

# REDUÇÃO DA RELAÇÃO GRANULOMÉTRICA EM PLANTAS DE PELOTIZAÇÃO COMO CONTRIBUIÇÃO NA REDUÇÃO DOS ÍNDICES DE ABRASÃO\*

Leonardo Semedo de Mattos Siqueira<sup>1</sup>  
Renata Ferreira Muller<sup>2</sup>

## Resumo

A Relação Granulométrica (RG) é um dos indicadores mais importantes referentes ao produto da pelotização. Através dele, garante-se boa permeabilidade do leito de pelotas, otimização do ciclo térmico e, desta forma, melhores resultados de qualidade física e consumo da matriz energética. Para garantia deste indicador, faz-se necessário que os processos de aglomeração de pelotas, classificação de pelotas cruas e peneiramento de pelotas queimadas estejam sob controle de parâmetros determinados e com nível de estabilidade assegurado.

**Palavras-chave:** Relação Granulométrica; Qualidade Física; Pelotamento.

## REDUCTION OF THE GRANULOMETRIC RELATION IN PELLETIZING PLANTS AS CONTRIBUTION ON DECREASE OF THE ABRASION INDEXES

### Abstract

The Granulometric Ratio (RG) is one of the most important indicators related to the pelletizing product. Through it, it guarantees good permeability of the bed of pellets, optimization of the thermal cycle and, thus, better results of physical quality and consumption of the energy matrix. To guarantee this indicator, it is necessary that the processes of agglomeration of pellets, classification of raw pellets and screening of burned pellets are under control of certain parameters and with a level of stability assured.

**Keywords:** Granulometric Relation; Physical Quality; Pelletizing Plant.

<sup>1</sup> Engenheiro Metalurgista e de Materiais, Especialização em Pelotização, Engenheiro de Operação,

Diretoria de Pelotização, Vale S/A, Vitória-ES Brasil

<sup>2</sup> Bacharel em Economia e Tecnólogo em Gestão da Produção Industrial, Técnico de Controle de Processo, Diretoria de Pelotização, Vale S/A, Vitória-ES Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A relação granulométrica, resultado do quociente entre o somatório das faixas de pelotas retidas nas malhas 12,5mm e 16mm pela faixa de pelotas retidas em 8mm e 10mm, é um indicador de qualidade que beneficia toda a cadeia produtiva desde o processo de endurecimento das pelotas até os processos de redução de minério. Este indicador adimensional é calculado conforme a equação descrita na figura 1, a seguir.

Descrição	Fórmula de Cálculo
Relação Granulométrica	$\frac{12,5-16\text{mm} + >16\text{mm}}{8-10\text{mm} + >10\text{mm}}$

Figura 1. Cálculo da Relação Granulométrica

Seu resultado tem impacto direto na permeabilidade do forno de pelotização e na qualidade final da pelota. O atendimento a relação granulométrica é um indicador que compõe o IDQ (índice de desempenho da qualidade) nas plantas de pelotização.

Para se atingir resultados satisfatórios relacionados à relação granulométrica, maior rigor é exigido da etapa de aglomeração no que tange às condições físicas e configurações dos equipamentos sob o ponto de vista de processo. Dentro da cadeia de processo da pelotização esta fase é a responsável pela formação das pelotas com propriedades físicas e dimensionais adequadas à alimentação da máquina de processamento térmico. A Pelotização está sempre susceptível a mudanças na matriz de minérios e insumos para aglomeração que implicam na necessidade de busca por novos padrões de operação, manutenção e processo. Entre esses novos padrões têm-se a necessidade de atingir as metas de relação granulométrica dentro do custo orçado para a matriz de aglomeração. Esse desafio atinge tanto a área de aglomeração quanto as etapas de desaguagem (anterior) e classificação de pelotas queimadas (etapa final).

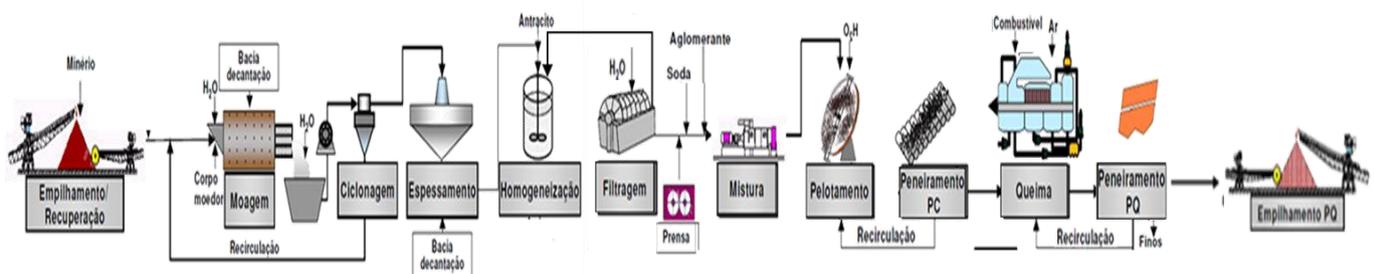


Figura 2. Fluxo do processo de pelotização

## 2 DESENVOLVIMENTO

O período de observação e análise do indicador compreendeu o período entre Junho/17 e Maio/18 nas plantas de pelotização A, B e C. Conforme resultados mostrados na figura 2.

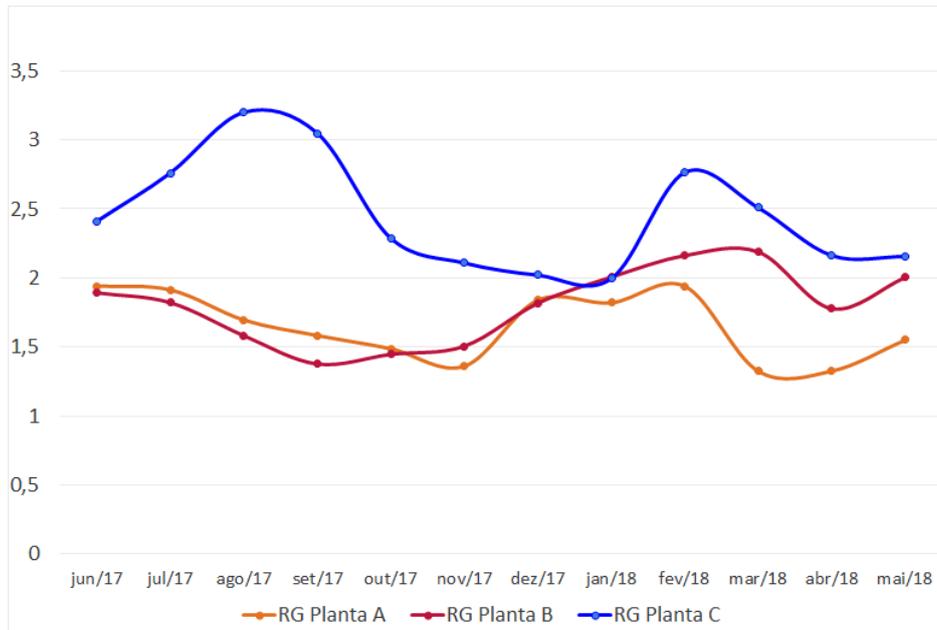


Figura 2. Relação Granulométrica das Plantas A, B e C

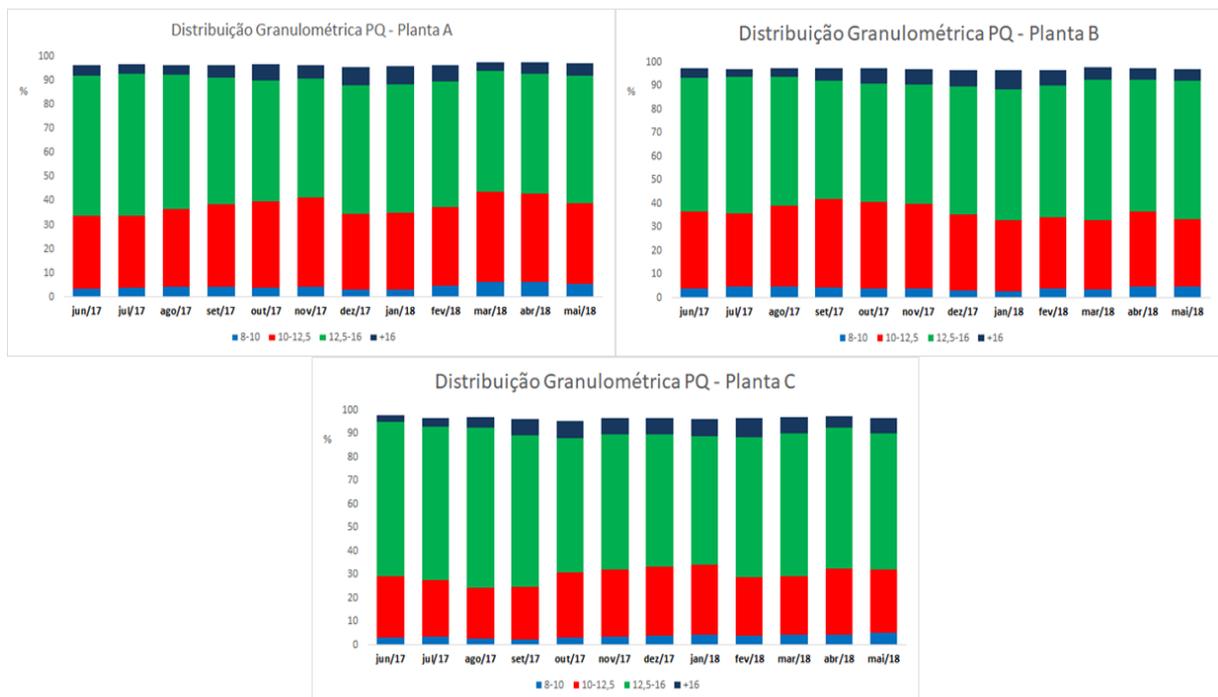


Figura 3. Proporção de pelotas nas faixas granulométricas que compõem a Relação Granulométrica para cada planta

Conforme exibido na figura 3, a proporção de pelotas de diâmetro mais elevado é maior, obviamente, para Relação Granulométrica mais alta. Segundo Gudenau (Gudenau et al. 1984), uma proporção de pelotas muito grandes, pode gerar índices de abrasão elevados no teste de tamboramento, considerando que a etapa de endurecimento das pelotas fica prejudicada. Termodinamicamente, faz-se necessário mais energia para consolidação das ligações físicas em sua estrutura interna.

Para desenvolvimento deste trabalho foram determinadas 3 etapas macro, cada uma com a utilização de determinadas ferramentas e métodos estatísticos para estudo. São elas:

- Análise do fenômeno: Estratificação por turno de operação e faixas de horário utilizando séries temporais e box plot, e análise de capacidade do indicador por planta;
- Análise do processo: Determinação do mapa de processo e suas principais variáveis, e comprovação estatística das principais causas;
- Estabelecimento do plano de ação: criação de padrões de parametrização e melhorias no processo de forma a promover melhoras nos resultados.

## 2.1 Análise de Fenômeno

Foram planejadas as estratificações por turno de operação e faixas de horário para determinação de focos de trabalho:

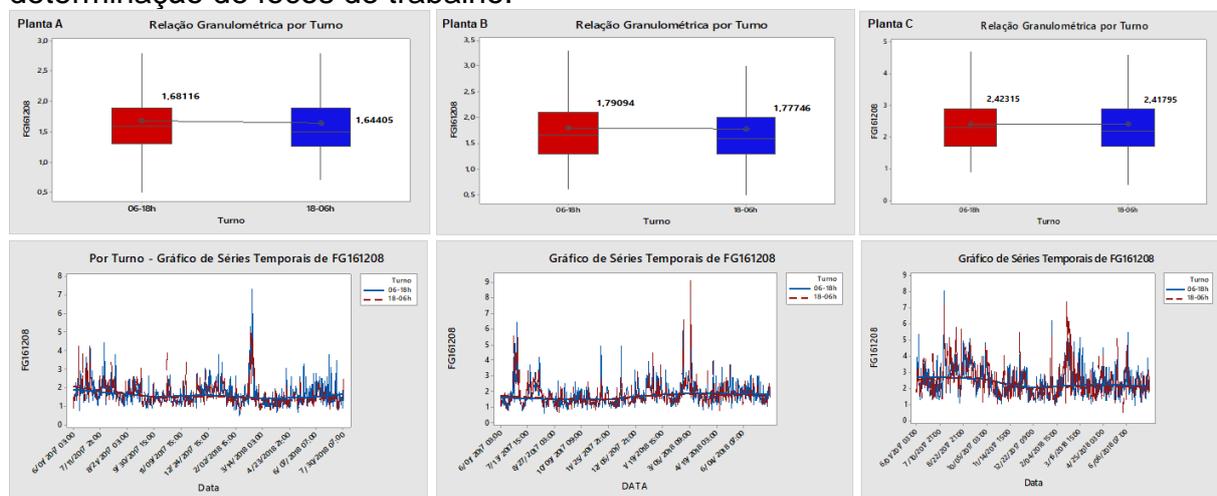


Figura 4. Relação Granulométrica das Plantas A, B e C, estratificação por turno de operação

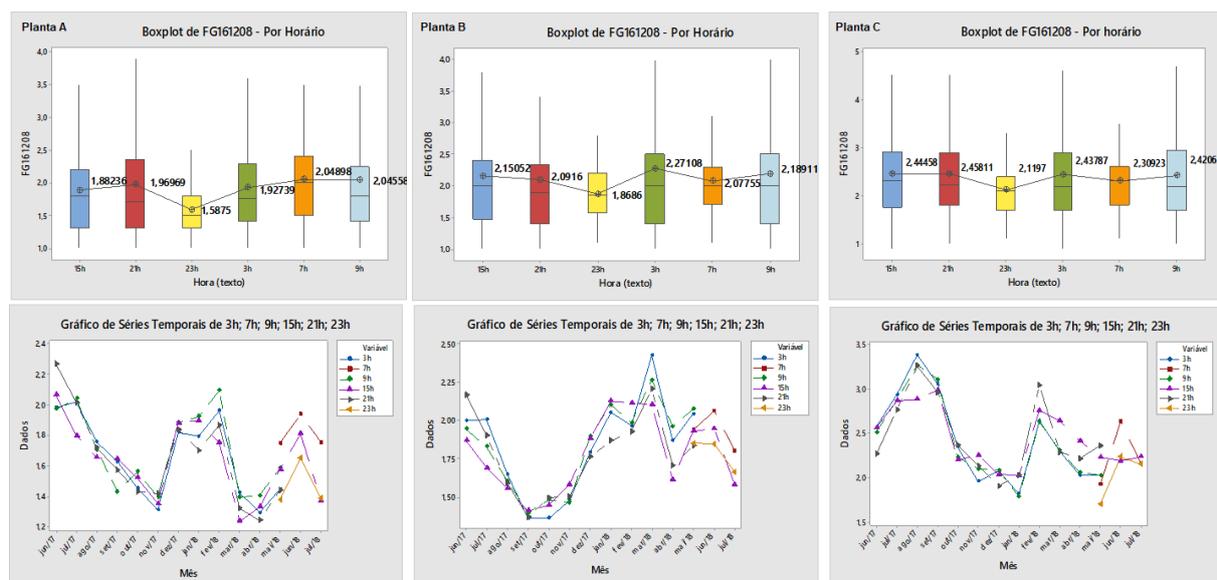


Figura 5. Relação Granulométrica das Plantas A, B e C, estratificação por faixa de horário de amostragem

A análise das figuras 4 e 5 conclui que existem focos específicos de problema, com exceção da faixa de horário das 23h em que normalmente os valores de relação

granulométrica são inferiores aos demais. Ainda assim, todas as análises de capacidade entre as estratificações foram semelhantes. Como exemplo, a figura 5 mostra a comparação entre a análise de capacidade entre faixas de horário distintas para a Planta C.

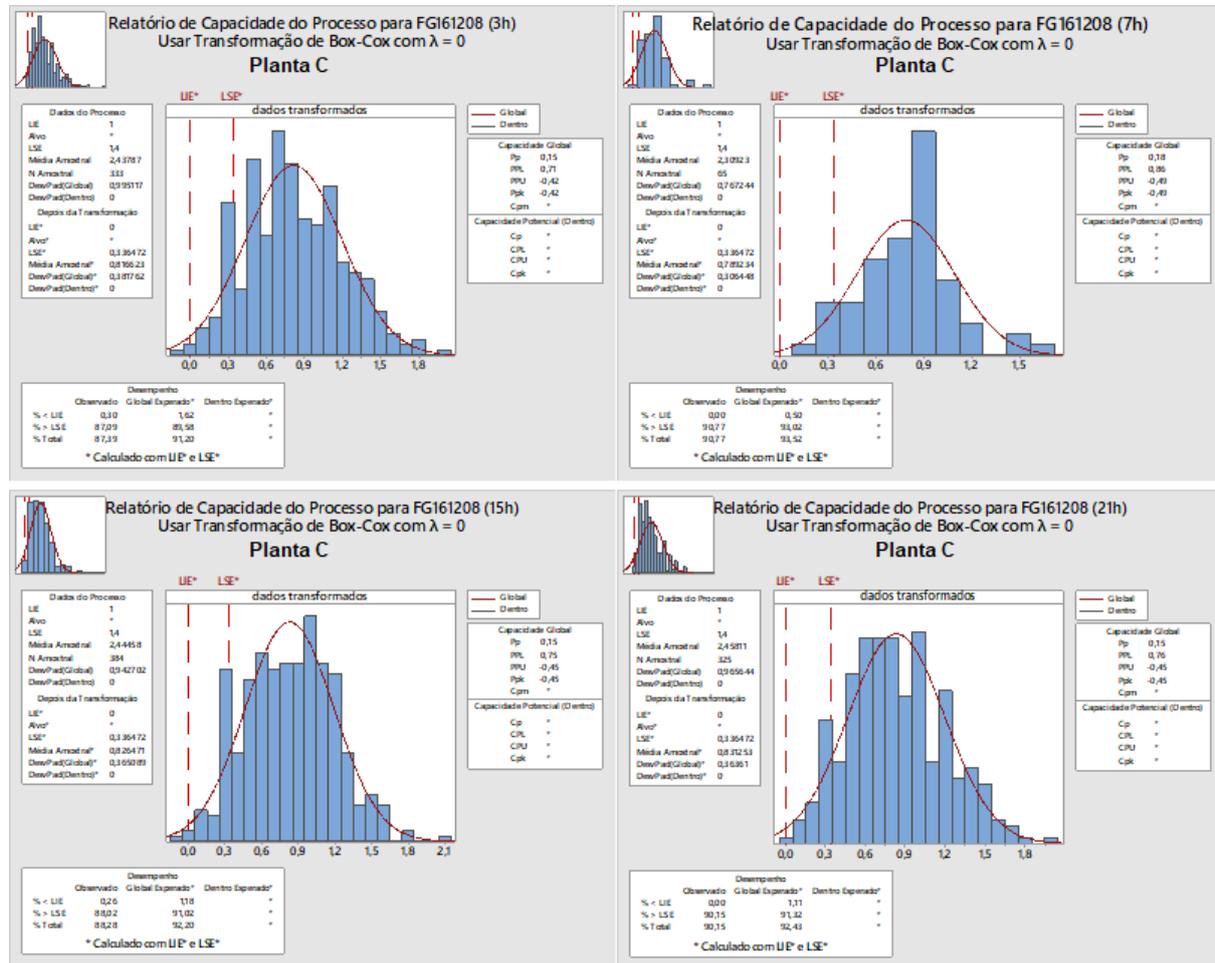


Figura 6. Análise de capacidade para a Planta C nos horários de amostragem 3h, 7h, 15h e 21h

A figura 6, tendo como exemplo a planta C demonstra grande variação de resultados entre os horários de amostragem e grande parte da amostra com valores próximos a 90% fora do valor alvo determinado, inicialmente como 1,2.

## 2.2 Análise de Processo

A etapa de análise de processo tem como objetivo principal determinar as principais variáveis e causas que influenciam nos resultados de Relação Granulométrica, bem como comprovar estatisticamente essa influência a fim de determinar ações de controle que tenham eficácia sobre o indicador.

A figura 7 mostra o mapa de processos com as variáveis que impactam diretamente neste resultado.

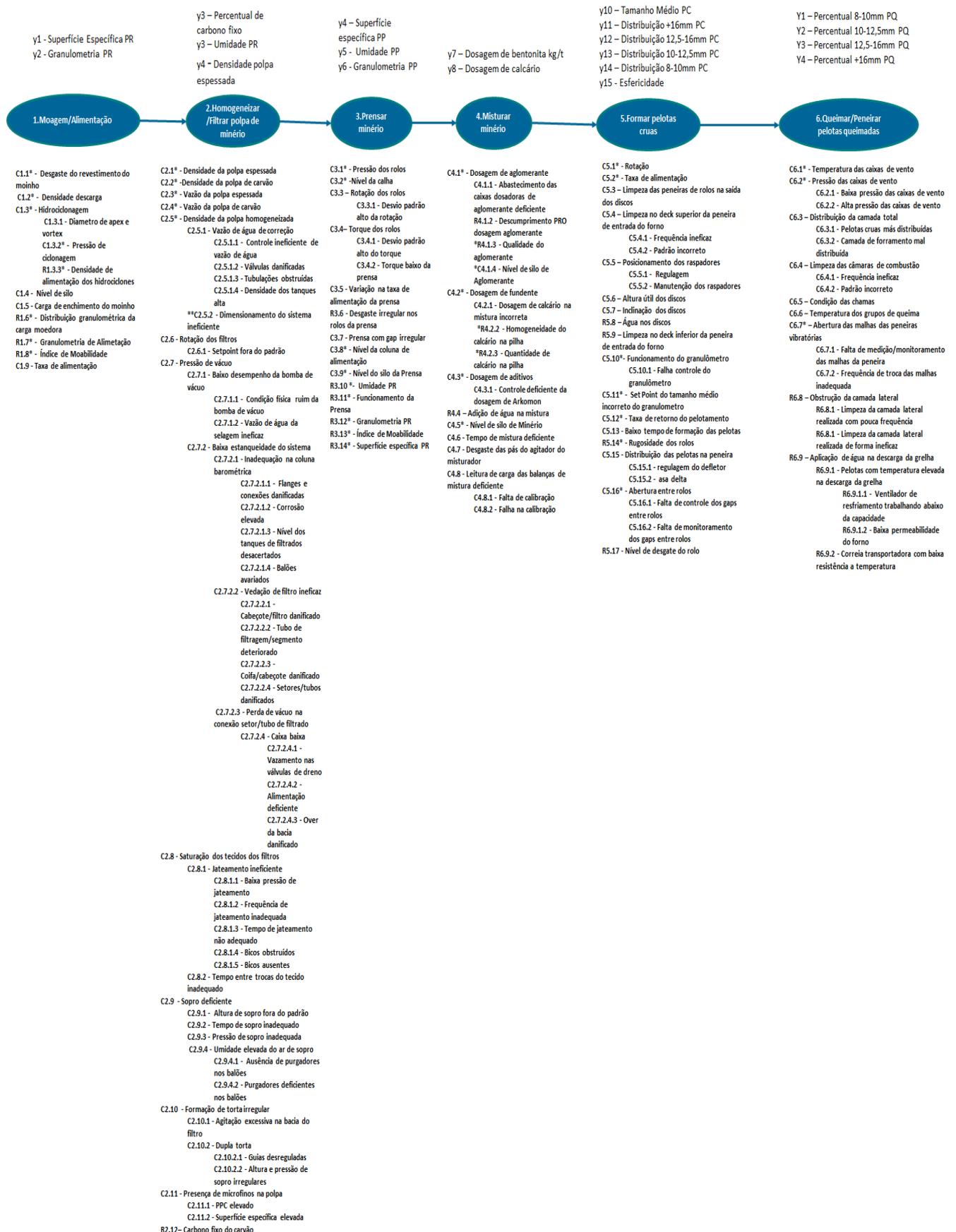
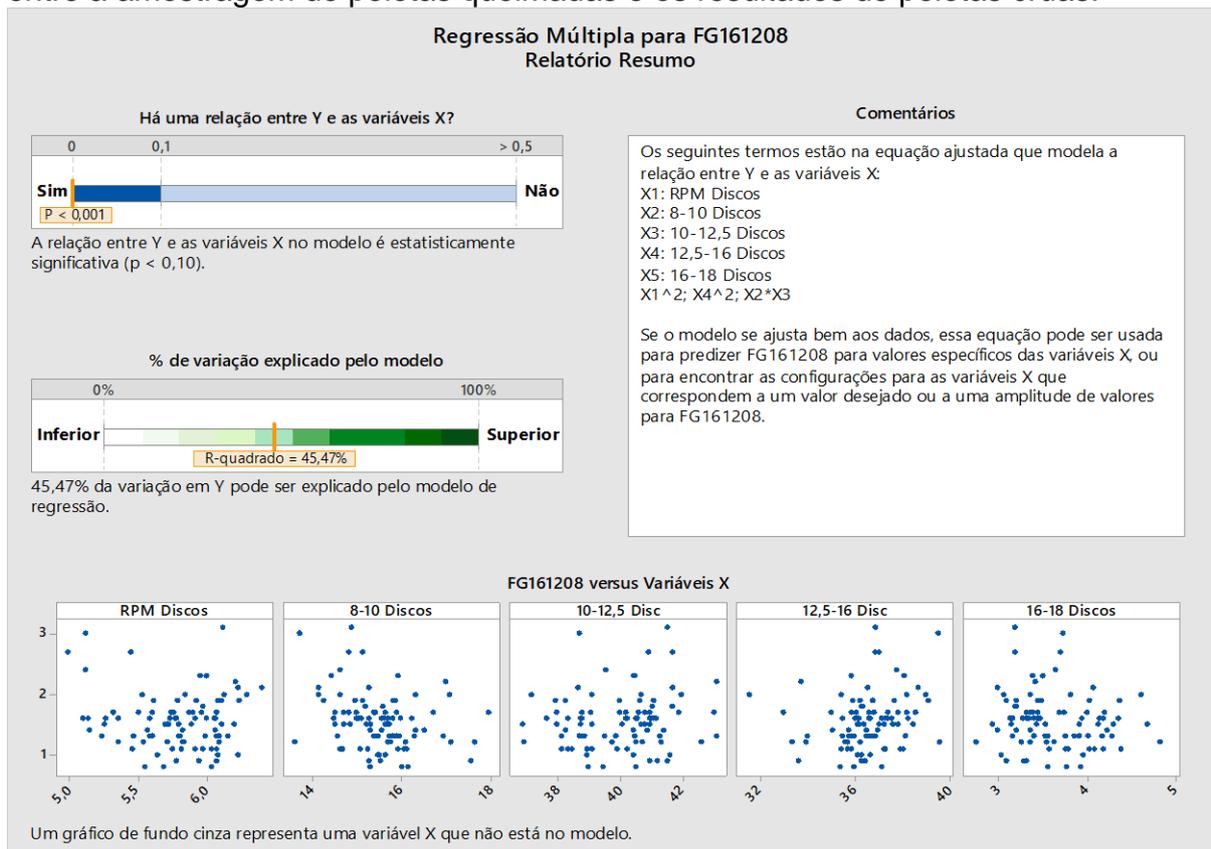


Figura 7. Mapa de processo com variáveis de entrada e saída, e as variáveis internas de controle

A comprovação estatística das principais variáveis, que direcionou a criação do plano de ação foi determinada através de regressão linear múltipla, inicialmente modelando-se com as variáveis da etapa de formação de pelotas cruas com as seguintes variáveis: Relação Granulométrica x Rotação dos discos de pelotamento e faixas granulométricas de pelotas cruas.

Este modelo, mostrado na figura 8, mostra uma relação forte entre a Relação Granulométrica e as demais variáveis, conforme análise exibida pelo software estatístico. O R2 obtido foi de 45,47%, o que consideramos suficiente para prosseguir com as análises devido às interferências e espaço temporal que ocorrem entre a amostragem de pelotas queimadas e os resultados de pelotas cruas.



**Figura 8.** Regressão linear entre RG x Rotação dos discos de pelotamento e granulometria das pelotas cruas

Como análise seguinte, adotando-se as variáveis: Rotação dos discos de pelotamento e granulometria da pelota crua como variáveis que impactam diretamente no resultado final, foram criados outros modelos tendo estas variáveis como resultado final e, desta forma, selecionados os parâmetros de cada fase do mapa de processos.

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,193362	76,42%	75,94%	74,56%

Coefficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	2,305	0,944	2,44	0,015	
DENS1_C@07HO-BP02	-0,922	0,288	-3,21	0,001	1,58
RPM MÉDIA DOS FILTROS	-0,786	0,219	-3,59	0,000	1,20
Dosagem Bentonita 7P5A	0,3181	0,0421	7,55	0,000	3,06
Dosagem Bentonita 7P5B	0,2160	0,0317	6,82	0,000	2,54
Dosagem Calcário 7P5A	0,00745	0,00193	3,87	0,000	3,90
Dosagem Calcário 7P5B	0,00881	0,00196	4,50	0,000	3,38
SET POINT DISCOS	0,1121	0,0431	2,60	0,009	1,54
SUP_SE_PR_L@07FI	-0,000593	0,000113	-5,25	0,000	1,27
UMID_H2O_PR_L@07FI	-0,0476	0,0385	-1,24	0,217	1,24
Média de finos	-0,2868	0,0395	-7,26	0,000	1,16
Média Controle	0,3370	0,0471	7,15	0,000	1,11
Taxa de alimentação média	0,023267	0,000697	33,37	0,000	1,19
Média Pressão de Vácuo	-0,248	0,122	-2,04	0,042	1,16
Média Pressão de Sopros	-0,1448	0,0916	-1,58	0,114	1,08

Equação de Regressão

RPM Média dos Discos = 2,305 - 0,922 DENS1\_C@07HO-BP02 - 0,786 RPM MÉDIA DOS FILTROS + 0,3181 Dosagem Bentonita 7P5A + 0,2160 Dosagem Bentonita 7P5B + 0,00745 Dosagem Calcário 7P5A + 0,00881 Dosagem Calcário 7P5B + 0,1121 SET POINT DISCOS - 0,000593 SUP\_SE\_PR\_L@07FI - 0,0476 UMID\_H2O\_PR\_L@07FI - 0,2868 Média de finos + 0,3370 Média Controle + 0,023267 Taxa de alimentação média - 0,248 Média Pressão de Vácuo - 0,1448 Média Pressão de Sopros

Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados  
(a resposta é RPM Média dos Discos;  $\alpha = 0,05$ )

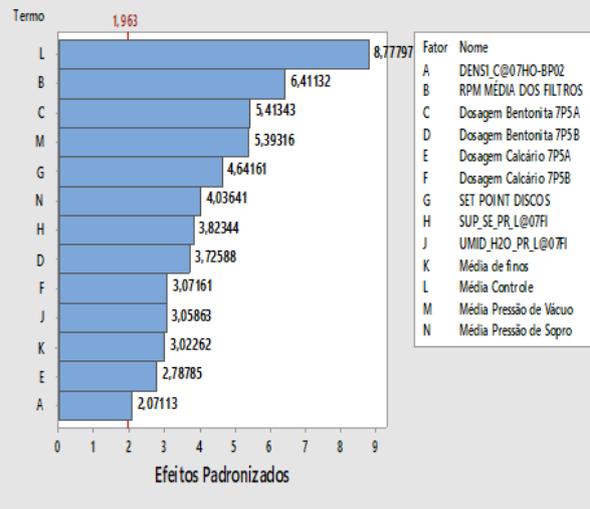


Figura 9. Regressão linear múltipla entre Rotação dos discos de pelotamento x variáveis das etapas de processo anteriores

Na figura 9 pode-se constatar um R2 elevado (~76%), com somente duas variáveis não significativas para o modelo: Umidade da polpa retida e Pressão de sopros, ambas contidas na etapa 2 do Mapa de processos.

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)
1,12697	52,34%	52,07%

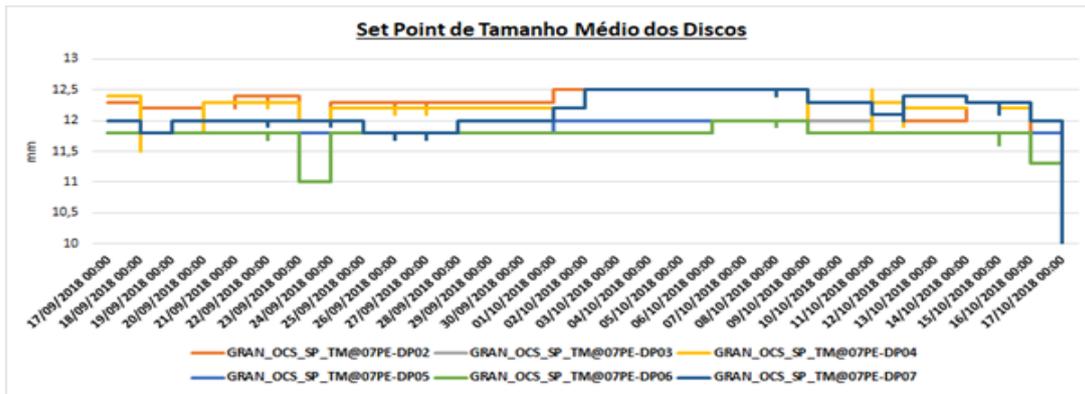
Coefficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P
Constante	136,58	4,15	32,94	0,000
SET POINT DISCOS	-8,574	0,348	-24,62	0,000
RPM Média dos Discos	2,185	0,162	13,47	0,000
Vazão de água nos discos	-34,11	8,44	-4,04	0,000
Taxa de alimentação média	-0,04504	0,00550	-8,19	0,000

Equação de Regressão

Média 10-12,5 = 136,58 - 8,574 SET POINT DISCOS + 2,185 RPM Média dos Discos - 34,11 Vazão de água nos discos - 0,04504 Taxa de alimentação média

Figura 10. Regressão linear múltipla entre Faixa granulométrica 10-12,5mm de pelotas cruas x variáveis dos discos de pelotamento



### Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)
1,18541	46,36%	46,04%

### Coefficientes

Termo	Coef	EP de		Valor-T	Valor-P
		Coef	Valor-T		
Constante	125,63	8,32	15,10	0,000	
GRAN_OCS_SP_TM@07PE-DP02	-2,657	0,436	-6,09	0,000	
GRAN_OCS_SP_TM@07PE-DP03	2,796	0,689	4,06	0,000	
GRAN_OCS_SP_TM@07PE-DP05	-4,961	0,715	-6,94	0,000	
GRAN_OCS_SP_TM@07PE-DP06	-2,322	0,380	-6,11	0,000	

### Equação de Regressão

$$\text{Média } 10-12,5 = 125,63 - 2,657 \text{ GRAN\_OCS\_SP\_TM@07PE-DP02} + 2,796 \text{ GRAN\_OCS\_SP\_TM@07PE-DP03} - 4,961 \text{ GRAN\_OCS\_SP\_TM@07PE-DP05} - 2,322 \text{ GRAN\_OCS\_SP\_TM@07PE-DP06}$$

**Figura 11.** Regressão linear múltipla entre Faixa granulométrica 10-12,5mm de pelotas cruas x Set Point de Tamanho Médio de Pelotas nos discos de pelotamento

As figuras 10 e 11 mostram como as alterações pontuais de operação dos discos de pelotamento influenciam no resultado final.

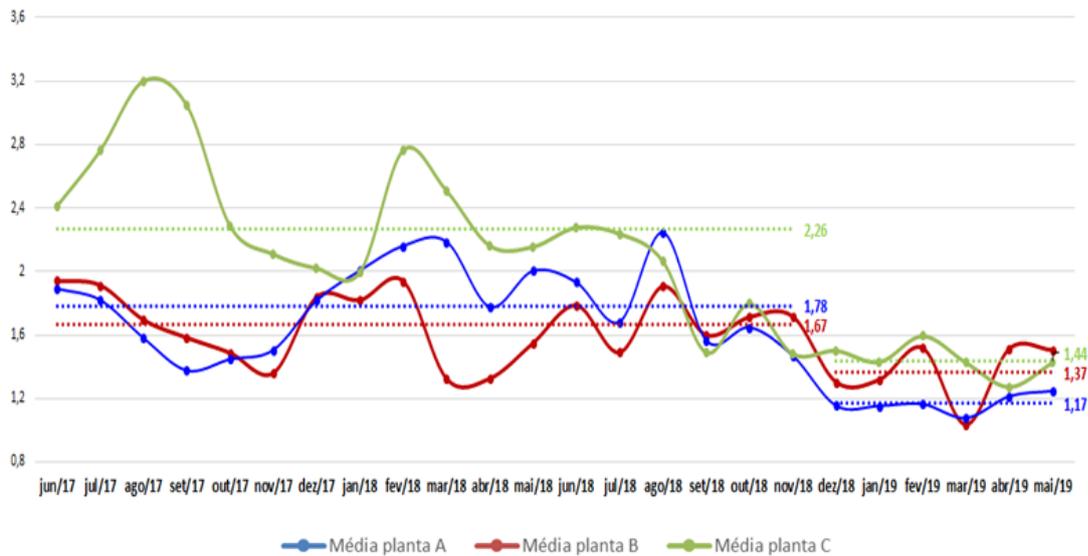
É demonstrada a influência das variáveis Set Point de Tamanho médio de pelotas, Vazão de água de controle dos discos, Taxa de alimentação de minério e Rotação.

A figura 11 já demonstra que a constante alteração de Set Point influencia diretamente no indicador final.

## 2.3 Estabelecimento do Plano de Ação

De acordo com os estudos realizados na etapa de Análise de Processo, foram comprovadas um total de 24 causas, previamente mapeadas na FTA (Failure Tree Analysis).

Após priorização das soluções, foram estabelecidas 30 ações, distribuídas da seguinte forma, de acordo com a etapa de processo:



Distribuição das Ações por Etapa de Processo

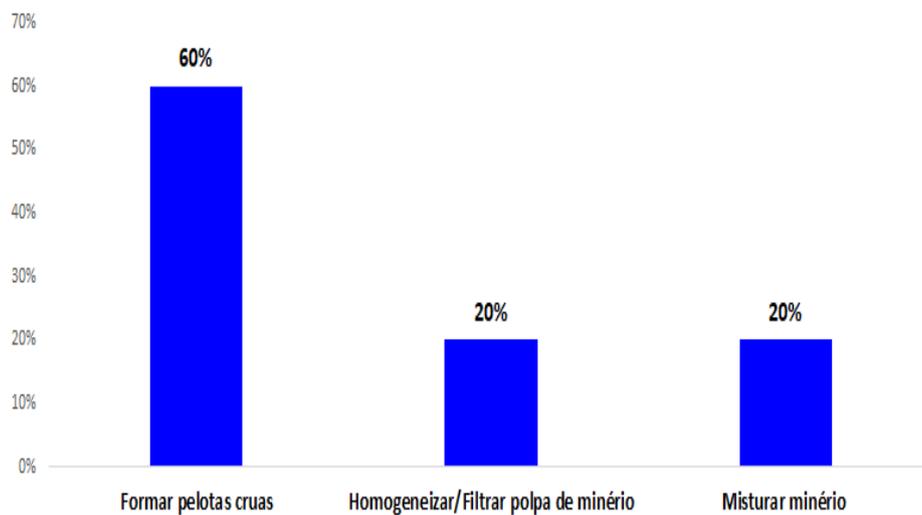


Figura 12. Distribuição das ações por etapa de processo

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após execução do plano de ação, foram obtidos resultados expressivos na redução da Relação Granulométrica das 3 plantas, conforme gráfico a seguir:

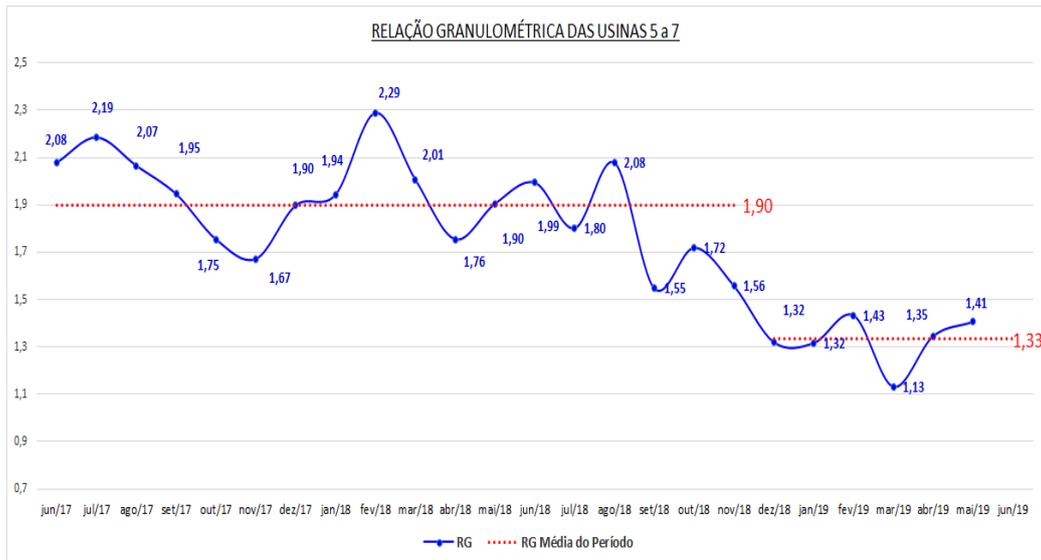


Figura 13. Relação Granulométrica Média das 3 plantas

Figura 14. Relação Granulométrica individual das plantas A, B e C

A redução da média de Relação Granulométrica das 3 plantas, obtida após a implantação do plano de ação, foi de 30%, sendo 18%, 35% e 36% para as Plantas A, B e C, respectivamente.

Como resultado adicional, houve redução dos níveis de abrasão nas 3 usinas, conforme mostrado na figura 15.

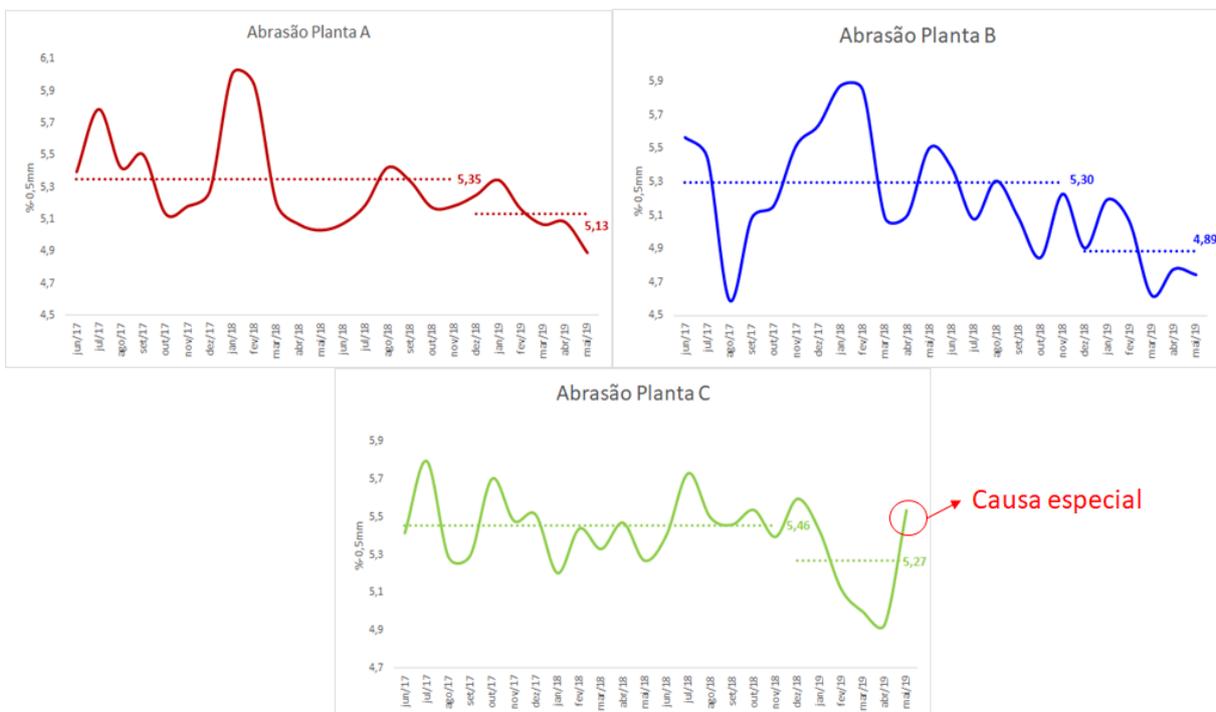


Figura 15. Abrasão (%-0,5mm após ensaio de tamboramento) das plantas A, B e C

As figuras 16, 17 e 18 comparam estatisticamente as médias entre os períodos P1 (Jun/17 a Dez/18) e P2 (Jan/19 a Mai/19), sendo o 2º período, após a implantação do plano de ação nas etapas de processo. Sendo a média da planta C com pouca redução, em função da causa especial ocorrida no mês de Maio devido a uma mudança repentina na matriz de minério de alimentação.

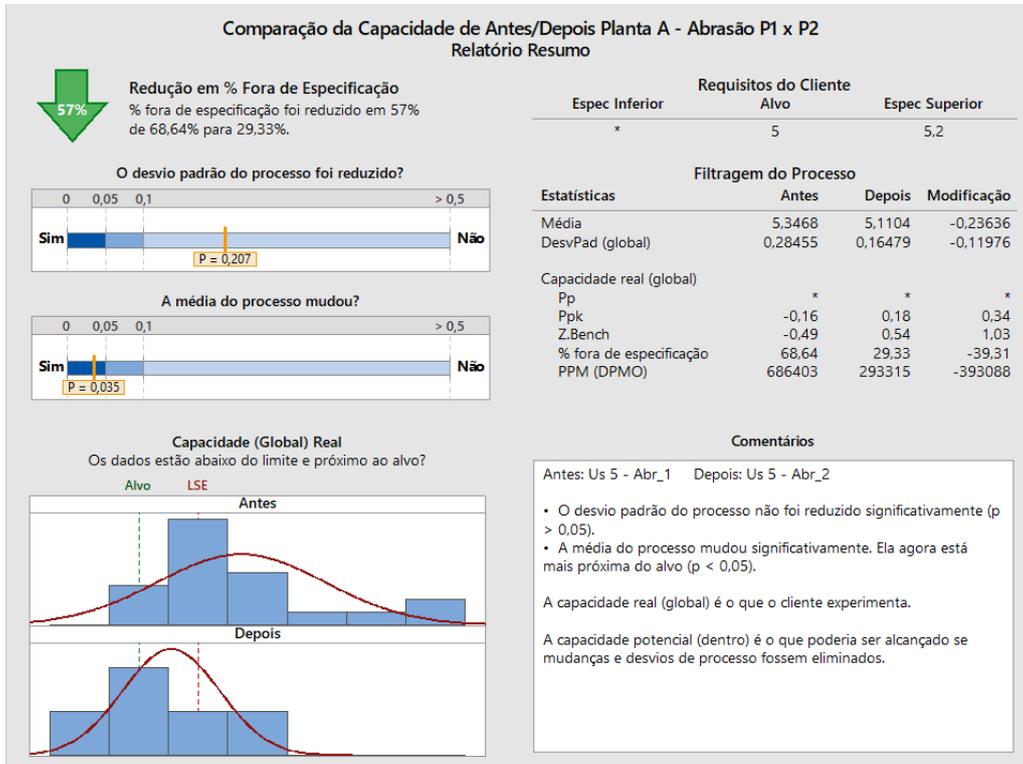
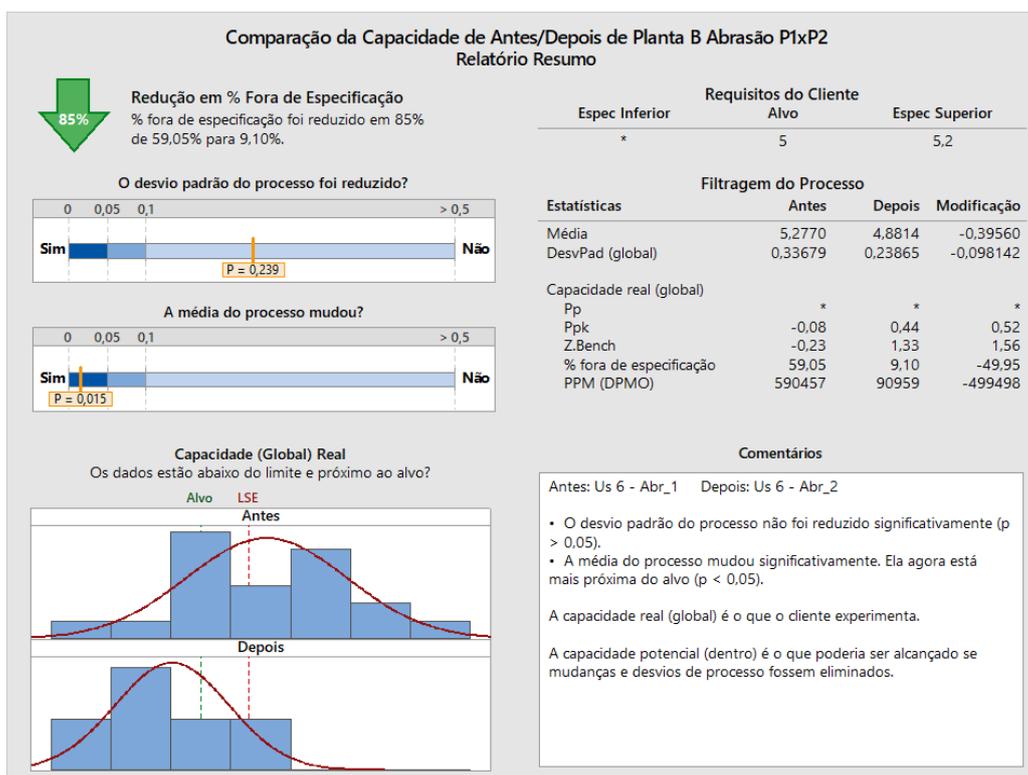
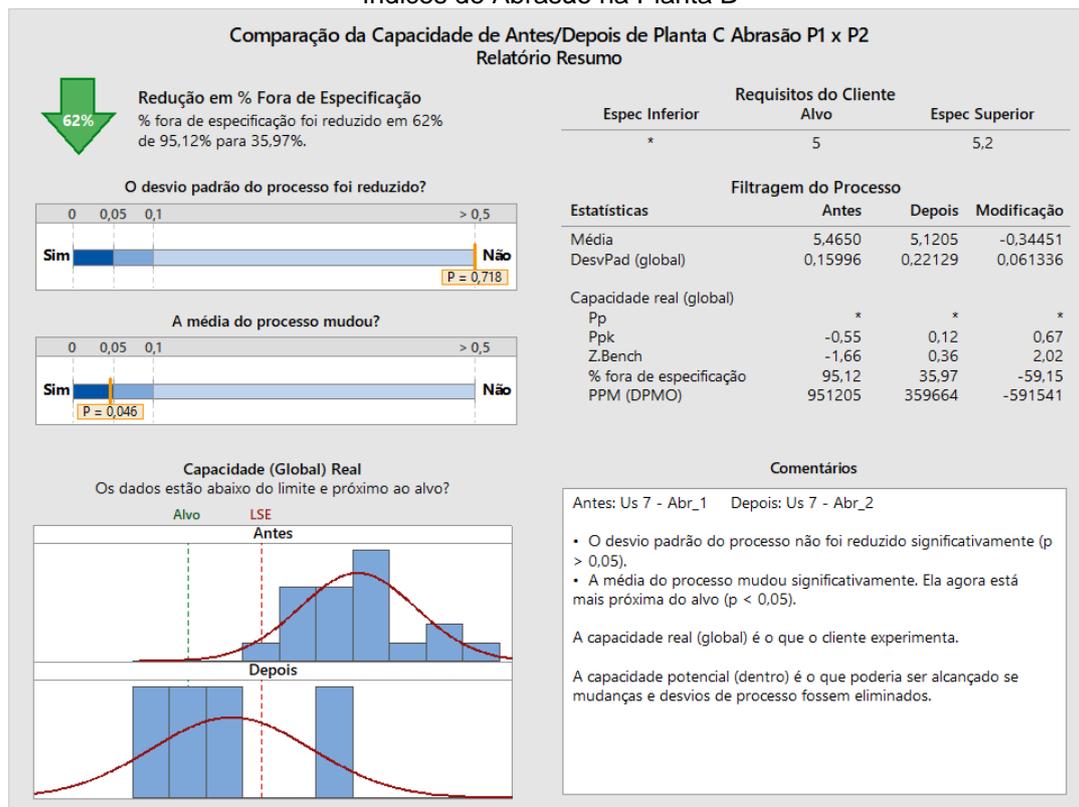


Figura 16. Comparação entre os períodos P1 (Jun/17 a Dez/18) e P2 (Jan/19 a Mai/19) para os índices de Abrasão na Planta A



**Figura 17.** Comparação entre os períodos P1 (Jun/17 a Dez/18) e P2 (Jan/19 a Mai/19) para os índices de Abrasão na Planta B



**Figura 18.** Comparação entre os períodos P1 (Jun/17 a Nov/18) e P2 (Dez/18 a Abr/19) para os índices de Abrasão na Planta C

Nota: retirado da análise de capacidade, o mês Mai/19, devido ao fato desse resultado se tratar de uma causa especial.

Como próximos passos, realizar a revisão do PDCA revisitando a etapa de Análise de Processo para identificação de novas causas, para identificação de pontos de melhoria, tendo como alvo, os valores alcançados na planta B.

## REFERÊNCIAS

- 1 MEYER, K. Pelletizing of Iron Ores; Springer. Verlag Berlin. Heidelberg, and Verlag Stahleissen mbH, Düsseldorf, Germany, 1980.
- 2 MATOS, A.P., Influência da temperatura, pressão, produção e granulometria no processo de secagem das pelotas cruas, Ouro Preto: REDEMAT-UFOP, 2007, 115p (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Materiais).
- 3 H. W. Gudenau, H. Walden, H. Kortmann, H. G. Papacek – Influence of the diameter of iron ore pellets on their production and quality properties – 1984..