

PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DE PARADA PARA A 2ª TROCA DE STAVES NO ALTO-FORNO 3 DA USIMINAS*

*Lucas Gonçalves Generoso¹
Gustavo Serrano dos Santos²
Larissa Rodrigues de Carvalho Rocha³
Gustavo Alexandre da Costa Manso⁴
Mauro Vivaldino Fernandes⁵*

Resumo

O Alto-Forno 3 da Usiminas iniciou sua atual campanha em 1999. Projetada para durar 15 anos de operação, previa-se uma produção de 41 Mt de gusa. A partir de 2008, iniciaram as avarias mais significativas no sistema de refrigeração, possibilitando a entrada de água e os consequentes distúrbios operacionais. Buscando estender a atual campanha até 2021, a Usiminas realizou, dentre outras atividades de preservação, duas trocas de staves, em 2015 e 2018. Neste trabalho, são apresentados o planejamento e os principais procedimentos relacionados à parada operacional do alto-forno para a segunda troca de staves, com foco nas atividades operacionais que permitiram a redução do nível da carga até 25,1 metros em relação ao *stock line*. Destacam-se os cuidados e o êxito no abaixamento de carga até o nível das ventaneiras e a metodologia de troca de staves adotada. Por fim, a previsão de extensão da campanha em 7 anos, possibilitará atingir uma produção acumulada de 53,5 Mt, superando em 12,5 Mt o valor projetado.

Palavras-chave: Alto-Forno; Staves.

PLANNING AND EXECUTION OF USIMINAS' BLAST FURNACE 3 BLOW DOWN FOR THE SECOND STAVES EXCHANGE

Abstract

Usiminas' Blast Furnace 3 started its current campaign in 1999. Designed to last 15 years of operation, it was expected to produce 41 Mt of hot metal. In 2008, wear in the refrigeration system began significantly, allowing water leaks and consequent operational disturbances. In order to extend the current campaign to 2021, Usiminas has carried out, among other preservation activities, two staves exchanges, in 2015 and 2018. In this paper, the planning and main procedures related to the blow down of the furnace for the second stove exchange is approached. It focuses on the operational activities that allowed the reduction of the burden level down to 25.1 meters below the stock line. The success of lowering burden to the tuyeres level and the methodology adopted is outstanding. Finally, the 7 year extension in the campaign will allow a production of 53.5 Mthm, surpassing by 12.5 Mthm the projected value.

Keywords: Blast furnace; Staves.

¹ Engenheiro Metalurgista, Gerência Técnica de Redução da Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, Gerência Geral de Redução da Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

³ Engenheira Metalurgista, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

⁴ Engenheiro Metalurgista, Gerência de Altos-Fornos da Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

⁵ Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, M. Sc., Gerência Técnica de Redução da Usiminas; Ipatinga, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Inicialmente projetado para 15 anos de campanha, o Alto-Forno 3 da Usiminas completou 19 anos de operação em outubro de 2018. Considerando que este reator iniciou sua campanha em 1999 e as boas condições do cadinho, foi proposto o desafio de aumentar sua campanha em 7 anos, até 2021 [1]. Assim, algumas intervenções foram necessárias para estender sua vida útil e aumentar a confiabilidade operacional. Sendo assim, uma das medidas adotadas foi a segunda troca de *staves*, realizada em 2018. Com as solicitações abrasivas e térmicas ao longo dos anos, alguns *staves* de ferro fundido apresentavam desgaste acentuado, conforme apresentado na Figura 1, superior a 55% da sua espessura original. Além disso, o número de tubos furados crescia exponencialmente a partir de 2008, totalizando 100 unidades até a data da troca, causando entrada de água no reator e instabilidades operacionais.

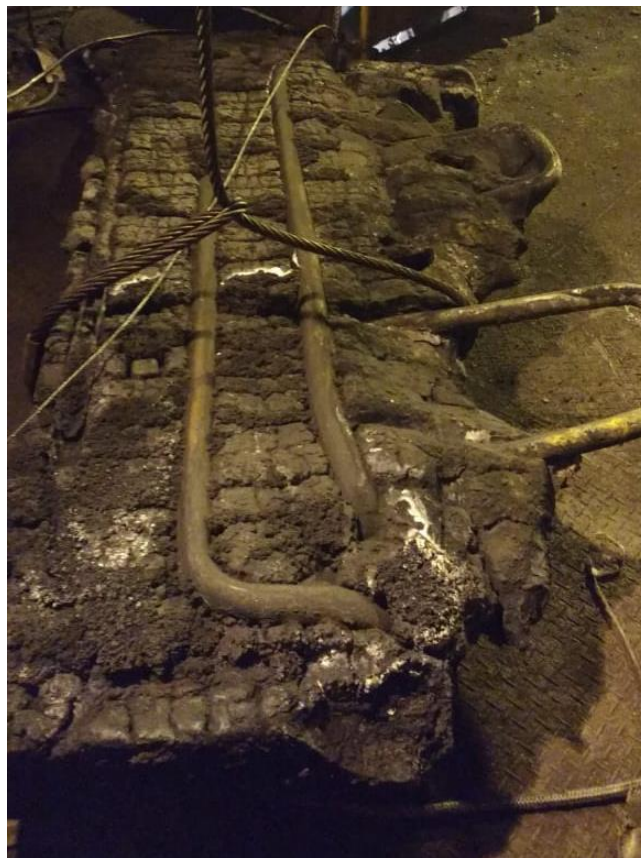


Figura 1. Desgaste acentuado em *stave* de ferro fundido.

Os preparativos para a troca de *staves* foram realizados para baixar a carga até o nível das ventaneiras, aproximadamente 2,8 metros abaixo do nível inferior ao B2, correspondente a 25,1 metros abaixo do *stock line*, uma vez que os *staves* mais críticos se encontravam nos níveis da rampa (B2 e B3) e da cuba (S1 e S2). As peças originais de ferro fundido foram substituídas por peças de cobre devido sua menor espessura convergir com o perfil interno remanescente do forno. As práticas adotadas na primeira troca de *staves* em 2015 serviram de referência para a realização deste trabalho.

Os critérios adotados para a seleção dos *staves* a serem substituídos foram o número de tubos furados, a espessura remanescente do *stave* e as regiões críticas, sendo variado o número de peças trocadas em cada nível, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Quantidade de *staves* trocados por nível

Nível do Alto-Forno 3	Unidades de <i>Staves</i>
S2	14
S1	10
B3	8
B2	6
Total	38

2 DESENVOLVIMENTO

A troca dos *staves* foi realizada pela parte interna do alto-forno, içando os *staves* antigos e retirando-os pelos *main holes* de topo, conforme indicado na Figura 2. Este procedimento exige o abaixamento do nível de carga do alto-forno até o nível B1. A descida de carga de um alto-forno é de grande complexidade e exige bastante cautela. Quaisquer erros podem prejudicar o andamento da obra e colocar em risco a segurança do equipamento. Portanto, o planejamento adotado abrangeu todas as condições de controle, a citar: estimativa do volume útil, esgotamento do cadinho, qualidades de gusa e escória, distribuição de carga, parâmetros de processo etc.

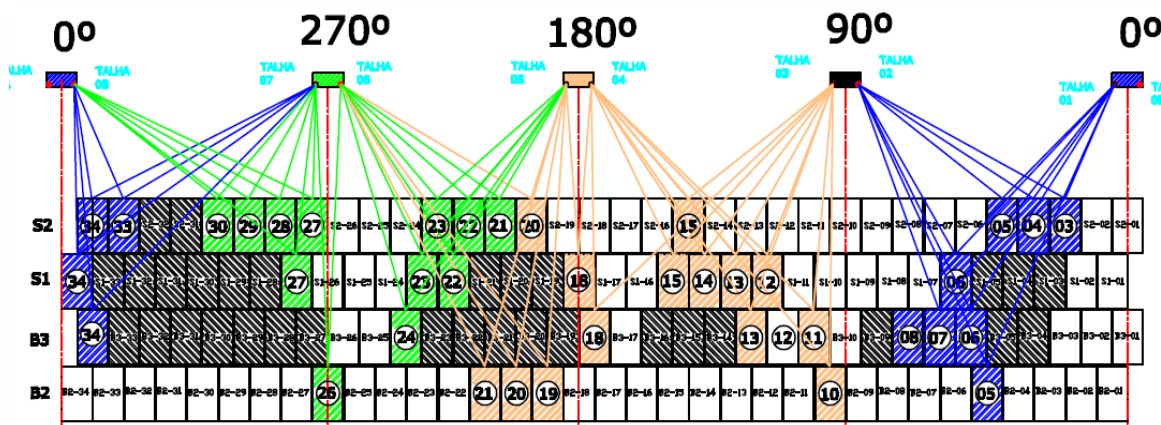


Figura 2. Metodologia para retirada de *staves*.

2.1 Volume Útil e Esgotamento do Cadinho

O volume útil do Alto-Forno 3 é igual a 2924 m³, conforme identificado em sondagens realizadas. Esse valor foi utilizado como referência nos cálculos para controle dos parâmetros de processo.

Para garantir melhor drenagem do cadinho e melhorar as condições de parada e retorno do forno, nos 20 dias antecedentes à parada, praticou-se qualidade de gusa e escória que garantisse sua melhor fluidez, conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Faixas de controle de gusa e escória

	Qualidade	Faixa
Escória	CaO/SiO ₂	≤ 1,18
	MgO	> 6%
	Si	0,35% ~ 0,45%
Gusa	S	< 0,040%
	Mn	0,45% ~ 0,70%
	TiO ₂	residual

Além disso, para garantir o bom esgotamento do cadinho foi realizada a elevação nas inclinações dos furos de gusa, de 12,5° para 15°, por meio de ajustes nos perfuradores. Esta medida foi realizada nos dias anteriores à parada. As alterações no ângulo de perfuração foram definidas de modo que o furo com a nova inclinação permanecesse dentro do túnel de 300 mm de diâmetro do furo de gusa.

Outro cuidado importante também foi garantir comprimento do furo de gusa superior a 3,5 metros. Para tanto, foi selecionada a massa com melhor desempenho.

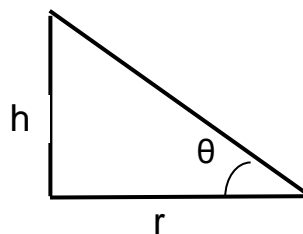
2.2 Condições Para a Parada

Conforme técnicas já adotadas e bem sucedidas na Usiminas, o abaixamento de carga foi previsto para um tempo total de 12 horas, sendo a velocidade de abaixamento dividida em três fases distintas, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3. Velocidades de descida de carga

Fase	Nível de Carga (m)	Velocidade (m/h)	Duração (h)
1ª	4,0 ~ 15,4	2,85	4
2ª	15,4 ~ 22,2	1,70	4
3ª	22,2 ~ 25,0	0,70	4

A altura do homem morto, após a descida de carga, foi calculada em aproximadamente 3,86 metros acima do nível das ventaneiras, considerando o ângulo de repouso para o coque do homem morto. Conforme a Figura 3, o raio (r) e altura do homem morto (h) podem ser encontrados pelas Equações 1 e 2. Em que D é o diâmetro do cadinho, igual a 12,2 m; P é a penetração da zona de combustão, igual a 1,5 m e θ é o ângulo de repouso, igual a 40°.

**Figura 3.** Representação geométrica para cálculo da altura do homem morto.

$$r = \frac{D - (2 \cdot P)}{2} \quad (1)$$

$$h = r * \operatorname{tg}(\theta) \quad (2)$$

Visando estabilizar as condições operacionais do alto-forno, planejou-se a operação *all coke* (510 kg/t) por 24 horas antes do início da descida de carga. A base de coque utilizada foi de 22 t/carga, o que corresponde a uma camada de coque de 286 mm no ventre.

Além disso, foram adotadas ações como a retirada das telas do segundo *deck* do peneiramento de coque e restrição quanto ao consumo de coque do pátio. Essas medidas visaram a melhor permeabilidade do gás no reator, além de maior granulometria do coque no homem morto, o que favorece o esgotamento do cadinho.

As condições operacionais visadas durante o período de operação *all coke* estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Condições operacionais durante a operação *all coke*

Condições Operacionais	Valores
Sínter	80%
Minério	10%
Pelota	10%
Base de coque	22 t/carga
<i>Small coque</i>	0 t/carga
Basicidade de escória	1,10 ~ 1,15
Temperatura de sopro	950°C

2.3 Controle dos Parâmetros de Processo

a) Número de cargas consumidas

Considerando que a operação de abaixamento de carga foi iniciada a 4 metros abaixo do *stock line*, o volume ocupado pelas cargas foi estimado por meio das Equações 3, 4 e 5.

$$V = VU - VSL = 2924 - 246 = 2678 \text{ m}^3 \quad (3)$$

$$Vc = \frac{m}{\rho} = 81,4 \text{ m}^3 \quad (4)$$

$$Nc = \frac{V}{Vc * Fc} = \frac{2678}{81,4 * 0,95} = 35 \text{ cargas} \quad (5)$$

Em que:

V = volume do forno ocupado pelas cargas (m^3);

VU = volume útil atual (m^3);

VSL = volume correspondente a 4 m abaixo do *stock line* (m^3);

Vc = volume de uma carga (m^3);

Nc = número de cargas a serem consumidas (-);

Fc = fator global de compressão de cargas (-);

m = massa da carga (Kg);

ρ = densidade da carga (Kg/m^3).

b) Carregamento durante a descida de carga

Para garantir melhor nível térmico do alto-forno durante as últimas horas de operação, foi carregada uma carga seca (22 t de coque, 440 kg de quartzo e 2200 kg de escória LD), 4 horas antes da operação de abaixamento da carga.

Visando melhorar as condições do *raceway* para o *blow in* e baseando-se nos resultados obtidos em operações similares, praticou-se o carregamento extra de 100 t de coque, divididos em 10 bateladas, durante as primeiras horas da operação de descida da carga. Este coque ajudou a resfriar o gás produzido pelo alto-forno.

Para controlar a escória com teor de Al_2O_3 máximo de 16% e MgO superior a 6%, foi carregado 200 kg de quartzo e 1000 kg de escória LD para cada batelada de coque.

c) Refrigeração

No decorrer de toda a operação, os cuidados especiais tomados no sistema de refrigeração do forno consistiram em inspeções constantes nos dias antecedentes à parada, durante o período de abaixamento de carga e após a parada do alto-forno, de forma a detectar e eliminar rapidamente possíveis pontos de vazamentos de água. Além disso, o controle da temperatura de entrada de água do *chiller* foi passado para automático em 30°C, uma semana antes da parada e a refrigeração dos *cigar coolers* foi interrompida durante a descida de carga. Após a parada foi mantida uma vazão mínima de água nas ventaneiras.

d) Controle térmico e temperatura de topo

Durante a operação *all coke*, o controle térmico foi feito de modo que as temperaturas de gusa atingissem valores superiores a 1500°C. Assim, os principais ajustes feitos foram na umidade e temperatura de ar soprado.

Para o controle da temperatura do topo durante o abaixamento de carga, visou-se uma temperatura máxima de 350°C, que foi controlada através dos *sprays* do topo. Por esse motivo os *sprays* do topo foram testados previamente de maneira que garantissem um bom funcionamento, mantendo estanqueidade da válvula pneumática e boas condições dos bicos para formação de névoa.

e) Controle do poder calorífico inferior do gás de alto-forno (BFG)

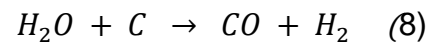
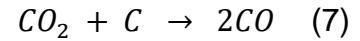
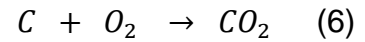
Durante o abaixamento de carga o poder calorífico do gás de topo aumenta substancialmente. Particularmente, o teor de hidrogênio em pouco tempo supera o valor mínimo da faixa de inflamabilidade no ar (4%). Embora o risco de combustão espontânea seja baixo, pois a temperatura do topo foi mantida abaixo de 350°C (ponto de ignição igual a 580°C), houve injeção de vapor e nitrogênio no topo, nitrogênio no balão de pó e *venturi scrubbers* no início do abaixamento de carga.

Com base nas diversas operações de abaixamento de carga realizadas anteriormente, a quantidade total de nitrogênio para controlar o poder calorífico do BFG abaixo de 1.100 kcal/Nm³, foi calculada em 30.000 Nm³/h. Considerando que as vazões no topo, balão e *venturi scrubbers* totalizam 22.000 Nm³/h, foi necessária a quantidade adicional de 8.000 Nm³/h. Para isto, foram instalados 12 pontos de injeção, sendo 4 em cada nível (B3, S1 e S2). Nestes mesmos níveis foram instalados também 12 pontos de injeção de vapor, com a mesma configuração. Estes sistemas de injeção foram abertos quando a sonda atingiu 15 metros.

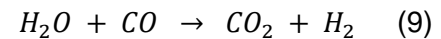
Durante a descida de carga, a cada 30 minutos, foi feito o acompanhamento dos teores de CO, CO₂, H₂, N₂ e O₂ pelos analisadores do topo.

f) Envio de gás para a atmosfera

As reações que ocorrem à frente das ventaneiras do alto-forno podem ser descritas pelas Equações 6, 7 e 8.



No início do processo de abaixamento de carga, até aproximadamente 4 horas, ocorre a elevação do CO (Equações 7 e 8) devido menor disponibilidade de carga a ser reduzida. À medida que o nível de carga se aproxima das ventaneiras, a simultânea queda do teor de CO com o aumento dos teores de CO₂ e H₂, sugerem a ocorrência da reação indicada na Equação 9, em função de maior disponibilidade de H₂O (vapor utilizado durante o processo de descida de carga).



Deste modo, ocorre queda acentuada no teor de CO e, conseqüentemente, elevação no teor de CO₂. Assim sendo, o direcionamento do gás BFG para a atmosfera (GA) foi planejado para ser feito antes do ponto de convergência das curvas de CO e CO₂, devido ao risco de alta concentração de O₂ no gás do topo, proveniente do ar soprado.

Este procedimento foi calculado para acontecer 8 horas após o início de abaixamento de carga, quando o teor de CO₂ atingisse 10%, conforme Figura 4.

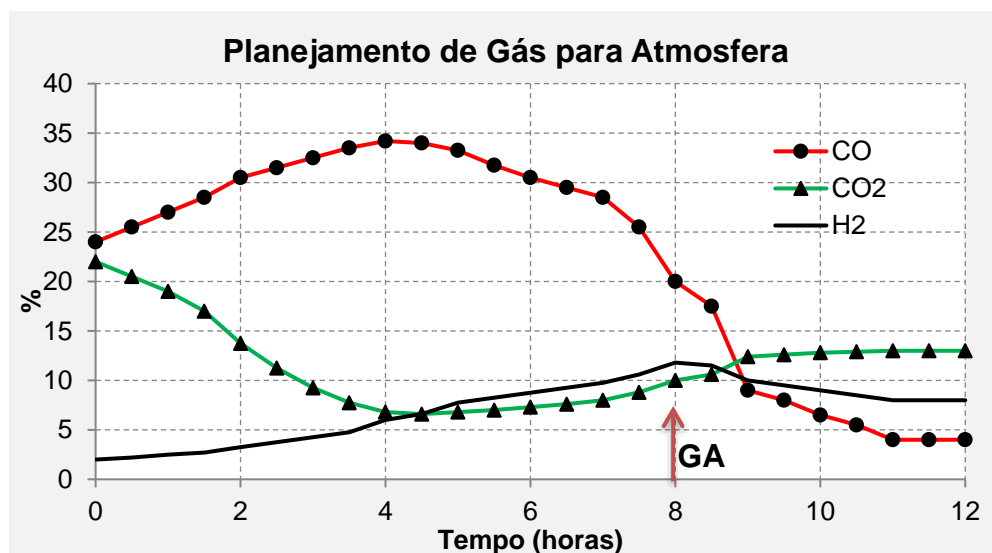


Figura 4. Concentrações previstas de CO, CO₂ e H₂ durante a descida de carga e envio de gás para atmosfera.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A descida de carga foi iniciada às 12h13min do dia 02/12/18 partindo-se do nível de sonda de 4 metros. Na Figura 5 é apresentada a altura da sonda de carga ao longo do tempo, ou seja, o processo físico de descida de carga. Nota-se que as velocidades de descida de carga foram bem próximas aos valores planejados, embora, em alguns momentos, mais lenta que o previsto. Às 00h33min do dia 03/12/18, o nível da carga chegou a 25,10 metros com relação ao *stock line* em um tempo total igual a 12 horas e 20 minutos. O valor planejado foi 25 metros em 12 horas. Na Figura 6 é confirmado o êxito do procedimento, sendo que o nível de carga chegou próximo às ventaneiras, permitindo assim maior facilidade para a troca de *staves* nos níveis inferiores (B2).

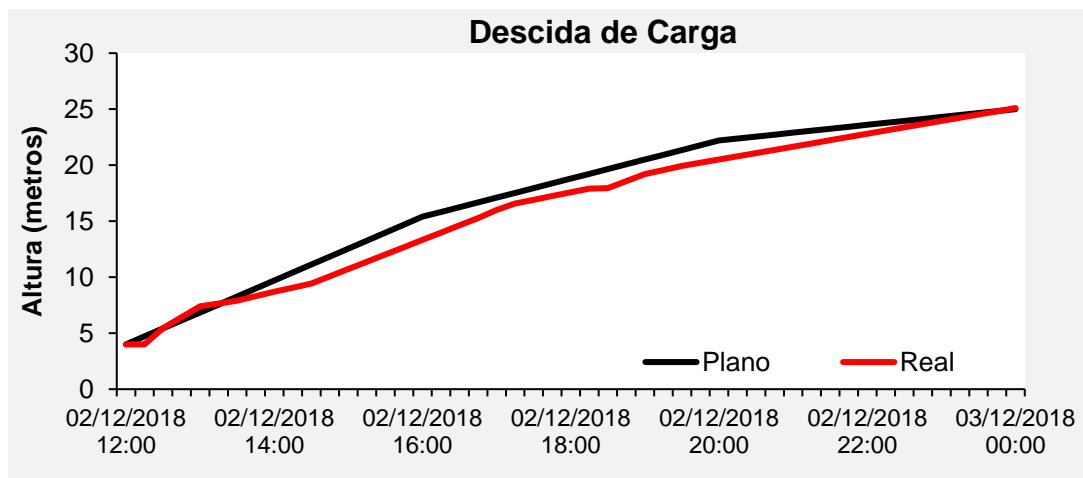


Figura 5. Evolução do nível da sonda durante a descida de carga.



Figura 6. Visualização do nível de carga próximo às ventaneiras (nível B1).

Conforme apresentado nas Figuras 7 e 8, o volume de ar soprado e pressão de ar durante a descida de carga foram superiores aos valores previstos em grande parte do tempo. Isso foi feito objetivando manter a velocidade de descida de carga próxima ao valor planejado, conforme mostrado anteriormente. Durante a descida de carga, a redução de volume de ar foi feita de maneira gradativa até às 20h, quando iniciou uma redução dos parâmetros de forma acentuada, visando controlar o fluxo de material no furo de gusa.

Destaca-se que as qualidades propostas para o gusa e para a escória foram devidamente atendidas. O estado térmico e o equilíbrio químico permitiram boa fluidez de gusa e escória e, aliados ao maior ângulo e comprimento de furo de gusa, garantiram assim o bom esgotamento do alto-forno.

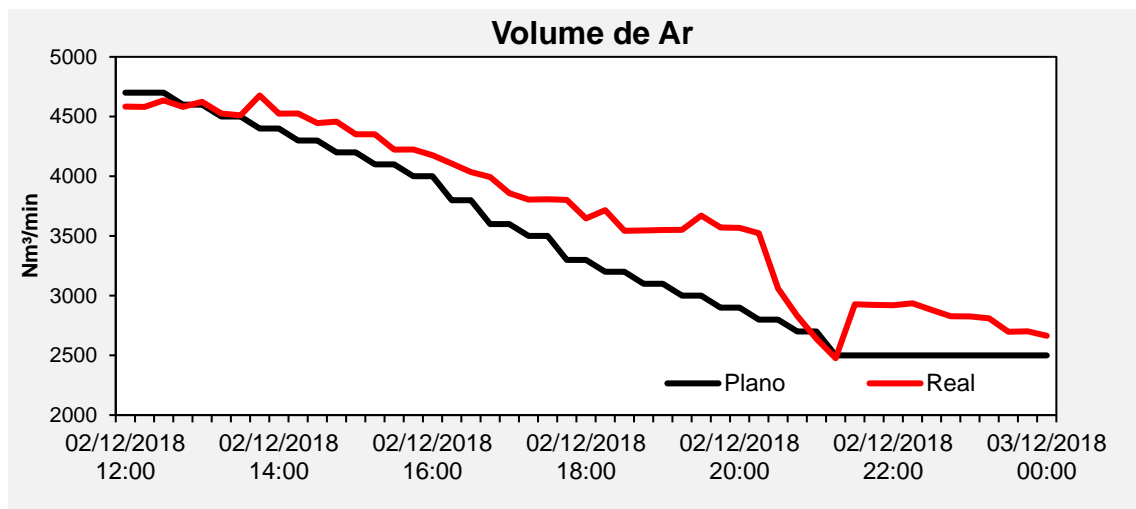


Figura 7. Evolução do volume de ar soprado durante a descida de carga.

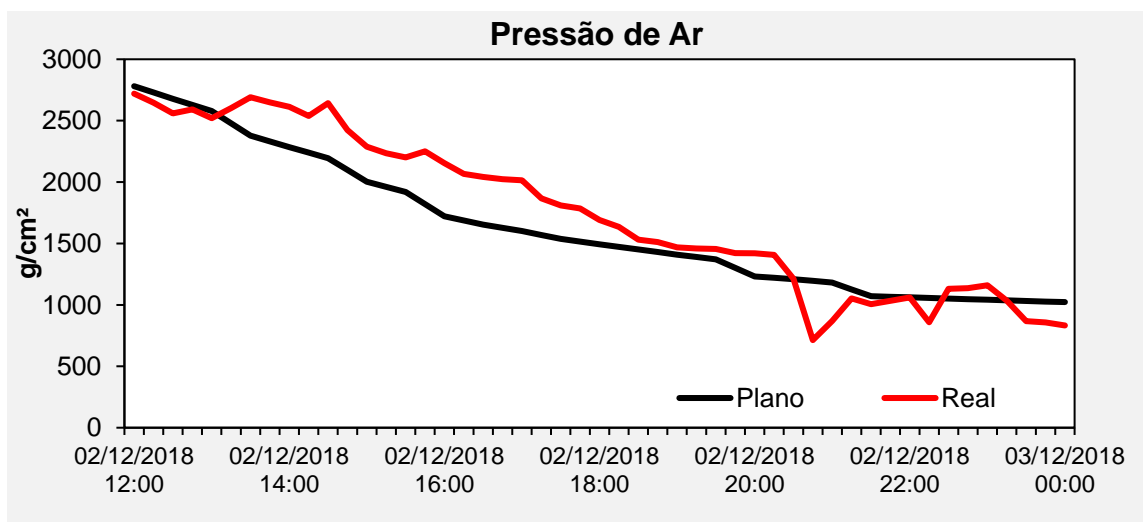


Figura 8. Evolução da pressão de base durante a descida de carga.

Pela Figura 9 pode ser observado que poder calorífico do BFG ultrapassou o valor previsto (1.100 Kcal/Nm³) durante algumas horas. Em contrapartida, a temperatura deste gás no topo foi mantida abaixo do ponto de ignição (580°C), assim como abaixo do valor planejado (350°C) durante todo o processo de descida de carga (Figura 10). Portanto, as condições de segurança foram plenamente atendidas.

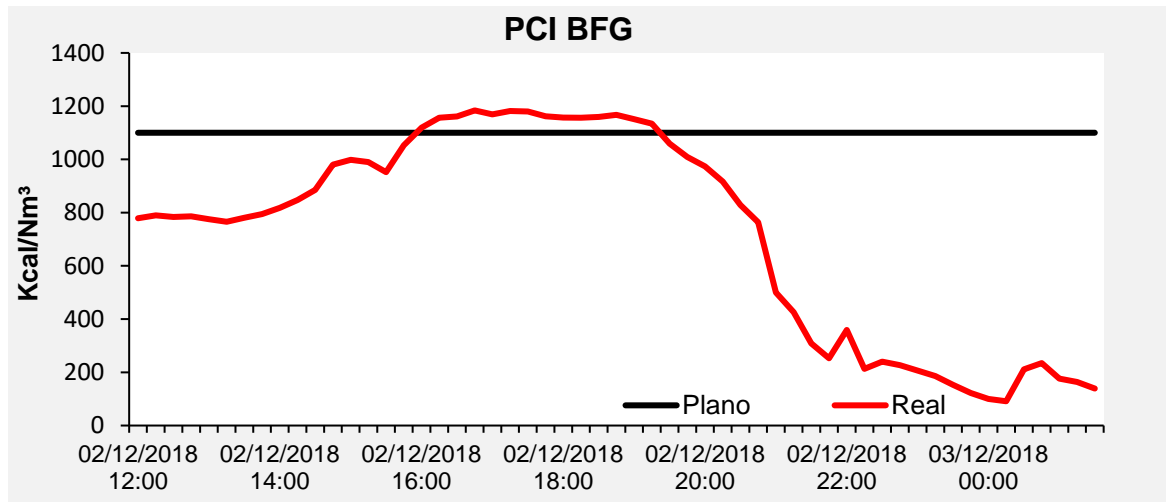


Figura 9. Evolução do poder calorífico do BFG durante a descida de carga.

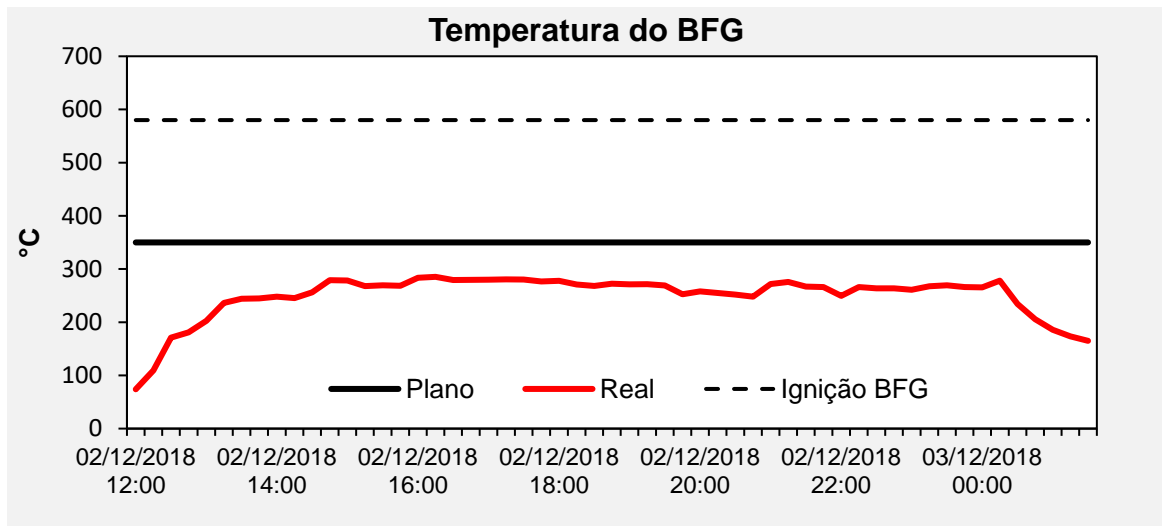


Figura 10. Evolução da temperatura do gás de topo durante a descida de carga.

Às 20h31min foram fechadas as válvulas de comunicação de BFG entre o alto-forno e gasômetro e abertos os *bleeders* 1, 3 e 4, indicando assim o direcionamento de gás para a atmosfera.

O critério para iniciar a passagem de gás para a atmosfera foi especialmente pela elevação no teor de H₂, que ocorreu após 8 horas e 18 minutos após o início de descida de carga. Nesse momento a concentração de CO₂ no BFG estava igual a 8,5%, como indicado na Figura 11.

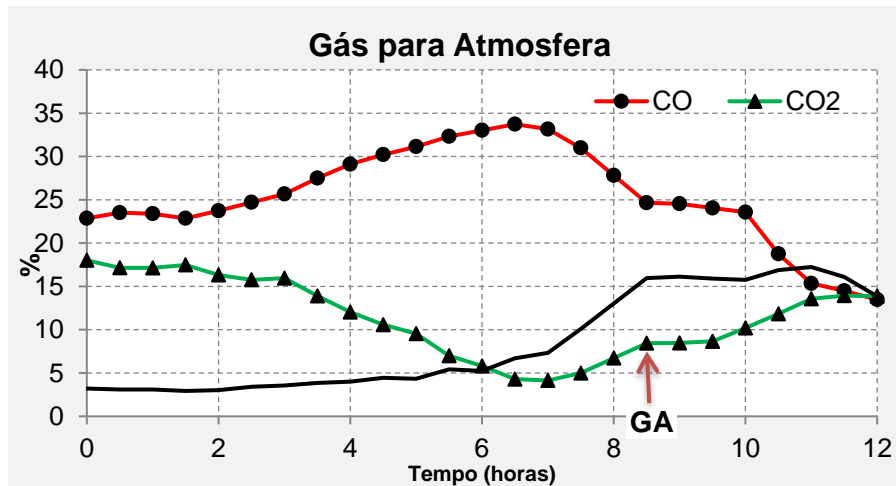


Figura 11. Resultados das concentrações de CO, CO₂ e H₂ durante a descida de carga e passagem de gás para a atmosfera (GA).

Às 23h26min já não havia indicação da presença de coque na frente de algumas ventaneiras, sendo possível visualizar o homem morto pelos olhais dos algaravizes. A partir desse momento as ventaneiras iniciaram seu processo de apagamento, finalizado às 00h29min, quando todas as ventaneiras já estavam apagadas. Às 00h33min foi confirmada a parada do Alto-Forno 3.

4 CONCLUSÃO

Face aos desafios enfrentados pelo setor siderúrgico ao longo dos anos, a busca pela competitividade tornou-se essencial nesta indústria. O prolongamento na campanha do Alto-Forno 3 é o resultado dos esforços e das boas práticas operacionais que a Usiminas emprega neste sentido. A segunda troca de *staves* faz parte de um conjunto de ações adotadas com a finalidade de permitir a extensão da sua campanha. As práticas adotadas para a descida de carga na primeira troca de *staves* do Alto-Forno 3 em 2015, nortearam a segunda troca em 2018.

Os cuidados com a qualidade das matérias-primas, comprimento e inclinação do furo de gusa, qualidade de gusa e escória, garantiram o bom esgotamento do alto-forno. O controle da velocidade de descida de carga permitiu maior estabilidade deste processo. Além disso, os controles do poder calorífico e temperatura de BFG asseguraram a segurança operacional.

A partir destes resultados pode-se afirmar que o abaixamento de carga foi bem planejado e executado, visto que os resultados esperados foram alcançados com a redução do nível de carga em 25,1 metros dentro do alto-forno, garantindo a segurança das pessoas e do equipamento.

A segunda troca de *staves* faz parte de um conjunto de ações que garantirão o prolongamento da campanha do Alto-Forno 3 até 2021, aumentando a produção de gusa projetada de 41 Mt para 53,5 Mt.

REFERÊNCIAS

- 1 FERNANDES, M. V.; ROCHA, L. R. C.; CARVALHIDO, A. C.; MARTINS, H. M. Competitividade e Longevidade – Os Desafios do Alto-Forno 3 da Usiminas em sua 4ª Campanha. 47º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e 5º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, ABM Week, SP-Brasil, 2017.