

PROCESSO DE RESFRIAMENTO DE UMA BATERIA DE FORNO DE COQUE *

Anton Skyrda Veríssimo¹
Ricardo Leite Passos²

Resumo

A manutenção da bateria do forno de coque é uma operação recorrente devido aos rigores das operações do dia-a-dia. No entanto, quando pequenos reparos em paredes individuais são necessários, reparos a quente podem ser feitos com o desligamento temporário do forno em questão. Se a eficiência dos fornos for inferior a 70% ou se mais de 50% dos fornos precisarem ser reparados com perdas de produção, é mais interessante do ponto de vista econômico resfriar toda a bateria e realizar manutenções programadas e otimizadas. Isso ocorre porque é muito difícil trazer a bateria de volta à sua forma original de produtividade por meio de reparos a quente ocasionais. Uma bateria operando com menos de 70% de sua capacidade nominal perderá um mês de produção total a cada 3,5 meses. Portanto, fazer a manutenção com a bateria resfriada pode resolver de uma única vez inúmeros problemas que se desenvolveram ao longo do tempo, reduzindo o tempo de reparo e retomando antecipadamente a sua produtividade. Neste trabalho são apresentadas técnicas para resfriar toda a bateria mantendo sua integridade. Simulações numéricas foram realizadas usando FLUENT /ANSYS para análise de fluxo e KFCSIM desenvolvido e validado pela AESTUS para transferência de calor transiente.

Palavras-chave: Bateria de coque; Técnicas de Resfriamento; Queimadores de Alta Velocidade; Simulação Numérica.

PROCESS OF COOLING DOWN A COKE OVEN BATTERY

Abstract

Coke oven battery maintenance is a recurring operation due to the rigors of day-to-day operations. However, when minor repairs to individual walls are required, hot repairs can be made with temporary shutdown of this furnace in question. If the efficiency of the furnaces is less than 70% or if more than 50% of the furnaces need to be repaired with production losses, it is more interesting from an economic point of view to cooling down the entire battery and perform programmed and optimized maintenance. This is because it is very difficult to bring the battery back to its original form of productivity by occasional hot repairs. A battery operating at less than 70% of its rated capacity will lose one month of total production every 3.5 months. Therefore, make the maintenance with the cooled battery can solve numerous problems that have developed over time all at once, drastically reducing repair time and resume battery as early as possible. In this work, techniques for cooling the entire battery while maintaining its integrity are presented. Numerical simulations were performed using FLUENT /ANSYS for flow analysis and KFCSIM developed and validated by AESTUS for transient heat transfer.

Keywords: Coke Oven Battery; Cooling Down Techniques; High Velocity Burner; Numerical Simulation.

¹ Msc Engenharia e Tecnologia Espaciais, Doutor em Engenharia Mecânica, Pós-Doc Engenharia Térmica, Chefe do Depto de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação, AESTUS/Thermojet, Pindamonhangaba – SP, Brasil.

² Engenheiro Metalúrgico, Diretor Executivo, AESTUS/Thermojet do Brasil, Pindamonhangaba – SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Uma coqueria é composta por uma série de fornos de coque, também conhecidos como baterias de coque, onde ocorre a carbonização do carvão. O processo de carbonização consiste na queima do carvão em um ambiente controlado, com baixo teor de oxigênio, resultando na transformação do carvão em coque.

As baterias de coque podem enfrentar alguns problemas em sua operação. Alguns dos principais problemas relacionados às baterias de coque incluem:

1. **Desgaste e deterioração dos fornos:** Os fornos de coque estão expostos a altas temperaturas e ambientes corrosivos, o que pode causar desgaste e deterioração ao longo do tempo. Isso pode levar a vazamentos de gases e diminuição da eficiência do processo.
2. **Emissões poluentes:** A coqueria é uma fonte significativa de emissões poluentes, incluindo gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NO_x). Essas emissões podem contribuir para a poluição atmosférica e as mudanças climáticas, exigindo a implementação de medidas de controle de poluição.
3. **Problemas de saúde e segurança:** A operação das baterias de coque envolve trabalhos em ambientes perigosos, com riscos de exposição a produtos químicos tóxicos e inflamáveis. Os trabalhadores podem estar sujeitos a problemas de saúde relacionados à inalação de gases e partículas perigosas, exigindo a implementação de medidas de segurança adequadas.
4. **Eficiência energética:** O processo de coqueria consome uma quantidade considerável de energia para atingir as altas temperaturas necessárias. O uso intensivo de energia pode contribuir para a demanda global de energia e aumentar a emissão de gases de efeito estufa, a menos que sejam implementadas melhorias na eficiência energética.

Para mitigar esses problemas, as indústrias têm buscado aprimorar as tecnologias de coqueria e implementar medidas de controle de poluição, como a captura e armazenamento de carbono (CAC), o uso de filtros e sistemas de tratamento de gases. Além disso, pesquisas estão em andamento para desenvolver alternativas mais sustentáveis ao coque, como a produção de coque a partir de biomassa ou o uso de outros combustíveis alternativos na indústria siderúrgica.

Por outro lado, quando uma coqueria apresenta algum tipo de avaria é necessário que se realize reparos para continuar a sua operação de forma segura e eficiente. Muitas vezes quando o reparo é pequeno e em poucos fornos, pode-se utilizar técnicas de reparo a quente, como solda cerâmica, sem parar a bateria por completo. Quando envolve a troca de material refratário em grandes quantidades que não seja possível a utilização de solda cerâmica e não se deseja parar a bateria faz-se a substituição dos tijolos. Esta substituição é feita por trabalhadores que devem entrar em um ambiente resfriado. Para isso é necessário parar uma parte da bateria, geralmente nos fornos adjacentes no forno onde ocorrerão os reparos. A segurança das paredes adjacentes é alcançada devido à manutenção da temperatura (750 – 850 °C) nas paredes de aquecimento durante o reparo, excluindo assim as transformações da sílica. Entretanto, muita das é necessário o revezamento dos trabalhadores de acordo com o Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo (IBUTG). Também por questão de segurança, os serviços

devem ser interrompidos sempre quando se tem o deslocamento do carro empurrador (*push car*). Isso acarreta tempos mais longos para realizar os reparos, pois um trabalhador tem um curto tempo para assimilar e continuar o trabalho de onde parou o outro e com isso, maior tempo de parada para retomar o forno.

Estes reparos não garantem que a bateria volte ao seu estado inicial de produtividade necessitando, muitas das vezes, em mais reparos adicionais, impactando diretamente na produção. Neste caso, é necessário realizar uma avaliação econômica do tempo de parada, materiais utilizados e garantia de retomada da eficiência da coqueria. Estima-se que, dependendo do escopo do reparo e dos tamanhos padrão das baterias de fornos de coque, o custo do reparo a quente é de 30 a 40% do custo do reparo a frio semelhante (OKOS, 2010). Lembrando que nos reparos a quente, temos a necessidade de utilizar tijolos de sílica de não expansíveis ou mais popularmente conhecidos de tijolos de “expansão zero”, sendo que ele custa de 17 a 20 vezes o valor de um tijolo de sílica usual. Por outro lado, esse número muda quando mais de 50% da coqueria requer reparos ou a eficiência dos fornos estão abaixo dos 70%. Uma bateria operando abaixo de 70% de sua capacidade nominal equivale a perda de um mês de produção total a cada 3,5 meses. Logo, uma parada com a bateria resfriada poderá resolver inúmeros problemas gerados ao longo do tempo de uma única vez, reduzindo drasticamente o tempo de reparo e retomada da bateria.

As principais vantagens de se resfriar uma coqueria são:

- Trabalhar com segurança e rapidez em toda a etapa da reforma;
- Redução drástica de dispositivos para manter a integridade das paredes (*hot repair*);
- Antecipação de meses e até anos de operação;
- Reparo a frio tem-se maior número de empresas habilitadas;
- Redução de mão de obra de terceiros (menor custo e risco em segurança);
- Ganho expressivo na produtividade durante a reforma;
- Redução no índice de absenteísmo, comparado com a bateria em operação (*hot repair*);
- Disponibilidade de COG (*Coke Oven Gas*) para o processo produtivo e geração de energia.

A experiência tem demonstrado que se a bateria for resfriada deliberadamente para evitar as objeções acima apontadas, ou acidentalmente, a contração diferencial que ocorre na alvenaria refratária resulta em perda da bateria devido a formação excessiva de rachaduras principalmente nas paredes de aquecimento, ou, na melhor das hipóteses, redução acentuada de sua vida útil e perda de eficiência operacional durante o restante de sua vida útil reduzida. Entretanto, diversas baterias ao redor do mundo já foram resfriadas por diferentes motivos e depois aquecidas para voltarem a produção. A coqueria de Indiana Harbor Coke Company L.P. foi resfriada e realizada a reforma a fim de reduzir a emissão de poluentes, (EPA, 2005).

Kosyrczyk et al (2014) relatam as condições precárias que a bateria de Jadwika na Polônia operava. Devido ao espaço necessário para a construção de uma nova planta e os custos envolvidos decidiram resfriar a bateria, realizar a sua reforma e reaquentá-la para retomar a produtividade conforme o seu projeto inicial.

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre o resfriamento controlado da bateria de coque de maneira que se possa realizar a manutenção necessária a frio, com segurança e, posteriormente, o seu aquecimento para operação nas condições na qual ela foi concebida.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Transformações Químicas no Tijolo Refratário

A composição dos tijolos de cada parede varia com pouca variação na concentração de sílica variando de 95% a 98% de SiO_2 . A sílica é composta de unidade estrutural básica tetraédrica de SiO_2 . Já na sílica cristalina os átomos de oxigênio e silício são agrupados dentro de um padrão regular com uma fórmula geométrica média de SiO_2 , constituindo em três formas principais de sílica cristalina: quartzo, cristobalita e tridimita. Quando o quartzo é submetido a grandes variações de temperatura, como é o caso do tijolo refratário, ele sofre alteração na sua estrutura cristalina, passando para tridimita e cristobalita até a sua fusão, conforme é mostrado na Figura 1. É importante salientar que a passagem do quartzo para cristobalita ou tridimita envolve quebras de ligações siloxano, Si-O-Si, portanto envolve grandes quantidades de energia e é pouco reversível. Em outras palavras, é necessário grandes quantidades de energia para que tais transformações ocorram. Da mesma forma, com uma grande quantidade de energia é empregada para a transformação da tridimita e para esta voltar ao estado de quartzo é muito pouco provável, conforme as medições que serão apresentadas a seguir.

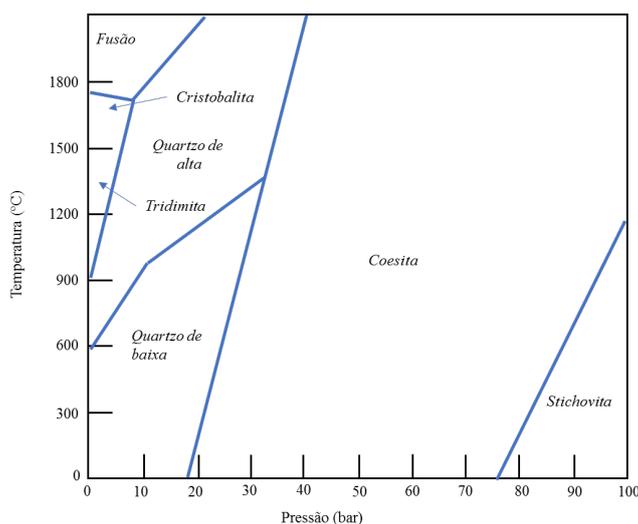


Figura 1. Diagrama de fases dos principais polímeros cristalinos naturais da sílica (adaptado de Melosh 2007).

2.2 Análise dos Tijolos Refratários

Para entender as transformações que ocorrem com o tijolo refratário da bateria, foram coletadas amostras do forno para análise de sua composição. As amostras são mostradas na Figura 2. A amostra denominada seminova 1 foi retirada da parte superior, no topo e a seminova 2 da parte inferior, próximo a soleira. Da mesma forma para as amostras denominadas usada 1 e 2. A diferença entre elas é que as amostras seminovas têm menos de um ano de instalação na bateria enquanto as usadas têm acima de 10 anos.



Figura 2. Amostras de tijolo refratário utilizados na bateria de coque.

Para realizar a análise da composição química foi empregada a técnica de difração de raio X, denominada DRX, cujo resultados são apresentados na Figura 4. Um fato extremamente importante é que em nenhuma amostra foi encontrado quartzo. Como era esperado observou-se maior concentração de tridimita na amostra Usada 2 comparada com a Usada 1. Por outro lado, as amostras semi-novas não apresentaram variações significativas de suas composições. Isso porque a amostra Usada 2 está localizada na região de maior temperatura, com o passar do tempo há a diminuição da formação da cristobalita no tijolo refratário. Como a bateria opera em elevadas temperaturas, a cristobalita sofreu transformações de fase para a tridimita, (Stevens et al, 1997) e (Pabst et al, 2014).

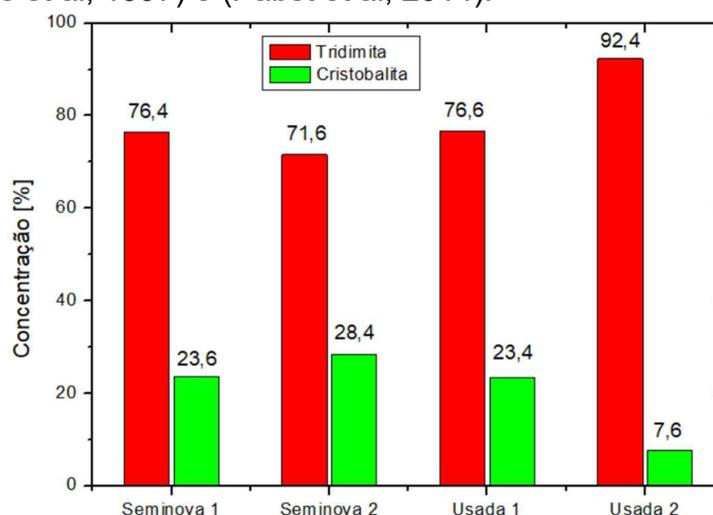


Figura 3. Análise das amostras de refratário.

A THERMOJET DO BRASIL tem realizado diversos trabalhos tanto de aquecimento como de resfriamento de abóbodas de fornos de vidros e regeneradores de alto forno, que, por sua vez, são constituídos também de sílica. Estes trabalhos foram realizados nos últimos 20 anos e compõe um acervo técnico detalhado de mais de

900 resfriamentos e aquecimentos, todos realizados com sucesso e total segurança. Baseado nesses dados reais e através das análises da composição química encontradas nos refratários semi novos e usados, pode-se afirmar que tanto o aquecimento como o resfriamento em fornos de coque seguem comportamentos similares aos das abóbodas de fornos de vidro e regeneradores de alto forno. Assim, serão explanados os fundamentos para realizar o resfriamento dos fornos da coqueria.

2.3 Expansão e Contração do Tijolo Refratário

O tijolo de sílica, quando aquecido ou resfriado a temperaturas abaixo de cerca de 870 °C, expande ou contrai, respectivamente. Na Figura 4 são apresentadas as expansões de cada elemento constituindo de um tijolo refratário novo. Acima de cerca de 870 °C, nenhuma expansão ou contração significativa ocorre. Dentro da faixa de 650 a 870°C, a extensão da expansão ou contração, conforme o caso, é relativamente pequena. Mudanças de temperatura na faixa de 650°C a 540 °C causam expansão ou contração do tijolo de sílica, conforme o caso, de cerca de 0,05%; dentro da faixa de 540 °C a 430 °C, ocorre contração ou expansão do tijolo de sílica de cerca de 0,06%; e dentro da faixa de 430 a 315 °C, a contração ou expansão do tijolo de sílica, conforme o caso pode ser, é da ordem de cerca de 0,12%. Abaixo de 315 °C, a contração ou expansão do tijolo de sílica é ainda mais acentuada em comparação com as mudanças que ocorrem de 315 a 430 °C.

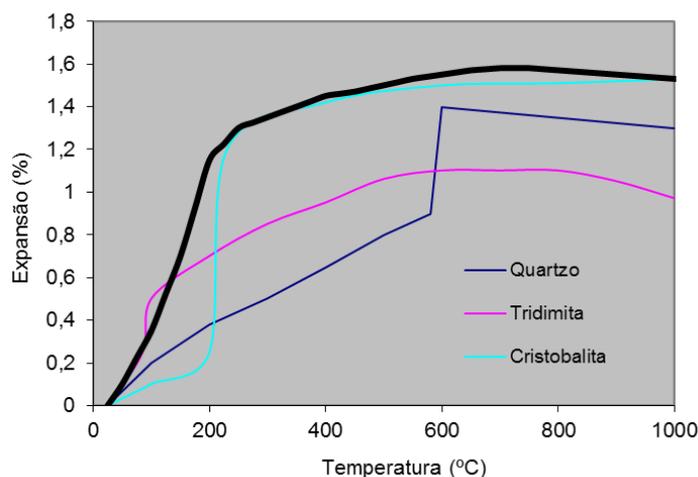


Figura 4. Variação da expansão do tijolo refratário com a temperatura.

O problema básico no uso de refratários de sílica em reparos a quente é a manutenção da durabilidade e estanqueidade ao gás de uma junta vertical contínua entre as porções de alvenaria velha e nova devido a deformações no aquecimento, causadas pela expansão linear térmica significativa da sílica 1,2-1,4%. Um dos grandes desafios é o controle da expansão/contração dos tijolos. Para entender a influência de cada elemento químico é necessário obter a derivada da expansão de cada um deles. A derivada da curva da Figura 4 é apresentada na Figura 5. Através dessa curva é possível identificar os picos bem como a maior taxa de expansão dos diversos componentes. Note que a cristobalita é a maior contribuinte para a variação das dimensões do tijolo, seguido da tridimita e, finalmente, pelo quartzo. Durante o

aquecimento é preciso ter o máximo de controle para que o forno. Em suas paredes e juntas absorvam as dilatações destas transformações por igual.

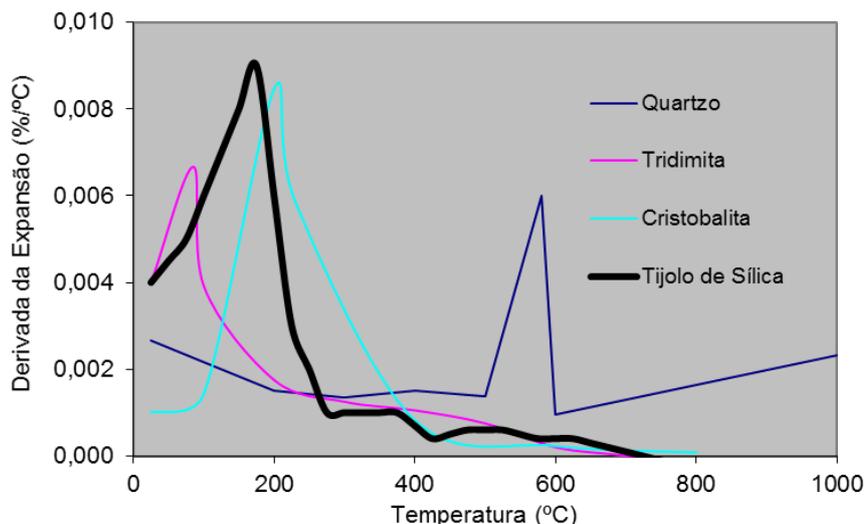


Figura 5. Derivada da expansão dos constituintes do tijolo refratário.

Devido a isso, reparos de alvenaria de baterias de fornos de coque são realizados usando módulos de quartzo fundido, com baixo coeficiente de expansão térmica 0,2-0,3% os chamados refratários não expansíveis.

2.4 Estudo da Curva de Aquecimento ou Resfriamento

O resfriamento da bateria de coque requer os mesmos cuidados e controle de seu aquecimento. É imprescindível que se realize levando em consideração a distribuição uniforme de temperatura nos fornos. Para isso é necessário recorrer a queimadores convectivos a fim de ter a homogeneidade da temperatura, seguindo estritamente uma curva de resfriamento programada. Nestes últimos anos um software foi desenvolvido e validado para definir as curvas de aquecimento/resfriamento de refratário comercial. Este software foi desenvolvido pela AESTUS e é chamado de KFSIM. Este software leva em consideração a composição química do refratário e seu fabricante, tempo de aquecimento e a curva de temperatura proposta pelo fabricante. Através do método de diferenças finitas, na qual consiste em dividir o refratário em várias partes, ou elementos, e então reconecta os elementos em pontos chamados nós. Assim, é realizado uma simulação transiente do refratário e analisada as características de expansão/contração.

Na Figura 6 é apresentada um estudo sobre uma otimização da curva. A curva é projetada de forma a diminuir os picos de expansão/contração. A curva inicial, em vermelho, representa a curva fornecida pelo fabricante do refratário para o aquecimento de uma bateria em 57 dias. Note que há muitos picos e que, para a preservação da bateria, eles devem ser evitados controlando durante o aquecimento/resfriamento. Entretanto, através do KFSIM é proposta uma nova curva com o objetivo de minimizar tais picos, realizando a transferência de calor de maneira mais atenuada e segura para a bateria.

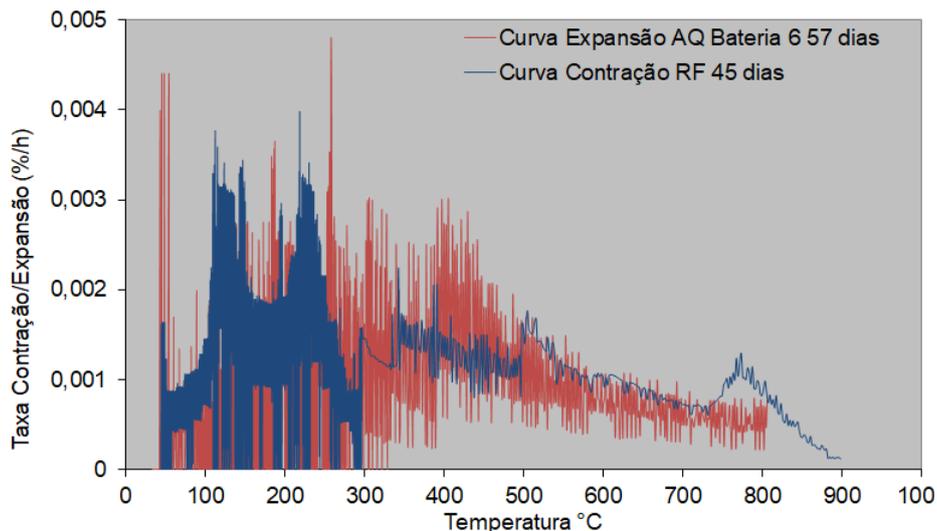


Figura 6. Estudo de otimização da curva de aquecimento através dos picos de expansão/contração.

2.5 Estudo do Método Convectivo para Resfriamento

É de fundamental importância que para se ter um bom aquecimento ou resfriamento dos fornos é necessário que a temperatura seja homogênea. Para isso, é imprescindível ter queimadores que operem com velocidades elevadas de modo a transferir o calor gerado durante o processo de queima de forma igualitária ao longo de toda a superfície do refratário. Para avaliar se um determinado equipamento cumpre esse requisito é necessário um estudo prévio recorrendo a simulações numérica levando em consideração todas as características do forno, como discutidas até o momento.

Na Figura 7 é mostrada a representação física da bateria de coque e seus fornos. Para avaliar a distribuição de temperatura do queimador convectivo foram selecionados dois fornos adjacentes, conforme é mostrado na figura. Através deles é possível avaliar a transferência de calor através do movimento dos gases quentes gerados pelo queimador.



Figura 7. Domínio computacional de uma coqueria vertical.

Uma vez selecionada a geometria, passa-se a construção da malha computacional. O software empregado para a simulação numérica é o FLUENT fornecido pela

ANSYS. O malhador utilizado é o ANSYS MESHING utilizado malhas cartesianas com refinamento nas curvas e proximidades, com resolução de aproximadamente 50 mm. Para se estabelecer o valor foi realizado um estudo de independência de malha. Uma amostra é apresentada na Figura 8. É importante salientar que quanto mais fina for a resolução da malha, maior será o tempo computacional.

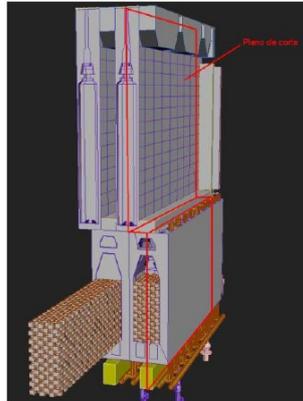


Figura 8. Malha computacional e representação do plano para apresentação dos resultados numéricos.

Para a turbulência foi empregado o modelo $k-\epsilon$ realizável, para a combustão o modelo de equilíbrio químico e para a radiação o modelo das ordenadas discretas. A Figura 9 apresenta os resultados da simulação numérica para um forno de uma coqueria vertical. O queimador utilizado tem velocidade a 150 m/s a saída, queimado GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), podendo variar a sua temperatura conforme a curva de aquecimento, sendo a sua carga máxima de 2.500 Gcal/h. Note que a temperatura é bem distribuída, com variações de 0,7 °C ao longo de seu comprimento. Outro fato importante é que toda a superfície do refratário é varrida pelos gases quentes gerados pelo queimador, característica típica do método convectivo de aquecimento/resfriamento.

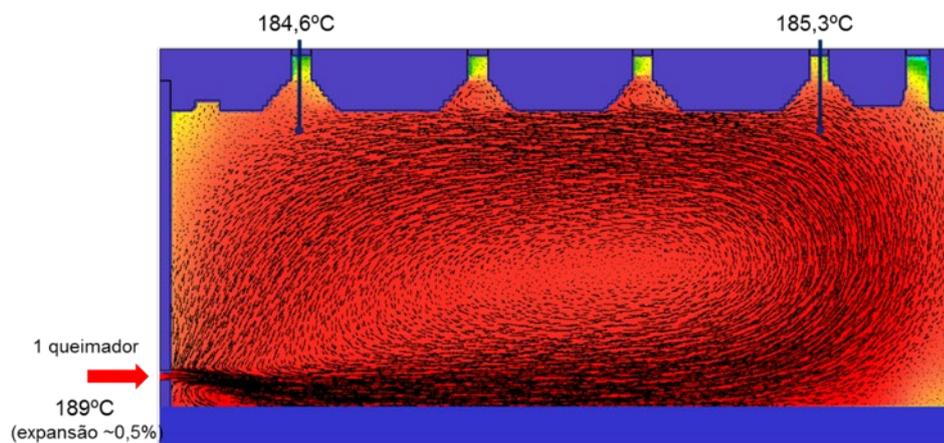


Figura 9. Resultado da simulação numérica no forno da coqueria.

É imprescindível que se tenha a distribuição homogênea de temperatura para realizar o aquecimento ou o resfriamento dos fornos. A termos comparativos dos queimadores utilizados pela Thermojet é apresentado na Figura 10 a disposição dos equipamentos no forno de coqueria vertical e na Figura 11 o posicionamento dos termopares nos fornos e na Figura 12 as medidas de temperatura efetuadas durante o aquecimento. Note que devido as características do queimador as temperaturas

permaneceram uniformes durante todo o aquecimento da bateria. A homogeneidade de temperaturas do sistema da Thermojet reflete na uniformidade da expansão longitudinal e transversal da bateria, conforme pode-se visto na Figura 13.



Figura 10. Posicionamento dos queimadores para controle de temperatura.

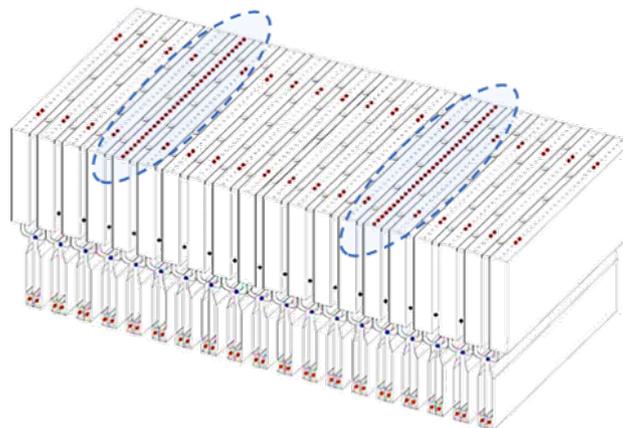


Figura 11. Disposição dos termopares na coqueria.

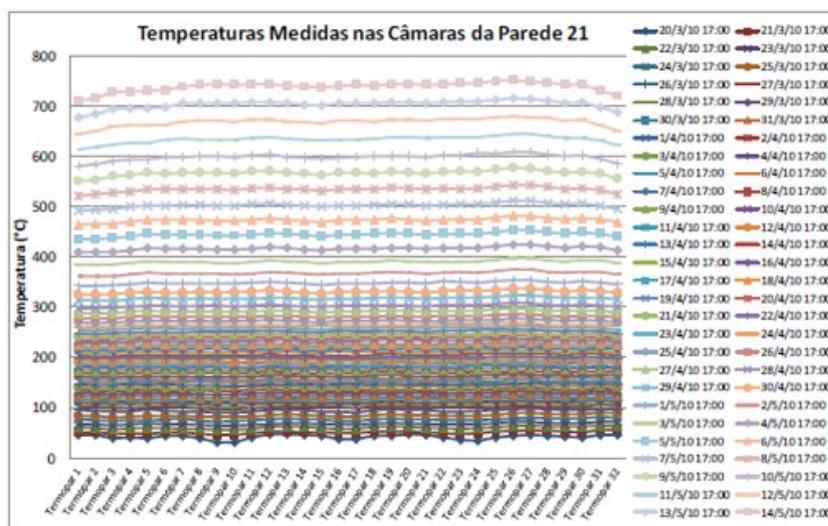


Figura 12. Monitoramento da temperatura durante o aquecimento da coqueria.

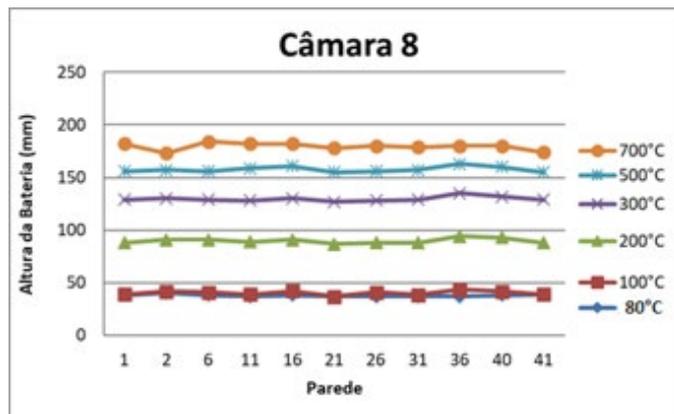


Figura 13. Medidas de expansão da coqueria.

3 CONCLUSÃO

O reparo a frio é uma técnica eficiente para restaurar a integridade estrutural dos fornos de coque, prolongando sua vida útil e evitando a necessidade de desligamentos prolongados para reparos mais complexos. O estudo aqui apresentado mostra que é possível realizar o resfriamento controlado dos fornos para o reparo e, posteriormente, reaquecê-lo sem perder a bateria, garantindo que volte a operar em sua performance na qual foi projetada para operar. Esta operação deve ser realizada com equipamentos adequados e projetados para esse fim, mantendo a homogeneidade do aquecimento/resfriamento, como os apresentados aqui. Uma vez resfriada e efetuados os reparos é necessário realizar uma limpeza minuciosa nas juntas antes de aquecer os fornos de forma que não haja impurezas que afetem a sua expansão. Por outro lado, os picos de expansão/contração para baterias com maior tempo de duração devem ser menores, uma vez que a concentração de tridimita é maior que a cristobalita, sendo que a tridimita apresenta menores taxas de expansão e contração. Com os fornos resfriados os reparos são feitos com segurança, reduzindo o tempo de parada dos fornos. Considerando que uma bateria ineficiente equivale a perda de um mês de produção total a cada 3,5 meses, em um ano a bateria pode perder cerca de 4 meses de produtividade! Com a proposta apresentada aqui, pode-se considerar que é possível realizar todo o trabalho de resfriamento, reparo e aquecimento da bateria entre 120 a 150 dias, através de uma parada programada, o que torna a parada parcial ou total da coqueria para reparos a frio muito viável economicamente.

REFERÊNCIAS

- 1 OKOS, 2010: Restoration of technical condition of coke oven batteries by hot repairs of refractory brickwork disponível em: www.okos.ru/
- 2 Melosh, HJ. A hydrocode equation of state for SiO₂, Meteoritics & Planetary Science; 2007; 42:2019-2098
- 3 Stevens SJ, Hand RJ and Sharp JH. Temperature dependence of the cristobalite ($\alpha - \beta$) inversion, Journal of Thermal Analysis, 1997;19:1409-1415.
- 4 Pabst W, Gregorová E, Kutzendörfer J. Elastic anomalies in tridymite- and cristobalite-based silica materials, Ceramics International, 2014; 40(3):3829-5106.

- 5 Kosyrczyk L. , Smółka C. , Sobala Z. The repair of the coke plant „Jadwiga” coke oven battery from the 10 years of the non-failure exploitation perspective; Piece Przemysłowe & Kotły; 2014; 5-6: 48-53
- 6 EPA, Environmental Protection Agency; 2005;70 FR 19992: 19992-20015.]