

ADEQUAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO TÉRMICA DA PAREDE DE COMBUSTÃO DE UM FORNO DE COQUE APÓS REFORMA DO REGENERADOR¹

Giulliany Nardoto Moraes²

Jonielton Tiengo³

Alexandre Rodrigues Monteiro Borges Junior⁴

Nilson Luiz Biccass⁵

José Roberto de Oliveira⁶

Resumo

Após 26 anos de operação dos fornos da ArcelorMittal Tubarão, algumas paredes apresentaram uma queda acentuada na temperatura das câmaras extremas afetando a distribuição térmica. O objetivo deste estudo é relatar as ações operacionais necessárias para a reforma do regenerador, seu controle térmico e comparar a distribuição térmica da parede antes e após a reforma. Para isso mediu-se a temperatura das câmaras ao longo da parede antes e após a reforma e a temperatura das câmaras de referência durante a reforma, controlando a temperatura das mesmas. Levando em consideração a idade das baterias, a distribuição térmica ao longo das paredes dos regeneradores reformados apresentaram melhora significativa. O controle térmico dos fornos de coque é de fundamental importância para o prolongamento da vida útil de uma bateria.

Palavras-chave: Regenerador; Forno de coque; Distribuição térmica.

COKE FURNACE COMBUSTION WALL THERMAL DISTRIBUTION ADEQUACY AFTER REGENERATOR REVAMP

Abstract

After 26 years of the ArcelorMittal Tubarão furnace operation, some walls presented a steep drop in the extreme chamber's temperature affecting on the thermal distribution. The purpose of this study is to discuss about the operational actions needed for the regenerator revamp, its thermal control and to make a comparison between the wall thermal distribution before and after the revamp. Thus, the chamber's temperature alongside the wall was taken before and after the revamp and the reference chamber's temperature during the revamp, controlling the temperature of them. Considering the batteries' age, the thermal distribution alongside the walls of the revamped regenerator shows a considerable improve. The coke furnace thermal control plays an important role on the extension of the batteries lifetime.

Key-words: Regenerator; Coke furnace; Thermal distribution.

¹ Contribuição técnica ao 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 11º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 19 a 22 de setembro de 2010, Belo Horizonte, MG.

² Engenheira de Produção em Metalurgia e Materiais – ArcelorMittal Tubarão.

³ Bacharel em Ciências Econômicas – ArcelorMittal Tubarão.

⁴ Bacharel em Administração – ArcelorMittal Tubarão.

⁵ Bacharel em Ciências Contábeis – ArcelorMittal Tubarão.

⁶ Doutor em Engenharia Metalúrgica pela USP – Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais/PROPEMM/IFES.

1 INTRODUÇÃO

A coqueria da Arcelormittal Tubarão possui três baterias de fornos de coque, modelo *Carl Still Half-Divided*, com 49 fornos cada, totalizando 147 fornos. Possuem ao todo 150 paredes de aquecimento com 32 câmaras de combustão em cada parede (17 são no lado máquina (LM) e 15 do lado coque (LC)), totalizando 4.800 câmaras. O lado máquina é onde o embolo da máquina desenformadora empurra a massa de coque e o lado coque é onde a massa de coque sai do interior do forno e é guiada até a caçamba de apagamento a seco. Cada forno é aquecido por duas paredes, a parede do forno e a parede do forno posterior (forno n e forno $n + 1$), ou seja, uma parede aquece dois fornos distintos, com exceção das paredes extremas da bateria. As três baterias podem ser aquecidas com gás de coqueria (COG) ou misto (MG) mistura do gás de alto forno e de coqueria, a queima do gás de coqueria só acontece esporadicamente, sendo consumido principalmente o gás misto. O combustível é então queimado em ciclos alternados de 20 minutos em cada lado. O gás misto é admitido para combustão no sistema *Underjet*, passando pela válvula de reversão, válvula de bloqueio (ou de gás), caixa de fumaça, canal *sole-flue* e regeneradores. Cada bateria tem 50 caixas de fumaça, e na combustão do gás misto uma caixa admite ar e a outra gás, alternadamente. O gás é distribuído em cada câmara de combustão na soleira através de uma coluna vazada em seis níveis de queima a partir da base das câmaras, garantindo maior uniformidade da temperatura vertical da parede do forno.

O ar para combustão é admitido através da tiragem natural da chaminé (160 m), passando através das caixas de fumaça e regeneradores onde é pré-aquecido.

Durante a combustão das câmaras do lado coque as câmaras de combustão do lado máquina estão recebendo a fumaça gerada desta combustão e vice-versa.

A fumaça resultante da queima passa através de um canal horizontal superior no forno, sendo succionado pelas câmaras do lado em sucção, passando através dos regeneradores para troca de calor, caixas de fumaça, canais longitudinais de fumaça, canal principal e chaminé. A Figura 1 esboça o sistema de combustão para gás misto.

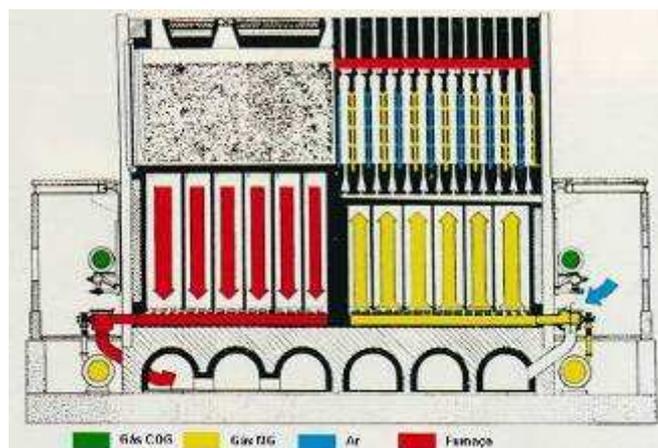


Figura 1: Sistema de combustão com gás misto. **Fonte:** Acervo ArcelorMittal Tubarão.

Na Figura 2 tem-se um esquema do regenerador com queima de gás misto (MG).

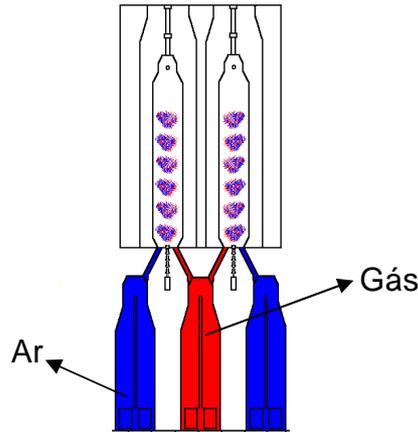


Figura 2: Esquema do regenerador com queima de gás misto. **Fonte:** Acervo ArcelorMittal Tubarão.

Os regeneradores têm papel importante no aquecimento dos fornos de coque, pois fazem o aquecimento do ar e do próprio gás misto (MG) que são admitidos para combustão, enquanto a outra metade (regeneradores) absorve o calor da fumaça resultante da combustão. Qualquer anormalidade nesta região do forno pode acarretar interferências na distribuição térmica da parede correspondente. São constituídos por tijolos sílica aluminosos, do tipo cheker e palito em sua maioria, caso o regenerador seja de gás, possui 5 painéis no lado máquina (LM) e 4 painéis no lado coque (LC), caso seja de ar, possui 4 painéis em ambos os lados (LM e LC). A Figura 3 esboça a bateria de fornos de coque modelo *Carl Still Half-Divided*.

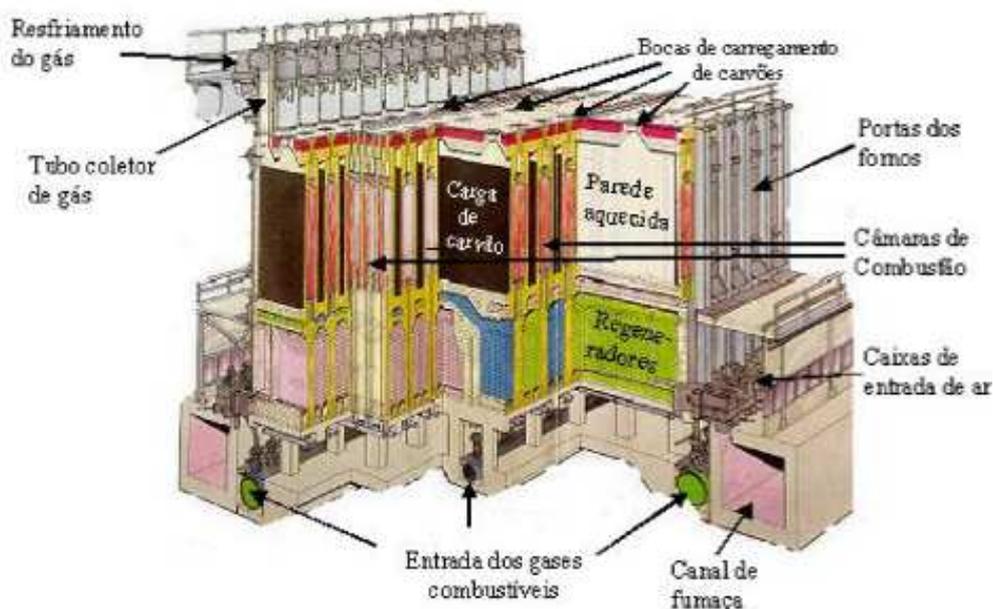


Figura 3: Bateria de fornos de coque modelo "Carl Still Half-Divided".¹¹⁾

Através da leitura da temperatura no sentido transversal, das câmaras 1 a 32 de fornos recém coqueificados (leitura cross wall), onde a temperatura é mais estável e representativa, obtém-se a distribuição térmica da parede.

A distribuição térmica adequada (teoricamente) de uma parede pode ser visualizada na Figura 4.

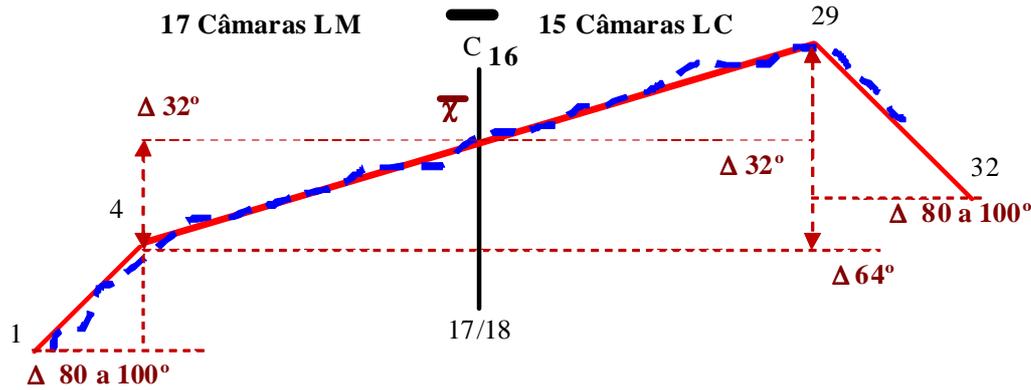


Figura 4: Distribuição térmica ideal. Fonte: Acervo ArcelorMittal Tubarão.

Em função da conicidade do forno (lado coque maior do que o lado máquina) para melhor escoamento do coque durante o desenformamento, a câmara 29 deve possuir temperatura superior a câmara 4, para uma distribuição térmica adequada a diferença entre essas câmaras deve ser de 64°C.

Após 26 anos de operação algumas paredes dos fornos apresentaram redução da temperatura das câmaras extremas, apresentando distorção na distribuição térmica. A Figura 5 mostra a distribuição térmica média da bateria.

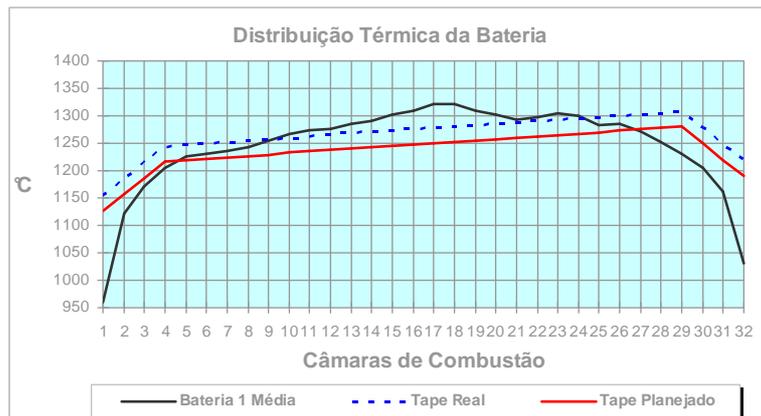


Figura 5: Distribuição térmica média da bateria. Fonte: ArcelorMittal Tubarão.

Existem vários fatores que afetam a distribuição horizontal da temperatura da parede, para se manter a boa distribuição da temperatura é necessário manter o controle dos seguintes pontos:

- Sucção das Caixas de Fumaça → Ajuste da distribuição de ar e gás para as câmaras de combustão estabelecendo uma perda de carga entre sucção das paredes e chaminé.
- Controle da Combustão → Controlar a sucção ar/gás para atingir o melhor rendimento para combustão, através do ajuste da tiragem da chaminé ou ajuste da caixa de fumaça.
- Regulagem Individual de Câmaras de Combustão → Ajuste do tijolinho de regulagem das câmaras de combustão com temperaturas com diferenças maiores que 20 °C das câmaras adjacentes.

O objetivo deste trabalho é relatar as ações operacionais necessárias para a reforma do regenerador de um forno de coque, o controle térmico no decorrer do serviço bem como comparar a distribuição térmica da parede de combustão do forno antes e após a reforma do regenerador.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Seleção do Forno

A seleção do forno baseia-se na avaliação da distribuição térmica (leitura *cross wall*) da parede, após a leitura *cross wall* da parede realizou-se ajuste da combustão e inspeção das câmaras. Repetiu-se o *cross wall* após o ajuste, confirmando a necessidade de reforma no regenerador.

Selecionou-se o forno 26, por apresentar temperatura baixa no lado máquina (LM) causando distorção na distribuição térmica da parede. A Figura 6 apresenta o gráfico de temperatura ao longo da parede 26 antes de reformar o regenerador lado máquina (LM) com combustão de gás misto (MG).

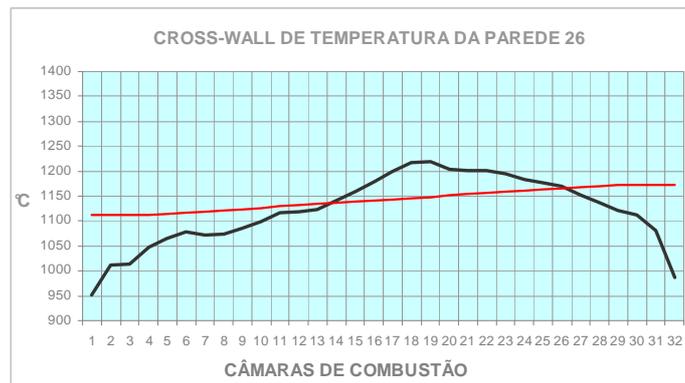


Figura 6: Temperatura ao longo da parede 26 antes de reformar o regenerador.

A parede 26 apresentava temperatura média de 1144°C sendo que a temperatura média da bateria no mesmo período estava em 1256°C, ou seja, a parede 26 estava 112°C abaixo da média da bateria.

2.2 Procedimentos Operacionais

Para execução dos serviços refratários no regenerador do forno algumas ações foram necessárias, garantindo a integridade dos fornos e a segurança dos operadores envolvidos na atividade.

O forno definido para reparo no regenerador (forno 26) e os fornos antecessor e posterior (25 e 27) foram mantidos com carga (coque), o forno antecessor ao forno 25 e posterior ao 27 (24 e 28) foram mantidos com tempo de coqueificação de 24 horas, visto que as paredes envolvidas na reforma permaneceram sem queima, sendo necessário manter a temperatura para preservação dos tijolos refratários.

Todos os serviços iniciaram às 6 horas e por isso quando a coqueificação dos fornos 25, 26 e 27 antecedia ao início do serviço, controlava-se a temperatura do forno em 1150°C (+/- 20°C).

Antes da liberação do forno para o serviço refratário foram executadas as seguintes atividades:

- manter os fornos 25, 26 e 27, isolados do coletor de gás com a tampa do tubo de ascensão travada na posição fechada, conforme Figura 8(a);
- manter as bocas dos fornos 25, 26 e 27, fechadas, conforme Figura 8(b);
- efetuar a troca de gás de misto (mg) para gás do coqueria (cog);

- fechar as válvulas de gás (misto e de coqueria) das paredes 26 e 27 (lados máquina e coque), retirar o braço das válvulas reversivas de gás de coqueria dos fornos 26 e 27 no lado da execução do serviço no regenerador, deixando as mesmas na posição fechada;
- isolar metade do canal sole flue (caixa de fumaça do forno 25 e 27) lados máquina e coque, conforme Figura 9(a);
- desconectar correntes do prato e da tampa da caixa de fumaça da parede 26 (lados máquina e coque), conforme Figura 9(b);
- deixar a tampa da caixa de fumaça do forno 26 (lados máquina e coque) com ligeira passagem de ar, conforme Figura 9(c);
- restringir a válvula borboleta (quadrante) das caixas de fumaça dos fornos 25 e 27 (lados máquina e coque), mantendo uma sucção de aproximadamente 17 mmca, garantindo a pressão do topo; e
- colocar paletas nas caixas de fumaça dos fornos 25 e 27 (lados máquina e coque) deixando apenas 10 ~15 mm para passagem de ar.

Caso a reforma no regenerador aconteça por um período superior a 1 semana é necessário instalar lança para injeção de gás nas câmaras extremas (1, 2, 31 e 32) das paredes 26 e 27 para controle da temperatura. A Figura 7 apresenta um desenho esquemático representando os fornos que ficaram cheios e os que ficaram com índice operacional de 100%.

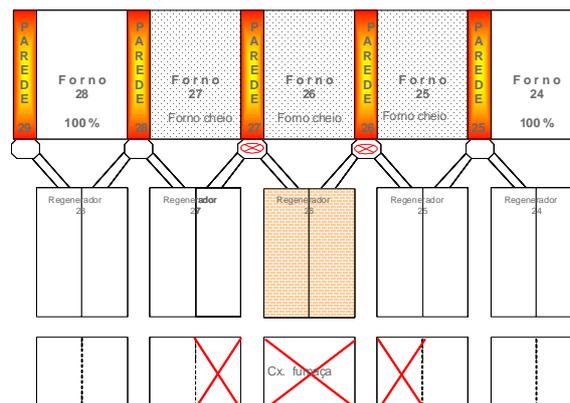
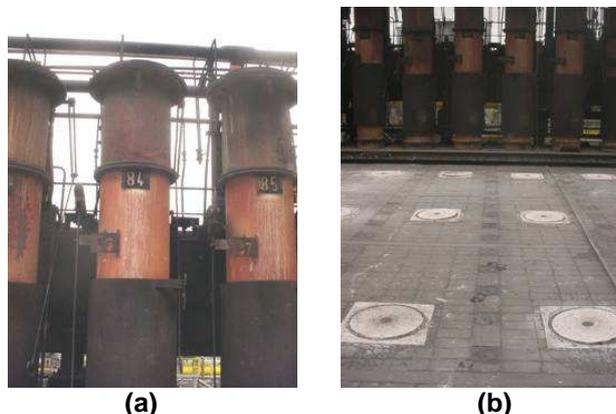


Figura 7: Desenho esquemático do regenerador a ser aberto e fornos que ficam carregados. **Fonte:** ArcelorMittal Tubarão.

As Figuras 8(a) e 8(b) mostram a tampa do tubo de ascensão travada na posição fechada e as bocas dos fornos 25, 26 e 27 fechadas e vedadas.



Figuras 8 (a) e (b): (a) Isolamento tampa do tubo de ascensão travada na posição fechada e (b) Bocas dos fornos 25, 26 e 27, fechadas e vedadas. **Fonte:** Acervo ArcelorMittal Tubarão.

As Figuras 9(a), 9(b) e 9(c) mostra isolamento da metade do canal sole flue no interior da caixa de fumaça, caixa de fumaça do forno n com corrente do prato desconectada e caixa de fumaça do forno n com tampa fechada caixa, com pequena abertura.



(a)



(b)



(c)

Figuras 9 (a), (b) e (c): (a) Isolamento da metade do canal sole flue da caixa de fumaça feito nos fornos 25 e 27, (b) Caixa de fumaça do forno 26 com corrente do prato desconectada e (c) Caixa de fumaça do forno 26 com tampa ligeiramente aberta. **Fonte:** Acervo ArcelorMittal Tubarão.

2.3 Controle de Temperatura

As paredes 26 e 27, que estão com gás fechado, são mantidas com o calor residual do coque que está coqueificado no interior do forno. Durante a reforma do regenerador é necessário conhecer a temperatura dos fornos envolvidos, para isso mede-se a temperatura das câmaras de referencia (1, 4, 16, 18, 29, 32) das paredes dos fornos 24, 25, 26,27, 28 e 29, logo após a coqueificação dos fornos 26 e 27, 8 horas após a primeira leitura e depois no intervalo de 4 em 4 horas. A temperatura dos fornos 25 e 28 são controladas na média em 1.150°C ($\pm 20^{\circ}\text{C}$), sendo possível atuar na válvula de gás de coqueria caso seja necessário.

As câmaras de combustão das extremidades, que mais perdem calor residual são as câmaras 1 e 32 caso a temperatura abaixe de 960°C , deverão receber calor adicional de lanças com gás COG, que são inseridas no seu interior, visando manter a temperaturas no interior da câmara em valores aceitáveis para as condições refratarias.

Visando não perder calor residual do coque, as tampas dos fornos, tampas dos tubos de ascensão ficaram travadas/fechadas e os fornos ficaram isolados do coletor de gás, conforme Figuras 8(a) e 8(b). Outra ação tomada foi o fechamento dos canais de ar para combustão, que foram vedados, na medida em que os tijolos do interior do regenerador foram retirados. As Figuras 10(a) e 10(b) ilustram o fechamento dos canais de ar para combustão com manta térmica.



(a)



(b)

Figuras 10 (a) e (b): (a) Canal de ar aberto para câmara de combustão (condição normal com regenerador em operação) e (b) Canal de ar fechado, evitando entrada de ar para câmara de combustão e esfriamento da mesma. **Fonte:** Acervo ArcelorMittal Tubarão.

2.4 Retorno do Forno após Reforma

Assim que a reforma do regenerador é concluída, todo o procedimento operacional do item 2.2 é desfeito iniciando a elevação da temperatura dos fornos 25, 26 e 27 para a média (câmaras 4, 16, 18 e 29) em 1.150°C ($\pm 20^{\circ}\text{C}$), em seguida realizada inspeção da coqueificação do forno (contração) e liberado o desenformamento.

Neste caso o aquecimento é feito com gás de coqueria (COG) e após o desenformamento retorna-se com o gás misto (MG).

Nos casos em que a reforma foi realizada em todo o regenerador (lado máquina ou lado coque) inicialmente realizou-se o aquecimento do regenerador reformado (recebimento da fumaça) aquecendo-se primeiramente o forno do lado oposto ao do regenerador reformado. Para acompanhamento da elevação da temperatura do regenerador, colocaram-se termopares na parte superior da capela do regenerador em ambos os lados e assim que a temperatura do regenerador reformado se aproximou da temperatura do regenerador do lado oposto, a queima do lado da reforma do regenerador foi liberada (aquecimento da parede).

Os fornos em que o regenerador lado máquina (LM) e lado coque (LC) foram reformados tiveram um intervalo de 2 semanas para iniciar a reforma do lado oposto. Após recolocação dos tijolos no interior do regenerador (tijolos em temperatura ambiente), se faz necessário elevar a temperatura gradativamente, afim de que os mesmos não tenham choque térmico e alguma danificação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação da Distribuição Térmica

A reforma do regenerador do forno 26 teve a duração de 64 horas e 21 minutos. Seis dias após a reforma do regenerador o forno 26 ficou vazio (sob controle de temperatura) para reforma anual onde foram realizadas as seguintes atividades: limpeza do canal sole flue, canal de fumaça e canal de gás, troca das correntes do prato e janela da caixa de fumaça, lubrificação das válvulas de bloqueio e reversiva e troca do *doorframe*.

Vinte e cinco dias após a reforma do regenerador realizou-se a leitura *cross wall* da parede 26. A Figura 11 apresenta o gráfico de temperatura ao longo da parede em

questão, 25 dias após a reforma do regenerador lado máquina (LM) com combustão de gás misto (MG).

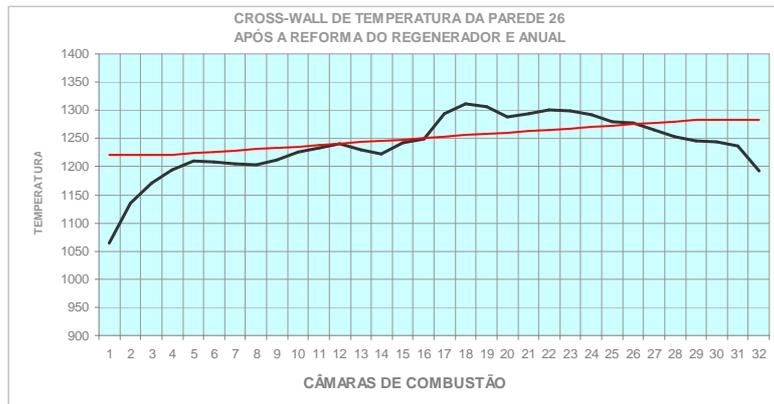


Figura 11: Temperatura ao longo da parede 26, vinte e cinco dias após a reforma do regenerador.

Com menos de 1 mês após a reforma do regenerador lado máquina (LM) e com apenas 12 dias do término da reforma anual do forno 26, a parede 26 apresentou um ganho médio de 109°C. A temperatura média da parede estava em 1253°C, sendo que a temperatura média da bateria no mesmo período estava em 1261°C, ou seja, a parede 26 apresentou 8°C à menor à média da bateria.

Após 54 dias da reforma do regenerador realizou-se nova leitura *cross wall* da parede 26. A Figura 12 apresenta o gráfico de temperatura ao longo da parede 26 com combustão de gás misto (MG).

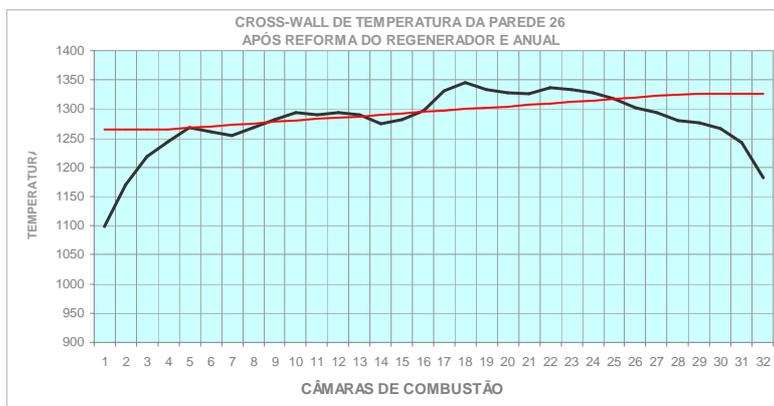


Figura 12: Temperatura ao longo da parede 26, cinquenta e quatro dias após a reforma do regenerador.

A parede 26 apresentou um ganho médio de 154°C após a reforma do regenerador. A temperatura média da parede foi de 1298°C, sendo que a temperatura média da bateria no mesmo período estava em 1254°C, ou seja, a parede 26 apresentou 44°C acima da média da bateria.

Na Figura 13 é possível visualizar melhor o ganho térmico na média da bateria.

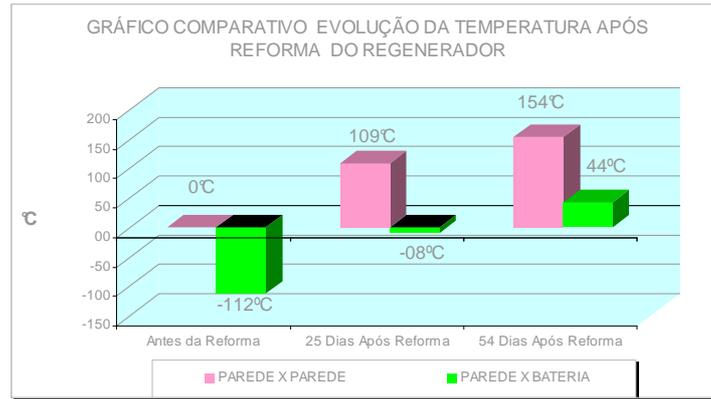


Figura 13: Comparativo da temperatura média parede x parede e parede x bateria.

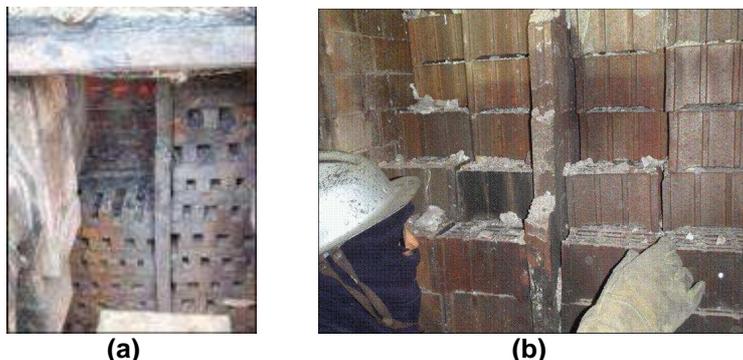
3.2 Execução do Serviço Refratário

Inicialmente retirou-se a chapa inclinada, liberando o acesso a parede de tijolos em seguida inicia-se a demolição da parede de isolamento. A Figura 14(a) e 14(b) mostra o acesso ao regenerador e a demolição da parede de isolamento, respectivamente.



Figuras 14 (a) e (b): (a) Retirada da chapa inclinada e (b) Demolição da parede de isolamento. Fonte: Acervo ArcelorMittal Tubarão.

Em seguida inicia-se a demolição parcial da parede de fechamento do regenerador tendo acesso à parte interna do regenerador (tijolo palito), após a retirada da primeira camada de tijolo palito é retirado o tijolo cheker. A demolição do regenerador é feita por compartimento. A troca dos refratários da parede 26 foi realizada somente no 1º compartimento do regenerador. A Figura 15(a) e 15(b) mostra a primeira camada de tijolo palito e tijolo cheker.



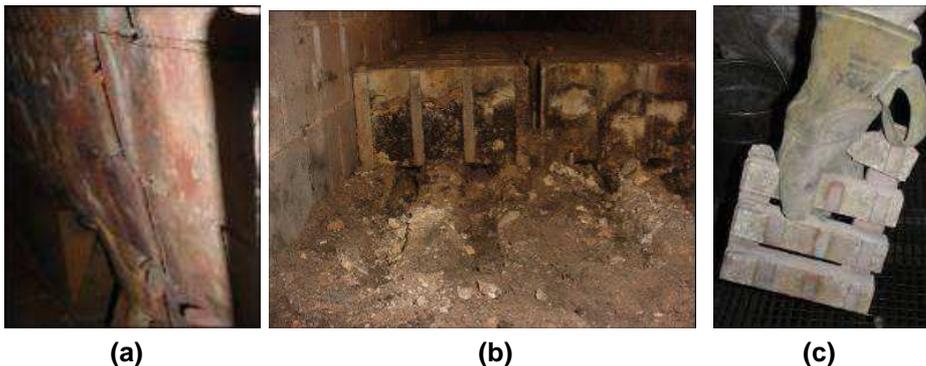
Figuras 15 (a) e (b): (a) 1ª Camada de tijolo palito e (b) Retirada do tijolo cheker. Fonte: Acervo ArcelorMittal Tubarão.

Ao concluir a retirada dos tijolos cheker inicia-se a retirada da segunda camada de tijolo palito chegando ao canal sole flue. A Figura 16 (a) e (b) mostra a segunda camada de tijolo palito e vista superior do canal sole flue.



Figuras 16 (a) e (b): (a) 2ª Camada de tijolo palito e (b) vista superior do canal sole flue. **Fonte:** Acervo ArcelorMittal Tubarão.

Durante a execução do serviço encontrou-se grande quantidade de juntas abertas nas extremidades das paredes, excesso de resíduos entre os tijolos palito e cheker, peças de tijolos fundidas com outros tijolos e / ou agregado com materiais diversos, parte inferior totalmente obstruída por grande quantidade de finos. Ressaltando que 50% dos tijolos palitos estavam danificados. A Figura 17(a), 17(b) e 17(c) mostram junta aberta, sujeira no interior do regenerador e tijolo fundido, respectivamente.



Figuras 17 (a), (b) e (c): (a) Junta aberta, (b) Sujeira no regenerador e (c) Tijolo fundido. **Fonte:** Acervo ArcelorMittal Tubarão.

Durante a montagem do regenerador aproveitou-se parte dos tijolos antigos, o rejuntamento das juntas abertas foi realizado com fibra cerâmica e argamassa de acordo com a montagem do regenerador. A Figura 18(a) e 18(b) mostram reparo da junta aberta com fibra cerâmica e argamassa.



Figuras 18 (a) e (b): (a) Junta com aplicação de fibra cerâmica, (b) Aplicação de argamassa. **Fonte:** Acervo ArcelorMittal Tubarão.

A parede de isolamento do regenerador é montada de acordo com a montagem do regenerador, impossibilitando o desalinhamento dos tijolos. As Figuras 19(a), 19(b) e 19(c) mostram a montagem do regenerador, fechamento do regenerador e parede de isolamento fechada respectivamente.



Figuras 19 (a), (b) e (c): (a) Montagem do regenerador, (b) Fechamento da parede de trabalho do regenerador e (c) Parede de isolamento fechada. **Fonte:** Acervo ArcelorMittal Tubarão.

A reforma do 1º compartimento do regenerador do forno 26 foi realizada em 02 dias com regime de trabalho de 2 turnos de 12 horas.

3.3 Retorno do Forno após Reforma

Para se ter condições de desenformamento dos fornos envolvidos no reparo, a temperatura das câmaras piloto, estavam em média (das câmaras 4, 16, 18 e 29) em 1150°C (+/-20 °C). A inspeção visual do coque no interior dos fornos apresentou ausência de manchas escuras, assim como as paredes, liberando-se o desenformamento / enformamento dos fornos com intervalo de 3 horas entre os fornos, carga seca de enformamento entre 26 e 27 t, e tempo bruto para o próximo desenformamento em torno de 22 h.

4 CONCLUSÃO

Baterias de fornos de coque com tempo de operação superior a 20 anos costumam apresentar alterações em sua distribuição térmica, proveniente das condições da estrutura refratária que compõem o forno.

Um acompanhamento nas condições dos refratários dos fornos e de sua estrutura metálica deve ser realizado periodicamente, prolongando a vida útil dos fornos.

A distribuição térmica adequada da parede além de ser importante para garantir a homogeneização da coqueificação e o desempenho operacional do forno, também garante o prolongamento da vida útil dos fornos, visto que temperaturas próximas das temperaturas de transformação de fase da sílica afetam os refratários de sílica, conseqüentemente reduzindo a vida útil da bateria.

A parede de combustão do forno 26 apresentou melhora significativa em sua distribuição térmica, tendo como resultado um melhor desempenho operacional do forno e a preservação dos tijolos refratários.

REFERÊNCIA

- 1 COSTA, L.C. Parâmetros de controle do processo de coqueificação das baterias de coque da Cosipa. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008, p.31.