

HEATING-UP DA COQUERIA 3 DA USINA DE IPATINGA DA USIMINAS¹

Luiz Cláudio Costa²
Antonio Marcos de Oliveira³
Israel Almeida Rodrigues⁴

Resumo

Uma coqueria é construída, principalmente, com tijolos de sílica. Para que os fornos possam operar normalmente, após a montagem, é necessário um processo de secagem e aquecimento, conhecido como pré-aquecimento ou *heating-up*. Este processo precisa ser bem planejado e controlado de tal forma que todas as fases cristalográficas do tijolo de sílica sofram transformação sem danificar a estrutura refratária e metálica da coqueria. O presente trabalho mostra a metodologia do *heating-up*, desde a secagem até a temperatura atingir cerca de 1050°C. São apresentados as curvas de temperatura e de dilatação do corpo da Bateria 6 da Coqueria 3 da Usiminas, na Usina de Ipatinga. O *heating-up* foi feito em duas etapas, sendo que a primeira foi realizada com um sistema convectivo, utilizando gás liquefeito de petróleo (GLP) como gás combustível, e a segunda (após 800°C) foi utilizado o próprio sistema de aquecimento da coqueria, com a queima de gás de coqueria nas câmaras de combustão dos fornos. O *heating-up* atingiu o objetivo traçado tanto nas curvas de temperatura quanto nas curvas de dilatação do corpo refratário da bateria.

Palavras-chave: Coqueria; Aquecimento; Refratários; Tijolos de sílica.

HEATING-UP OF USIMINAS COKE OVEN PLANT 3

Abstract

A coke plant is built mainly with silica bricks. For the ovens to operate normally after the assembly, special care is needed in the process of drying and heating, known as heating-up. This process must be well planned and controlled so that all crystallographic phases of silica brick are transformed without damaging the coke plant structure of refractory. This work shows how heating-up was done, since the drying until the temperature reaches about 1.050°C. Graphs are presented of temperature and dilation curves of the batteries. The heating-up was done in two steps, the first step was performed with a convective system, using LPG as fuel gas, and the second step (after 800°C) it is used its own coke oven heating system with burning coke oven gas in the combustion flues of the heating walls. The heating-up reached the aim outlined in the temperature curves and in the expansion curves.

Key words: Coke plant; Heating-up; Refractory; Sílica bricks.

¹ Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

² Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, M.Sc. Gerência de Processos da Redução; Usiminas Cubatão, SP, Brasil.

³ Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Gerência Técnica da Redução; Usiminas Ipatinga, MG, Brasil.

⁴ Membro da ABM, Técnico Metalurgista, Gerência de Coqueria; Usiminas Ipatinga, MG, Brasil

1 INTRODUÇÃO

A bateria de fornos de uma Coqueria é composta, principalmente, de tijolos refratários de sílica. A sua construção exige precisões milimétricas no assentamento dos tijolos. Invariavelmente, durante a construção, há bastante retrabalho com demolição e reassentamento devido a variações de 2 ou 3 mm entre o medido e o esperado. Essa exigência rigorosa é necessária, pois, a alvenaria refratária deverá ser estanque à gás durante toda a sua vida útil estimada de 30 anos. O tijolo de sílica tem características especiais quanto à dilatação com o calor.⁽¹⁾ Para uma estrutura refratária que tem grandes dimensões (até 20 metros de comprimento do forno) e rigor milimétrico, quando submetida a variações de calor em torno de 200°C precisa ter alta estanqueidade e seu tijolo não pode sofrer nem dilatação nem contração, com essa variação de temperatura. O tijolo de sílica em temperaturas acima de 800°C tem essa característica, ou seja, ele praticamente não dilata acima dessa temperatura. Essa característica do tijolo de sílica em relação à outros tijolos refratários é mostrada na Figura 1.⁽²⁾ As variações da curva de dilatação da sílica é mostrado na Figura 2.⁽³⁾ Essa variação é função dos constituintes do tijolo que ficaram após a queima na sua fabricação, ou seja, vai depender da quantidade de sílica em cada uma de suas fases, como a tridimita, a cristobalita e os quartzos alfa e beta que ficaram no final da fornada do lote de tijolos. Dependendo dessa composição, os pontos de inflexão da curva de dilatação mudam.

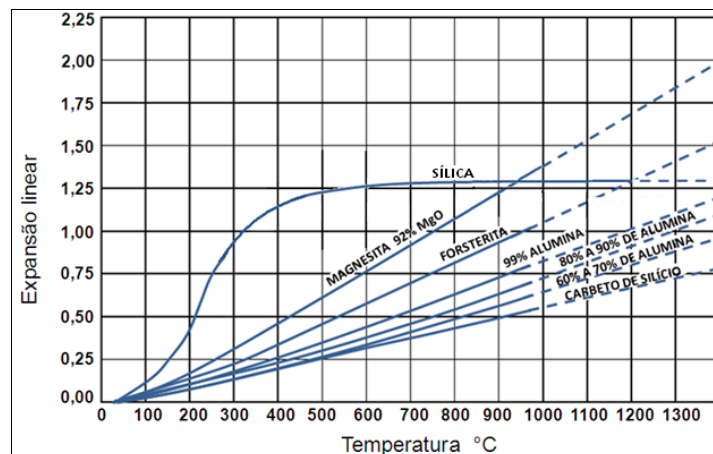


Figura 1 – Curvas de dilatação de diversos materiais refratários.

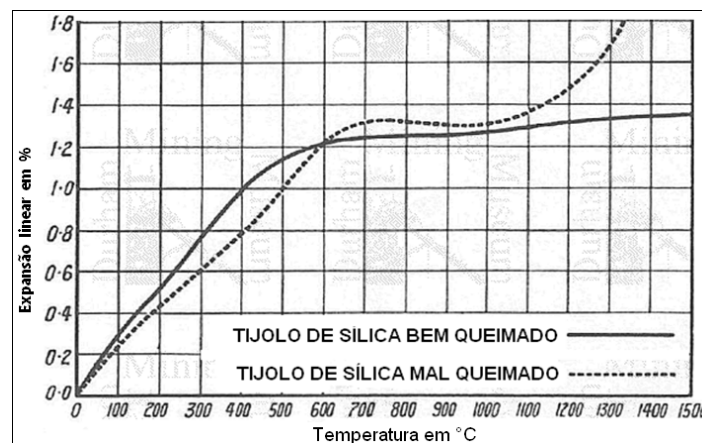


Figura 2 – Curvas de dilatação de tijolos de sílica de fornadas diferentes.

Se o tijolo de sílica, praticamente, não dilata acima de 800°C, abaixo desse valor a realidade é muito diferente. Observa-se (Figura 1) as grandes variações nas taxas de dilatação, principalmente, próximo das temperaturas de 110°C e 220°C. Essa característica nessas temperaturas trás duas preocupantes restrições do tijolo de sílica. A primeira é que esse tijolo deve ser aquecido muito lentamente e de forma que sua dilatação seja linear até 800°C. A segunda restrição é que, após ser aquecido acima de 800°C, esse tijolo não pode ser mais resfriado, sob o risco de trincar ou lascar devido à heterogeneidade do seu resfriamento, principalmente, na região central da estrutura refratária, que no caso de uma coqueria, tem grandes dimensões. Devido a essas características do tijolo de sílica, o aquecimento dos fornos da coqueria requer um cuidado especial para garantir que toda a estrutura refratária dilate uniformemente e dentro das dimensões esperadas. Isto é necessário para que essa estrutura refratária se mantenha bem encaixada na estrutura metálica e estanque.

O *heating-up* é dividido em duas etapas, sendo a primeira entre a temperatura ambiente e 800°C na qual o aquecimento é realizado com calor inserido dentro dos fornos. A segunda etapa, a partir de 800°C, é utilizado gás de coqueria injetado nas câmaras de combustão. Assim, para iniciar o *heating-up*, os sistemas de queima de gás de coqueria pelo *underjet* e o sistema de reversão têm que estar prontos e testados, de forma que, ao atingir 800°C, eles possam entrar em operação imediatamente para dar continuidade à curva de aquecimento. Isso é fundamental porque, com o sistema normal de aquecimento dos fornos, as temperaturas da região dos regeneradores e dos canais *soleflue* ficam dentro de seu valor normal de trabalho, enquanto que, durante *heating-up*, o sistema de aquecimento pelos fornos, mesmo mantendo a temperatura em 800°C, a tendência é que a região dos regeneradores atinja temperaturas acima de sua faixa projetada, podendo danificar os tijolos e abrir trincas na estrutura desses regeneradores. Assim não é possível, ao final da primeira etapa, esperar a normalização do sistema de aquecimento da bateria para iniciar a segunda etapa.

A forma de aquecimento da primeira etapa, até 800°C, pode ser feita pelo sistema aspirado ou convectivo. O sistema aspirado consiste na utilização de um gás combustível, geralmente o gás de coqueria, que é queimado dentro do forno em um empilhamento de tijolos, colocado nos dois lados do forno, para proteger as paredes da chama direta. Os fumos aquecidos são aspirados pela chaminé através de orifícios no alto das paredes que se comunicam com as câmaras de combustão. O fluxo de fumos aquecidos segue dos fornos para as câmaras de combustão, destas para os regeneradores, canais *soleflues*, caixas de fumaça, canal de fumaça e finalmente para a chaminé. Todo o percurso é feito em depressão, succionado pela tiragem da chaminé. Nesse sistema, o cuidado maior é garantir que as câmaras extremas acompanhem a temperatura das demais regiões do forno. No momento da mudança do sistema de aquecimento pelos fornos para o aquecimento utilizando gás de coqueria pelas câmaras de combustão, é necessário que todas as câmaras estejam acima da temperatura de ignição do gás de coqueria. Caso isso não aconteça, é necessário que a ignição seja forçada pelo topo da câmara de combustão.

O sistema convectivo consiste na queima de um gás combustível, que pode ser o GLP ou o gás natural, num queimador externo para aquecimento do ar, que é injetado forçadamente por meio de ventiladores. Esse sistema não precisa de empilhamento de tijolos dentro do forno e pode ser instalado em apenas um lado do forno, evitando um trabalho da retirada desse empilhamento nos preparativos para o

primeiro enformamento. O fluxo do gás aquecido é o mesmo do sistema anterior, mas, na região do forno, a pressão é positiva e a distribuição do gás mais eficiente, de forma que, mesmo as câmaras extremas têm sua temperatura subindo junto com as demais regiões. As diferenças dos fluxos de calor dos dois sistemas dentro do forno são apresentadas na Figura 3. Na Figura 3a é apresentado o método com gás de coqueria e tiragem pela chaminé. Na Figura 3b é apresentado o sistema convectivo com entrada de ar forçado, mantendo o interior do forno com pressão positiva. As setas mostram a melhor distribuição do gás quente no sistema convectivo do que no aspirado.

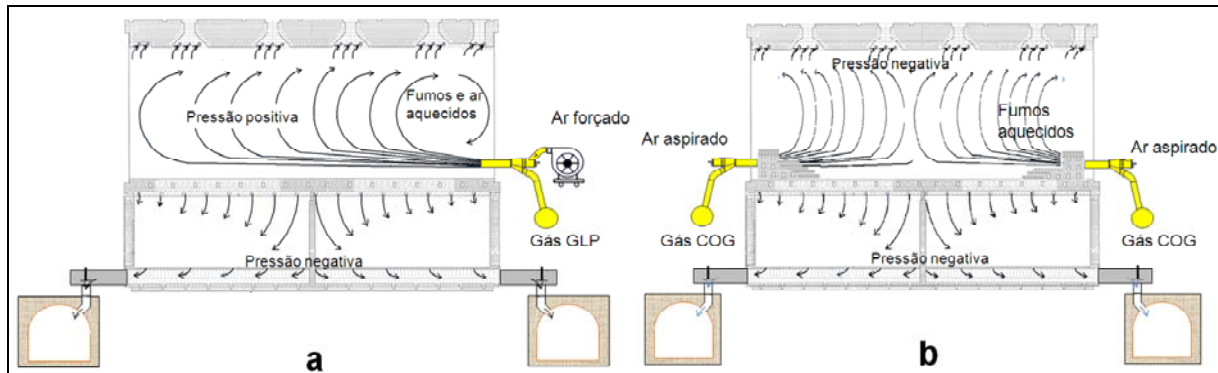


Figura 3 – As duas formas de heating-up dos fornos de uma bateria.

Para ambos os sistemas, é necessário que a chaminé esteja funcionando, ou seja, que esteja fazendo a tiragem. Por isso, a primeira etapa do heating-up é a partida da chaminé, que consiste no aquecimento de sua base.

No presente trabalho é apresentado a metodologia do *heating-up* da Coqueria 3 da Usiminas, Usina de Ipatinga. Essa coqueria é composta de duas baterias de 40 fornos cada com 6 metros de altura e sistema de aquecimento do tipo *underjet*. A primeira fase do heating-up foi feito pelo sistema convectivo, com GLP, cujos serviços foram contratados de uma empresa especializada nesse tipo de aquecimento de fornos. Essa empresa ficou responsável pelo controle da curva de aquecimento até 800°C sob supervisão do construtor da coqueria e da equipe da operação da Usiminas. A partir de 800°C, o aquecimento foi assumido pela equipe de operação da Usiminas sob supervisão do construtor.

2 PREPARATIVOS PARA O HEATING-UP

O primeiro passo do processo de *heating-up* é a determinação da curva de temperatura dos refratários. Através da amostragem de tijolos em todas as fornadas é traçada uma curva conforme a Figura 2 e selecionados os lotes que estão dentro do limite de tolerância. Com a média dos valores de dilatação obtidos em todos os lotes aprovados é traçada a curva média de dilatação. Mesmo assim, as diferenças ainda existentes entre os lotes dentro da tolerância são diluídas através da distribuição dos tijolos durante o assentamento. A partir dessa curva de dilatação é traçada a curva de temperatura dos tijolos com o tempo que irá nortear o aquecimento da bateria.

O *heating-up* foi iniciado antes de terminar a montagem do topo dos fornos. Isto porque é necessário aguardar a dilatação total dos tijolos para fazer o fechamento das canaletas dos tirantes transversais e longitudinais, colocar as bases

dos trilhos da máquina enforadora e inserir massa nas juntas de dilatação que são deixadas na região do topo.

A partida da chaminé, ou seja, o aquecimento de sua base, também foi feita pelo sistema convectivo.

Para o aquecimento dos fornos foram preparados canhões de injeção de gás quente inseridos em uma abertura na parte inferior da porta do lado da desenforadora. Foram instalados termopares para os fornos e para as câmaras de combustão. Também foram feitos os ajustes nas portas para vedação dos fornos e o tamponamento da base dos tubos de ascensão. Na Figura 4 são apresentadas as fotos da posição dos canhões nos fornos da bateria.



Figura 4 – Detalhes dos canhões de injeção de gás quente. a) Ventiladores posicionados abaixo da plataforma de serviço. b) Detalhe do canhão posicionado no orifício da porta do forno.

3 HEATING-UP PELO SISTEMA CONVECTIVO ATÉ 800°C

A curva definida para a secagem e *heating-up* das baterias é mostrada na curva pontilhada da Figura 8. A curva seguiu a taxa de expansão de 0,024% por dia e começa com 10 dias de secagem, com sopro de gás quente. Após esses 10 dias, começou o *heating-up* propriamente dito com a elevação da temperatura dentro da curva estipulada, num total de 47 dias. A temperatura (T) foi monitorada em vários pontos como é mostrado na Figura 5. Os pontos representam a localização dos termopares no forno e nas câmaras de combustão. Em todas as paredes os termopares estão nas câmaras 8 e 26 e em algumas paredes estão nas câmaras 1,3 30 e 32 e em uma parede em todas as câmaras. Em todos os regeneradores e caixas de fumaça foram colocados termopares tanto no lado da desenforadora (OS) quanto no lado do coque (CS).

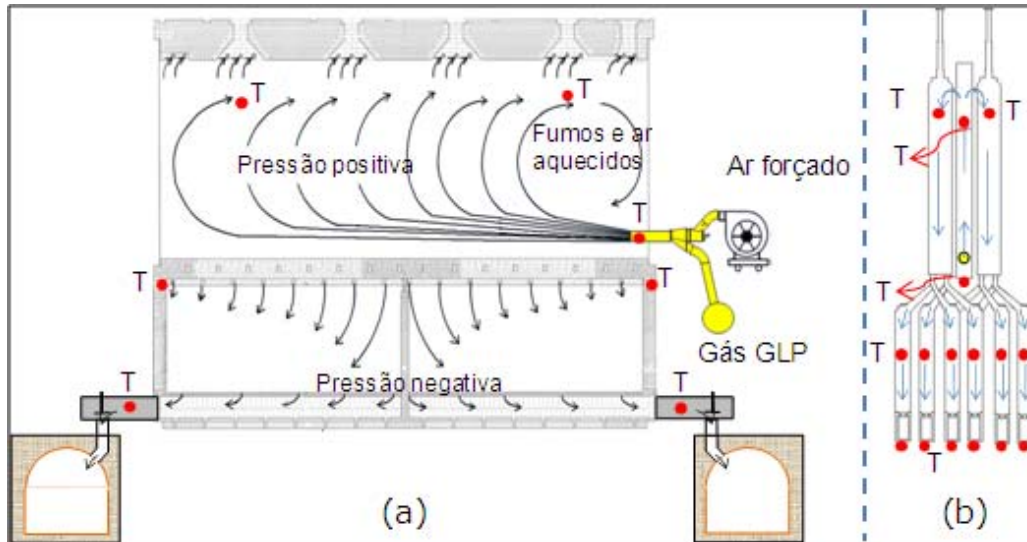


Figura 5 – Desenho esquemático da distribuição dos pontos de medição de temperatura durante o aquecimento convectivo..

A temperatura do interior do forno ficou ligeiramente superior à temperatura de dentro da câmara de combustão. Todo o controle da injeção do gás quente foi feito baseado nessas temperaturas e também nas temperaturas dos regeneradores e caixas de fumaça. No caso das caixas de fumaça e regeneradores, o monitoramento foi realizado para evitar que a temperatura nessas regiões atingisse valores acima do permitido. Quando a temperatura nessas regiões subia mais do que o programado, eram abertas passagens de ar que reduziam essa elevação de temperatura. O controle da temperatura em todos os pontos de medição foi feito através da variação da vazão de ar soprado, da temperatura do gás quente e através da tiragem da chaminé, regulada nos canais de fumaça e individualmente em cada caixa de fumaça.

A cada dois dias foram feitas as medições de dilatação das paredes de aquecimento e a cada sete dias, as medições de dilatação na altura da bateria. Sempre que era encontrada alguma irregularidade na dilatação, era avaliada a causa e, se necessário, a curva de aquecimento seria paralisada, o que não ocorreu em nenhum momento. Uma idéia da evolução da dilatação da bateria tendo como referência os tirantes transversais e longitudinais em dois momentos do *heating-up* é apresentado na Figura 6. Na Figura 6a, o aquecimento está no início onde observa-se os tirantes ainda por cima dos tijolos do topo. Na Figura 6b, já próximo de 800°C, os tirantes já estão dentro das canaletas, mostrando a dilatação vertical da bateria.



Figura 6 – Fotos da bateria em dois momentos da dilatação.

Até atingir 500°C, todos os trabalhos no corpo da bateria ficaram limitados ao controle da temperatura e às medições de dilatação e das molas dos tirantes e *buckstays*. A partir de 500°C começaram a serem retomadas as atividades finais de montagem como o preenchimento das juntas do topo com massa mais líquida que deve penetrar na alvenaria fechando as juntas restantes. Essa massa foi também colocada nas junções entre a estrutura metálica e a parede refratária nas extremidades das paredes. A massa nas juntas começou a ser colocada quando a temperatura atingiu valores acima de 550°C, quando as dilatações da região já estavam acima de 80% do seu final e a temperatura ainda não estava tão alta que impedisse a penetração dessa massa nas juntas.

Ao atingir 800°C, o aquecimento foi estabilizado, visando a mudança do tipo de aquecimento para gás de coqueria pelas câmaras de combustão.

4 AQUECIMENTO COM GÁS DE COQUERIA APÓS 800°C

Ao atingir 800°C nas bases das câmaras, já era possível haver ignição do gás de coqueria. Nesse momento foi iniciada a preparação para mudança do aquecimento convectivo para o sistema de queima de gás pelo sistema normal de aquecimento da bateria, ou seja, pela tubulação de gás de coqueria, *manifolds*, dutos *underjet* e base da câmara, com saída da fumaça pelos regeneradores. O sistema de reversão passou a funcionar a partir desse momento, com alternância de queima de 30 em 30 minutos.

Na Figura 7 é apresentado o esquema de aquecimento do tipo *underjet* com gás de coqueria. Cada parede é alimentada por dois manifolds de gás, um para as paredes ímpares e outro para as paredes pares. Num mesmo ponto de reversão fica em queima as câmaras ímpares das paredes pares e as câmaras pares das paredes ímpares. No ponto seguinte da reversão é feita a troca.

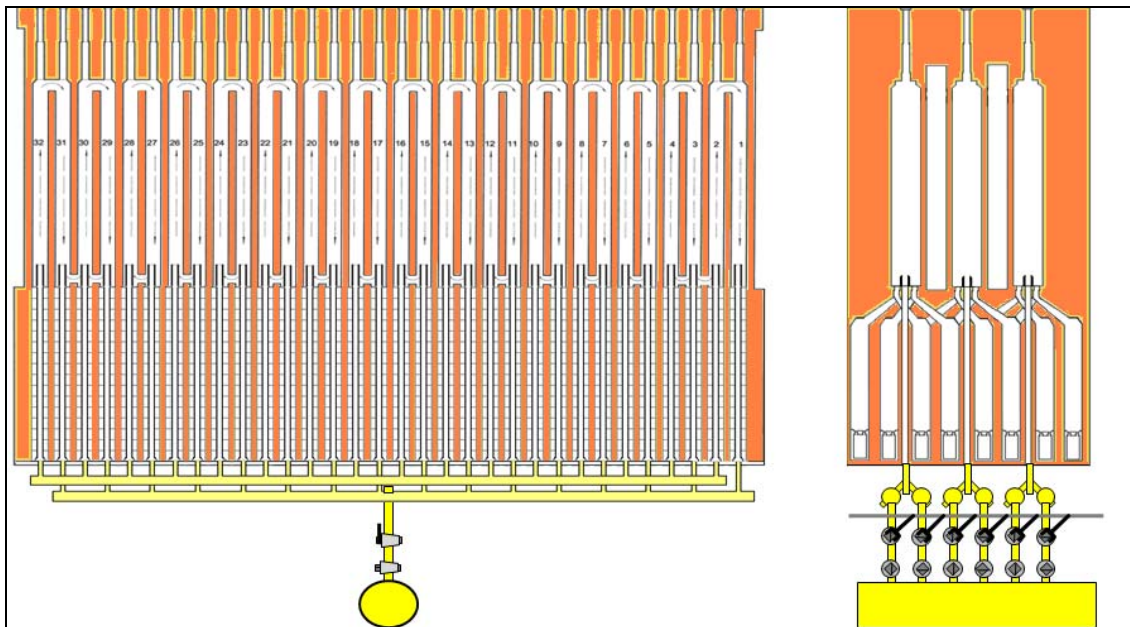


Figura 7 – Desenho esquemático do sistema de queima de gás de coqueria.

Após acendimento de todas as câmaras de combustão, o acompanhamento da temperatura foi feito através da leitura por pirômetro infravermelho na base das câmaras de combustão piloto 7 e 26 de duas em duas horas, nos três primeiros dias,

e de quatro em quatro horas a partir do quarto dia. O controle da temperatura nessa etapa não foi tão preciso quanto na anterior, pois, todo o aprendizado com o novo equipamento para controle dos fluxos de gases e da combustão foi executado pela experiência dos supervisores de montagem e por tentativa e erro. Nessa etapa a temperatura foi elevada até 1.050°C, aguardando, a partir daí, o primeiro enformamento. Durante essa etapa também foi concluída a montagem do topo, com a colocação das bases dos trilhos da máquina enformadora, os próprios trilhos e o fechamento das canaletas dos tirantes.

5 RESULTADOS

5.1 Medições das Temperaturas das Câmaras de Combustão e Fornos

As medições de temperatura na fase de secagem e aquecimento até 800°C foram feitas por termopares de forma contínua. A cada turno de 8 horas era fechado um valor para acompanhamento junto à curva objetivada e ao longo do turno. Os dados eram arquivados num supervisor e repassados para planilhas. Essas planilhas eram impressas e distribuídas para os operadores que tomavam ações de correção, quando necessárias.

A curva de aquecimento da fase convectiva desde a secagem até atingir 800°C é apresentada na Figura 8. A linha pontilhada representa a curva objetivada, calculada conforme descrito acima. A linha contínua, um pouco acima da pontilhada, é a temperatura interna do forno, medida por termopares colocados nas bocas 1 e 4 conforme mostrado na Figura 5a. A linha que está praticamente coincidindo com a curva objetivada, é a curva da temperatura medida por termopares nas câmaras 8 e 26 nas posições indicadas na Figura 5b. A linha contínua, mais abaixo das demais, é a curva da temperatura medida por termopares nas caixas de fumaça. Esse gráfico mostra o desempenho do controle da temperatura ao longo do *heating-up*, seguindo precisamente a curva objetivada e não permitindo que a região das caixas de fumaça atingisse temperaturas acima de 400°C.

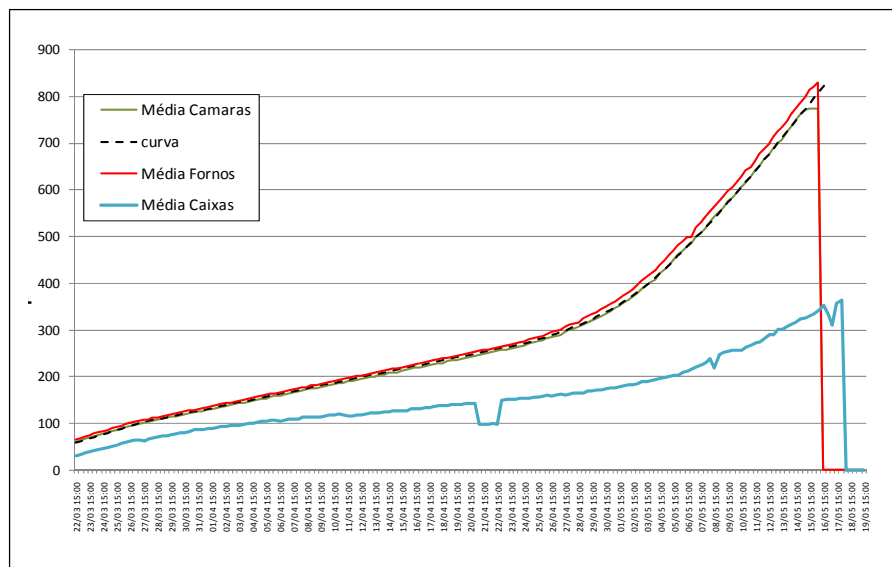


Figura 8 – Médias das temperaturas mediadas por termopares nas câmaras e fornos da Bateria 6.

Na Figura 9 são apresentadas as temperaturas de todos os termopares inseridos nas câmaras de combustão, em curvas obtidas nos dias e horários que foram feitas as medições de dilatação. Essas curvas mostram que, praticamente, todas as câmaras tiveram suas temperaturas elevadas uniformemente. Alguns pontos de grande variação são medições erradas causadas por queima ou defeito do termopar.

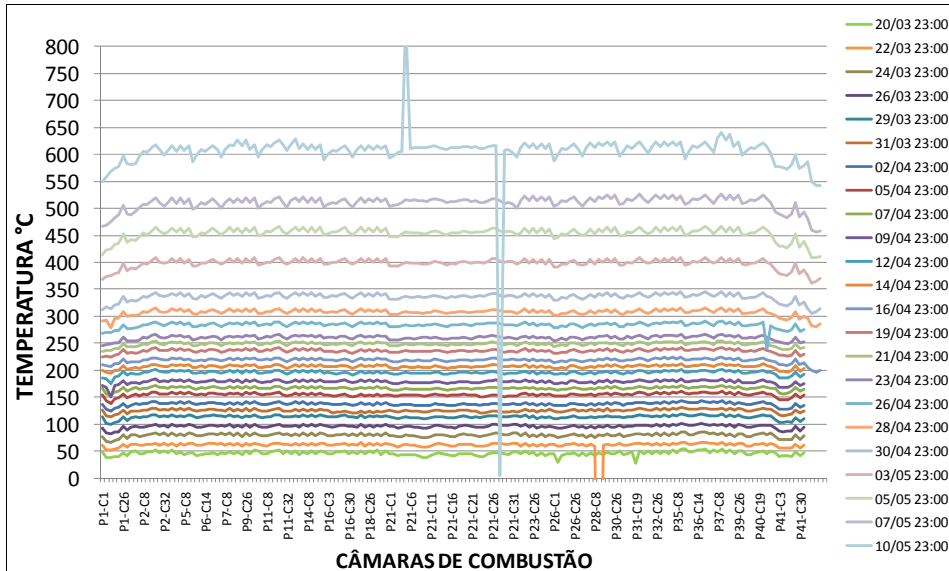


Figura 9 – Temperatura de todas as câmaras medidas nos dias e horários que foram feitas as medições de dilatação.

A evolução da temperatura média das câmaras 7 e 26 medidas com pirômetro infravermelho após o início do aquecimento com gás de coqueria pelo *underjet* é mostrada na Figura 10. Devido ao baixo fluxo de gás necessário para o aquecimento, não foi possível manter a válvula controladora de vazão de gás de coqueria em automático. Esse fato, aliado às dificuldades de estabelecer a vazão correta para atingir a temperatura objetivada, provocou as discrepâncias entre as temperaturas objetivada e obtida.

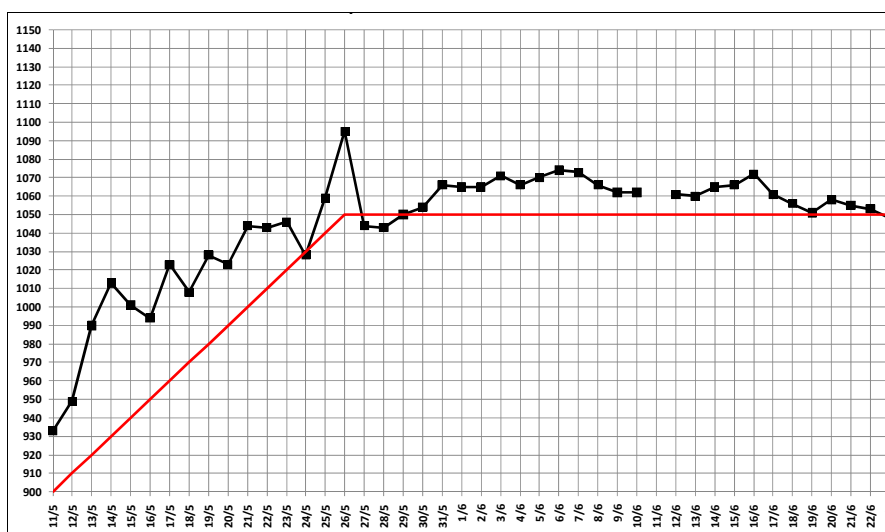


Figura 10 – Temperatura média da bateria 6 obtida por leitura com pirômetro infravermelho nas câmaras 7 e 26.

5.2 Medições das Dilatações da Bateria

Foram determinados os pontos que iriam ser feitas as medições da dilatação e do recalque da bateria. Nas laterais das paredes de aquecimento, foram escolhidos 3 pontos, um na parte superior, um próximo à soleira do forno e um na parte inferior do regenerador, tanto no lado do coque quanto no lado da desenfundadora. Os pontos do topo foram determinados em três posições próximas às câmaras 8,17 e 25 nas paredes 1, 2, 6, 11, 16, 21, 26, 31, 36, 40 e 40A da Bateria 6.

Nas laterais da bateria, as medidas foram feitas com régua milimetrada tendo como referência fios de piano nas três alturas descritas acima. Outros pontos também foram medidos, como a verticalidade das paredes contrafortes. As molas dos tirantes e *buckstays* eram reguladas a cada medição. As medidas laterais foram feitas nas segundas, quartas e sextas-feiras de cada semana e as medidas do topo, uma vez a cada 10 dias até se atingir 800°C.

Os valores médios das medições de dilatação das paredes obtidos a partir das medidas das laterais da bateria foram convertidos em porcentagem e estão mostrados nas curvas da Figura 11. A curva tracejada é a dilatação objetivada, a curva contínua é a dilatação medida do lado da desenfundadora (PS) e a curva pontilhada é a dilatação medida do lado do coque (CS).

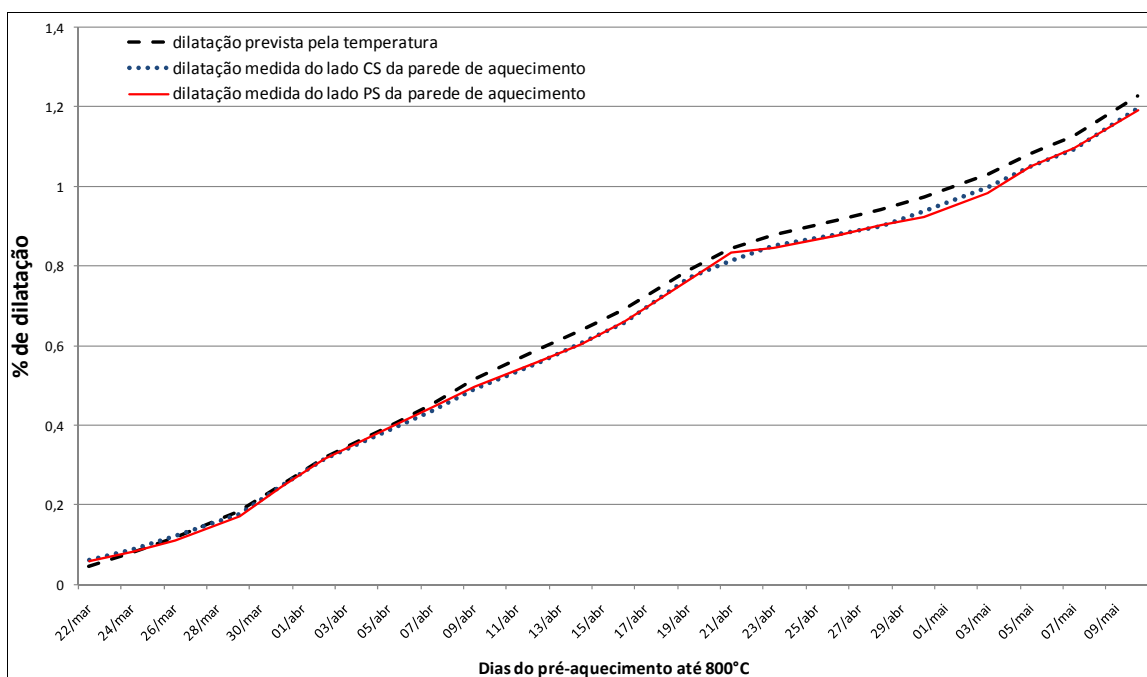


Figura 11 – Curvas das dilatações médias medidas nas laterais das paredes de aquecimento.

A dilatação ao longo das paredes da bateria, foi relativamente uniforme. No gráfico da Figura 12 são mostrados os perfis dessas dilatações a cada medição. A variação máxima entre paredes chegou em torno de 5 mm, ou seja, 0,03% da dilatação da parede, o que é considerado bastante razoável.

Na Figura 13 é mostrada a média do perfil vertical da dilatação, onde é possível observar uma tendência maior de dilatação na parte central, ou seja, próximo da plataforma de serviços da bateria e uma menor dilatação da região dos regeneradores, o que era esperado devido à temperatura dessa região e ao tipo de

tijolo refratário aplicado, o silicoaluminoso, de coeficiente de dilatação diferente do dos tijolos de sílica.

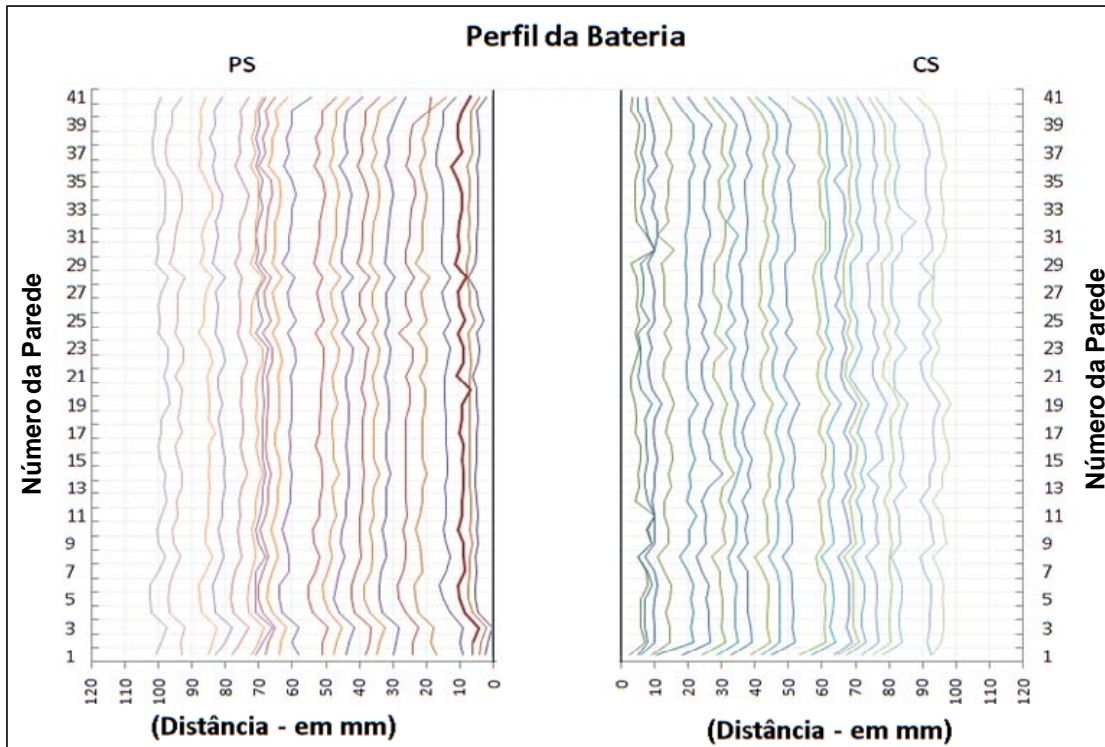


Figura 12 – Curvas de dilatação da média entre as três alturas de dilatação lateral de todas as paredes de aquecimento. O desvio padrão as medidas entre as paredes não chegou a 1,5 mm

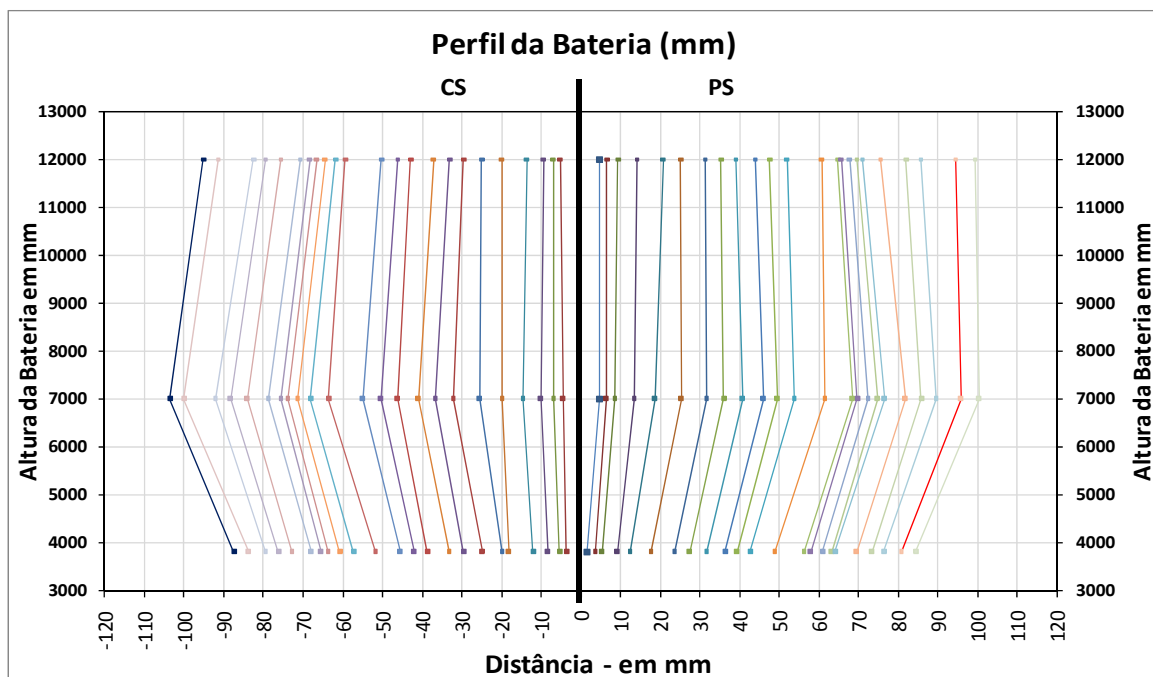


Figura 13 - Curvas da dilatação dos mesmos dados da Figura 12, mostrados agora pela média de todas as paredes em cada altura da lateral das paredes.

6 CONCLUSÕES

Os procedimentos efetuados visando o pré-aquecimento do corpo refratário da Bateria 6 da Usiminas, Usina de Ipatinga, atenderam plenamente aos valores previstos na curva de temperatura planejada.

O sistema de aquecimento convectivo mostrou-se bastante eficiente e preciso no aquecimento, tanto no seguimento da curva objetivada quanto na homogeneidade de elevação das temperaturas em todos os pontos da bateria.

A dilatação seguiu o traçado previsto e não propiciou qualquer irregularidade dimensional significativa no corpo da bateria.

Agradecimentos

Agradecemos a toda a equipe de controle térmico da Usiminas, Usina de Ipatinga, às equipes das contratadas Usiminas Mecânica, RIP e Termojet, aos colegas da Gerência Técnica da Redução da Usina de Ipatinga e a equipe de supervisão do consórcio fornecedor da nova coqueria, MCC e ACRE. A todos, nosso muito obrigado pelas grandes colaborações no sucesso desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 BILEK, Vladimir. Refratários para revestimentos de fornos industriais. Joinville: Fundação Tupy, 1978. 143 p.
- 2 GENERAL REFRACTORIES. Refractories: for those who design, use, purchase, construct and supervise the operation of equipment requiring refractory materials. Philadelphia: s.n., 1949. pág 106.
- 3 CHESTERS, John Hugh. Refractories: production and properties. London: ISI, 1973. pag. 168.