TÉCNICAS DE REPARO A QUENTE E AVALIAÇÕES DE MATERIAIS REFRATÁRIOS PARA FORNOS DE SOLEIRA ROTATIVA*

Lucas Antunes Orsini[1]
Danilson Gonçalves de Melo e Silva[2]

Resumo
A compreensão das propriedades dos materiais refratários é de extrema importância no desenvolvimento, aprimoramento, controle de qualidade e seleção dos revestimentos a serem utilizados em processos onde atuam mecanismos de desgaste de natureza mecânica, química e térmica. O equipamento avaliado neste trabalho foi um forno de soleira rotativa de reaquecimento de tarugos. O foco do trabalho foi o revestimento refratário da camada de trabalho deste equipamento, motivado pela necessidade de aumento da confiabilidade da soleira. Para a técnica de reparo a quente, dois materiais foram caracterizados e testados e um deles apresentou resultados promissores. Para a substituição do revestimento de trabalho da soleira, foram avaliados dois materiais comerciais. Testes laboratoriais foram realizados, seguindo normas nacionais e internacionais. Os ensaios foram divididos de acordo com os mecanismos de desgastes previstos no revestimento em operação e os resultados obtidos permitiram avaliar o seu potencial desempenho. Este trabalho orientou o desenvolvimento, a seleção e a aplicação de materiais refratários para a camada de trabalho da soleira de fornos de soleira rotativa, objetivando aumentar a confiabilidade, disponibilidade e vida útil desta região.
Palavras-chave:Propriedades de Refratários; Fornos de Soleira Rotativa.

HOT REPAIR TECHNIQUES AND REFRACTORY MATERIALS EVALUATION FOR ROTARY HEARTH FURNACES

Abstract
The comprehension of refractory properties is important to the development, quality control and selection of materials used in processes where wearing mechanisms such as mechanical, chemical and thermal are present. The unit process evaluated is a rotary hearth furnace. The focus of this work was the refractory lining at the hearth of this equipment due to the necessity of increasing the refractory lifetime for this application. For the hot repair technique, two materials were characterized and tested. One of them showed promising results. For the hearth lining substitution, two commercial materials were evaluated. All the materials analyzed were submitted to laboratorial tests, following national and international technical standards. The tests were divided according to the importance of the solicitations of the refractory lining under operation. This work guided the development, the selection and the application of refractory for the hearth lining of rotary hearth furnaces in order to achieve a better productivity and reliability of this equipment.
Keywords: Refractory Properties; Rotary Hearth Furnaces.

[1] *Estudante de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Tecnologia e Engenharia de Processos, Vallourec Soluções Tubulares do Brasil S.A., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*
[2] *Engenheiro Químico, Doutor, Engenheiro, Tecnologia e Engenharia de Processos, Vallourec Soluções Tubulares do Brasil S.A., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*

** Contribuição técnica ao 73º Congresso Anual da ABM – Internacional, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 04 de outubro de 2018, São Paulo, SP, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

A análise do desempenho de materiais refratários em usinas siderúrgicas é uma prática fundamental e a sua importância está ligada ao fato que os refratários são vitais para o processo produtivo. Estes materiais são utilizados na indústria moderna do aço devido à sua capacidade de resistência a estresses termomecânicos que ocorrem em temperaturas elevadas. (1)Os custos envolvidos na aquisição desses materiais são relativamente baixos quando comparados ao valor total do projeto, mas a sua falha e a consequente interrupção da produção gera sérios prejuízos financeiros. Um dos equipamentos em que estes materiais são utilizados são os fornos de reaquecimento de aço, responsáveis por aquecer os tarugos até que atinjam propriedades adequadas para passar pelo processo de conformação mecânica.

Todos os fornos de reaquecimento possuem uma câmara construída de materiais cerâmicos refratários densos e isolantes para a retenção de energia térmica e uma soleira para suportar ou carregar o aço ao longo do processo de reaquecimento. Essa soleira pode ser constituída de uma combinação entre suportes metálicos refrigerados a água e refratários ou apenas materiais refratários. O último caso é frequentemente utilizado em fornos de reaquecimento de soleira rotativa. (2)O forno de reaquecimento (Figura 1) estudado apresenta soleira composta por camadas de materiais refratários e gira no sentido horário em torno do eixo vertical do forno, partindo da zona de pré-aquecimento até a zona de encharque.

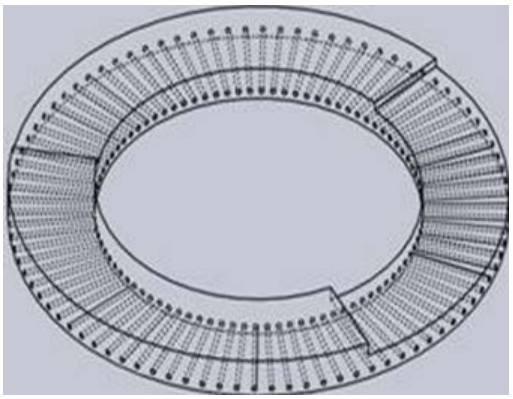

Figura 1. Forno de reaquecimento de soleira rotativa.

Por se tratar de um equipamento muito importante, é imprescindível realizar este estudo para compreender quais são os possíveis mecanismos de desgaste que possam ocorrer com o revestimento refratário da soleira. Esses mecanismos podem ser classificados resumidamente como térmicos, mecânicos e químicos. Dentro desta análise é importante considerar a interação entre os mecanismos, pois raramente estes ocorrem separadamente, embora possa haver a predominância de um ou mais destes. Outro ponto a ser avaliado é o fator tempo, uma vez que o equipamento é utilizado por longos períodos contínuos. (3)

O motivo primordial pelo qual se escolheu trabalhar e focar no revestimento refratário da soleira, e mais especificamente na camada de trabalho, está ligado à menor vida útil desta região em relação às outras áreas (teto, parede, canal de fumos, dentre outros) do forno. A média da vida útil de cada região dos fornos de reaquecimento pode ser assim relacionada: paredes, entre 5 e 15 anos; teto, entre 5 e 20 anos; soleira, entre 1 e 4 anos. (4) Esta menor campanha do revestimento refratário da camada de trabalho da soleira está diretamente ligada ao maior número

de solicitações e mecanismos de desgaste a que está região é submetida quando comparada as demais regiões do equipamento.
Dentre os mecanismos químicos responsáveis pela degradação do revestimento refratário de trabalho da soleira de forno rotativo e pela redução da sua vida útil pode-se destacar a corrosão. (5) Este mecanismo refere-se ao ataque químico da carepa (óxido de ferro formado na superfície do aço na presença de oxigênio) ao refratário em serviço. Na mesma linha de raciocínio pode ser considerado um importante mecanismo térmico de desgaste, o gradiente de temperatura (choque térmico). (6)No caso dos fornos de soleira rotativa, este gradiente ocorre principalmente devido à colocação dos tarugos que estão à temperatura ambiente (25 °C) sobre a soleira que se encontra a temperatura de operação (1280°C) e tambémàs taxas de resfriamento e aquecimento as quais o equipamento é submetido antes e após as paradas de manutenção. Este processo pode ou não levar o refratário a sofrer uma termoclase, ocasionando a perda de fragmentos da face de trabalho através de um processo de formação e propagação de trincas em sua estrutura. Outros dois mecanismos mecânicos de desgaste importantes e que merecem atenção são a abrasão e o impacto do tarugo sobre a soleira. (7) O primeiro mecanismo é ocasionado pelo atrito do tarugo com o refratário durante o processo de enfornamento e/ou desenfornamento e o segundo mecanismo está relacionado a uma possível queda do tarugo de alguns centímetros sobre a camada de trabalho da soleira, principalmente durante o processo de enfornamento. Para o último caso, como o choque não é distribuído homogeneamente na superfície do refratário, e sim concentrado em alguns pontos, a tensão gerada nestas regiões será alta, podendo ocasionar a formação e propagação de microtrincas que poderão levar a degradação superficial do revestimento.
Este trabalho foi motivado pela necessidade de desenvolvimento de melhores práticas de seleção e avaliação de materiais refratários para a camada de trabalho da soleira de fornos rotativos de reaquecimento. Isto permitea análise e melhoria do projeto, a otimização do processo de instalação do refratário, a análise das curvas de resfriamento e aquecimento durante as paradas de produção e a melhoria nas práticas de manutenção preventiva visando prolongar a vida útil do revestimento. Além disto, pode-se atuar nas práticas operacionais do forno de modo a retardar a degradação do refratário. Atuando em cada etapa, estima-se ser possível minimizar os custos de aquisição, montagem e manutenção do refratário, além de aumentar a disponibilidade do equipamento e a sustentabilidade do processo produtivo.

2 DESENVOLVIMENTO

Devido à grande competitividade nos mercados nacional e internacional de aço e à necessidade de se aumentar a disponibilidade do forno de reaquecimento, estudou-se produtos e técnicas de reparo que pudessem postergar a troca da camada de trabalho. Também foram estudados materiais já desenvolvidos e utilizados no mercado brasileiro para a confecção dos blocos pré-moldados com o intuito de reduzir os custos de manutenção e aumentar a disponibilidade do equipamento para a área produtiva.
O projeto original de distribuição das camadas do revestimento refratário da soleira do forno de reaquecimento estudado consiste em uma primeira camada constituída por blocos pré-moldados fabricados através de concreto refratário de baixo teor de cimento (1,0<CaO<2,5%), classe aluminosa (80%), de fluência livre e de pega hidráulica; uma segunda camada composta por concreto refratário sílico-aluminoso,

teor convencional de cimento e de pega hidráulica; uma terceira camada formada por duas fiadas de tijolos isolantes de densidade 800 kg/m³ e dimensões de 229 x 114 x 63 mm; uma penúltima camada composta por duas fiadas de tijolos isolantes de densidade 600 kg/m³ e dimensões de 229 x 114 x 63 mm; uma última camada constituída por manta de fibra cerâmica de densidade igual a 128 kg/m³ e espessura de 6,25 mm.

As paradas de manutenção deste equipamento estavam previstas para serem realizadas anualmente e o objetivo principal era o de realizar o levantamento do desgaste da camada de trabalho da soleira, uma vez que esta região estaria submetida às maiores solicitações e mecanismos de desgastes.

Nos primeiros três anos de operação o nível de desgaste da camada de trabalho da soleira atingiu valores próximos a 20 mm/ano, principalmente nas posições centrais, uma vez que todo o carregamento de tarugos é ajustado automaticamente pela pinça de enfornamento para ser depositado nestas regiões, mesmo que o material tenha menores comprimentos (exemplo: 800 mm). Nas regiões mais periféricaso desgaste da soleira foi menos acentuado, chegando a valores próximos a 5 mm/ano. Desta forma, após quatro anos de operação, a camada central de trabalho da soleira do forno estava com 80 mm de espessura a menos do que quando comparada ao projeto inicial (Figura 2), sendo que as regiões periféricas apresentavam um desgaste de 20 mm.

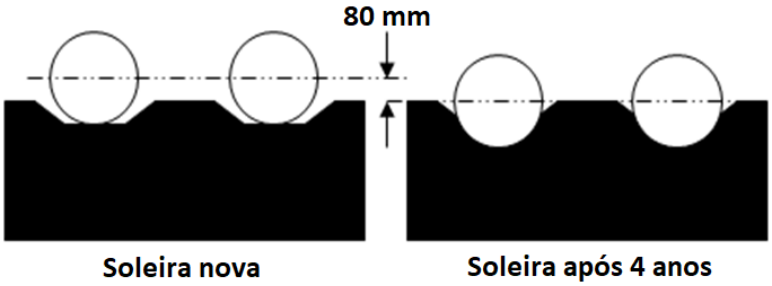

Figura 2. Desgaste da soleira após 4 anos de operação.

Em consequência do desnivelamento ao longo da extensão da soleira ocasionado por níveis de desgaste distintos do revestimento refratário de trabalho, os tarugos com comprimentos superiores a 3000 mm, ao serem desenfornados, apresentavam deformações longitudinais que dificultavam a sua posterior laminação. Como uma parada para substituição dos blocos pré-moldados solicitaria grandes investimentos e um longo período de manutenção, foram avaliadas técnicas e materiais de reparo para postergar a vida útil da camada de trabalho.

Desta forma, adotaram-se as seguintes premissas básicas: a primeira delas foi a realização do reparo a quente sem o desligamento total dos queimadores, a segunda foi a de se utilizar um material de aplicação a seco (massa seca) para se evitar qualquer risco de explosão durante a sua instalação, a terceira foi a de que o produto refratário apresentasse uma boa aderência ao bloco pré-moldado remanescente e a quarta foi a de garantir o início do processo de sinterização do material logo após a sua aplicação.

2.1 Materiais e Métodos

O produto escolhido para atender as premissas técnicas foi desenvolvido por uma empresa nacional e ensaios laboratoriais foram divididos em físicos, mecânicos, químicos e térmicos para avaliar o potencial do produto. Foram realizados ensaios

de densidade aparente e porosidade aparente (NBR 16661 e NBR 8592), resistência à compressão a frio (NBRISO10059-2e NBR 11222), resistência à flexão a temperatura ambiente por três pontos (NBRISO 5014, NBR 9642 e NBR 11222), análise química (NBR ISO 12677) e variação dimensional linear (NBR 8385). Todos esses ensaios foram realizados a 25 ºC e com temperatura de tratamento térmico prévio de 200 °C, 400 °C, 1000 °C e 1400 °C.Para a preparação dos corpos de prova foram utilizadas formas de ferro previamente umectadas com óleo polimerizado. O material foi levemente socado para acomodação. Após o processo de moldagem, os corpos de prova foram colocados em estufa a 200°C por 12 horas. A partir desta etapa e após o resfriamento, o material foi removido das formas e encaminhado ao processo de queima em forno elétrico e atmosfera oxidante, nas temperaturas prévias de tratamento térmico.

Para o teste de aderência e grau de sinterização foi adotada aseguinte metodologia. Foram moldados quatro corpos de prova com geometria triangular e com o mesmo material dos blocos pré-moldados. Estes foram queimados a 1400°C em um forno elétrico. As peças então foram perfuradas por uma serra copo de 50 mm de diâmetro a uma profundidade de 50 mm. Logo em seguida, a massa seca foi acomodada no furo dos corpos de prova sendo tratados às temperaturas de 200 °C, 400°C, 1000°C e 1400°C, objetivando fazer uma avaliação da sua aderência e sinterização em cada etapa do tratamento térmico.

Seguindo a mesma linha de estudo de reparo a quente, testou-se um segundo produto, rico em MgO, porém sem a presença de aditivos e ligantes que garantissem a sua aderência e/ou sinterização após aplicação. A utilização deste produto demonstrou ser interessante devido ao MgO não formar fase líquida com a carepa na temperatura de operação do forno (1280°C). Outros dois pontos relevantes para a realização dos testes com este material estavam ligados ao fato de que em atmosfera redutora o início de formação de fase líquida se dá a temperatura de 1370 °C e em atmosfera oxidante o aparecimento de fase líquida se dá a 1591 °C. (8) A análise química foi feita através da técnica de espectrometria por fluorescência de raios-X. A granulometria da fonte de MgO utilizada variou entre 1 a 5 mm para se evitar um possível arraste do material pelo sistema de exaustão. Uma fina camada de carepa foi colocada sobre o produto refratário para prevenir uma possível aderência do MgO ao tarugo ao longo do processo térmico.

Já para o estudo da troca da camada de trabalho foram comparados dois produtos: o material A instalado na montagem do forno em 2005 e o material B, um produto aluminoso (90%) com adição de Cr_2O_3 (3-4,5%) e ultra baixo teor de cimento (0,2%<CaO<1,0%), substituto do material A. Foram escolhidos testes laboratoriais que serviram para definir o material com maior potencial de desempenho através da avaliação de propriedades físicas, mecânicas, químicas e térmicas. Foram realizados ensaios de densidade aparente e porosidade aparente (NBR 16661 e NBR 8592), resistência à compressão a frio (NBR ISO 10059-2 e NBR 11222), resistência à compressão a quente (ASTM C1681), abrasão a frio (NBR 13185), resistência à flexão a temperatura ambiente por três pontos (NBR ISSO 5014, NBR 9642 e NBR 11222), análise química (NBR ISO 12677), ataque químico (NBR 9641), expansão térmica (NBR 6637), variação dimensional linear (NBR 8385) e condutividade térmica (ASTM C1113). Ambos concretos foram fornecidos por empresas nacionais e toda a preparação dos corpos de prova foi realizada através de um misturador do tipo planetário sobre uma mesa vibratória em fôrmas metálicas conforme a norma NBR 8382.

2.2 Resultados

2.2.1 Reparo a Quente com a Massa Seca

Os resultados dos ensaios físicos, mecânicos e térmicos da massa seca estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultado dos ensaios da massa seca

Testes após tratamento térmico a 200 °C por 5 horas	Média	Desvio Padrão
d.m.a. (g/cm³)	2,74	0,03
p.a (%)	7,59	0,76
RFTA (MPa)	1,65	0,21
RCTA (MPa)	7,14	1,51
Testes após tratamento térmico a 400 °C por 5 horas		
d.m.a. (g/cm³)	2,69	0,01
p.a. (%)	16,53	0,32
RFTA (MPa)	4,61	0,62
RCTA (MPa)	18,85	2,22
Variação Linear (%)	-0,07	0,02
Testes após tratamento térmico a 1000 °C por 5 horas		
d.m.a. (g/cm³)	2,66	0,01
p.a. (%)	20,73	0,36
RFTA (MPa)	7,61	1,88
RCTA (MPa)	50,59	5,46
Variação Linear (%)	0,01	0,01
Testes após tratamento térmico a 1400 °C por 5 horas		
d.m.a. (g/cm³)	2,57	0,07
p.a. (%)	22,23	2,13
RFTA (MPa)	8,05	0,98
RCTA (MPa)	60,08	0,91
Variação Linear (%)	0,51	0,05

A Figura 3 mostra o corpo de prova utilizado para o teste de aderência.

Figura 3. Corpos de prova para o teste de aderência.

2.2.2 Troca da Camada de Trabalho

Os resultados dos ensaios físicos, mecânicos e térmicos dos dois produtos avaliados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados dos ensaios dos materiais da camada de trabalho da soleira

	Material A		Material B	
	Média	**Desvio Padrão**	**Média**	**Desvio Padrão**
Testes após tratamento térmico a 110 °C				
d.m.a (g/cm^3)	2,87	0,00	3,19	0,01
p.a. (%)	17,09	0,20	15,35	0,10
Variação Linear (%)	-0,12	0,18	-0,11	0,10
RFTA (MPa)	5,79	0,67	6,11	0,61
RCTA (MPa)	22,14	4,04	33,47	1,86
Testes após tratamento térmico a 800 °C				
d.m.a (g/cm^3)	2,85	0,01	3,19	0,01
p.a. (%)	18,31	0,14	15,98	0,25
Variação Linear (%)	-0,13	0,04	-0,18	0,05
RFTA (MPa)	6,46	0,58	8,11	0,72
RCTA (MPa)	44,45	8,20	53,91	1,20
Testes após tratamento térmico a 1000 °C				
d.m.a (g/cm^3)	2,84	0,00	3,18	0,00
p.a. (%)	17,70	0,16	16,54	0,11
Variação Linear (%)	-0,15	0,25	-0,21	0,03
RFTA (MPa)	12,54	0,30	19,04	1,15
RCTA (MPa)	88,37	5,16	89,84	6,87
Testes após tratamento térmico a 1200 °C				
d.m.a (g/cm^3)	2,85	0,01	3,19	0,01
p.a. (%)	17,38	0,22	16,88	0,22
Variação Linear (%)	-0,12	0,06	-0,17	0,09
RFTA (MPa)	13,72	1,68	22,67	0,27
RCTA (MPa)	112,38	6,26	116,73	5,03
Testes após tratamento térmico a 1300 °C				
d.m.a (g/cm^3)	2,85	0,00	3,18	0,01
p.a. (%)	17,98	0,00	17,43	0,01
Variação Linear (%)	-0,29	0,08	-0,27	0,04
RFTA (MPa)	12,69	0,79	24,10	2,03
RCTA (MPa)	104,87	3,86	119,55	1,01

A resistência à flexão a quente por três pontos dos materiais A e B está apresentada na Figura 4 e a resistência à compressão a quente nasFiguras 5 e 6.

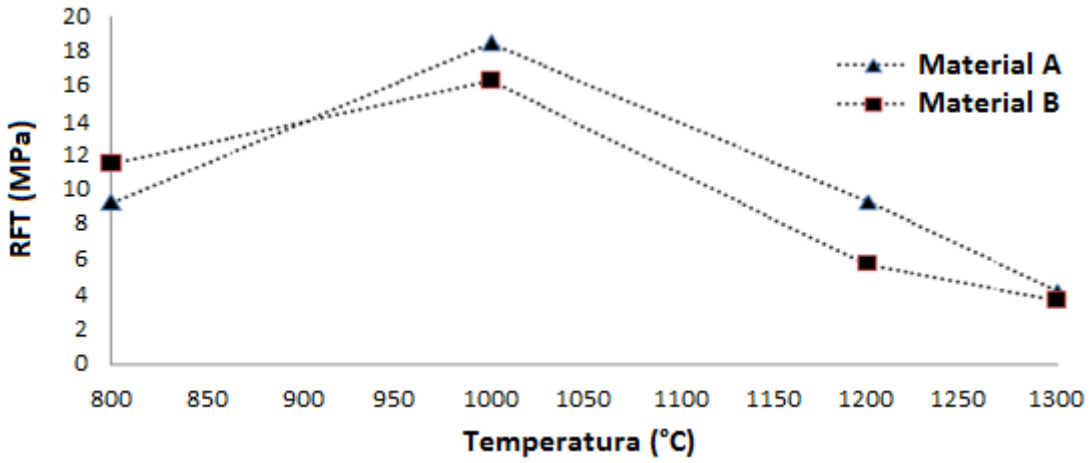

Figura 4. Resistência à flexão a quente.

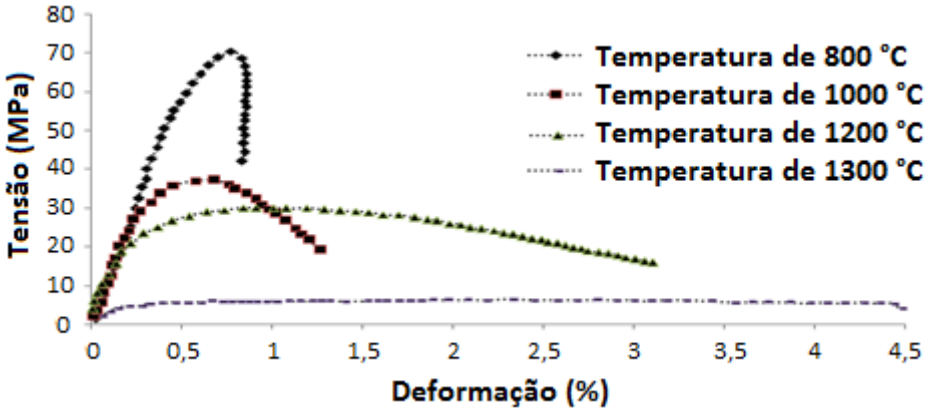

Figura 5. Resistência à compressão a quente do Material A.

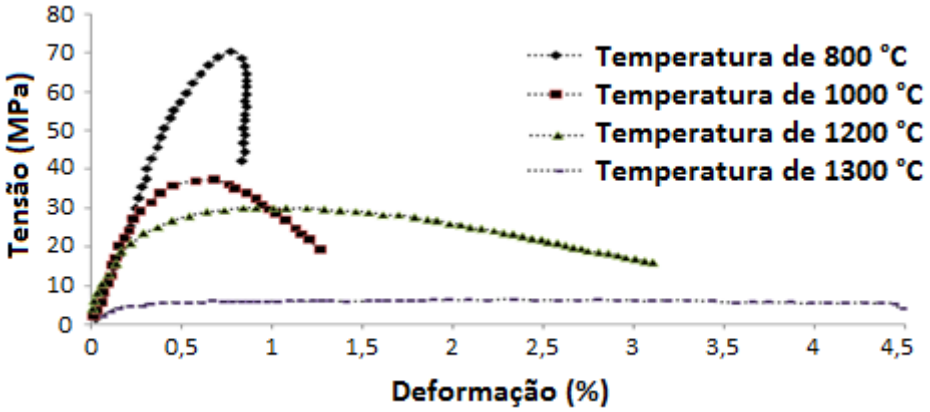

Figura 6. Resistência à compressão a quente do Material B.

A Figura 7 apresenta o resultado do teste de ataque por escória pelo método estático.

Figura 7. Resultado do teste de ataque por escória pelo método estático.

2.3 Discussão

2.3.1 Reparo a Quente com a Massa Seca

O material apresentou propriedades mecânicas a frio crescentes com o aumento da temperatura de queima, atendendo uma das premissas listadas que era garantir o início de sinterização tão logo fosse aplicado durante o reparo a quente. O ligante utilizado neste produto promove uma forte sinterização para temperaturas acima de 1000°C. Avaliando a habilidade deste material em resistir à penetração de óxidos metálicos (carepa), constata-se que esta característica foi prejudicada. Esta confirmação se dá pelo aumento da porosidade aparente do material após tratamento térmico em diferentes temperaturas, sendo que a causa mais provável seja a expansão dos gases aprisionados nos estágios de queima. Quando eles atingem a superfície do material eles podem escapar, formando poros abertos que aumentam a porosidade aparente. A análise química do material mostrou a presença majoritária de dois componentes, sendo 88% de Al_2O_3 e 8% de SiO_2. O terceiro óxido de maior percentual foi a titânia (TiO_2) com um valor de 2%.O material apresentou um bom comportamento no teste de aderência, pois após o tratamento térmico em cada temperatura não foi relatado nenhum indício de trincas entre a massa e os corpos de prova.
Mesmo com o ponto negativo relacionado ao aumento da porosidade aparente do material com o aumento da temperatura de queima, a sua utilização foi aprovada. A aplicação do produto foi realizada pelo lado de fora do forno através da porta de desenfornamento. Para os testes, o material foi transferido e acondicionado em sacos plásticos contendo apenas um quilograma para facilitar a sua aplicação, uma vez que toda operação foi realizada manualmente. Cada material foi aplicado em maior volume nas posições centrais da soleira com o intuito de nivelar a camada de trabalho e permitir uma sobrevida ao refratário. A aplicação foi realizada através de pás do tipo concha e, por motivos operacionais e de segurança, esta foi realizada pela porta de desenfornamento. Alguns queimadores permaneceram ligados para que a retomada da produção não fosse prejudicada e para que a sinterização do material se iniciasse logo após a sua aplicação. O material foi nivelado e compactado pela própria pá durante a aplicação. Aguardou-se um período de aproximadamente uma hora após a acomodação do produto para que todos os queimadores fossem religados. A temperatura do forno estava próxima a 800°C e a taxa de aquecimento utilizada foi de 50°C/h até que fosse atingida a temperatura final de operação. Inicialmente, o material demonstrou ter uma boa aderência ao refratário dos blocos pré-moldados, porém aproximadamente dois meses após a sua aplicação o produto saiu parcialmente, aderido aos tarugos, e novas intervenções foram realizadas. Esta técnica de reparo mostrou-se promissora, porém novos produtos e metodologias de avaliação devem ser desenvolvidos.

2.3.2 Reparo a Quente com a Massa Refratária Básica

A massa refratária básica apresentou um teor de MgO de 98%. A sua aplicação foi realizada utilizando a mesma metodologia da massa seca, todavia o produto saiu aderido aos tarugos logo após a sua aplicação. Este fenômeno aconteceu pela difusão do ferro e magnésio na interface entre o tarugo e a massa rica em MgO.

2.3.3 Troca da Camada de Trabalho

A tendência apresentada pelos resultados de resistência à compressão e a flexão a temperatura ambiente foram semelhantes. Ambos os materiais apresentaram um baixo módulo de ruptura logo após a secagem (110°C), mas estes valores sofreram um aumento considerável com o acréscimo das temperaturas de queima.
Quando se avalia a resistência à flexão a quente para os dois materiais,nota-se que estes também apresentaram resultados semelhantes. Através destes valores, pode-se prever um comportamento análogo de resistência à abrasão. (9) Também é comum correlacioná-la a resistência à corrosão por metais e escórias. Para o primeiro caso, o volume erodido no teste de abrasão a frio foi de 4,1 cm^3 para o material A e 4,0 cm^3 para o material B. Todas as amostras foram tratadas termicamente a 1400°C antes da realização dos ensaios. Logo, a correlação entre a resistência à flexão a quente e a resistência à abrasão pode ser feita. No entanto, para a resistência à corrosão por metais e escórias, outras propriedades, tais como a composição mineralógica, são igualmente ou até mais importantes do que a resistência à flexão a quente. Este fato foi comprovado na etapa dos ensaios químicos.
Nota-se que o material A apresentou uma deformação plástica a 1300°C (próxima a temperatura de operação do forno) igual a 4,5% antes da sua ruptura, enquanto para o material B o valor foi de 1,7%. O maior valor de deformação no regime plástico para o material A na temperatura de trabalho comprova que este produto suporta um maior impacto (queda) do tarugo quando comparado ao material B. Uma das explicações para esta diferença entre os valores das deformações pode estar ligada a maior formação de líquidos de alta viscosidade no material A, que aliviariam o nível de tensões internas a altas temperaturas.
A análise química revelou baixas concentrações de impurezas (TiO_2<2,0%, Fe_2O_3<1,0% e (Na_2O+K_2O)<0,5%) para o material A e para o material B (TiO_2<0,1%, Fe_2O_3<0,5% e (Na_2O+K_2O)<0,3%), reduzindo a probabilidade de formação de fases com ponto de fusão abaixo da temperatura de operação do forno (1280°C). Porém, quando se avalia a quantidade de SiO_2 no material A (12%) em relação ao material B (3,5%), a probabilidade de formação de uma fase de baixo ponto de fusão através da reação entre a sílica livre e a carepa (óxido de ferro) é maior no produto A do que no produto B. Esta fase é denominada faialita e forma-se próxima a temperatura de 1200 °C, abaixo da temperatura de operação do forno (1280°C).
A formação da fase faialita ($2FeO.SiO_2$) na camada de trabalho da soleira do forno poderia ocasionar uma termoclase estrutural, pois esta nova fase presente alteraria a microestrutura do material, gerando o aparecimento e propagação de microtrincas e ocasionando a perda de fragmentos na face quente do material. (10) Este fato ficou comprovado e bem evidenciado no teste de ataque por escória pelo método estático. O teste foi realizado a uma temperatura de 1600 °C por cinco horas, objetivando favorecer a cinética química da reação.
O material B apresentou um bom resultado frente ao material A devido a menor quantidade de SiO_2 presente na sua composição, além da presença de Cr_2O_3 que apresenta uma alta resistência ao ataque de carepa (óxido de ferro). Vale ressaltar que este método apresenta algumas desvantagens, tais como não haver a renovação da escória durante o teste e a amostra se encontrar totalmente encharcada na temperatura do teste, sem a presença de um gradiente térmico conforme situação real.

Foram avaliadas a condutividade térmica e a expansão térmica reversível dos dois materiais. Pelo fato do material B possuir um maior teor de alumina em relação ao material A e porosidade aparente semelhante, era esperado que o primeiro apresentasse valores superiores em relação ao segundo, quando comparadas as suas propriedades térmicas apresentadas. Os resultados da condutividade térmica obtidos para os materiais A (2,52W/mK a 1000°C e 2,58W/mK a 1200°C) e B (3,49W/mK a 1000°C e 3,93 a 1200°C) estão de acordo com valores encontrados na literatura para materiais aluminosos com 80% de Al_2O_3 e 90% de Al_2O_3. Este fato também se repetiu para os resultados da expansão térmica reversível, sendo que o material A apresentou um valor de 0,1% a 1200°C e o material B um valor de 0,3% a 1200°C.

3 CONCLUSÃO

Este trabalho permitiu o desenvolvimento, seleçãoe aplicação de materiais refratários para a camada de trabalho da soleira de um forno rotativo de reaquecimento de tarugos, objetivando elevar a vida útil, a disponibilidade e a confiabilidade deste equipamento.

A massa seca aluminosa utilizada no reparo a quente demonstrou ser promissora, porém as metodologias de avaliação de novos materiais refratários devem ser aprimoradas de forma a prever o seu comportamento quanto à sinterização e a aderência aos tarugos. O material a base de MgO, por não conter nenhum ligante em sua composição, aderiu-se aos tarugos, não sendo uma opção favorável para este tipo de reparo.Baseando-se nos resultados obtidos para a massa seca, a técnica de reparo a quente permitiu que a troca da camada de trabalho fosse postergada em dois anos.

Os materiais A e B utilizados na fabricação de peças pré-moldadas para a camada de trabalho da soleira apresentaram valores similares de resistência à flexão a quente na temperatura de operação do forno (1280°C). Os valores do volume erodido no ensaio de abrasão a frio também foram praticamente idênticos. O material A apresentou o resultado de deformação plástica a 1300°C quase três vezes superior ao resultado anotado pelo material B nas mesmas condições. No ensaio de ataque químico utilizando o método estático, o material B apresentou uma menor corrosão quando comparado ao material A. Este comportamento está relacionado à menor quantidade da fase cristalina SiO_2, além da presença de Cr_2O_3 que apresenta uma alta resistência ao ataque de carepa.

Agradecimentos

À Vallourec Soluções Tubulares do Brasil S.A., pelo incentivo à pesquisa e desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

1 Chaudhary A, Biswas S, Prince RK, Pal, AR. Failure analysis of bullnose refractory in reheating furnace of Hot Strip Mill. Engineering Failure Analysis. 2016; 60: 341-352.
2 The Energy Technology Support Unit and British Steel. Good practice guide: continuous steel reheating furnaces: specification, design and equipment, v.76. Oxfordshire, ReinoUnido: Energy Efficiency Office; 1994.
3 Menezes I. Efeitos termomecânicos em refratários. São Paulo: Associação Brasileira de Metais; 1985.

4 Duarte AK. Apostila do curso de refratários. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG; 2010.
5 Slovikovskii VV. Brickwork of furnace lining of high-temperature metallurgical plants produced from special refractory materials. Refractories and Industrial Ceramics. 2010; 51(4): 233-235.
6 Damhof F, Brekelmans WAM, Geers MGD. Predictive FEM simulation of thermal shock damage in the refractory lining of steelmaking installations. Journal of Materials Processing Technology. 2011; 211(12): 2091-2105.
7 Slovikovskii VV. Corrosion and erosion resistant lining of rotary furnaces. Refractories and Industrial Ceramics. 2008; 49(2): 99-102.
8 Muan A, Osborn EF. Phase equilibria among oxides in steelmaking. Reading, Massachusetts, EstadosUnidos: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.; 1965.
9 Duarte AK. Testes e propriedades referentes a refratários. Belo Horizonte: Curso de refratários para aciaria elétrica; 2000.
10 Pandolfelli VC, Fadel MT. Choque térmico em cerâmicas avançadas e refratários. Cerâmica. 1989; 35(228): 1-6.