



AUMENTO DA EFICIÊNCIA DE QUEIMA DO FORNO DE PELOTIZAÇÃO *STRAIGHT-GRATE* DA SAMARCO MINERAÇÃO*

Luiz Cláudio von Sperling Cotta¹

Maycon Athayde²

Ana Maria Guilherme Bailon³

Gleudson Martins dos Santos³

Sérgio Fernando Nunes²

Resumo

A produção de pelotas de minério de ferro de alta resistência mecânica, que suportem o transporte e operação nos reatores de redução, necessita da correta adequação dos parâmetros de processo dos fornos de grelha móvel. A região de queima é a etapa decisiva neste equipamento para garantir a qualidade da pelota e também representa a maior parte da energia inserida no processo. No presente trabalho foi realizada a otimização do processo de queima, suportado pela metodologia *Lean Six Sigma*, avaliando a composição química da pelota, os ajustes de adição de combustível sólido na pelota e temperatura do perfil térmico de queima. Dessa forma, foram realizados ensaios em escala piloto para diferentes perfis de temperatura da etapa de queima. Não obstante, foram avaliadas as propriedades químicas, físicas, metalúrgicas e ainda foi realizada a avaliação microestrutural das pelotas. A validação dos estudos em escala laboratorial foi realizada através de testes industriais a fim de assegurar a qualidade do produto, a produtividade do forno e redução de custos de produção.

Palavras-chave: Queima; Pelotas; Lean six sigma; Otimização de processos.

EFFICIENCY INCREASE OF THE FIRING ZONE OF THE *STRAIGHT-GRATE* PELLETIZING FURNACE OF SAMARCO

Abstract

The production of iron ore pellets with high cold compression strength that resist the transport and reduction on reactors requires the accurate adjustment of process parameters of the straight grate furnace. The firing zone is a decisive step in this equipment to ensure the quality of the pellet and also is the most intensive energy in the process. In this study, it was optimized the firing process, based on *Lean Six Sigma* methodology, evaluating the chemical composition of the pellet, the set points of solid fuel into the pellet composition and the thermal profile of firing temperature. Furthermore, pilot scale tests of different temperature profiles in the firing step were performed. Additionally, the physical, chemical, metallurgical properties were analyzed, as well as the microstructural evaluation. The validation of laboratory scale essays was performed by industrial tests to ensure the product quality, productivity of the furnace and reduced production costs.

Keywords: Firing zone; Pellet; Lean six sigma; Process optimization.

¹ Engenheiro Metalurgista, Eng., Samarco Mineração, Anchieta, ES, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, MSc, Eng., Samarco Mineração, Anchieta, ES, Brasil.

³ Técnico de Processo, Samarco Mineração, Anchieta, ES, Brasil.

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



1 INTRODUÇÃO

Os fornos de pelletização de grelha móvel são projetados em basicamente três regiões para realizar a sinterização de aglomerados de minério de ferro: Secagem; Queima e; Resfriamento. Todavia, a região de queima é a etapa responsável por garantir as propriedades dos aglomerados e, dessa forma, é a etapa decisiva para garantir a qualidade da pelota [5]. A temperatura dos gases que permeiam o leito de pelotas é fundamental para retirar a umidade da pelota, promover a transformação da goethita (removendo a água de cristalização contida no minério), atingir o ponto de combustão do combustível sólido misturado na pelota e promover as reações de sinterização e formação de escória. Para isso, um perfil térmico é utilizado para promover em cada etapa todas as transformações na pelota e uma faixa de temperatura caracteriza cada etapa. A figura 1 apresenta as faixas de temperaturas para cada etapa.

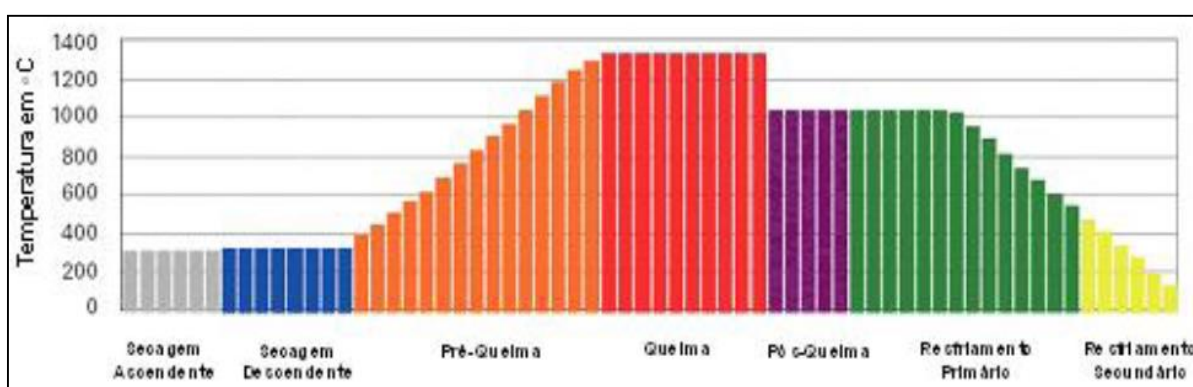


Figura 1 – Perfil térmico do forno de pelletização tipo grelha móvel.

De acordo com a figura 1, a etapa de queima é dividida em 3 regiões: Pré-queima; queima e; pós queima. A etapa de pré-queima é fundamental para que aconteça um aquecimento suave no leito de pelotas durante a transição entre secagem e queima. Nestas condições, as pelotas sofrem um aquecimento adequado antes de serem submetidas às rigorosas temperaturas de sinterização na zona de queima. Nesta zona ocorre a decomposição dos hidratos, carbonatos ou sulfatos [4]. A mudança súbita de temperatura entre as etapas promove uma degradação drástica das pelotas em função da pressão excessiva de vapor criada pela evaporação descontrolada da água contida nas pelotas (entre as partículas) e pela transformação da goethita em hematita [3]. A etapa de pós-queima também é importante para promover a homogeneização térmica do leito de pelotas. A heterogeneidade da qualidade física final dos aglomerados na região central do forno pode estar diretamente associada à distribuição não uniforme dos fluxos de gases [1]. A pós-queima também representa uma etapa intermediária para evitar a súbita mudança de temperatura entre as etapas de queima e resfriamento. O resfriamento mais suave promove maior reoxidação da magnetita em hematita secundária, o que favorece a resistência à compressão da pelota.

A etapa de queima das pelotas representa a região do forno sob a maior temperatura de operação. O perfil térmico dos fornos da Samarco Mineração são mantidos acima de 1300°C de temperatura de queima e este trabalho avalia se o patamar utilizado é o ideal para o processo. Segundo Meyer [5], existe uma temperatura de queima que maximiza a resistência à compressão das pelotas

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



(figura 2). Isto pode ser entendido considerando que em temperaturas muito baixas não há formação de uma quantidade de líquidos suficiente para dar resistência elevada às pelotas ou a recristalização dos óxidos de ferro não é eficiente. Em temperaturas muitas elevadas a redução à magnetita é favorecida, e esta transformação enfraquece a pelota.

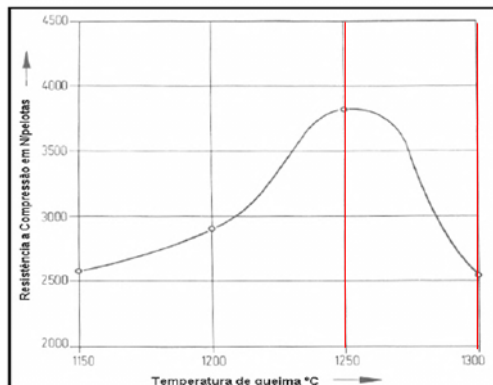


Figura 2 – Efeito da temperatura de queima na resistência a compressão [5].

Portanto o objetivo do trabalho foi o de aumentar a eficiência de queima e reduzir o consumo térmico do forno através da modificação do perfil térmico.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Monitoramento do Consumo Térmico do Forno

O consumo térmico dos fornos de grelha móvel é avaliado através do consumo dos combustíveis adicionados, tanto na pelota como nos queimadores do forno. A fórmula de cálculo do consumo térmico é descrita abaixo:

$$CT = \frac{C_{carvxo} * PCI_{carvxo} + C_{coque} * PCI_{coque} + C_{óoqu} * PCI_{óCIu} + C_{GNI} * PCI_{GNI}}{\text{Produção}}$$

Em que:

CT = Consumo Térmico (kcal/kg);

C = Consumo total (kg ou Nm³ para GNI);

PCI = Poder calorífico inferior (kcal/kg ou kcal/Nm³ para GNI);

Os valores de PCI dos insumos são fixos de acordo com a tabela 1:

Tabela 1: Poder calorífico inferior dos combustíveis utilizados na Samarco

Carvão Mineral	6.600 kcal/kg
Coque de Petróleo	8.550 kcal/kg
Óleo Combustível 2A	9.400 kcal/kg
Gás Natural Industrial (GNI)	8.500 kcal/kg

Na Samarco, o consumo térmico do forno é monitorado diariamente e reportado mensalmente. A figura 3 apresenta o histórico do consumo térmico diário e mostra que o indicador tem registrado aumento sucessivo, o que motivou a realização do projeto.

* *Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

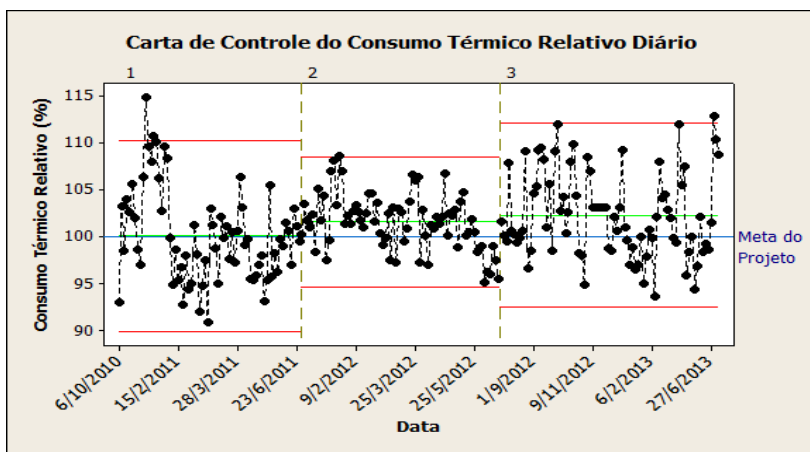


Figura 3 – Histórico do consumo térmico do forno em estudo.

Dessa forma, com base na metodologia Lean Seis Sigma, foi proposto uma meta de redução do consumo térmico a fim de aumentar a eficiência de queima do forno e reduzir o indicador. Neste trabalho, foram avaliados três tipos de pelotas que se diferenciam pelas suas basicidades binárias (B2). Ao avaliar separadamente pelos tipos de pelotas, foi verificado que a pelota de alta basicidade apresentava o menor consumo térmico neste forno e, portanto, o foco maior do trabalho foi para as pelotas padrão e de média basicidade (figura 4).

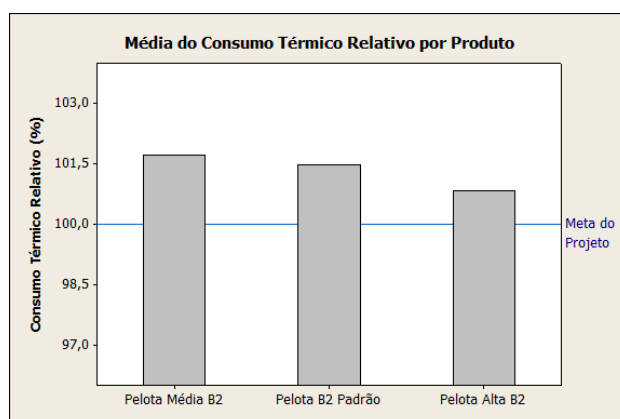


Figura 4 – Média histórica do consumo térmico por tipo de pelota.

A partir disso, diversas causas foram levantadas em reunião de *Brainstorming* e, após a classificação das causas (através de ferramentas como Matriz de Afinidades e Matriz de Esforço x Impacto), foi determinado que as ações mais eficazes seriam reavaliar o perfil térmico. Para isso foi elaborado um estudo em escala piloto para validação das ações e em seguida uma série de testes industriais para determinar as melhores temperaturas de trabalho do forno.

2.2 Avaliação de Perfil Térmico em Escala Piloto (*Pot Grate*)

O *Pot Grate* (figura 5) é o forno em escala reduzida projetado para simular as fases do forno de grelha móvel. Cada etapa do processo de queima tem sua faixa de temperatura de trabalho e, portanto, é possível realizar testes com diferentes perfis térmicos.

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



Figura 5 – Forno *Pot Grate* da Samarco.

Foram estabelecidos três perfis térmicos para serem comparados para os três tipos de pelotas com réplicas, no total de 18 testes realizados.

Tabela 2: Programação dos testes em escala piloto.

Perfil	Tipo de Pelota		
	Media B2	B2 Padrão	Alta B2
Perfil Padrão	Teste 1	Teste 4	Teste 7
Perfil 1	Teste 2	Teste 5	Teste 8
Perfil 2	Teste 3	Teste 6	Teste 9

O perfil 1 apresenta uma temperatura máxima mais baixa que o perfil padrão e o perfil 2 apresenta uma temperatura máxima mais baixa que o perfil 1. As pelotas queimadas de todos os testes foram avaliadas em testes de Tamboramento (ISO 3271), Resistência à Compressão (ISO 4700), Determinação Relativa do Grau de Inchamento (ISO 4698), Degradação Dinâmica a Baixa Temperatura – LTD (ISO/DIS 13930). Determinação das propriedades da redução sob a carga – Delta P (ISO 7992) e Índice de Permeabilidade Magnética.

2.3 Avaliação das Pelotas Queimadas por Microscopia

O Laboratório de Microscopia Óptica da Samarco realiza as análises mineralógicas e a caracterização microestrutural das pelotas queimadas. Tais análises informam quantitativamente a porção de cada mineral contido no minério de ferro e a identificação de fases formadas durante o processo de endurecimento da pelota crua. A partir dos resultados de todos os testes de queima no *Pot Grate*, as pelotas foram avaliadas a fim de se investigar as fases cristalinas formadas que podem justificar os resultados obtidos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Avaliação do Perfil Térmico em Escala Piloto

As Figuras 6a e 6b apresentam os resultados de qualidade física dos testes realizados. Foi possível detectar um aumento da resistência física das pelotas com a

* *Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*



redução do perfil térmico. De acordo com Costa [2], a utilização de perfis térmicos mais suaves permite uma retirada mais suave das águas de hidratação e cristalização, reduzindo o efeito de "spalling" responsável pela fragilização das pelotas.

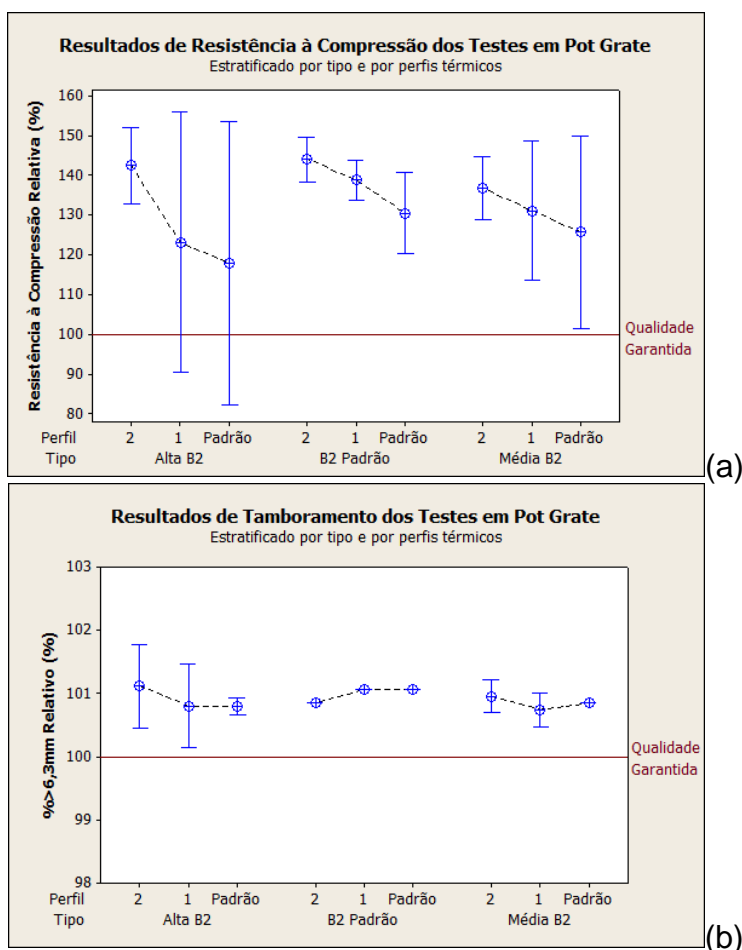


Figura 6 – Resultados de Qualidade Física.

Os resultados de tamboramento não apresentaram variação significativa. Portanto, não é possível afirmar que a variação do perfil térmico influencia no índice de tamboramento das pelotas. Com relação aos testes metalúrgicos, as figuras 7 a 10 apresentam os resultados para cada teste.

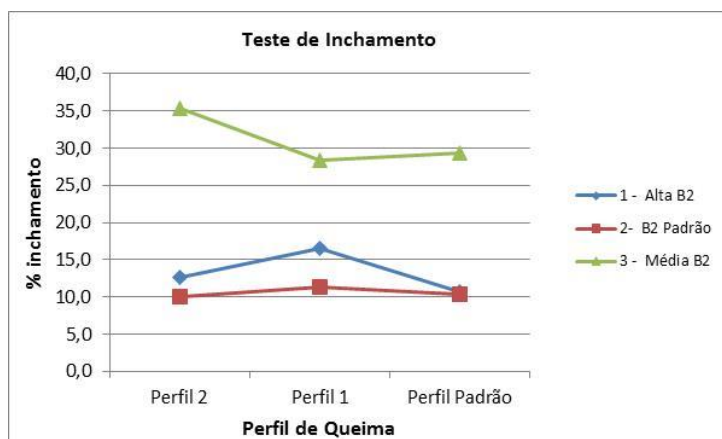


Figura 7 – Resultados dos testes de Inchamento.

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



Os resultados de inchamento mostraram pouca interferência do perfil para pelotas de Alta B2 e Padrão. Porém, a um perfil mais baixo, o percentual de inchamento foi maior para pelotas Média B2, o que pode indicar maior formação de ferro fibroso que diminui a permeabilidade no leito do alto-forno.

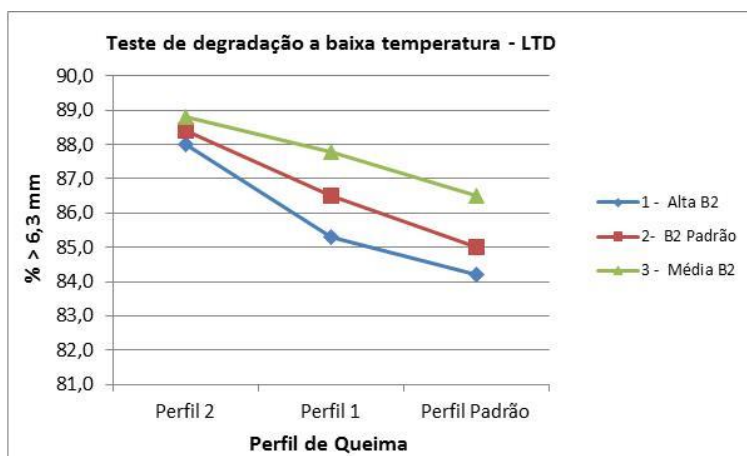


Figura 8 – Resultados dos testes de degradação a baixa temperatura.

Com relação aos resultados dos testes LTD, foi evidenciado que, a um perfil térmico mais baixo, ocorre menor degradação das pelotas, ou seja, menor quantidade de finos, o que impacta diretamente na permeabilidade do forno reator do cliente.

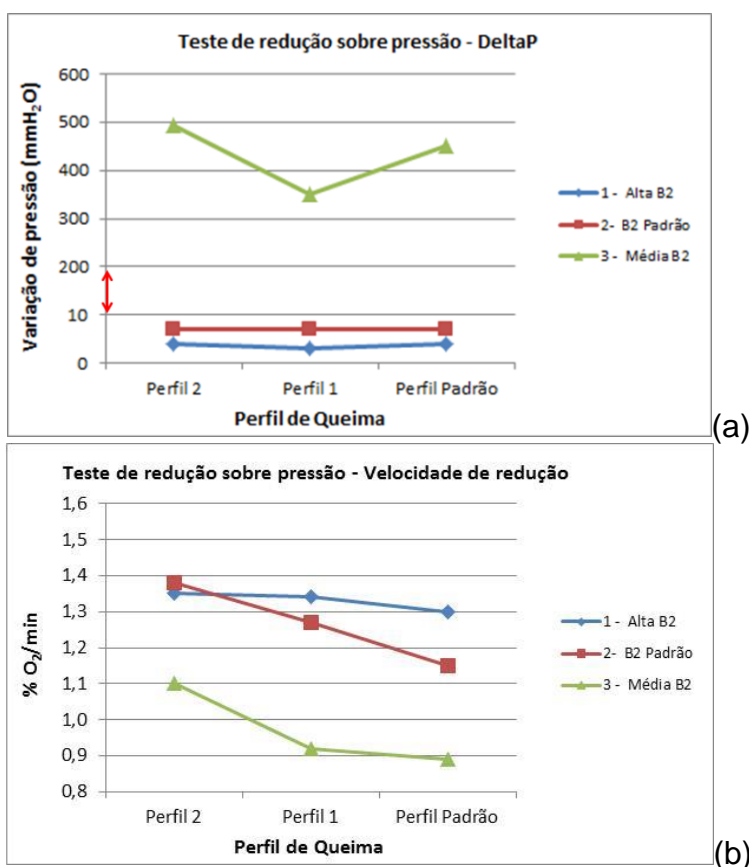


Figura 9 – Resultados dos testes de redução sobre pressão – Variação de pressão (a) e Velocidade de Redução (b)

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



Os testes de redução sobre pressão reportam dois parâmetros. A variação de pressão no reator (figura 9a) se mostrou estável para os três tipos de pelotas em seus respectivos ranges padrões (é esperado que as pelotas Média B2 apresentem uma variação de pressão muito maior que as outras). A velocidade de redução (Figura 9b) não teve mudança significativa para pelota de Alta B2, mas as pelotas Padrão e Média B2 mostraram que, a um perfil mais baixo, a redução da pelota acontece mais rapidamente, o que é positivo para o reator do cliente.

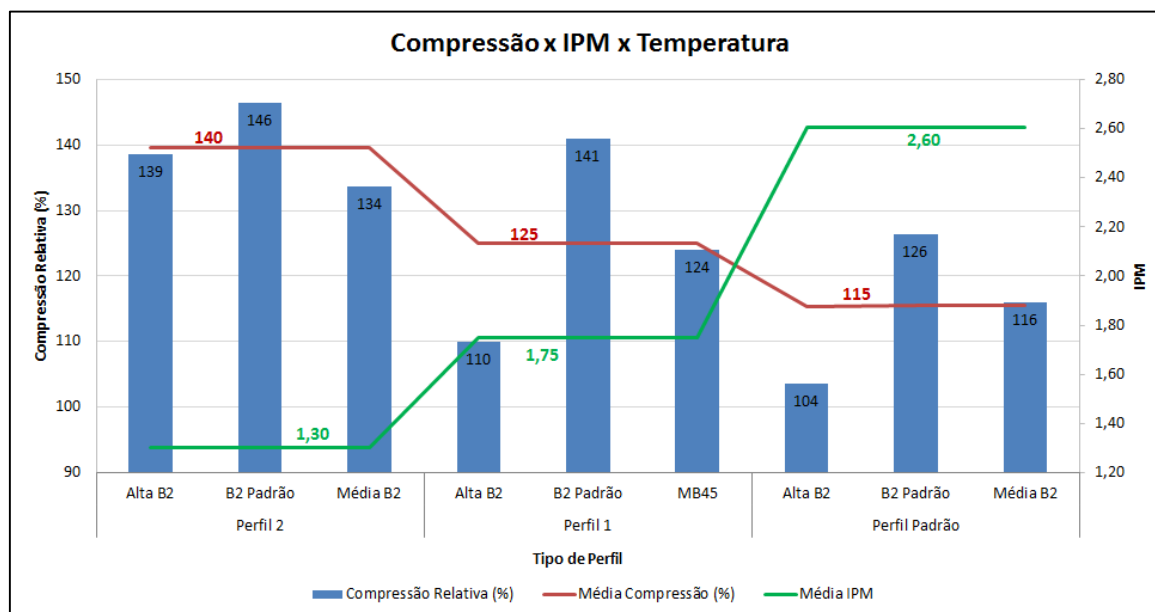


Figura 10 – Resultado do teste de Índice de Permeabilidade Magnética.

A figura 10 mostra que o índice de permeabilidade magnética (IPM) aumentou de acordo com a temperatura do perfil térmico, assim como a resistência à compressão diminuiu. Esse resultado pode ser um indício de maior retenção de magnetita na pelota, o que indica que, em perfis térmicos maiores, há maior formação de magnetita e não há tempo suficiente durante o resfriamento para reoxidar o cristal em hematita novamente. A presença de magnetita retida na pelota pode justificar a diminuição da resistência à compressão.

3.2 Resultados da Avaliação das Pelotas por Microscopia

A figura 11 apresenta as imagens da camada intermediária das pelotas para todos os tipos de testes realizados.

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.

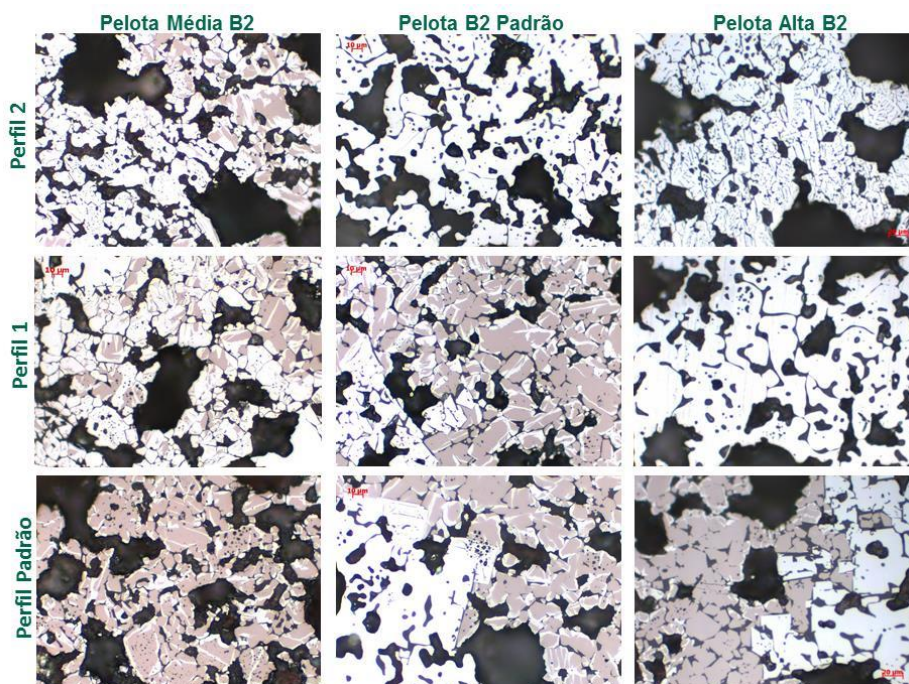


Figura 11 – Imagens por Microscopia das Pelotas.

A avaliação microestrutural mostrou que, para menores temperaturas, têm-se menores quantidades de magnetita retida na pelota, o que justifica os resultados de IPM e de resistência à compressão. É observado também que para a pelota de Alta B2, o perfil mais baixo apresentou grande quantidade de hematita primária, o que indica baixa interação das partículas durante o endurecimento. A maior formação de hematita secundária nos perfis mais baixos indica melhor condição de resfriamento da pelota no processo.

Dessa forma, os resultados em escala piloto foram base para a realização de testes em escala industrial, com a expectativa de redução do consumo térmico sem que isso interfira de forma negativa na qualidade física das pelotas.

3.3 Resultados dos Testes em Escala Industrial

Os testes em escala industrial avaliados permitiram a elaboração de dois novos perfis térmicos: Perfil 1 para pelotas de Alta B2; Perfil 2 para pelotas Padrão e de Média B2. A figura 12 apresenta os novos perfis térmicos de operação para cada tipo de produção.

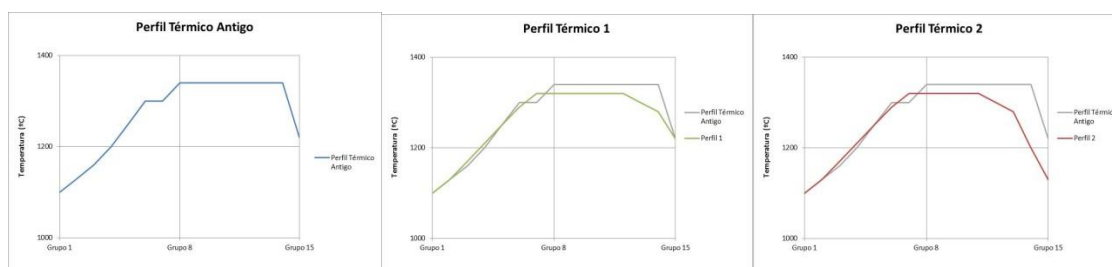


Figura 12 – Perfis Térmicos desenvolvidos.

O perfil térmico para pelota de alta basicidade foi diferenciado, baseado na análise por microscopia a fim de se evitar a retenção de hematita primária (conforme

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



evidenciado no perfil mais baixo no teste de escala piloto). A fim de validar os novos perfis, foi realizado um teste *ON-OFF* (figura 13) objetivando-se comprovar que há efetivamente uma redução de consumo térmico com o perfil mais baixo.

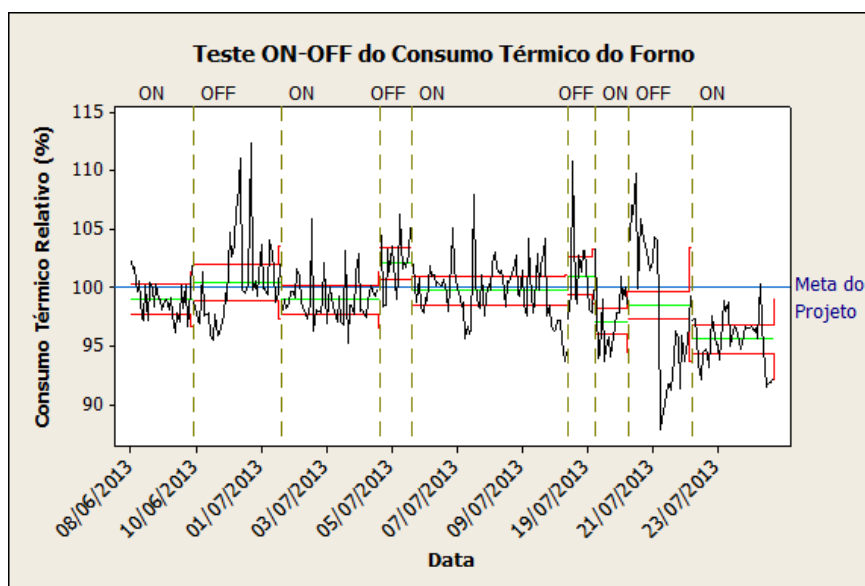


Figura 13 – Teste *ON-OFF* do perfil térmico para pelotas Padrão.

O teste *ON-OFF* comprovou que foi possível atingir um consumo térmico mais baixo com a redução de perfil e foi possível atingir a meta proposta pelo projeto. A figura 14 apresenta os resultados de qualidade física da pelota antes e depois das modificações de perfil.

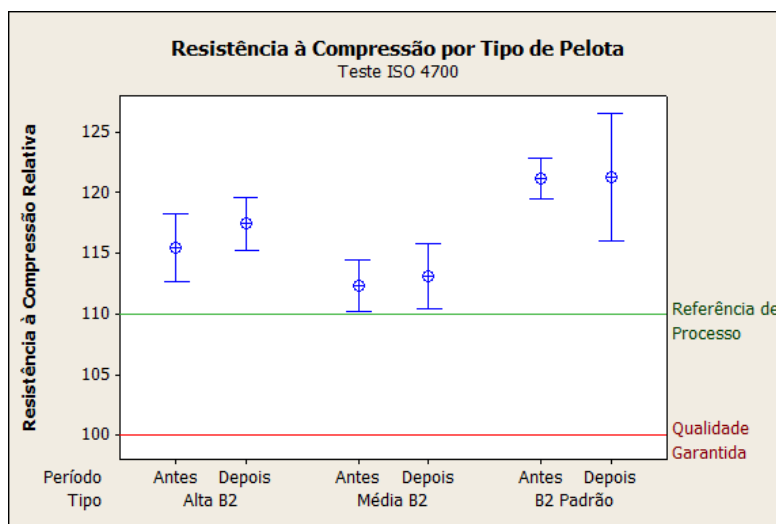


Figura 14 – Resultados de Qualidade física dos testes industriais

Foi possível verificar que as modificações de perfil não interferiram na qualidade da pelota. Ao se investigar o motivo de não ter havido aumento deste indicador, conforme os testes em escala piloto, foi verificado que as operações aumentaram o consumo de combustível sólido, o que justifica a manutenção do patamar de qualidade física. Ao avaliar os consumos de combustíveis no forno, foi verificado que houve redução significativa do consumo de GNI e um aumento no consumo de antracito (adicionado à pelota crua), de acordo com a figura 15.

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.

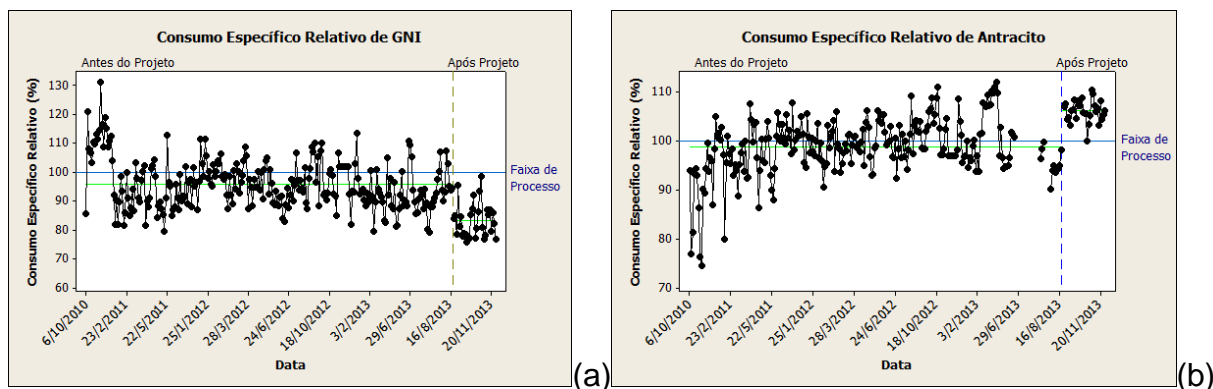


Figura 15 – Consumos Específicos de GNI (a) e Antracito (b) antes e após o projeto.

Essa inversão de matriz energética justifica a manutenção do patamar de qualidade física das pelotas e ainda resultou em uma redução de consumo térmico de 3% (figura 16), o que representa um custo evitado anual de cerca de 1,3 MBLR.

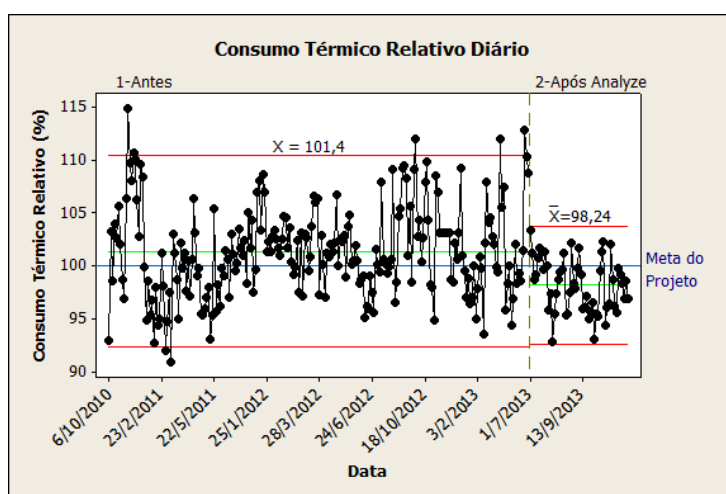


Figura 16 – Consumo Térmico Relativo do forno após o projeto.

4 CONCLUSÃO

Baseado em metodologia Lean Seis Sigma, realização do projeto em escalas piloto e industrial, foi possível concluir que a utilização de perfis térmicos mais baixos não só é capaz de reduzir o consumo térmico do forno, como também proporciona um aumento na qualidade física do produto final. A inversão da matriz energética é positiva para a redução geral dos insumos combustíveis na pelletização.

REFERÊNCIAS

- 1 Athayde M., Modelamento fluidodinâmico da zona de queima de fornos de grelha móvel para pelletização de minério de ferro, Dissertação de Mestrado, UFMG, 2013.
- 2 Costa RVP. Otimização da resistência à compressão de pelotas de minério de ferro para redução direta pela aplicação de projeto robusto. Dissertação de Mestrado, UFOP, 2008.
- 3 Fonseca MC. Influência da distribuição granulométrica do pellet feed no processo de aglomeração e na qualidade da pelota de minério de ferro para redução direta, Dissertação de Mestrado, UFOP, 2004.
- 4 Matos AP. Influência da temperatura, pressão, produção e granulometria no processo de secagem das pelotas cruas, Dissertação de Mestrado, UFOP, 2007.
- 5 Meyer K. Pelletizing of Iron Ores, Düsseldorf: Springer-Verlag mbH, 1980.

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.