e vibrado.



**Figura 2: Revestimento do fundo da panela, com tijolos no impacto e monolítico concretado no local.**

### 2.2.2 Secagem do concreto

Após o período de cura do material, a panela foi submetida a uma curva específica para a secagem do fundo, com o objetivo de certificar que a potência dos aquecedores de panela convencionais seria suficiente para retirar toda a água da massa de concreto introduzida, ao longo de toda a sua espessura. Além dos termopares na face fria já citados, foi instalado um termopar na face quente do concreto, a título de comparação. Também foi acompanhada a temperatura da tampa do queimador, padrão do equipamento.

Aqueceu-se a panela durante 21h com acompanhamento constante da curva, e foi determinado que o monolítico já estava totalmente isento de umidade.

### 2.2.3 Montagem das paredes

A montagem do revestimento de trabalho das paredes seguiu o procedimento padrão da Ternium Brasil, sem nenhuma anormalidade ou necessidade de ajuste para os tijolos da linha ALTIMA®. Ao final desta etapa, a panela foi liberada para seguir o ciclo de aquecimento padrão da usina e entrar em operação.

## 2.3 Medição da eficiência energética

Optou-se como métrica prática para este projeto medir quantos graus a menos o aço perde pelo refratário em uma panela com revestimento de trabalho isolante durante a sua permanência neste equipamento. Este valor servirá de referência para realizar ajustes nas operações da aciaria, trazendo uma série de benefícios ao longo de todo o processo.

Como durante o processo de refino há influência de muitos fatores sobre a queda de temperatura do aço (adições de material, circulação forçada de aço, mistura no distribuidor), determinou-se que o período de trânsito entre um equipamento e outro do refino seria o ideal para comparar a perda de temperatura apenas pelo revestimento refratário. Sendo assim, foram utilizadas a temperatura final de um equipamento, a inicial do seguinte e o tempo entre elas para determinar a taxa de perda térmica, em °C/min.

Para que não fossem comparadas condições distintas de operação da aciaria, foram levantadas todas as corridas de 3 panelas convencionais e da panela *Carbonfree* que operaram no mesmo período. Estas corridas foram divididas em

grupos de acordo com a vida do refratário, a temperatura inicial do aço na panela e a carga de metal líquido. Foram então calculadas as taxas médias de perda para cada grupo separadamente e comparadas entre os tipos de refratário, fazendo a relação Taxa de perda *Carbonfree* dividida pela Taxa de perda convencional. Fazendo a média ponderada destes valores de acordo com a quantidade de corridas presentes em cada grupo, obteve-se o valor global de quanto menor é a perda do revestimento de trabalho isolante, em porcentagem.

A partir deste resultado, calculou-se com o auxílio da simulação computacional quanto é a queda de temperatura devida ao revestimento refratário em uma panela convencional, durante o tempo em que esta fica cheia de aço. Sabendo o quanto a panela *Carbonfree* é mais eficiente neste quesito, pôde-se calcular qual é a diferença de perda térmica, em graus, entre os dois revestimentos.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados da primeira campanha da panela mencionada, tanto na análise tradicional de desgaste de refratário, regiões críticas e potencial de vida; quanto na análise aprofundada da questão energética e de qualidade do produto final. É importante ressaltar que por uma questão de segurança, esta campanha ainda contou com refratários com alto teor de carbono nas regiões críticas. Ao longo do desenvolvimento do projeto, o objetivo é que também estes sejam alterados para a metodologia *Carbonfree*, de modo que os resultados obtidos sejam ainda mais expressivos.

#### 3.1 Desgaste dos refratários: monolítico e ALTIMA®

A principal ferramenta utilizada para esta análise foi a medição a laser do interior da panela, realizada por equipamento próprio para este fim e calibrado. As dimensões avaliadas por este método foram compatíveis com aquelas encontradas no remanescente ao final da campanha.

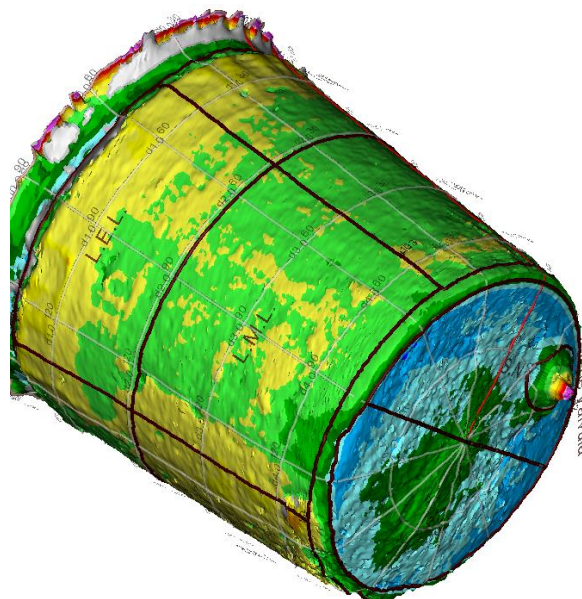
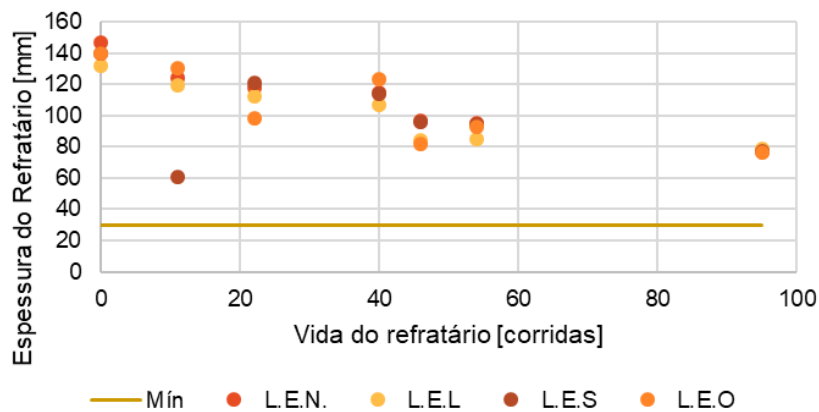


Figura 3: Imagem 3D da panela gerada a partir da medição a laser durante a campanha.

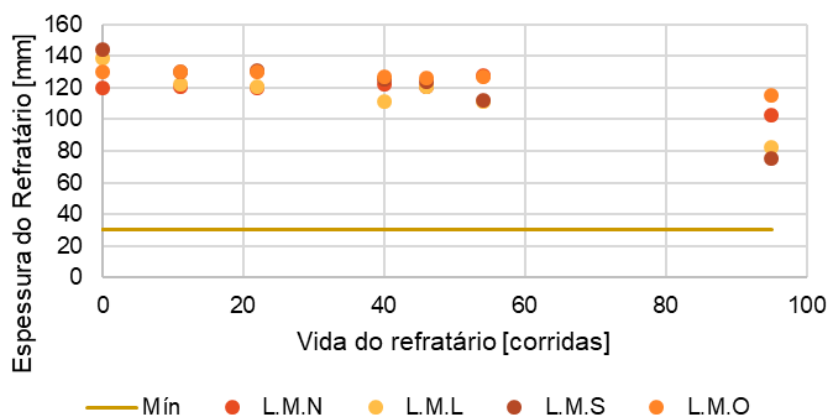
Antes da realização da primeira corrida, a panela foi medida para a determinação da condição inicial. Os valores encontrados foram coerentes com as dimensões de projeto da mesma, com um erro aproximado de 5%.

Durante toda a campanha foram realizadas medições com o mesmo sistema, a fim de acompanhar o desgaste ao longo do tempo. Os gráficos abaixo ilustram as menores espessuras em cada região de acordo com o número de corridas realizadas.

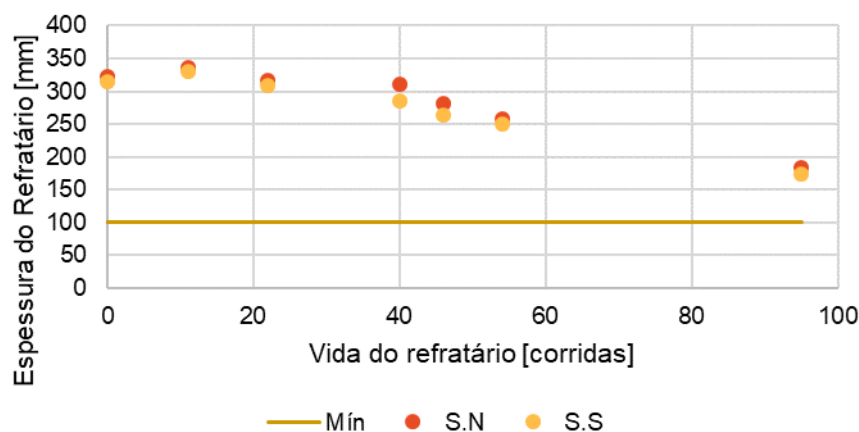
### Linha de escória



### Linha de metal



### Fundo



Figuras 4 a 6: Menores espessuras do revestimento registradas por medição a laser,



separadas por região.

A partir das medidas iniciais e finais, é possível calcular a velocidade de desgaste média durante a campanha, e assim o potencial de vida para a panela. Nas regiões mais solicitadas, o potencial de campanha do projeto atual seria por volta de 130 corridas.

Por tratar-se de um teste com diversas etapas, optou-se por finalizar a operação da panela no batente de vida vigente na usina ao final desta primeira campanha, de 96 corridas. Nas próximas etapas a questão do desgaste, e conseqüentemente a vida do refratário, será acompanhada até que se chegue ao limite de operação com segurança.

### 3.2 Pick-up de carbono durante o refino

Ao final da campanha, todas as corridas de aços com ultra-baixo teor de carbono do período foram levantadas, tanto as do revestimento *Carbonfree* quanto as do tradicional. Foram avaliados o teor de carbono medido no aço ao final do tratamento no RH e ao final do lingotamento contínuo. Separando as corridas para cada tipo de revestimento, calculou-se a variação média de teor de carbono para cada uma delas.

Nas corridas com revestimento tradicional, encontrou-se um aumento médio de teor de carbono de 5ppm; enquanto naquelas tratadas na panela *Carbonfree* o valor foi de 2ppm.

### 3.3 Eficiência energética

Foram levantadas ao todo 378 corridas realizadas nos meses de maio e junho de 2019, em 4 panelas diferentes. Destas, 190 não foram consideradas no cálculo por algum tipo de anomalia (falta de dados, panela muito tempo fora do ciclo, alta adição de elementos de liga no vazamento, etc). As 188 restantes foram divididas em 21 grupos conforme a metodologia apresentada. Os grupos com maior número de dados, e conseqüentemente maior peso, foram aqueles em que a panela tinha carga intermediária e temperatura intermediária-baixa. Ao fim dos cálculos, verificou-se que a perda média de temperatura da panela *Carbonfree* é de 10 a 15% menor do que a de uma panela convencional, o que equivale a uma diferença total de 8 a 12°C ao longo de todo o tempo de panela cheia.

## 4 CONCLUSÃO

A primeira panela de aço brasileira com revestimento de trabalho monolítico concretado no local foi montada e operou com sucesso, atingindo a vida prevista para esta etapa. As medições a laser revelaram baixa velocidade de desgaste do revestimento, possibilitando aumentos de campanha no futuro com segurança. Além disso, a aplicação de material *Carbonfree* apresentou-se como uma solução tecnológica promissora nos quesitos de qualidade de aços de ultra baixo teor de carbono, emissões de gases estufa e eficiência energética. Por fim, ficou clara a importância da colaboração e dos projetos de parceria entre clientes, fornecedores e a academia para implementação de inovações disruptivas na indústria.

## Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem às empresas envolvidas pelo suporte e o apoio em um projeto tão inovador. Agradecemos também a valiosa contribuição de Ariovaldo do Nascimento, Flávio Rocha, Luis Henrique Souza, Wallace Gonçalves, Matheus dos Santos, e Donaldo Orosimbo.

## REFERÊNCIAS

- 1 GOTOH, T., TADA, H., IIDA, E., TOMIYA, H. Unburned Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO brick “ALTIMA” for steel ladle, Shinagawa technical report Vol. 50, 2007.
- 2 TOMIYA, H., TADA, H., IIDA, E. Results of unburned Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO brick “ALTIMA” for steel ladle, Shinagawa technical report Vol. 51, 2008.
- 3 MAEDA, E. Refractories and global warming, Shinagawa technical report, Vol. 54, 2011.
- 4 TOMIYA, H., TAKISAWA, T., YOSHIDA, M. High performance ladle bricks, Shinagawa technical report Vol. 55, 2012.
- 5 DOI, N., IIDA, A., TOMIYA, H. Enhancement of corrosion resistance of unburned Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO brick “ALTIMA” by improving microstructure, Shinagawa technical report Vol. 59, 2016.
- 6 RAMOS, V. P. de S., LIMA, H.A.A., GALESI, D.F., SAKO, E.Y., FRASSON, S.C., NASCIMENTO, A. do, Free and low carbon alumina-magnesia bricks for steel ladle metal line, UNITECR 2017 – 15th Biennial Worldwide Congress, 2017, Santiago, Chile.
- 7 LIMA, H.A.A., THOMAZ, M.M., SANTOS, M.F.dos, RAMOS, V.P. de S., GALESI, D. F. Avaliação de tijolos sem carbono em panelas de aço. 49º Seminário de Aciaria, Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos, ABMWeek 2018, São Paulo, Brasil.
- 8 SANTOS, M.F., MOREIRA, M.H., CAMPOS, M.G.G., PELISSARI, P.I.B.G.B., ANGÉLICO, R.A., SAKO, E.Y. *et al.* Enhanced numerical tool to evaluate steel ladle thermal losses. *Ceramics International*, 2018.