

## CO-INJEÇÃO DE GÁS NATURAL E CARVÃO PULVERIZADO NO ALTO-FORNO 3 DA ARCELORMITTAL TUBARÃO: RESULTADOS OPERACIONAIS\*

Luiz Augusto Wasem<sup>1</sup>

Filipe Sathler<sup>2</sup>

Lucas Gonçalves Generoso<sup>3</sup>

João José dos Santos Carvalho<sup>4</sup>

Claudio César da Costa<sup>5</sup>

João Bosco Mendes<sup>6</sup>

Leonardo de Nardi Plazzi<sup>7</sup>

### Resumo

A tecnologia do uso da co-injeção de gás natural e carvão pulverizado nas ventaneiras para a produção de ferro-gusa foi aplicada no Alto-Forno 3 da ArcelorMittal Tubarão com o objetivo de diminuir o consumo de combustíveis e de redução dos gases de efeito estufa. O presente trabalho demonstra os resultados operacionais no período de setembro de 2022 a janeiro de 2023 onde foi injetado até 33 kg/t de gás natural paralelamente à redução do carvão pulverizado e do coque rate em comparação ao período anterior somente com injeção de carvão. Esta ação corrobora com a iniciativa da ArcelorMittal em atingir seu compromisso de redução da emissão de GEE até 2050 por meio de produtos e processos com baixa emissão de CO<sub>2</sub>.

**Palavras-chave:** Co-Injeção; Gás Natural; Carvão Pulverizado; Alto-Forno; Gases de Efeito Estufa – GEE.

## CO-INJECTION OF NATURAL GAS AND PULVERIZED COAL IN BLAST FURNACE 3 AT ARCELORMITTAL TUBARÃO: OPERATIONAL RESULTS

### Abstract

The technology of co-injection of natural gas and pulverized coal in the tuyeres to produce pig iron was implemented in Blast Furnace 3 at ArcelorMittal Tubarão with the aim of reducing fuel consumption and greenhouse gas (GHG) emissions. The paper presents the operational results from September 2022 to January 2023, during which up to 33 kg/t of natural gas was injected in parallel with the reduction in pulverized coal and coke rate compared to the previous period when only coal injection was used. This initiative supports ArcelorMittal's commitment to achieving net zero GHG emissions by 2050 through the development of low CO<sub>2</sub> emissions products and processes.

**Keywords:** Co-Injection; Natural Gas; Pulverized Coal; Blast Furnace; Greenhouse Gas – GHG.

<sup>1</sup> Engenharia Metalúrgica, Especialista de Altos Fornos, Unidade Técnica da Área de Redução, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo e Brasil.

<sup>2</sup> Engenharia Metalúrgica, Especialista de Altos Fornos, Unidade Técnica da Área de Redução, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo e Brasil.

<sup>3</sup> Engenharia Metalúrgica, Especialista de Altos Fornos, Unidade Técnica da Área de Redução, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo e Brasil.

<sup>4</sup> Engenharia Metalúrgica, Especialista de Altos Fornos, Unidade Técnica da Área de Redução, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo e Brasil.

<sup>5</sup> Engenharia Metalúrgica, Gerente, Unidade Técnica da Área de Redução, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo e Brasil.

<sup>6</sup> Engenharia Metalúrgica, Gerente, Unidade Técnica da Área de Redução, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo e Brasil.

<sup>7</sup> Engenharia de Produção, Gerente, Gerencia Operacional dos Altos Fornos 2 e 3, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo e Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A busca pela redução do consumo de combustíveis nos altos-fornos e da redução dos gases de efeito estufa resultou na iniciativa da ArcelorMittal Tubarão em adotar o gás natural como combustível no Alto-Forno 3, como substituto parcial do carvão mineral.

Essa tecnologia consiste em injetar combustíveis auxiliares gasosos, neste caso o gás natural, pelas ventaneiras, promovendo assim uma redução do consumo dos combustíveis de um modo geral. O uso de um ou outro tipo de combustível auxiliar irá depender do custo, de sua disponibilidade e da tecnologia empregada para tal fim. A injeção de carvão e posteriormente a de gás natural foram testadas e aprovadas e, na atualidade, grande parte dos altos-fornos empregam algum tipo de injeção auxiliar pelas ventaneiras [1].

Além da iniciativa de redução do consumo de combustíveis, o uso de matérias-primas com menores quantidades de carbono fóssil intensivas colaboram para o atendimento da meta de redução dos gases de efeito estufa e desta forma permitem a geração de certificados *Green Steel*, que representam uma produção de aço mais sustentável e reforça a iniciativa da empresa de atingir a meta de carbono neutro em todas as suas operações até 2050 e, como passo intermediário, reduzir em 25% suas emissões específicas até 2030.

Tecnologia e equipamentos para o uso simultâneo de gás natural (GN) e carvão pulverizado (PCI) na siderurgia, denominado de co-injeção, também foram desenvolvidos com sucesso [2]. No Brasil, também existem casos de co-injeção relatados em usinas siderúrgicas das cidades de Ouro Branco [3] e Ipatinga [4], ambas em Minas Gerais. Em somatória, modelos de co-injeção de carvão pulverizado e gás natural no alto-forno foram apresentados e os resultados mostraram a possibilidade de avanços consideráveis na operação do alto-forno, como por exemplo aumento de produtividade, menor teor de silício no gusa e redução do Coque Rate [5].

O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados da co-injeção de Gás Natural e Carvão Pulverizado nas ventaneiras do Alto-Forno 3 da ArcelorMittal Tubarão como alternativa de redução de combustível e redução da emissão de CO<sub>2</sub>.

### 1.1 Vantagens do uso do Gás Natural

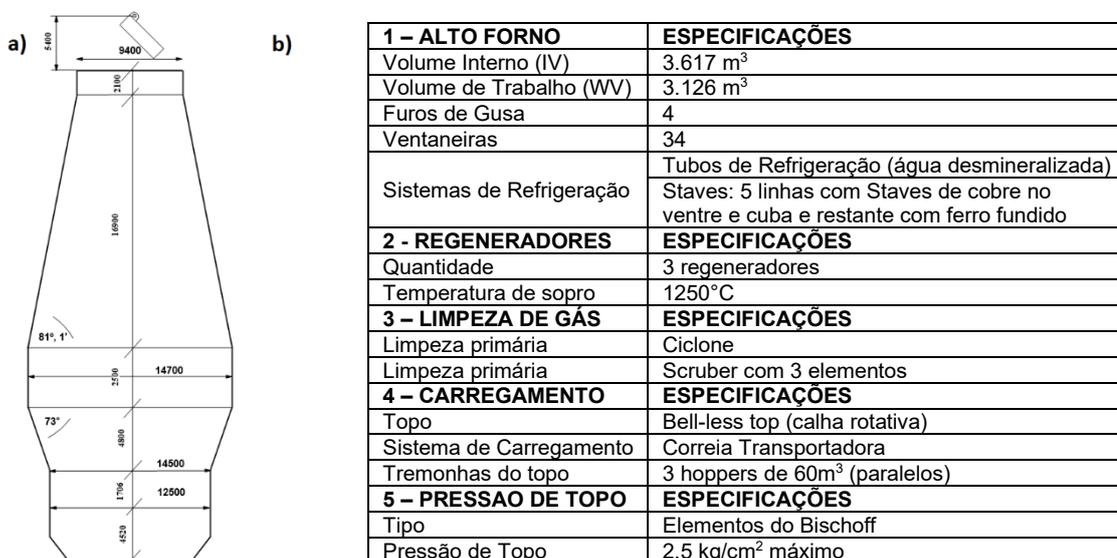
Há vários benefícios resultantes da injeção do gás natural:

- Redução dos custos de produção de gusa provenientes da redução do consumo de coque e carvão PCI;
- Elevada taxa de substituição em relação ao carvão PCI;
- Menor custo de instalação e manutenção quando comparado a outras injeções;
- Aumento da produtividade, caso seja necessário, em função da injeção de enriquecimento de oxigênio no ar soprado;
- Redução do input de enxofre e fósforo pela redução de coque e carvão PCI;
- Maior estabilidade operacional com melhoria da qualidade da gusa devido menor recirculação de finos no interior do forno;

- Redução da geração de pó/lama devido maior eficiência de combustão do que o carvão PCI;
- O poder calorífico do gás do topo gerado aumenta em função da elevação do teor de hidrogênio, possibilitando reduzir o consumo de gás nos regeneradores e maior geração de energia elétricas nas caldeiras;
- Redução da dependência de utilização de certos tipos de carvão;
- Redução da emissão de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, material particulado e NO<sub>x</sub>;
- Geração de certificados Green Steel com prêmio no mercado;

## 1.2 Especificações do Alto-Forno 03

O Alto Forno 3 da ArcelorMittal Tubarão teve o seu início de operação (*start-up*) em 21/07/2007, permitindo uma capacidade de 2,8 Milhões de toneladas de gusa por ano. As suas principais especificações estão citadas na Figura 1 [6].



**Figura 1.** Principais Especificações do Alto Forno 03 da ArcelorMittal Tubarão.  
a) Medidas do corpo do forno; b) Dados dos principais equipamentos. [6].

Com uma produção acumulada de 13,6 milhões de toneladas de gusa produzidos, o seu blowdown ocorreu em 11/10/2012 finalizando assim sua primeira campanha. Sua segunda campanha teve início em 06/07/2014 e já acumula até o mês de março/23 uma produção de 22,7 milhões de toneladas.

## 1.3 Especificações da Planta de Gás Natural

A planta de injeção de gás natural do Alto-Forno 3 foi desenvolvida para uma capacidade instalada de injeção de 445.944 Nm<sup>3</sup>/dia, o que representa uma taxa de 39,27 kg/t (para uma produção de 8.000 t/dia), permitindo assim uma injeção mínima de 340 Nm<sup>3</sup>/h e máxima de 546,5 Nm<sup>3</sup>/h por lança.

O sistema de injeção de gás natural no alto forno 3 foi concebido de forma a ter o mínimo de interferência no sistema existente de injeção de carvão pulverizado, ou seja, são sistemas independentes que coexistem e são facilmente intercambiáveis. O sistema de injeção de gás natural consiste das seguintes partes:

- Um conjunto de medição de gás natural na estação de recebimento da fornecedora onde o gás chega a 25 Kgf/cm<sup>2</sup> e o reduz para 15 Kgf/cm<sup>2</sup> e um conjunto de redução de pressão, equipado com uma válvula auto-operada para reduzir a pressão do gás natural de 15 Kgf/cm<sup>2</sup> para 10 Kgf/cm<sup>2</sup>;
- Um conjunto de segurança de válvulas duplo corte, equipado com três válvulas *shut-off* para realizar a interrupção do fornecimento de gás natural e inertizar o conjunto;
- Um conjunto de controle de vazão do GN equipado com dois ramais (redundantes) com suas respectivas válvulas controladoras para suprir as linhas de injeção;
- Um conjunto de 68 válvulas, sendo 34 para a injeção de GN e 34 para refrigeração das lanças com nitrogênio distribuídas em duas rotas (ventaneiras pares e ímpares);
- 34 lanças de injeção de 21,3 mm de diâmetro externo e 13,9 mm de diâmetro interno, de aço inox 310S aos quais, possuem as mesmas especificações das lanças utilizadas para a injeção de carvão pulverizado, instaladas do lado esquerdo do algaraviz (Figura 2).

A injeção funciona baseada no controle de vazão de gás natural para as linhas, onde uma das duas válvulas de controle (redundância) é responsável por realizar o controle da demanda de gás natural a ser injetado. Cada lança conta com um transmissor de pressão, que permite saber se existe fluxo de gás natural no sentido de alimentação do alto forno através da comparação com o valor de referência após a válvula auto-operada na linha principal.

Na preparação para iniciar a injeção de gás natural, é interrompida a injeção individual de carvão PCI do lado esquerdo do algaraviz, troca-se os mangotes da respectiva linha de gás natural e assim é iniciada a injeção. Quando há necessidade de retornar para a injeção de carvão pulverizado, interrompe-se o gás, troca-se as lanças de injeção por novas, visando evitar resíduos de material no interior das mesmas, troca-se os mangotes das respectivas linhas e assim inicia-se a injeção de carvão pulverizado.

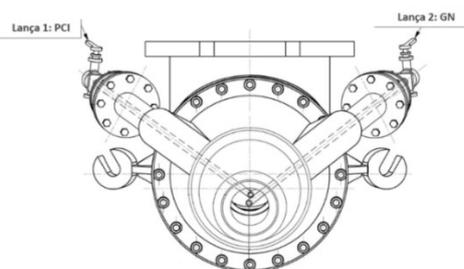


Figura 2. Arranjo das lanças no interior da ventaneira do Alto-Forno 3

#### 1.4 Aspectos de Segurança

Para o devido funcionamento de toda a planta de injeção de gás natural, foram implantadas diversas melhorias visando garantir a segurança das pessoas, dos equipamentos e de todo o processo. São elas:

- Válvulas de corte de injeção para o caso em que os transmissores indicarem pressão do GN menor do que a pressão de ar de sopro (delta de 1,5 kgf/cm<sup>2</sup>);
- Bloqueio de GN individual, caso o sistema de medição de vazão de ar da ventaneira atingir valores menores do que 60 m<sup>3</sup>/min;

- Sistema de detecção de passagem de blocos em frente à ventaneira que interrompa o fluxo para o interior do alto-forno por meio de Delta P (diferencial de pressão) evitando o risco de explosão (o mesmo já instalado para o PCI);
- Sistema de nitrogênio para verificar estanqueidade nas tubulações de GN;
- Interlock de desarme da planta se atingir 11,5% de hidrogênio no gás do topo;
- Desarme do sistema de injeção de gás natural caso a temperatura do gás de topo atingir valores maiores do que 450°C;
- As instalações da planta de injeção de GN são em ambientes abertos, o que permite que o gás seja dissipado em caso de vazamento;
- Sistema de detecção de bloqueio de ventaneiras por câmeras;
- 3 Medidores on-line de Metano, na área, próximos às estações de distribuição de gás natural com alarmes na sala de controle;
- Sistema de redução e elevação automática da vazão de gás. Quando o sistema atinge 10,5% de H<sub>2</sub> do topo, há uma redução automática de vazão em 5% a cada 15 segundos (munidos de alarmes) e se assim permanecer baixo o próprio sistema retorna automaticamente para a vazão anterior mediante redução do % de H<sub>2</sub> do topo abaixo de 10%;
- Purga de nitrogênio nas tremonhas do topo pelo sistema de equalização secundária. As tremonhas têm a equalização primária com BFG (gás de alto-forno) e existe o risco de explosão devido ao encontro do Ar e o BFG com alto poder calorífico durante o processo de alívio das tremonhas.
- Analisador online com atualização de 1 segundo (análise dos gases CO e CO<sub>2</sub> por infravermelho e do H<sub>2</sub> por condutibilidade térmica) localizado na limpeza de gás, redundante a dois cromatógrafos já existentes para o processo do alto-forno.

## 2 DESENVOLVIMENTO

Nos últimos anos, a distribuidora local de GN realizou investimentos em novos dutos para abastecer as novas usinas da região e previa vender o excesso de GN para potenciais empresas locais. Assim foi possível utilizar a planta existente de PCI, como o mínimo de alterações para realizar a injeção simultânea de GN pelas ventaneiras.

O teste da injeção de gás natural iniciou-se as 10:00h do dia 12/09/2022 e finalizou no dia 31/01/2023. A substituição inicial do GN pelo PCI se deu gradualmente iniciando com 5 kg/t até atingir 33 kg/t no dia 27/09/2022, injetando em todas as ventaneiras, sendo uma lança com PCI e outra com gás natural. Importante a ressalva de que, em um primeiro momento houve a troca parcial de carvão PCI por gás natural e após estabilização da marcha operacional, houve redução assim, do coque rate carregado.

### 2.1 Itens de Controle

#### 2.1.1 Temperatura de Chama

A Temperatura Teórica da Chama (TTC) é uma temperatura calculada a partir de um balanço de energia na região do raceway e esta fornece a energia necessária, a partir da combustão, para a o aquecimento e fusão do gusa e escória, juntamente com todas as demais reações no alto-forno. Esta deve ser a mais constante possível

pois uma TTC baixa pode resultar em uma queda de temperatura na parte inferior do alto-forno o que pode prejudicar assim a eficiência de combustão e o equilíbrio térmico gerando muitas instabilidades operacionais. Ao contrário uma temperatura elevada pode permitir melhor eficiência de combustão, mas também pode afetar a altura da zona de coesão diante do deslocamento das isotermas no alto-forno levando assim a uma descida de carga instável, também resultando em instabilidades operacionais.

Os constituintes de maiores proporção no GN são o carbono 75% e 25% hidrogênio. O gás natural, possui elevada relação de  $H_2/C$  quando comparado a outros combustíveis auxiliares, portanto diminui a TTC sendo necessário um maior nível de energia para o craqueamento dos hidrocarbonetos. Então, para compensar a queda da TTC devemos enriquecer o ar soprado com oxigênio o que resulta em um consumo de coque mais rápido nas ventaneiras, e conseqüentemente aumento de produtividade do alto-forno.

Além disso, devido ao consumo de coque mais rápido nas ventaneiras, há menos tempo para a troca de calor dos gases com a carga, o que faz com que o material da carga chegue sem o devido aquecimento e não devidamente reduzido na parte inferior do alto-forno aumentando assim a taxa de redução direta e comprometendo o nível térmico do reator, assim, antes que os benefícios do aumento da produtividade por enriquecimento de oxigênio sejam alcançados, o equilíbrio térmico do alto-forno deve ser satisfeito [7].

### 2.1.2 Injeção em todas as Ventaneiras

É de extrema importância manter uma mesma taxa de injeção de gás natural e carvão PCI em todas as ventaneiras pois assim teremos uma TTC uniforme em toda a circunferência do alto-forno. Ventaneiras sem injeção ou com taxas diferenciadas deixam a zona de coesão assimétrica [8] causando instabilidade operacional, podendo resultar em redução de produção e/ou consumo elevado de combustível e até ocasionar falhas nos conjuntos de insuflação devido abaixamento excessivo da raiz da zona de coesão (Figura 3).

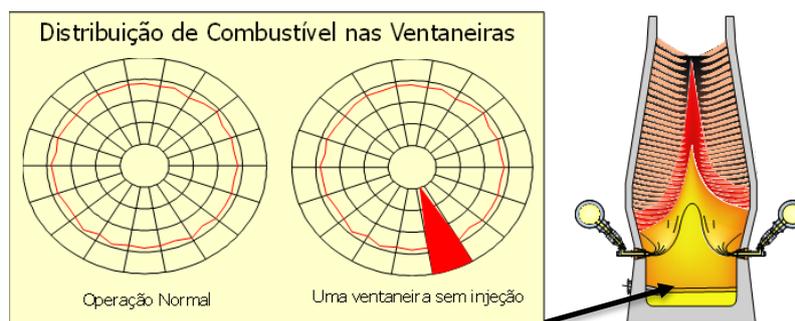


Figura 3. Assimetria da Zona de Coesão em função [8]

### 2.1.2 Taxa de Substituição

O hidrogênio substitui parte do carbono consumido pela redução do  $FeO$  diminuindo assim o consumo específico de coque (*solution loss*). Esta reação é expressa pela gasificação endotérmica do carbono que diminui à medida em que se aumenta o hidrogênio [7].

A taxa de substituição então, é a equivalência, em termos de consumo de coque para, neste caso, ao consumo de gás natural. Relatos em outros trabalhos mostraram que esta taxa varia em torno de 1,3 a 1,8 [4], 1,35 [3] e 1,1 [9] para diversos altos-fornos com diversas taxas de injeção de gás, sendo somente injeção de gás natural ou co-injeção com o carvão pulverizado.

## 2.2 Resultados

### 2.2.1 Produtividade

Em termos de produtividade, não se pode observar ganhos, pois pouco antes da injeção de gás natural houve a necessidade de redução da produtividade do Alto-Forno 3 em função de condições de mercado. Nesse cenário, houve limitação do enriquecimento de oxigênio e assim foi necessário operar com o gás natural à uma temperatura de chama relativamente mais baixa (Figura 4).

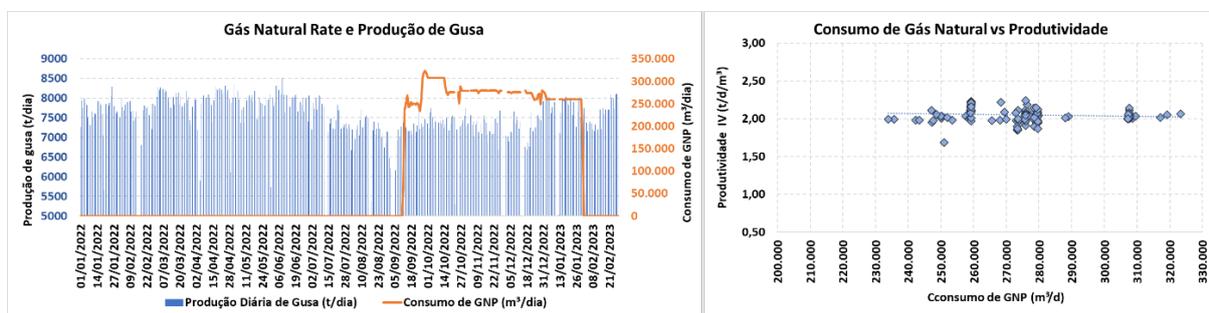


Figura 4. Produção e Consumo de Gás Natural

### 2.2.2 Temperatura Teórica de Chama

Como relatado, em função de controle de produção, ao injetar o gás natural, não foi possível elevar o enriquecimento de oxigênio no ar soprado. Por esse motivo houve uma queda na TTC (Figura 5) de uma média de 2155°C para 2090°C, mas não houve muito prejuízo à operação visto que a temperatura do gás do topo se manteve adequada (elevou de 146°C para 156°C em média) e apesar da queda da temperatura de gusa (1510°C para 1485°C em média) a mesma ainda permaneceu na faixa normal de operação (Figura 6). A razão para isso é que houve diminuição da reação de *Solution Loss* (reação endotérmica) permitindo que os requisitos de energia para altas temperaturas fossem atendidos com temperaturas de gás mais baixas, demandando menos coque a ser queimado para fornecer o calor sensível.

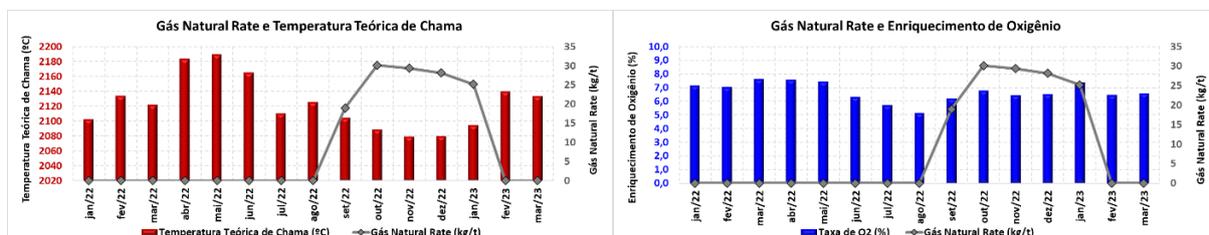


Figura 5. Comportamento da Temperatura Teórica de Chama em função da injeção de Gás Natural com o Enriquecimento de Oxigênio no Ar Soprado

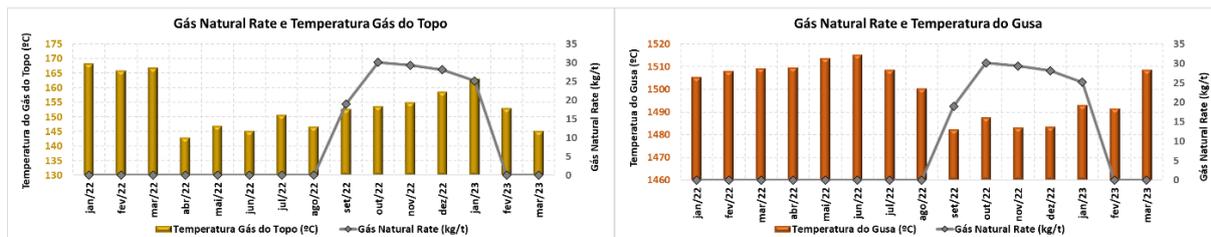


Figura 6. Comportamento da Temperatura do Gás do Topo e da Temperatura do Gusa mediante injeção de gás natural

## 2.2.3 Permeabilidade

Em um primeiro momento, com a troca do carvão pulverizado pelo gás natural, houve melhora da permeabilidade dP/V do reator (Pressão de Sopros – Pressão de Topo dividido pelo Volume de Ar Soprado) pelo fato de ter reduzido o percentual de cinzas e material incombustível (*char*) e também pelo fato de que a injeção de gás natural enriquece os gases com H<sub>2</sub> o que resulta em redução da densidade do gás gerado, melhorando assim a permeabilidade (0,30 para 0,29). Com esta melhora, foi possível otimizar o leito de fusão, reduzindo assim o coque rate e elevando os percentuais de sinter (42% para 46,1% em média) e minério granulado (de 9,8% para 12,3% em média) a fim de reduzir o custo de produção (Figura 7). Com o aumento, houve uma perda de permeabilidade de 0,30 para 0,32 mas ainda dentro dos padrões de controle (período de abr/22-mar/23 - excluindo paradas e instabilidades operacionais).

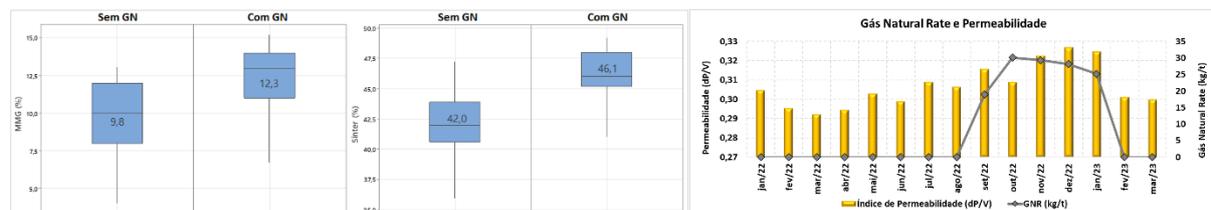
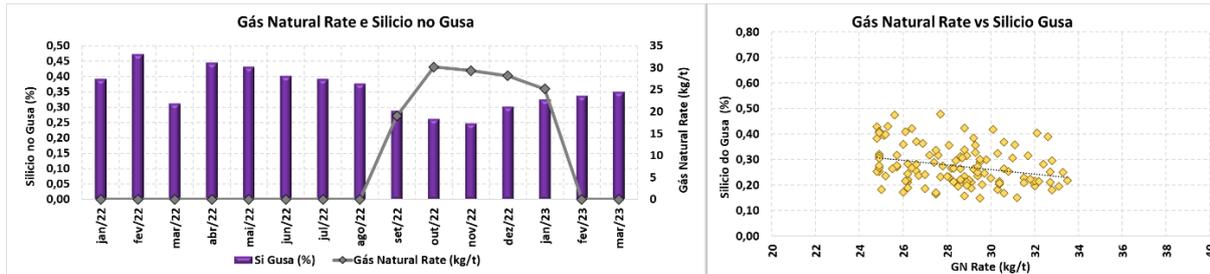


Figura 7. Comportamento da Permeabilidade (dP/V) com o uso de gás natural e incremento de minério granulado e sinter na carga

## 2.2.4 Qualidade do Gusa

Como abordado, com a diminuição da densidade dos gases pela injeção de GN, houve melhora na descida da carga obtendo assim um processo mais estável e como consequência, uma menor variação da qualidade do gusa. Além disso, a estabilidade operacional, resultou em uma diminuição do fuel rate total e consequentemente um deslocamento da zona de coesão para baixo, diminuindo assim o volume abaixo desta, resultando em uma menor incorporação de silício no gusa.

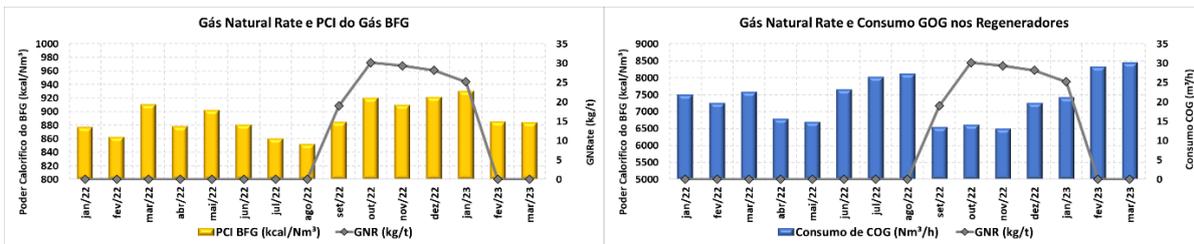
A própria queda da TTC e a limitação no enriquecimento de oxigênio no ar soprado prejudica a eficiência de queima do CH<sub>4</sub> reduzindo assim a temperatura de chama real, elevando as perdas térmicas na região acima das ventaneiras. Isso aumenta a concentração de hidrogênio próximo à parede impactando a eficiência de redução do gás, reduzindo, portanto, a temperatura do gusa. Uma redução da temperatura de gusa e elevação da temperatura de gás do topo mostra que houve uma redução do aporte térmico na zona de elaboração e elevação na zona de preparação, conforme visto na Figura 6, o que favoreceu também a redução do percentual de silício no gusa de 0,41% para 0,28% em média (Figura 8).



**Figura 8.** Percentual de silício do gusa versus a injeção de gás natural (dados do período de abr/22 a mar/23 - excluindo paradas de alto-forno e instabilidades operacionais).

### 2.2.5 Poder Calorífico do BFG

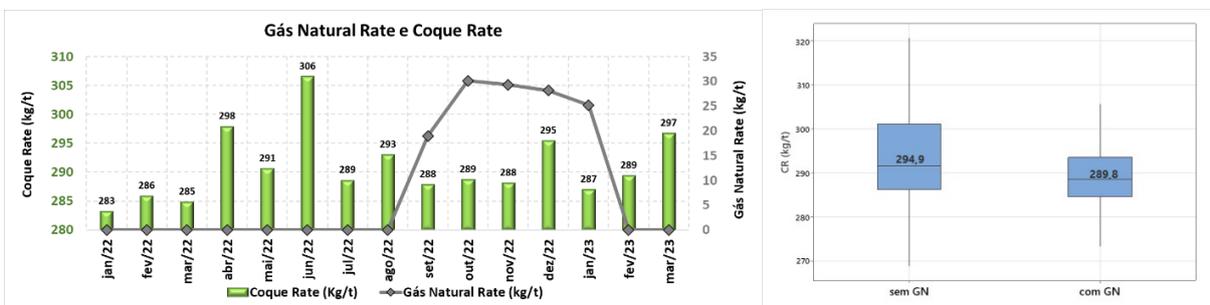
Como esperado, houve elevação do poder calorífico do gás BFG em função da elevação do percentual de hidrogênio no gás do topo de 875 para 890 kcal/Nm<sup>3</sup> em média. Isso se refletiu diretamente no consumo de gás COG (gás de coqueria) nos regeneradores, que diminuiu aproximadamente 7,8% (Figura 9) saindo de 7465 Nm<sup>3</sup>/h para 6880 Nm<sup>3</sup>/h em média (dados do período de abr/22 a mar/23 - excluindo paradas de alto-forno e instabilidades operacionais)..



**Figura 9.** Consumo de COG e Poder Calorífico do BFG em função da injeção de gás natural

### 2.2.6 Combustíveis – Coque Rate e Fuel Rate

Com a injeção de gás natural e melhora das condições operacionais do Alto-Forno 3 em termos de estabilidade e qualidade do gusa, foi possível uma redução dos combustíveis, coque rate e principalmente fuel rate, conforme podemos observar nas respectivas Figuras 10 e 11 abaixo. Houve redução em média de 5,1 kg/t de coque rate e de 15,7 kg/t para o fuel rate (dados do período de abr/22 a mar/23 - excluindo paradas de alto-forno e instabilidades operacionais).



**Figura 10.** Resultados do Coque Rate antes e durante o uso do gás natural

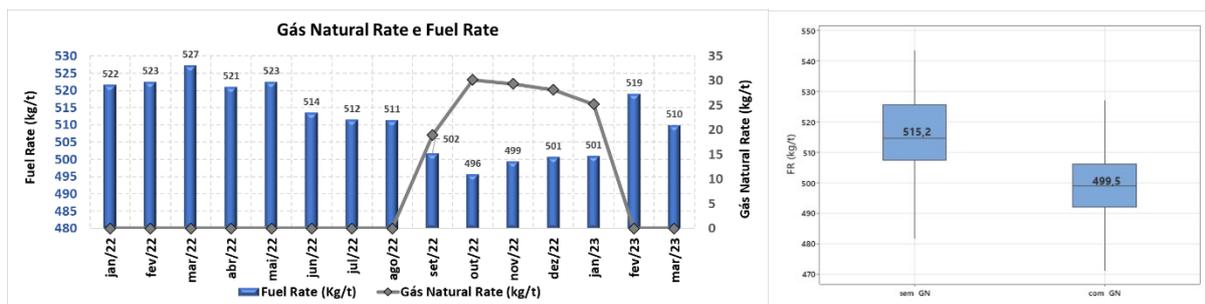


Figura 11. Resultados do Fuel Rate antes e durante o uso do gás natural

## 2.2.6 Taxa de Substituição

Para a taxa de carvão pulverizado (PCR), obtemos uma boa correlação o que mostra uma relação de 1,80 com  $R^2$  de 0,83 (Figura 12).

Para o Coque Rate, foi obtida uma correlação que indica uma taxa de substituição de 1,01 (Figura 13).

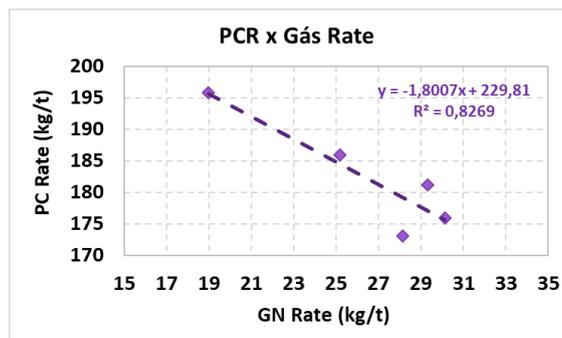


Figura 11. Correlação do PCI Rate com a taxa de gás natural

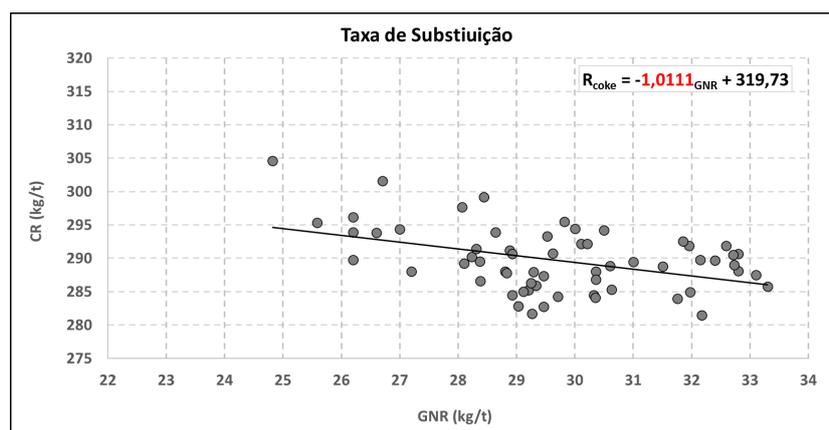


Figura 11. Taxa de substituição coque x gás natural

## 3 CONCLUSÃO

Após o período de injeção de gás natural no Alto-Forno 3 da ArcelorMittal Tubarão foi demonstrado os ganhos em termos de redução do consumo de combustíveis. Além disso, com a melhora da performance operacional, em termos de estabilidade e de permeabilidade, foi possível elevar o consumo de sinter e minério granulado em

detrimento ao consumo de pelota, objetivando assim uma redução dos custos de produção.

A utilização do gás natural no período de teste demonstrou ser uma relevante plataforma para a redução de GEE. Foram evitadas, durante este período, um total de 33.836t CO<sub>2</sub>eq, sendo aprovado, portanto, o seu uso no Alto-Forno 3. Com as emissões evitadas foi possível gerar 15.687 certificados XCarb™ colaborando assim para continuidade do uso de Gás Natural na modalidade de co-injeção.

Outros benefícios obtidos foram a redução do consumo de COG nos regeneradores pela elevação do poder calorífico do gás BFG e a redução do silício do gusa, bem como alguns benefícios indiretos como redução do consumo de nitrogênio de arraste de carvão PCI e custos de manutenção da planta. Existe ainda oportunidades para ganhos secundários tais como melhor condição de permeabilidade do cadinho (menor % finos) e menores gastos com a planta de moagem e injeção devido menor taxa de carvão PCI.

Importante salientar que durante o período de co-injeção, não foi possível elevar o enriquecimento de oxigênio, o que garantiria uma correção da temperatura teórica de chama, pois esta elevação traria necessariamente uma elevação de produtividade, o que no momento da injeção, não era possível a sua realização em função de condições de mercado.

A co-injeção do gás natural com o carvão PCI no Alto-Forno 3 se mostrou uma iniciativa importante na redução de custos operacionais e também uma importante medida de redução da emissão dos gases de efeito estufa, corroborando para o atingimento da meta da ArcelorMittal de carbono neutro em todas as suas operações até 2050.

## REFERÊNCIAS

- 1 Mourão M B, Yokoji A, Malynowskyj A, et al. Introdução à Siderurgia. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais; 2007.
- 2 Babich A, Yaroshevskall S, Formoso A, Cores A, Garcia L, Nozdrachev V. Co-injection of Noncoking Coal and Natural Gas in Blast Furnace. ISIJ International. Vol. 39 (1999), No. 3. pp. 229-238.
- 3 Matos U F de, Abreu J F A C, Ferraz S P, Lemos R M, et al. Co-Injeção de Gás Natural e Carvão em Altos-Fornos. 44º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas. 2014, Minas Gerais.
- 4 Souza M A T de, Rosa E R R, Oliveira C F de, Hostt H. Injeção de Gás Natural nas Ventaneiras do Alto-Forno 3 da Usiminas Usina de Ipatinga. 32º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades. 2011, Bahia.
- 5 Castro J A de, Nogami H, Yagi J. Numerical Investigation of Simultaneous Injection of Pulverized Coal and Natural Gas with Oxygen Enrichment to the Blast Furnace. ISIJ International, Vol. 42 (2002), No. 11, pp. 1203–1211
- 6 Sathler F, Junior RCN, Costa CC, Ribeiro EC. Descrição dos Fundamentos Teóricos e Práticos do Blowdown Aplicados ao Alto Forno 03 da ArcelorMittal Aços Planos América do Sul. 45º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas. São Paulo. 2015.
- 7 Lingiard OE. Tecnologia de injeção de gás natural em Alto-Forno. Curso Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. Vitória; 2011.

- 8 Geerdes M, Chaigneau R, Kurunov I, Lingiardi O, Ricketts J. Modern Blast Furnace Ironmaking: An Introduction. 3<sup>rd</sup> Edition, 2015.
- 9 Agarwal J C, Brown F C, Chin D L, et al. Coinjection of Natural Gas and Pulverized Coal in the Blast Furnace at High Levels: Field Test Results at USS/Gary. Ironmaking Conference Proceedings, Vol 58 pp 105-134. Chicago, 1999. |