

AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM FORNOS DE PELOTIZAÇÃO*

Artur Frederico Fonseca da Cruz¹
Ederson Barcelos Haagensen²
Leandro Resinentti Zanon³
William Wagner Dettoni Regattieri⁴
Marcos Meyer Machado⁵

Resumo

Este trabalho tem como objetivo principal a redução do custode produção numa planta de pelotização de minério de ferro, com aplicação da metodologia *Lean Six Sigma* na fase de maior custo, o processamento térmico. O desenvolvimento do trabalho se deu em três usinas de pelotização. Para que não houvessem prejuízos do atendimento à qualidade do produto final, foram realizadas adequações no processo de pelotamento levando em consideração a teoria de ajuste do diâmetro médio das pelotas e sua influência na máquina de endurecimento de pelotas [4]. Para alcance dos resultados, a atuação foi direta no desenvolvimento de novos perfis de queima por nível de produção, ajuste no percentual de aplicação do combustível sólido e balanceamento termodinâmico. O resultado do trabalho representou uma redução no consumo específico do gás natural de 12,93%, 12,15% e 5,66% nas usinas A, B e C, respectivamente. Estes ganhos foram garantidos pela manutenção dos resultados de resistência à compressão e abrasão da pelota processada termicamente.

Palavras-chave: Forno de pelotização; Eficiência energética; *Lean Six Sigma*; Consumo específico de gás natural.

ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENTS ON THE INDURATING MACHINE OF PELLETIZING PLANTS

Abstract

The main target of this work is to reduce the production costs of a pelletizing plant using the *Lean Six Sigma* approach in the most expensive process, the indurating. The development of this work was in 3 plants. To avoid quality loss of the indurated pellets, have been done adjustments on the balling process based on the diameter average theory and their influence on the indurating machine. To achieve the results, new thermal profiles were developed by level production, adjustments on the balance of solid/gas combustibles ratio and thermodynamic balance of the machine. It was reduced 12,93%, 12,15% and 5,66% of the plants A, B and C, respectively, assuring the abrasion index and cold compression strength of the indurated pellets.

Keywords: Indurate pelletizing machine, Energy efficiency, *Lean Six Sigma*, Specific natural gas consumption.

¹ Engenheiro de Materiais, Engenheiro, Unidade Técnica Pelotização, VALE S/A, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

² Técnico Metalurgista, Analista Operacional, Gerência de Operação da Pelotização, VALE S/A, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, Engenheiro, Unidade Técnica Pelotização, VALE S/A, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

- ⁴ *Técnico Metalurgista, Analista Operacional, Gerência de Operação da Pelotização, VALE S/A, Vitória, Espírito Santo, Brasil.*
- ⁵ *Engenheiro Metalurgista, Supervisor, Gerência PCMO Pelotização e Utilidades, VALE S/A, Vitória, Espírito Santo, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

A rentabilidade de qualquer processo produtivo está atrelada fortemente ao custo variável. Um dos fatores que influencia diretamente neste custo é o consumo dos insumos utilizados no processo de pelletização, dentre estes o gás natural destaca-se como maior contribuinte, representando 34% do total, que compõe a parcela do custo com matriz energética, conforme ilustrado na figura 1. A utilização deste insumo é contínua e essencial por ser a principal fonte de energia no processamento térmico das pelotas verdes em fornos de pelletização.

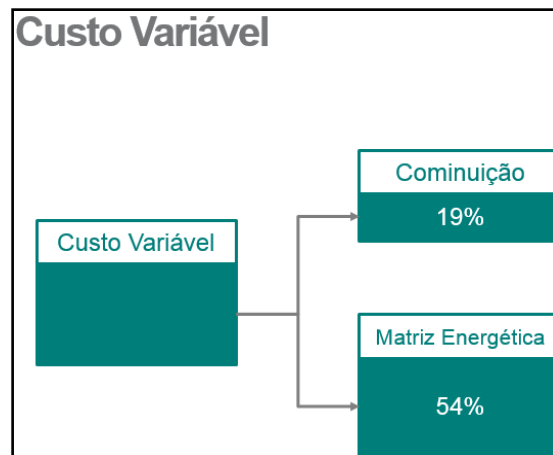


Figura 1 Estratificação macro do custo variável.

Diante do cenário macroeconômico brasileiro, a constante elevação do preço desse insumo impacta direta e negativamente nos custos de produção e na geração de caixa da empresa. Atuar diretamente no controle e na redução do consumo específico de gás natural é estratégico em plantas de pelletização.

O fluxograma típico do processo de pelletização está ilustrado na Figura 2 e define os limites dos três macroprocessos do sistema produtivo. São eles: 1. Preparação da matéria prima; 2. Formação das pelotas verdes; 3. Processamento térmico das pelotas verdes [1].

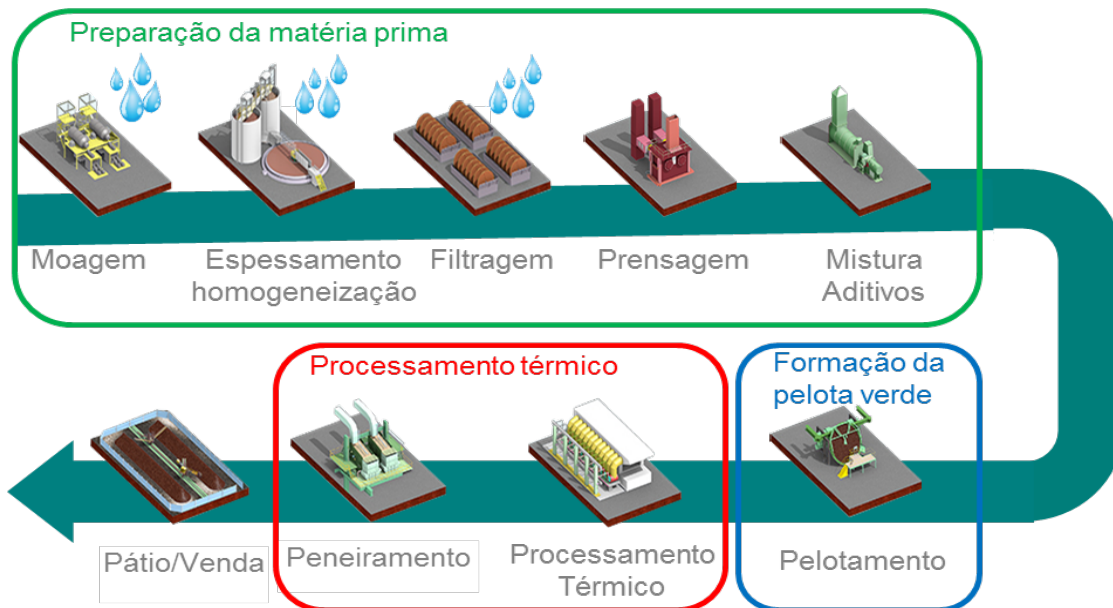


Figura 2 Fluxograma típico do processo de pelletização.

Os macroprocessos de preparação da matéria prima e formação da pelota verde consistem em adequar as características físicas dos grãos de minério por cominuição, o teor de umidade da polpa filtrada, a adição de aglomerantes, fundentes, combustível sólido, e aglomeração das partículas de minério de ferro com aditivos no pelotamento.

A importância da etapa de processamento térmico no processo produtivo da pelletização é caracterizada por conferir propriedades físicas e metalúrgicas ao produto final, assegurando o manuseio e transporte até o cliente sem a deterioração das pelotas produzidas. A Figura 3 representa o processo termodinâmico em uma máquina do tipo *traveling grate* que utiliza a recirculação de gases para secar as pelotas verdes formadas e classificadas, provenientes da etapa de pelotamento, possibilitando a aplicação de altas cargas térmicas com temperaturas superiores a 1300°C através da injeção de gás natural e/ou óleo combustível para aquecimento dos gases recuperados durante o processamento.

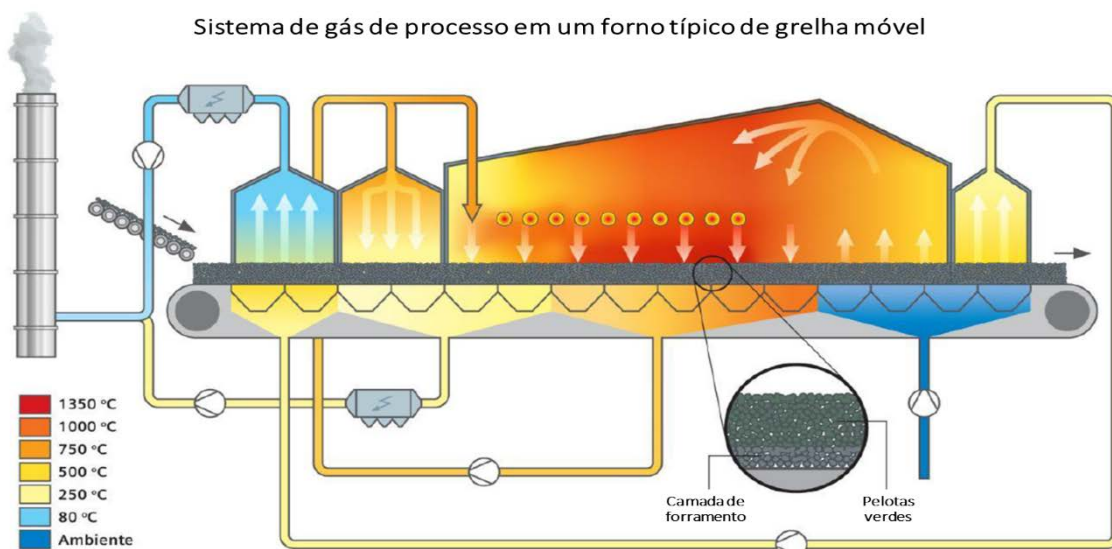


Figura 3 Esquema de um forno de pelletização tipo grelha móvel (adaptado) [2]

2 DESENVOLVIMENTO

MATERIAIS E MÉTODOS

Como alvo do estudo foram escolhidas três plantas de pelletização, as quais representavam 47% do orçamento de gás natural e aqui serão identificadas como usinas A, B e C.

A metodologia *Lean Six Sigma* foi escolhida para condução das análises e direcionamento das soluções visando a redução do consumo de gás natural.

As aquisições de dados para análises e medições dos resultados foram feitas através de informações de qualidade e consumo obtidos através do Sistema de Gerenciamento de Informações de Processo (PIMS) Aspen Tech.

O tratamento de banco de dados e análises estatísticas foram realizados com os softwares Microsoft Excel e Minitab.

2.1 Premissas para análise

Com base numa análise prévia de fenômeno e para reduzir o número de variáveis que poderiam influenciar na análise de desempenho do forno algumas premissas foram adotadas:

- Mesmo tipo de pelota antes e após a execução das ações;
- Em uma das usinas foi utilizado como período base o desempenho pós parada para manutenção relevante de modo a expurgar os efeitos benéficos já introduzidos pelas intervenções;
- Análise de qualidade física por média diária dos principais parâmetros da pelota queimada;
- Análise de desempenho do forno estratificado por faixa de produção.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Otimização do perfil de queima em um forno de pelletização

Na configuração de um forno de pelletização o perfil térmico de queima é parte essencial por ser responsável pela maior parte da contribuição na energia térmica empregada na queima das pelotas de minério de ferro predominantemente hematítico. Normalmente a energia térmica fornecida é uma relação de 60% proveniente da queima do combustível nos queimadores (gás natural ou óleo combustível) e 40% pela queima do combustível sólido misturado no interior da pelota verde.

Constantemente as equipes de processo e operação de uma planta de pelletização buscam a melhor eficiência térmica da máquina de endurecimento de pelotas trabalhando na relação entre a matriz de minério, o setup do perfil térmico, adição de carbono fixo na pelota verde e fluxo de gases no forno. Neste trabalho será dado foco apenas nas configurações do perfil térmico e serão feitas as devidas ressalvas às demais interferências.

Para alcance dos índices de qualidade das pelotas de minério de ferro hematítico, a literatura já sugere perfis clássicos de queima vastamente explorados em usinas de

pelotização que utilizam fornos de grelha móvel. A figura 4 mostra um exemplo de perfil térmico, o qual permite combinações ou ajustes garantindo a especificação de qualidade da pelotae otimize o consumo de combustíveis. A região destacada em verde (pré-queima e queima) compreende a área de abrangência direta do perfil de queima, enquanto as demais áreas são consequência dos demais parâmetros operacionais controlados no forno de pelotização de grelha móvel.

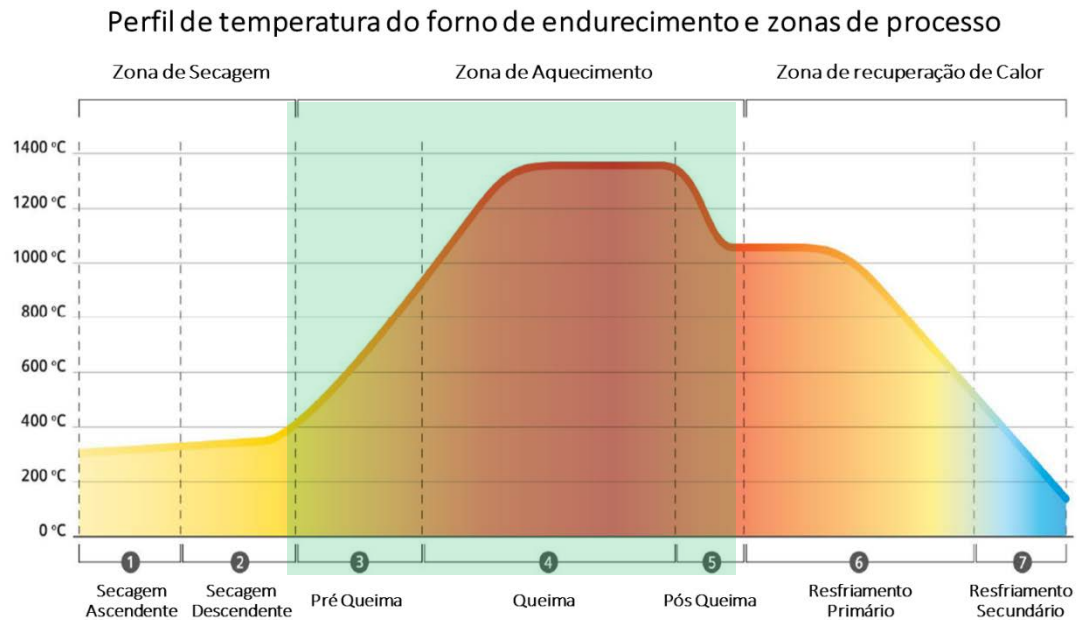


Figura 4 Perfil de queima típico para pelotas de minério de ferro hematíticos em um forno de grelha móvel (adaptado)[2].

Para o alcance da qualidade especificada das pelotas queimadas, além do perfil térmico, outro fator influenciador é o ciclo térmico – tempo de permanência das pelotas no forno. Este é inversamente proporcional ao nível de produção e, para que seja possível combinar os fatores econômicos e de qualidade, faz-se necessária a variação deste perfil térmico também por níveis de produção, evitando-se alto consumo específico de combustível com “super qualidade” em produções reduzidas ou falta de qualidade por deficiência de queima em produções elevadas[3]. Para tanto foi desenvolvido uma nova configuração com distintos perfis de temperatura para as faixas de produção, conforme ilustrado na figura 5.

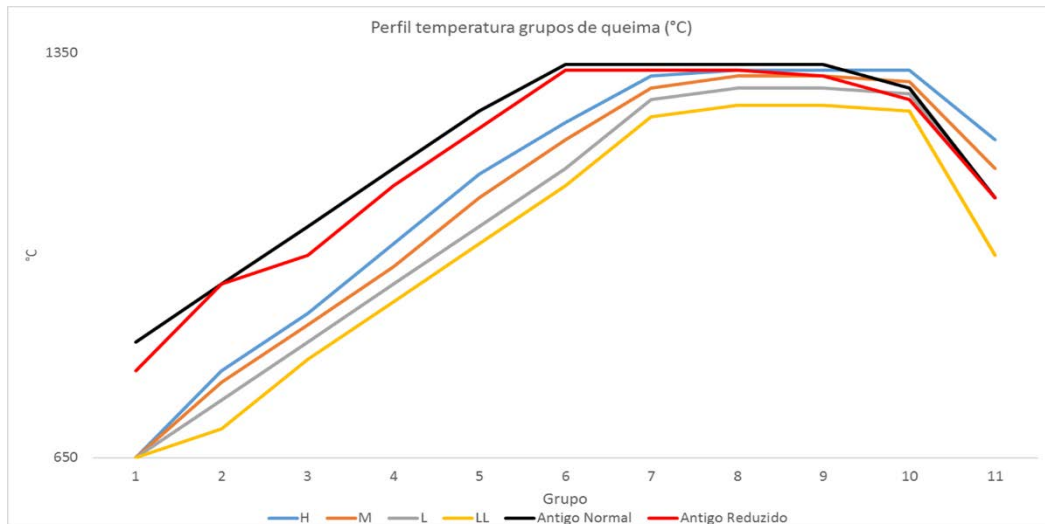


Figura 5 Comparativo perfil de queima desenvolvido e o usual das plantas.

Combinados aos novos perfis térmicos foram realizados ajustes nas configurações de operação dos ventiladores de processo, modificando o balanço termodinâmico a fim de assegurar a redução do consumo energético sem prejuízo à qualidade final do produto.

3.2 Influência do combustível sólido no consumo de gás natural

Para minimizar o consumo de combustível (óleo ou gás natural) no forno de pelotização e garantir um aquecimento uniforme da pelota verde em toda a seção do forno, muitas empresas adicionam combustível sólido às pelotas cruas. A queima desse combustível no interior das pelotas aporta, diretamente, parte do calor necessário ao processo, com um maior rendimento térmico [3].

Meyer em 1980 já reforçava esta afirmação de vantagem adicional da manutenção da qualidade das pelotas queimadas com a redução do consumo de gás natural/óleo combustível no processamento térmico no forno.

Durante o estudo com as usinas A, B e C o aumento do combustível sólido na mistura para aglomeração foi avaliado e comprovado sua influência isolada em aproximadamente 20% do consumo específico de gás natural, conforme representado nas figuras 6 e 7, e assim embasando tecnicamente a decisão de elevação do carbono fixo em aproximadamente 5,0%.

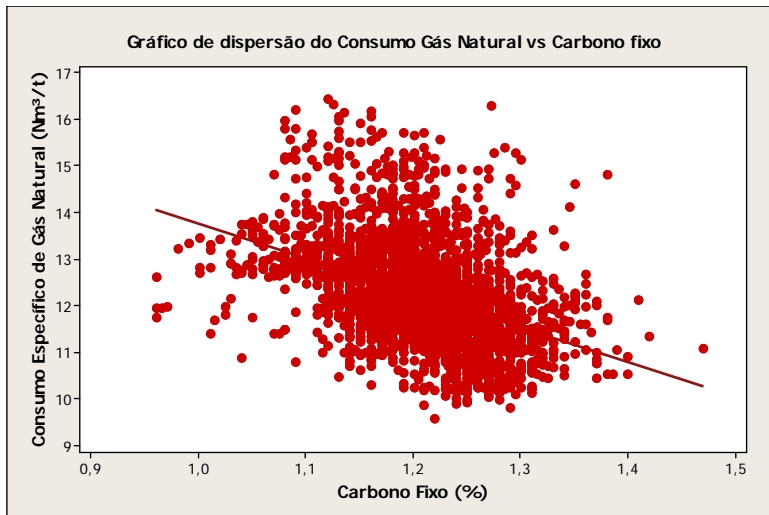


Figura 6 Gráfico de dispersão da relação consumo de gás e carbono fixo na polpa de minério.

Análise de Regressão: Consumo Específico Gás Natural versus Carbono Fixo na Polpa

A equação de regressão é:
Consumo Específico de GN = 21,13 - 7,384 Carbono Fixo da Polpa

S = 0,957653 R-Sq = 18,5% R-Sq(adj) = 18,5%

Análise de variância					
Fonte	DF	SS	MS	F	P
Regressão	1	606,27	606,267	661,07	0,000
Erro	2903	2662,34	0,917		
Total	2904	3268,61			

Figura 7 Análise de regressão do consumo de gás e carbono fixo na polpa de minério.

3.3 Influência da granulometria da pelota na qualidade e consumo térmico

Segundo Gudenauet *al* [4], em análises para determinar quantitativamente as dependências dos diferentes diâmetros de pelotas para uma aplicação mais ampla, produziram-se em uma série de testes em laboratório, onde as pelotas foram endurecidas em *potgrate*. Para tanto foram apurados o consumo de combustível, taxa de produção, a resistência a passagem de gases, o gradiente de temperatura no leito de pelotas e as pelotas individuais. A base de dados serviu para a determinação do diâmetro ótimo das pelotas para as condições de produção industrial.

A figura 8 representa os dados de tempo da etapa de endurecimento e resfriamento do processo, onde verificou-se que durante o endurecimento e o resfriamento as pelotas de 11 mm apresentaram um menor tempo, e pelotas com diâmetros menores, o tempo tende a aumentar devido à resistência ao fluxo dos gases, já para as pelotas com diâmetros maiores o tempo eleva devido a maior área superficial.

Dinâmica do processamento térmico em função do diâmetro da pelota

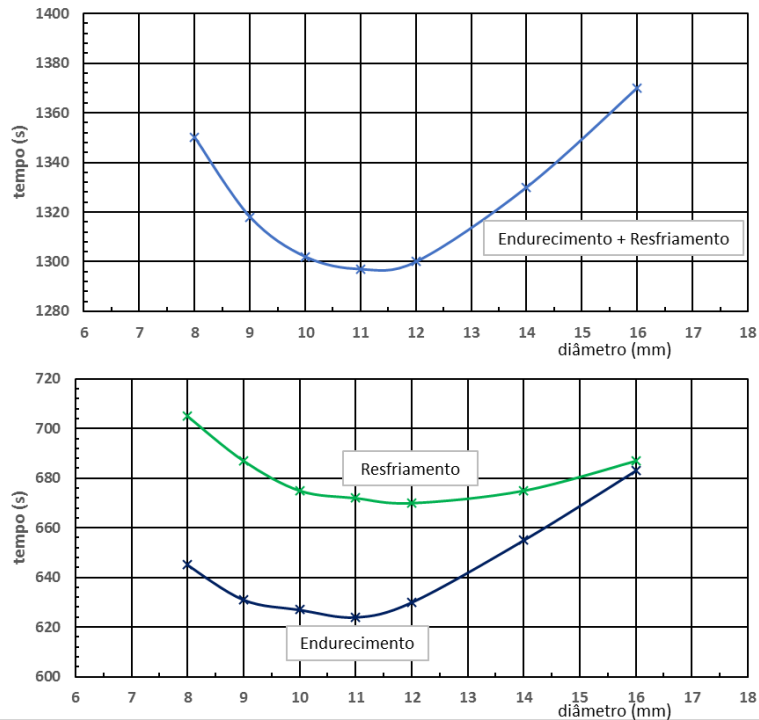


Figura 8 Comparativo tempo endurecimento e resfriamento com os diâmetros médio das pelotas (adaptado) [4].

Com relação à resistência ao tamboramento, os valores do teste não só permitem uma indicação sobre a quantidade de poeira produzida durante o transporte, mas também produz algumas conclusões às condições de endurecimento, evidenciados na figura 9.

Os resultados para pelotas extremamente pequenas podem ser explicados pelo maior número de pelotas e o número muito maior de superfície daí resultante, ao passo que para as pelotas extremamente grandes, um endurecimento insuficiente pode ser decisivo para os valores de tambor menos satisfatórios.

Com base nos resultados dos ensaios existentes e a partir do pressuposto de que o diâmetro ótimo da pelota é um pouco menor, aproximadamente de 10 mm.

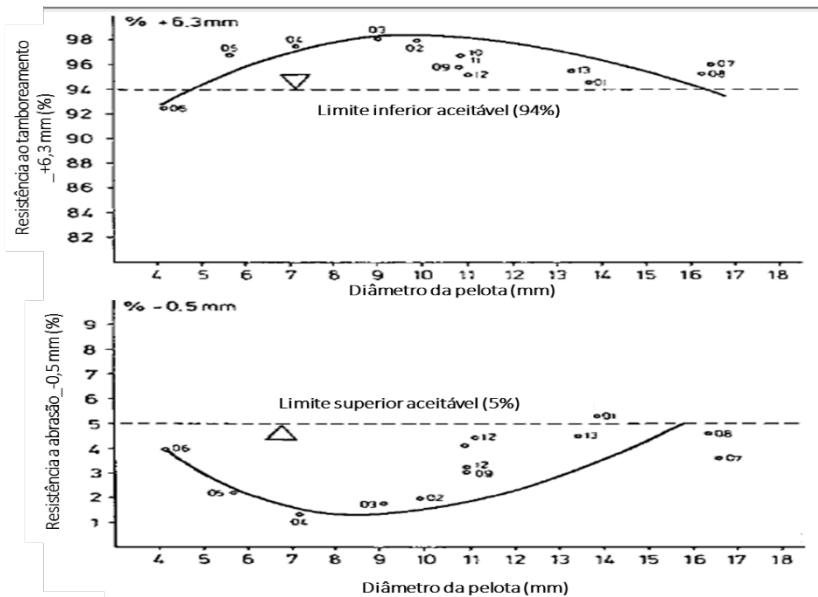


Figura 9 Comparativo da resistência a abração com o diâmetro médio das pelotas (adaptado) [4].

3.4 Resultados das plantas industriais

Foram observados com a implementação dos trabalhos diversos ganhos com relação a menor utilização de gás natural e manutenção da qualidade física do produto final.

A figura 10, exemplifica os ganhos em diversas faixas de produção das pelotas realizadas durante a produção da usina C.

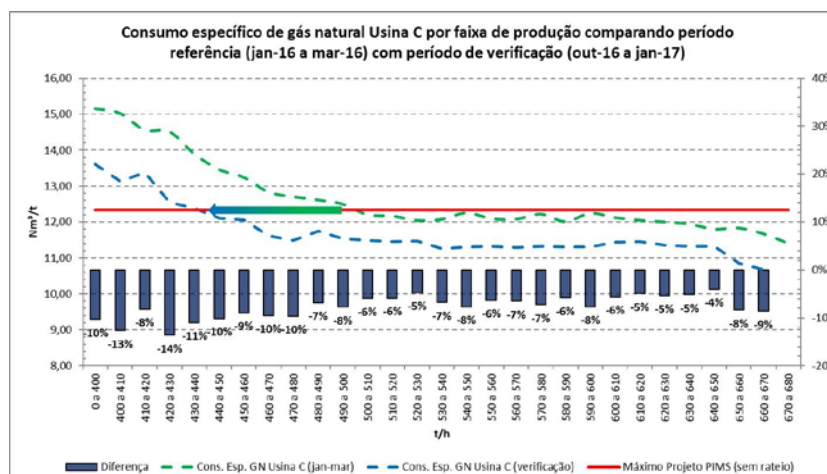


Figura 10 Comparativo do consumo específico de gás natural por faixa de produção.

A tabela 1, resume os ganhos evidenciados com a redução da principal fonte de energia na etapa de processamento térmico, para o mesmo tipo de pelota, estratificados por faixa da produção nominal das referidas plantas, demonstrando em sua maioria, ganhos superiores a 15% de redução.

Tabela 1. Tabela resumo das reduções de consumo de gás natural por faixa de produção:

Faixa de produção nominal	Usina A	Usina B	Usina C
60% a 70%	20,45%	15,63%	11,70%
70% a 80%	16,20%	21,00%	8,10%
80% a 90%	16,90%	15,43%	7,40%
Acima de 90%	15,52%	15,00%	5,90%

Os trabalhos foram iniciados no final do primeiro trimestre do ano de 2016 e com término no primeiro trimestre de 2017. Os gráficos ilustrados pelas figuras 11 a 13, são referentes ao consumo de gás natural das plantas abordadas no trabalho, com o indicador anual e mensal. Foram contabilizados ganhos de 12,93%, 12,15% e 5,66% de redução no consumo de gás natural respectivamente das usinas estudadas. Muito embora, esses ganhos foram aferidos somente durante o período de verificação do projeto, destacado em amarelo, percebe-se a expressiva redução do consumo anual e a manutenção dos resultados ao longo do ano de 2017, evidenciando-se assim a mudança de patamar desse indicador após a consolidação dos projetos.

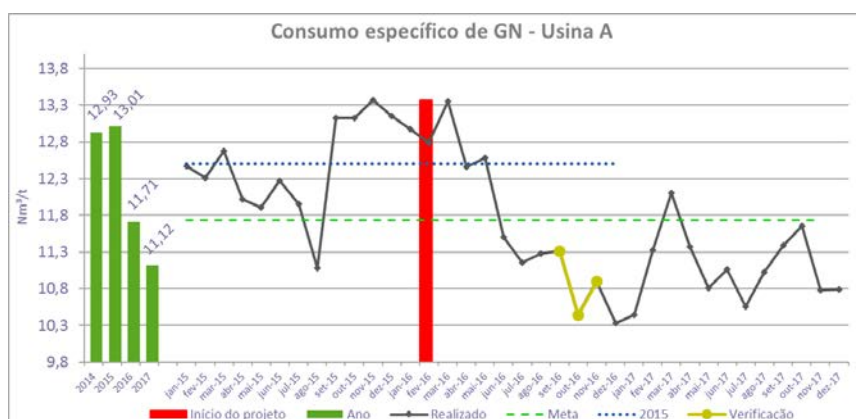


Figura 11 Consumo específico de gás natural consolidado – Usina A.



Figura 12 Consumo específico de gás natural consolidado – Usina B.

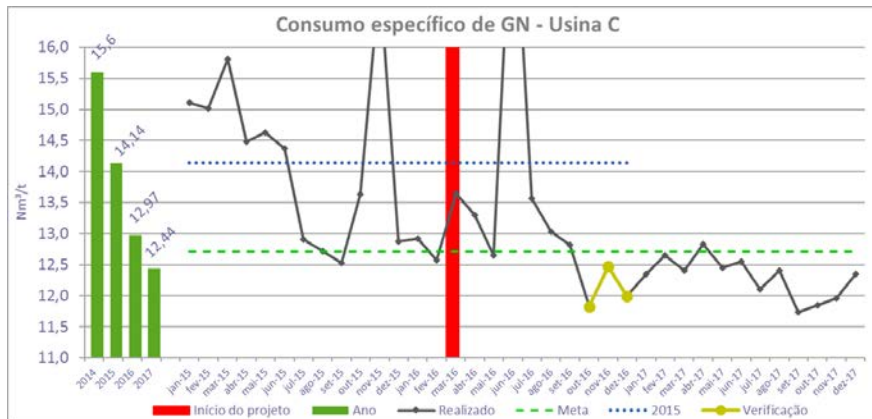


Figura 13 Consumo específico de gás natural consolidado – Usina C.

Na esfera da qualidade física, foi observado a manutenção da resistência a compressão, ilustrado na figura 14 e uma melhora considerável no índice de abrasão ilustrada na figura 15, em ambos os casos exemplificada pelos resultados apresentados da usina B.

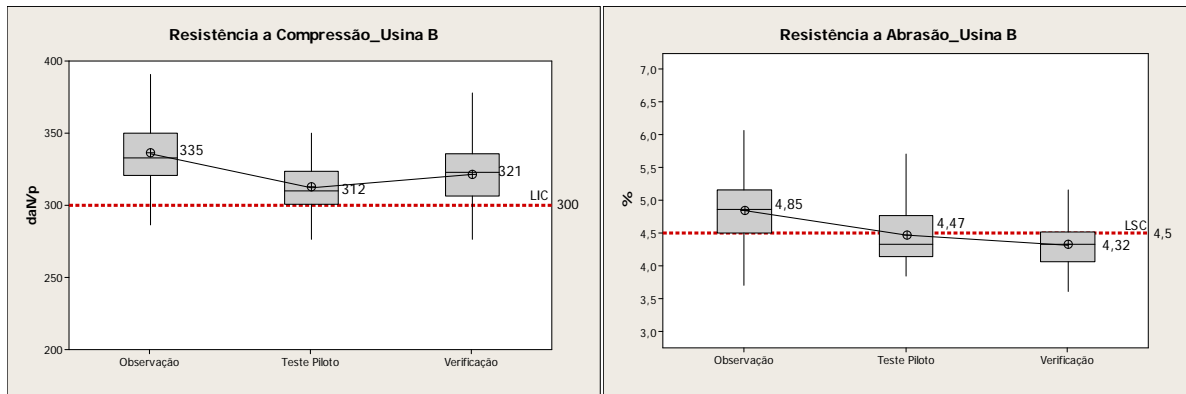


Figura 14 Resistência à compressão Usina B. **Figura 15** Índice de abrasão Usina B.

Muito da captura dos ganhos de consumo e manutenção da qualidade física, pode ser explicada por ajustes realizados no processo de pelletização, distribuição granulométrica, onde a figura 16 representa o índice granulométrico (dispersão das pelotas) e a figura 17 demonstra a aproximação do percentual retido nas malhas de 10 mm e 12,50 mm das pelotas produzidas na planta B. Benefícios em linha com os estudos aventados por Gudenau et al [4], traduzindo em dispersão controlada e pelotas menores com potencial melhora da qualidade física e a necessidade de menor carga térmica aplicada no processamento.

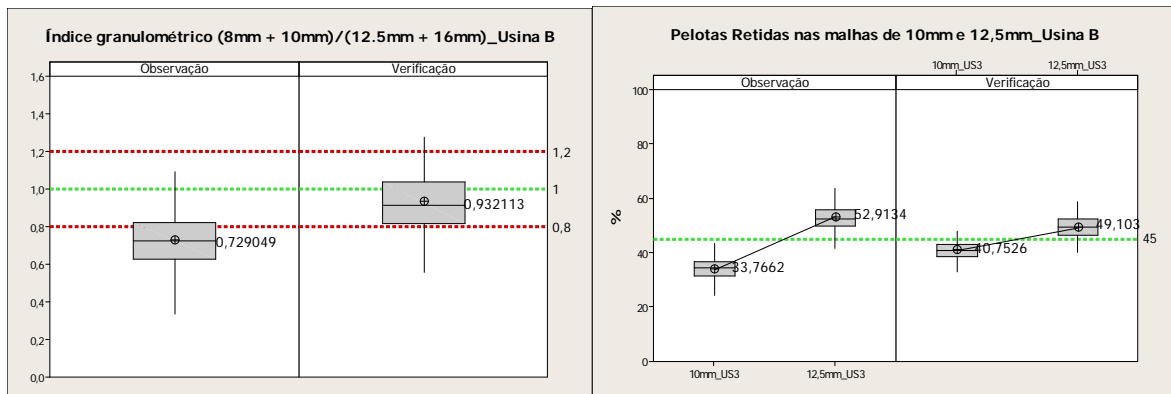


Figura 16 Índice granulométrico Usina B. Figura 17 Granulometria pelotas Usina B.

4 CONCLUSÃO

A aplicação da metodologia *LeanSix Sigma* associada ao conhecimento técnico conceitual proporcionaram resultados de uma redução no consumo específico do gás natural de 12,93%, 12,15% e 5,66% nas usinas A, B e C, respectivamente.

Estes ganhos foram garantidos pela manutenção dos resultados de resistência à compressão e abrasão da pelota processada termicamente. Novos modelos de operação com foco em processo foram elaborados e aplicados, principalmente nos subprocessos de pelotamento e processamento térmico.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Vale pela oportunidade de aperfeiçoamento profissional para embasamento técnico na condução de projetos de melhoria contínua com foco na redução de custos.

6 REFERÊNCIAS

- 1 Meyer K. Pelletizing of Iron Ores. Springer-Verlag, Berlin, 1980
- 2 Siemens-vai. Circular Pelletizing Technology. 18 th Middle East Iron & Steel Conference 2014. <http://www.metalbulletin.com/events/download.ashx/document/speaker/7205/a0ID00000X0jz6MAB/Presentation>. Acessado em 08/06/18.
- 3 Cruz A.F.F., Souza A. J., Santos W.B., Falco H.S., Melhoria nos desempenhos de um forno de pelotização com foco na otimização do processo e parada estratégica de manutenção. 4º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, ABM Week, 2016.
- 4 Gudenau HW, Walden H, Kortmann H, Papacek HG. Influence of the diameter of iron ore pellets on their production and quality properties. *Aufbereitungs-technik*. 1984; numero 1.