

PROJETO COQUE – RECUPERAÇÃO DA PERMEABILIDADE DO CADINHO DO ALTO-FORNO Nº2*

Carlos José de Souza¹
Filipe Soares Pontes²
Guilherme Augusto Faria³
Guilherme Ribeiro do Espírito Santo⁴
Isnard de Miranda Castro⁵
Luciano Milagres da Silva⁶
Marcelo Araujo Martins⁷
Paulo Cesar Gonçalves⁸
Péricles Guimarães Oliveira Aguiar⁹
Leonardo de Almeida Horacio¹⁰

Resumo

Este trabalho tem como objetivo apresentar o planejamento, os ajustes técnicos e operacionais, além dos resultados obtidos no Alto-Forno 2 da Aperam South America, durante sua operação com coque no período de 6 meses. O trabalho foi realizado de acordo com as seguintes etapas: desenvolvimento de fornecedor de coque objetivando custo e qualidade necessária para o projeto, logística de recebimento e manuseio do coque, planejamento da transição do redutor carvão vegetal para coque sem parada do Alto-Forno, controle operacional durante o período de operação com o coque.

Palavras-chave: Alto-Forno; Carvão vegetal; Coque; Permeabilidade do Cadinho

COKE PROJECT - RECOVERY OF THE HEARTH PERMEABILITY BLAST FURNACE N ° 2

Abstract

This work aims to present the planning, technical and operational adjustments, as well as the results obtained in Blast Furnace 2 of Aperam South America, during its operation with coke in the period of 6 months. The work was carried out according to the following steps: development of coke supplier aiming at cost and quality required for the project, logistics of receiving and handling of coke, planning of the transition from charcoal to coke without stopping the Blast Furnace, control during the period of operation with the coke.

Keywords: Blast Furnance; Charcoal; Coke; Hearth Permeability

- ¹ Física, Gerente do Pátio de Matérias-Primas, Redução, Aperam South America, Timóteo.
- ² Engenheiro Metalúrgico, Gerente de Processo, Redução, Aperam South America, Timóteo.
- ³ Engenheiro Metalúrgico, Engenheiro de Processo, Redução, Aperam South America, Timóteo.
- ⁴ Engenheiro Metalúrgico, Gerente Executivo, Redução, Aperam South America, Timóteo.
- ⁵ Administração, Gerente Executivo, Redução, Aperam South America, Timóteo.
- ⁶ Administração, Técnico de Processo, Redução, Aperam South America, Timóteo.
- ⁷ Administração, Gerente do Alto-Forno 2, Redução, Aperam South America, Timóteo.
- ⁸ Engenheiro Produção, Analista de Gestão, Redução, Aperam South America, Timóteo.
- ⁹ MSc Engenheiro Metalúrgico, Engenheiro de Processo, Redução, Aperam South America, Timóteo.
- ¹⁰ Engenheiro Mecânico, Engenheiro de Processo, Redução, Aperam South America, Timóteo.

1 INTRODUÇÃO

Os Altos-Fornos são equipamentos utilizados para a produção de ferro-gusa, que é uma das principais matérias-primas utilizadas para a fabricação do aço. Atualmente, aproximadamente 60% do aço produzido no mundo tem como origem o ferro-gusa líquido produzido em Altos-Fornos.

Em 1996, o carvão vegetal foi substituído pelo coque metalúrgico no Alto-Forno 2 em função dos baixos custos. Vale ressaltar que a *Aperam South America* utilizou apenas coque adquirido, por não possuir coqueria em seu site. Entretanto, a partir de julho de 2011, motivado pelas oscilações no mercado do coque metalúrgico, o Alto-Forno retornou sua operação com o carvão vegetal.

Após o retorno da operação com carvão vegetal, o Alto-Forno 2 apresentou problemas operacionais, como: queda de produtividade, aumento no consumo de combustível, descontrole no teor de silício do ferro-gusa, dificuldades de drenagem de líquidos do cadinho e sopro excessivo pelo furo de gusa desde o início de corrida.

Análises técnicas indicaram que o cadinho e a refrigeração do Alto-Forno 2 não eram adequados para a operação com carvão vegetal. Como consequência da operação, ocorreu uma formação de cascão (material solidificado) na parede e soleira do cadinho induzindo ainda uma baixa permeabilidade do homem morto (camada formada pelo redutor estagnado).

Com o objetivo de recuperar a permeabilidade do cadinho, para uma operação mais estável, foi proposta a utilização de coque com foco em reduzir o cascão formado na soleira e paredes do cadinho.

A utilização do coque durante o período de 6 meses tornou-se viável em função do não comprometimento da produção (podendo até ofertar mais ferro-gusa do que o previsto), a possibilidade de remover ou diminuir o cascão do cadinho (não remove só pela temperatura, a quantidade de gusa no cadinho sendo maior além da movimentação dos líquidos em um cadinho com coque ser muito diferente do carvão vegetal, que pode ser comprovada pelo desgaste do cadinho com diferentes combustíveis), além da recuperação da permeabilidade do homem morto.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Desenvolvimento de fornecedor do coque

A escolha do fornecedor de coque foi pautada no custo, qualidade e logística de fornecimento. Este trabalho foi desenvolvido pela área de redução - PRE (responsável por definir as características necessárias do coque) e a área de compras de matérias-primas – PSM (responsável por identificar e negociar com os fornecedores em potencial). A figura 1 apresenta a especificação das características do coque definido pela equipe da Redução para o fornecedor USIMINAS.

Especificação Coque - USIMINAS		
Parâmetros	Mínimo	Máximo
P (%)	-	0,035
S (%)	-	0,7
C. Fixo (%)	88	-
M. Volateis (%)	-	1
Cinzas (%)	-	10,5
C.S.R (%)	58	68
C.R.I (%)	-	30
MICUN 40 (%)	-	78
D.I 150/15 (%)	83	-
D.I 30/15 (%)	93	-
H2O (%)	-	5
F. Grossa	10% máx. >75 mm	
F.Fina	5% máx. <25 mm	

Figura 1. Especificação do coque metalúrgico.

2.2 Logística de recebimento, condicionamento e abastecimento do coque metalúrgico

O recebimento do coque e seu condicionamento estão apresentados no fluxograma da figura 2.

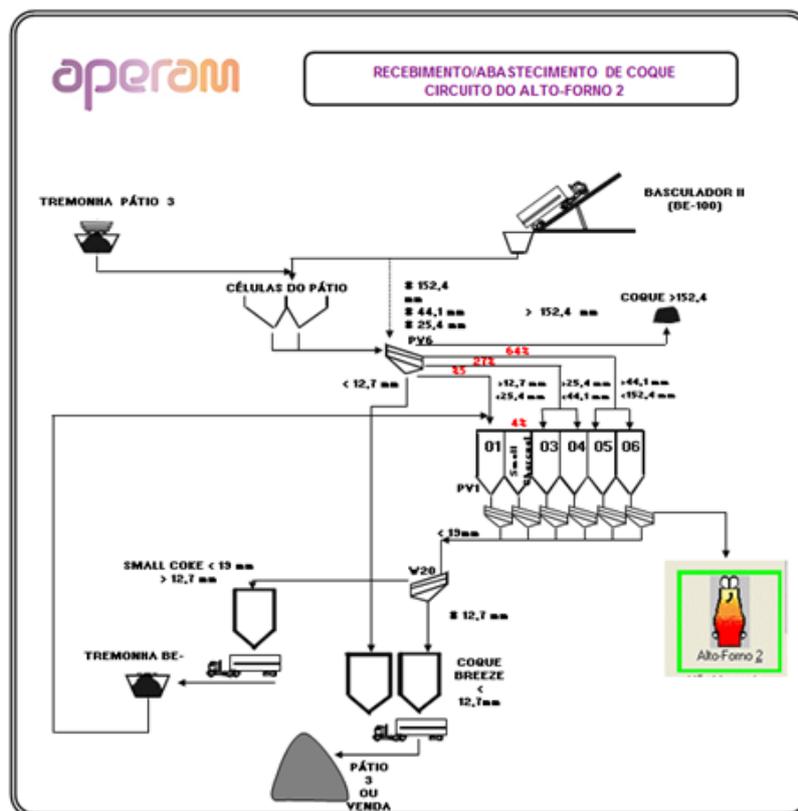


Figura 2. Fluxograma de recebimento e abastecimento de coque no Alto-Forno.

Para definição das malhas de peneiramento a serem utilizadas para a peneira instalada no circuito de abastecimento do Alto-forno 2, tomou-se como base a distribuição granulométrica do coque utilizada nos melhores resultados do reator operando com coque. As malhas de peneiramento foram escolhidas de modo a se obter três produtos dentro das seguintes faixas granulométricas:

- Coque grosso: > 44,1 mm;

- Coque médio: de 25,4 a 44,1 mm;
- *Small Coke*: de 12,7 a 25,4 mm;
- *Coke Breeze*: < 12,7 mm.

Durante a operação com coque utilizou-se carvão vegetal junto à carga metálica, o *small charcoal* (carvão vegetal gerado no peneiramento primário), com fração granulométrica acima de 12,7 mm e abaixo de 25,4 mm. Sua participação na carga redutora atingiu 12% (a maior participação da história). O *coke breeze* foi estocado no pátio e destinado a venda posteriormente.

A distribuição da carga redutora nos silos do *stock house*, de acordo com a faixa granulométrica, ficou conforme apresentado na figura 3.

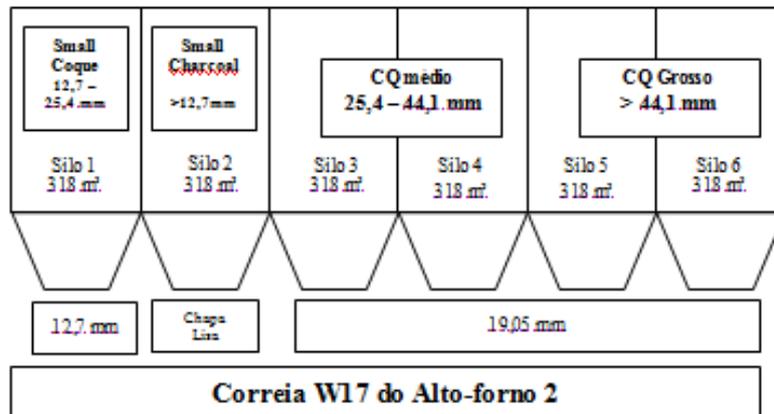


Figura 3. Esquema dos silos de coque e *small charcoal* do *Stock House*.

2.3 Transição do redutor carvão vegetal para o coque metalúrgico

Objetivando garantir uma operação estável durante a substituição do redutor, a proposta foi aproximar o máximo possível os valores das variáveis operacionais para os dois redutores. Os principais ajustes efetuados foram na composição química da escória e nos parâmetros do sopro. As figuras a seguir apresentam os parâmetros operacionais para transição do redutor.

Dia	Hora	Carbono de topo (kg/t)	Carbono injeção (kg/t)	Base (kg/carga)	Nº cargas	gusa carga (ton)	B2 (SiO ₂ ,CaO)	%Si Gusa	V. Esc (kg/t)	%MgO	%Mn	%Fluorita	%S	Temp. Gusa obj (°C)	%Pelota	%Minério	Vazão Ar (Nm ³ /h)	%O ₂	Unidade Ar (Nm ³ /h)	Tobama (°C)	Tsupro (°C)	Contra Pressão (bar)		
																							Total	PCI
Carvão Vegetal	24/10	sábado	07:00	430	0	5,8		19488	0,70	0,80	180-200	7,0-10	0,40	3,0	0,010	>1400	79,0	210	46000	0,02%	35	1938	1000	0,94
	25/10	Domingo	19:00	450	0	5,8		12885	0,70	1,00	180-200	7,0-10	0,40	3,0	0,010	>1400	79,0	210	45000	0,01%	35	1938	1000	0,94
	26/10	segunda	00:00	455	0	4,0	10	8751	0,80	1,30	180-200	7,0-10	0,40	3,0	0,010	1110	79,0	210	45000	0,01%	35	1938	1000	0,94
	26/10	segunda		460	0	4,0	10	8656	0,80	1,40	180-200	7,0-10	0,40	3,0	0,010	1450	79,0	210	45000	0,01%	35	1938	1000	0,94
	26/10	segunda		470	0	4,0	10	8511	0,85	1,50	180-200	7,0-10	0,40	3,0	0,010	1450	79,0	210	45000	0,01%	35	1938	1000	0,94
	26/10	segunda		470	50	4,0	10	8511	1,00	2,00	180-200	7,0-10	0,40	3,0	0,010	1450	79,0	210	45000	0,01%	30	2048	1050	0,94
Coque	26/10	segunda	10:00	800	0	6,0	10	10000	1,5	1,50	<280	7,0	0,40	0,0	0,020	1470	85,0	150	47000	0,01%	35	1938	1000	0,8
				570	0	6,0	10	0535	1,5	1,20	<280	7,0	0,40	0,0	0,025	1480	85,0	150	48000	0,01%	35	1938	1000	0,8
				550	0	6,0	10	10499	1,7	1,30	<280	7,0	0,40	0,0	0,030	1470	85,0	150	49000	0,01%	35	1938	1000	0,8
				535	0	6,0	10	11215	1,20	1,20	<280	7,0	0,40	0,0	0,030	1470	85,0	150	50000	0,01%	35	1938	1000	0,8
				500	45	6,0	10	2000	1,20	0,80	<280	7,0	0,40	0,0	0,030	1470	90,0	100	51000	0,01%	35	2045	1050	0,8
				450	80	6,0	10	2245	1,20	0,50	<280	7,0	0,40	0,0	0,030	1470	90,0	100	52000	1,01%	35	2067	1050	0,8
				470	85	6,0	10	2766	1,20	0,50	<280	7,0	0,40	0,0	0,030	1470	90,0	100	53000	1,01%	30	2106	1070	0,8
				430	140	5,9	10	13721	1,20	0,50	<280	7,0	0,35	0,0	0,030	1470	90,0	100	51000	1,51%	20	2178	1070	0,8

total coke rate = coke rate + small coke

Figura 5. Cronologia dos parâmetros operacionais.

LEITO Nº	carbono topo (kg/t)	carbono Injeção (kg/t)	Coke Rate (kg/t)	PCI (kg/t)	Coke Equiv. (kg/t)	NÚM. CARGAS PLAN. REAL	NÚMERO VOLTAS POR POSIÇÃO DA COLHER PLANEJADO																								LEITO Nº	Base Carbono / Coque (kg/carga)										
							CARVÃO VEGETAL								COQUE								MINÉRIO									Carbono Base (kg/carga)	COQUE Base (kg/carga)									
							11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	11	10				9	8	7	6	5	4	3	2	1
1	455	0	-			10	-	-	2	2	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2	2	2	-	-	-	1	4000							
2	460	0	-			10	-	-	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	-	-	-	2	4000							
3	470	0	-			10	-	-	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	-	-	-	3	4000							
4*	470	50	-			10	-	-	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	-	-	-	4*	4000							
TRANSIÇÃO																																										
1			800	0	800	10																													6000							
2			570	0	570	10																													6000							
3			550	0	550	30																													6000							
4			535	0	535	10																													6000							
5			500	45	535	10																													6000							
6			490	60	536	10																													6000							
7			470	85	535	10																													6000							
8			430	140	538	10																													6000							

Figura 6. Transição da distribuição da carga.

Mês	Data	Produção disponível para Aciaria (ton)	Temperatura (°C)	%Si	%S	%P	Redutor
out/15	15/10/2015	1000	1410	1,10	0,010	0,070	CARVÃO
	16/10/2015	1000	1410	1,10	0,010	0,070	CARVÃO
	17/10/2015	1000	1410	1,10	0,010	0,070	CARVÃO
	18/10/2015	1000	1410	1,10	0,010	0,070	CARVÃO
	19/10/2015	1000	1410	1,10	0,010	0,070	CARVÃO
	20/10/2015	1000	1410	1,10	0,010	0,070	CARVÃO
	21/10/2015	1000	1410	1,10	0,010	0,070	CARVÃO
	22/10/2015	1000	1410	1,20	0,010	0,070	CARVÃO
	23/10/2015	950	1420	1,20	0,010	0,070	CARVÃO
	24/10/2015	900	1430	1,50	0,010	0,070	CARVÃO
	25/10/2015	900	1440	1,80	0,010	0,070	CARVÃO
	26/10/2015	850	1450	2,00	0,080	0,075	TRANS
	27/10/2015	850	1480	1,50	0,070	0,075	COQUE
	28/10/2015	880	1480	1,50	0,065	0,080	COQUE
	29/10/2015	900	1480	1,20	0,055	0,080	COQUE
	30/10/2015	950	1480	1,00	0,050	0,080	COQUE
	31/10/2015	950	1480	1,00	0,045	0,080	COQUE
nov/15	01/11/2015	1000	1470	1,00	0,035	0,080	COQUE
	02/11/2015	1030	1470	1,00	0,035	0,080	COQUE
	03/11/2015	1050	1470	1,00	0,035	0,080	COQUE
	04/11/2015	1050	1470	1,00	0,035	0,080	COQUE
	05/11/2015	1050	1470	0,90	0,035	0,080	COQUE
	06/11/2015	1050	1470	0,90	0,035	0,080	COQUE
	07/11/2015	1050	1470	0,90	0,035	0,080	COQUE
	08/11/2015	1050	1470	0,90	0,035	0,080	COQUE
	09/11/2015	1050	1470	0,90	0,035	0,080	COQUE
	10/11/2015	1050	1470	0,90	0,035	0,080	COQUE

Figura 6. Transição da produção, temperatura e qualidade do gusa.

Transição da escória

Uma das grandes diferenças da operação com coque e a operação com o carvão vegetal é a composição da escória, principalmente sua basicidade binária, relação %CaO / %SiO₂. Quanto maior esta relação maior o poder dessulfurante da escória, maior seu ponto de fusão e menor sua viscosidade. Como o coque tem um percentual elevado de enxofre, opera-se o reator com escórias básicas, em média 1,2. Já para o carvão vegetal, que praticamente não contém enxofre, este valor situa-se em torno de 0,65. Portanto, as escórias do processo com carvão são de menor ponto de fusão e mais viscosas. Outra diferença significativa das escórias para os dois processos é o volume gerado devido à diferença da quantidade de cinzas entre os redutores, onde a operação com coque pode gerar o dobro do volume de escória do que a operação com carvão vegetal.

Dessa forma, o grande desafio foi aproximar o máximo possível às características das duas escórias na transição. A figura 7 apresenta as mudanças nas características da escória durante a transição do redutor de carvão vegetal para coque.

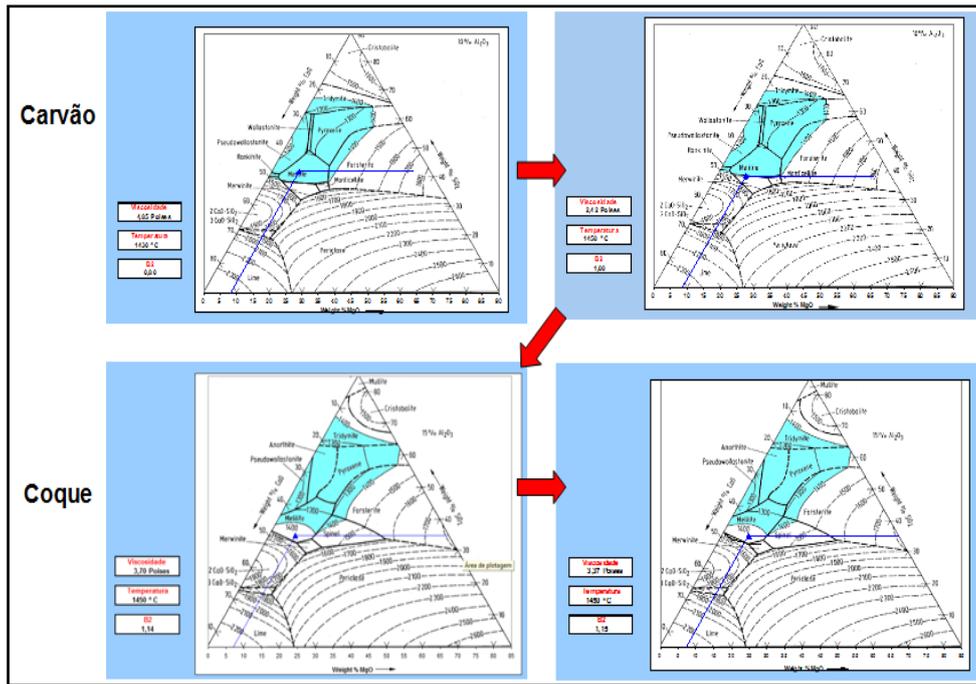


Figura 7. Transição da escória.

2.4 Resultados e discussões

A transição do redutor carvão vegetal para coque iniciou às 10 horas da manhã do dia 26 de outubro de 2015, quando a primeira carga de coque foi carregada no topo do Alto-Forno 2. As variações na estabilidade operacional durante o período de transição podem ser vista na figura 8.

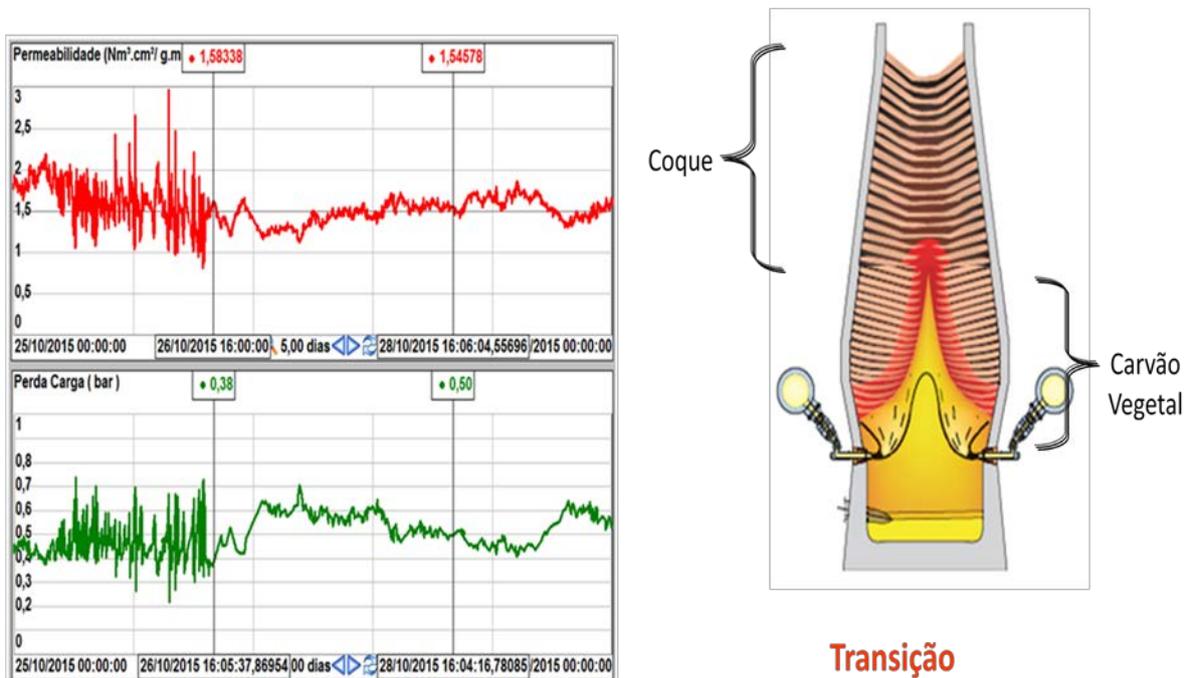


Figura 8. Perda de carga e permeabilidade durante a transição do redutor.

Apesar da instabilidade operacional apresentada durante as 24 horas que antecederam a transição, 6 horas após o carregamento do coque no topo do Alto-

Forno, os parâmetros operacionais estabilizaram, momento onde o coque atingiu o nível das ventaneiras. A figura 9 apresenta a estabilização da descida de carga após a chegada do coque na região das ventaneiras.

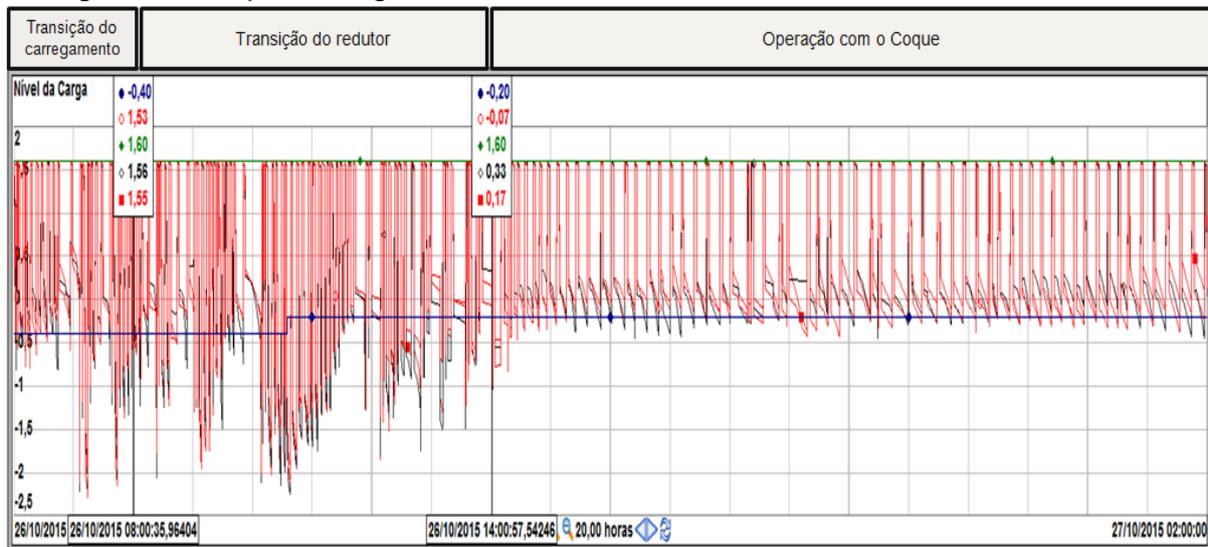


Figura 9. Descida de carga durante a transição do redutor.

A vazão foi reduzida além do esperado em função da instabilidade operacional apresentada pelo Alto-Forno antes da transição. O objetivo da redução da vazão foi evitar “arriamentos” e “engaiolamentos”, além do aumento excessivo da temperatura dos gases de topo. A figura 10 apresenta o gráfico da evolução da vazão de ar do soprador durante e após a transição redutor.

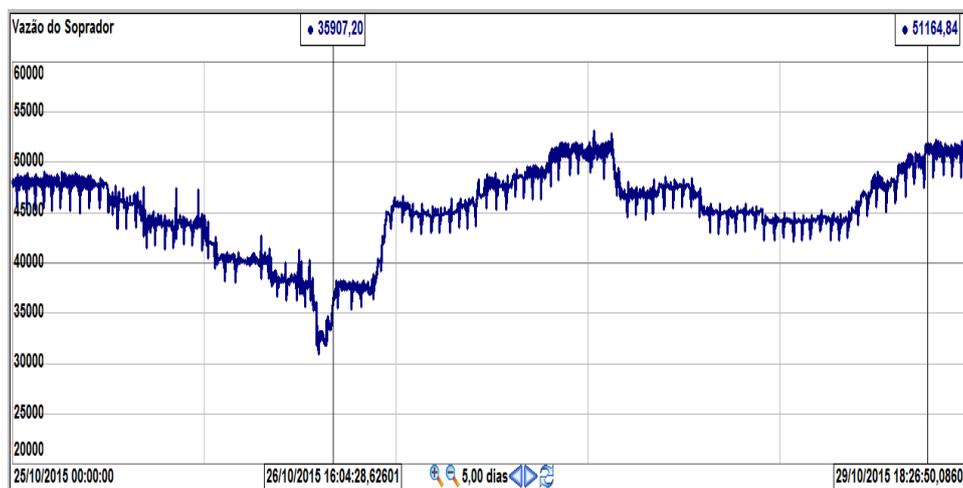


Figura 10. Gráfico da evolução da vazão de ar do soprador durante e após a transição redutor.

Durante o período de utilização do coque, foi possível trabalhar com temperatura de gusa média de 1480°C ($\pm 20^\circ\text{C}$), sendo 80°C acima do praticado com carvão vegetal. A figura 11 apresenta a temperatura do gusa durante a utilização do coque e a queda na temperatura após o retorno para o carvão vegetal.

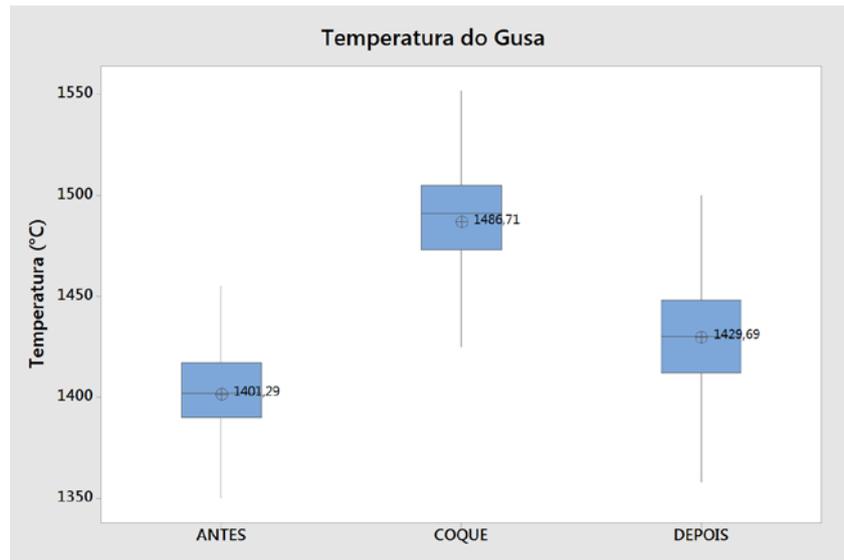


Figura 11. Temperatura do ferro-gusa durante a utilização do coque

Mesmo trabalhando com valores de temperatura mais altos, o controle do teor de silício do gusa foi fundamental para o sucesso do projeto. Teores altos de silício comprometem a limpeza do cadinho, além de impactar negativamente o processo na Aciaria. Como pode ser observado na figura 12, fora os períodos de paradas preventivas, o valor médio praticado foi 0,69%, com um índice de atendimento ao teor de silício menor que 0,80% de 75%.

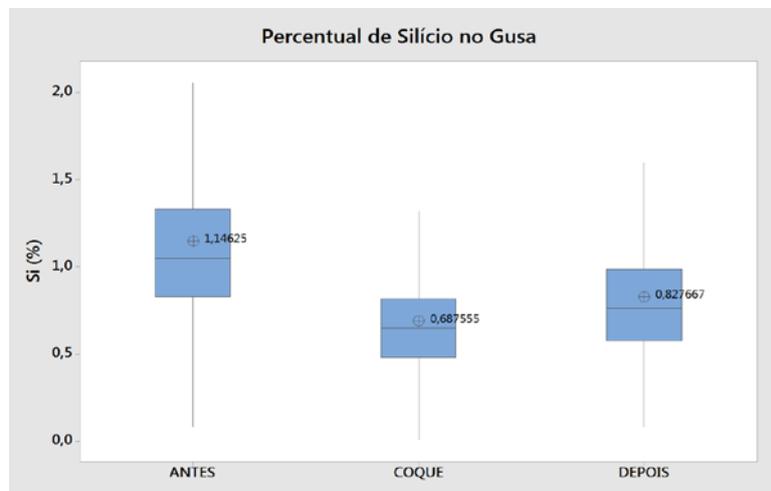


Figura 12. Gráfico do teor de silício no ferro-gusa durante a utilização do coque.

Um dos pontos relevantes do processo de troca de redutor foi o consumo de combustível. Devido às grandes diferenças nas condições operacionais com os dois tipos de redutores esperava-se passar por um período de turbulência e de alto consumo. Porém, o comportamento do processo foi diferente do esperado, alcançando assim valores menores de consumo do que o esperado, logo no início da operação com coque, conforme evidenciado nos gráficos da figura 13.

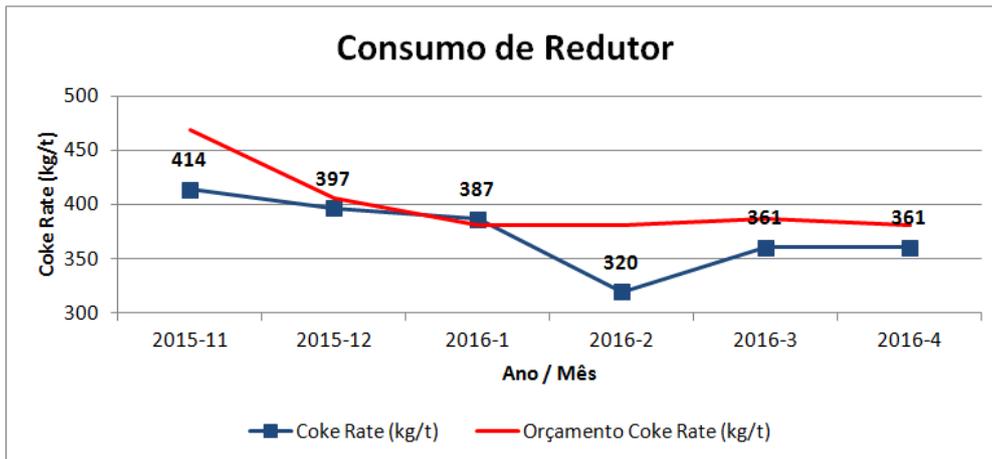


Figura 13. Gráfico do coque equivalente

A Tabela 1 apresenta em detalhe o consumo de redutor, onde fica evidenciada a participação significativa do *small charcoal*. A participação do *small charcoal* na carga atingiu 18% no mês de março/2016.

Tabela 1. Detalhe do consumo de redutor

Coke Rate (kg/t)	Small Coke (kg/t)	S. Charcoal (kg/t)	PCI (kg/t)	*Coque Equivalente (kg/t)
414	20	13	105	520
397	21	24	109	514
387	18	36	102	504
320	33	57	124	483
361	24	69	104	507
361	7	57	113	490

* Coque equivalente = Coke rate + Small Coke + (PCI * Tx. Subs.) + (Small Charcoal * Tx. Subs.)
Valores médios:
Tx. Subs PCI = 0,75
Tx. Subst Small Charcoal = 0,65

A estabilidade operacional permitiu também reduzir a participação da pelota na carga metálica, reduzindo os impactos no custo do gusa provocados pela operação com coque. A figura 14 apresenta a evolução da composição da carga metálica durante a operação com coque.

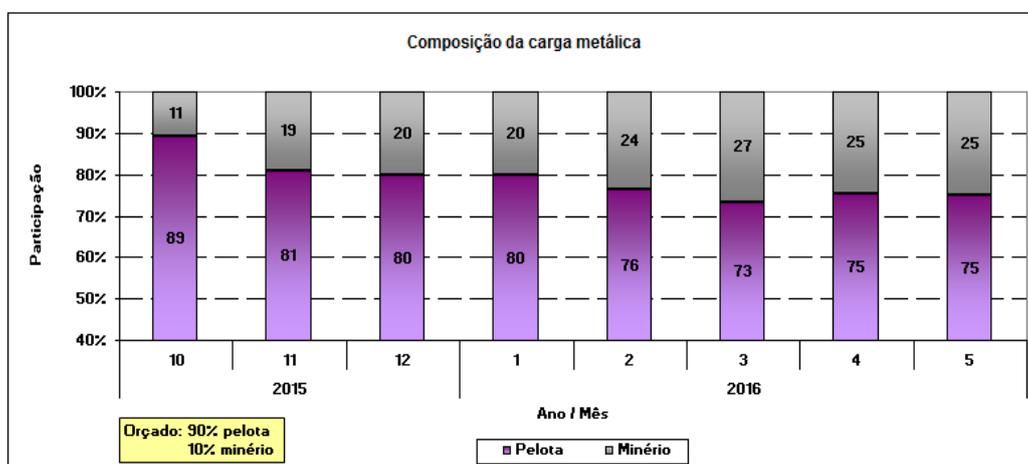


Figura 14. Evolução da composição da carga metálica durante a operação com coque.

Para o projeto coque, a produção objetivada final foi de 1.100 toneladas. Valor este atingindo antes do esperado, conforme apresentado na figura 15.

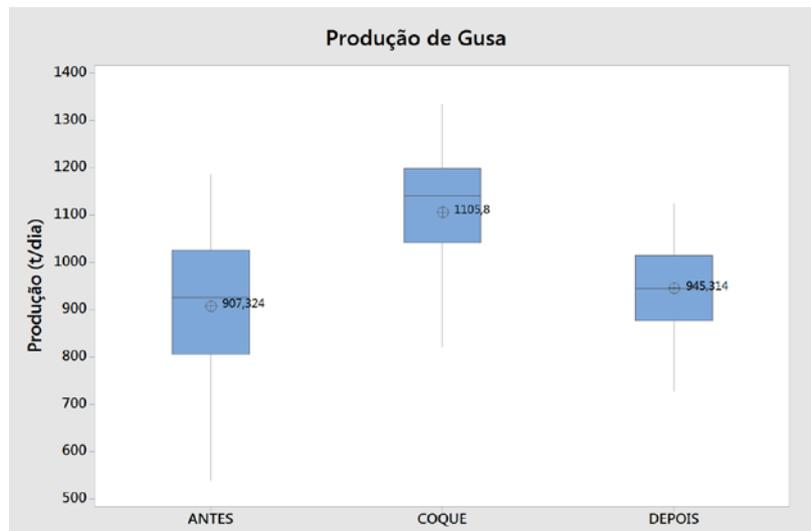


Figura 15. Evolução da produção calculada durante a operação com coque.

O indicador DCI (*Deadman Cleanliness Index*) é uma forma de avaliar a limpeza do cadinho em função de variáveis operacionais. Seu calculo é realizado conforme (equação 01).

$$DCI = T_{gusa} + \left((1 / 2,57 * 10^{-3}) * \Delta C \right) - (1430 - 190 * (1,23 - C / S)) \quad (1)$$

Onde:

DCI = Deadman Cleanliness Index

T_{gusa} = Temperatura do gusa (°C)

Delta C = saturação do teor de carbonos (%)

C/S = Basicidade binária

Conforme apresentado na figura 16, o DCI teve uma queda acentuada de outubro de 2014 até julho de 2015. Durante o período de utilização do coque, observa-se uma evolução significativa no DCI, indicando que o cadinho estava sendo limpo.

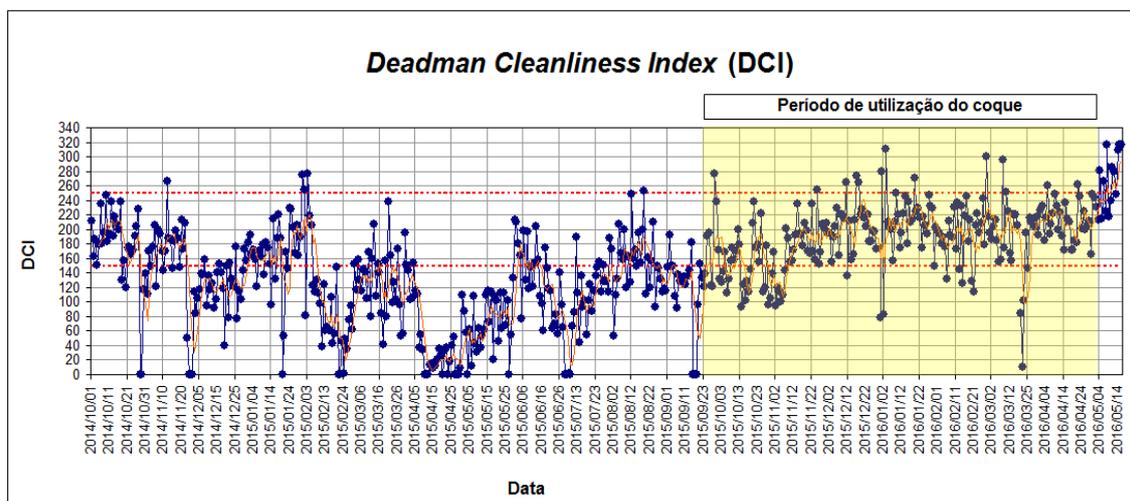


Figura 16. Evolução do DCI durante a operação com coque.

O sopro pelo furo de gusa foi eliminado durante o período de utilização do coque. Este fenômeno pode estar relacionado ao *desing* do cadinho, que foi projetado para operação com coque. A figura 17 apresenta fotos do sopro pelo furo de gusa durante a operação com carvão vegetal e coque.



Figura 17. Sopro com carvão vegetal (a), sopro com coque (b).

3 CONCLUSÃO

A substituição do carvão vegetal pelo coque no Alto-forno 2 da *Aperam South América*, ocorreu no dia 26 de outubro de 2015, se deu de forma estável, sem qualquer distúrbio que pudesse comprometer o fornecimento de gusa para a Aciaria.

Um ponto importante na estabilidade do processo na troca de combustível foi o funcionamento estável de todos os equipamentos implantados e principalmente do sistema de automação e controle, demonstrando a qualidade dos trabalhos efetuados por todos os envolvidos no projeto.

Durante a operação do Alto-Forno 2 com o redutor coque foi possível obter: uma operação estável, atingir a meta de produção, baixo consumo de redutor, utilização do *small charcoal* junto a carga metálica, redução da participação de pelota na carga, recuperação da permeabilidade do homem morto e evolução na limpeza do cadinho (índice de limpeza medido pelo DCI - *Deadman Cleanness Index*).

O período de operação com coque permitiu validar a necessidade de adequação do cadinho e sua refrigeração para operação com 100% de carvão vegetal.

REFERÊNCIAS

- 1 BABICH, A; SENK, D. and GUDENAU, H. W. Effect of coke reactivity an nut coke on blast furnace operation. *Ironmaking and Steelmaking*, vol. 36 (2009), No 3, p. 222 – 229.
- 2 WATAKABE, S; TAKEDA, K; NISHIMURA, H; GOTO, S; NISHIMURA, N; UCHIDA, T; KIGUCHI. Development of high ratio coke mixed charging technique to the blast furnace. *ISIJ International* , Vol. 46 (2006), No 4, p. 513 – 522.

- 3 OKUDA, K., AMANO, S., ISHIOKA, N., ONO, H., FURUKAWA, T. and INOUE, T. Use of small size coke (7 ~ 20 mm) mixed with ore in blast the furnace. Transactions ISIJ, Vol. 24 (1984), p. B37.
- 4 GONÇALVES, LUIZ J. ET AL. Substituição de Coque por Carvão Vegetal no Alto-forno 2 da Aperam South America. Timóteo, 14 p. RT11-0015/2011