

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS - ICEx
DEPARTAMENTO DE ESTATÍSTICA**

MAURÍCIO ACENSO TOMAGNINI

**“OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO VISANDO O
INCREMENTO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS PELOTAS”.**

**BELO HORIZONTE
2018**

MAURÍCIO ACENSO TOMAGNINI

**“OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO VISANDO O
INCREMENTO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS PELOTAS”.**

Monografia apresentada ao Departamento de Estatística da UFMG como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Estatística com Ênfase em Indústria e Mercado.

Orientador: Prof. Dr. Gregório Saravia Atuncar

**Belo Horizonte
2018**

RESUMO

A presença excessiva de partículas finas no minério calcinado é um dos principais aspectos que limitam o aumento da produção, gerando ineficiência energética e instabilidades nos processos. A pelletização é responsável por tratar, em circuito fechado, todo o pó gerado nos fornos elétricos e calcinadores, garantindo a recuperação metálica, uma vez que o pó contém em média 2,4% de níquel. Assim, a sobrevivência das pelotas ao processo de calcinação é fundamental para estabilidade, produtividade e recuperação metálica. Este trabalho teve como objetivo a determinação do ponto ótimo de operação dos discos pelletizadores, visando o aumento da resistência mecânica (*kgf*) das pelotas. Para isso foram utilizadas as ferramentas estatísticas de planejamento e análise de experimentos. Através de um experimento fatorial com *a* níveis da velocidade do disco em % RPM (*fator A*), *b* níveis da taxa de alimentação em t/h (*fator B*), *n* réplicas, sendo que, cada réplica contém todas as combinações dos fatores *A* e *B*. Foi realizada a análise da variância (ANOVA) para o fator *A*, o fator *B* e interação entre eles. Após a ANOVA, foi possível inferir, através dos métodos de comparações múltiplas de Tukey o melhor ponto de operação. Em seguida essa condição de operação foi replicada para todos os discos pelletizadores. Após três meses de operação na condição otimizada, foi comprovada a redução de 3% na recirculação de pó. A redução da carga circulante de pó em decorrência do aumento da resistência das pelotas possibilitou o incremento da produção em 114 t de níquel/ano, ganho líquido de 1.3 milhões de Reais/ano, redução de 3,2 mil m³ de água/ano, 11,7 mil GJ/ano e redução de 1,5 mil toneladas de CO_{2eq}/ano.

Palavras-Chave: Pelotização, Planejamento e Análise de Experimentos (DOE), Análise de Variância (ANOVA), Comparações Múltiplas, Teste de Tukey, Redução de Opex.

ABSTRACT

The excessive fine particles in the calcined ore is one of the main aspects that limit the increase of production, result in energy inefficiency and instabilities in the processes. The pelletizing plant is responsible for treating, in closed circuit, the dust generated in electric furnaces and rotary kilns, guaranteeing the metallic recovery, because the kiln dust contains on average 2.4% of nickel. The survival of the pellets to the rotary kiln is essential for stability, productivity and metal recovery. This work had as main objective the determination of the optimum point of operation of the pelletizing disks, aiming to increase the mechanical resistance (kgf) of the pellets using the statistical design and analysis of experiments. Through a factorial experiment with two factors: with *a* disc speed levels in% RPM (factor A), *b* feed rate levels in t/h (factor B), *n* replicates and each replica containing all combinations of factors A (velocity of the disk) and B (feed rate), the ANOVA was performed for factor A, factor B and interaction between them. After the ANOVA, it was possible to infer, through the Tukey multiple comparison methods, the best point of operation. The best operating condition was the replicated to all four pelletizing discs. After three months of operation in the optimized condition, it was possible to verify the reduction of around 3% in the recirculation of kiln dust. The reduction of the circulating kiln dust load due to the increase in pellet resistance allowed the production to increase by 114 t nickel/year, net adds of USD 365,545/year, a reduction of 3.200 m³ of water/year, 11.7 thousand GJ/year and a reduction of 1,5 thousand tons of CO₂eq/year.

Key Words: Pelletizing, Analysis of variance (ANOVA), Design of Experiments (DOE), Multiple Comparison, Tukey's Test and Opex Reduction.

SUMÁRIO

1.0	INTRODUÇÃO.....	1
2.0	OBJETIVO	1
3.0	A PELOTIZAÇÃO – DESCRIÇÃO DO PROCESSO	1
3.1	O Processo de Pelotização	2
3.2	Variáveis de Processo.....	4
4.0	PLANEJAMENTO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS	5
4.1	Planejamentos fatoriais com dois fatores	5
4.2	Metodologia.....	6
4.3	Verificação da adequação do modelo	12
5.0	COMPARAÇÕES MÚLTIPLAS EM SEGUIDA À ANOVA.....	13
5.1	Teste de Tukey para comparação de médias.....	13
6.0	PLANEJAMENTO E ANÁLISE DO EXPERIMENTO	15
6.1	Coleta dos dados (amostragem)	16
6.2	Análise Descritiva dos Dados Observados	17
6.3	Análise de Variância (ANOVA)	22
6.4	Verificação do Modelo	24
7.0	COMPARAÇÕES MÚLTIPLAS.....	26
7.1	Teste de Tukey Para Comparações Múltiplas	27
8.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
9.0	ANEXOS	34
10.0	REFERÊNCIAS	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – (A) Disco pelletizador (B) Fotografia de um disco em operação.	2
Figura 2 - Estágios de formação das pelotas cruas.	3
Figura 3 - Forno de secagem e queima ou endurecimento das pelotas.	3
Figura 4 - (a) Gráfico dos efeitos principais sem interação com dois fatores em dois níveis; (b) Gráfico dos efeitos principais com a níveis do fator A e b níveis do fator B; (c) Gráfico das interações de dois fatores com dois níveis e (d) Gráfico da interação de a níveis do fator A e b níveis do fator B.	6
Figura 5 – Fórmulas e notação para totais e médias.	8
Figura 6 – Decomposição da soma dos quadrados e graus de liberdade.	9
Figura 7 – Fórmulas de cálculo para as somas quadráticas.	11
Figura 8 – Estufa (150 °C).	16
Figura 9 - Aparato Kratos – Teste de compressão.	17
Figura 10 – Gráfico resumo para 40 %RPM e 9, 10, 11 e 12 t/h.	19
Figura 11 – Gráfico resumo para 50 %RPM e 9, 10, 11 e 12 t/h.	20
Figura 12 – Gráfico resumo para 60 %RPM e 9, 10, 11 e 12 t/h.	21
Figura 13 – Agrupamento usando o Método de Tukey e Confiança de 95%	28
Figura 14 – Maior média observada de resistência mecânica das pelotas.	30
Figura 15 – Ponto de operação recomendado.	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais variáveis de processo nas características das pelotas cruas.....	4
Tabela 2 - Arranjo das observações de planejamento fatorial com dois fatores.	7
Tabela 3 – ANOVA para um fatorial com dois fatores, modelos de efeitos fixos.....	12
Tabela 4 – Aleatorização da ordem do experimento (Minitab).....	16
Tabela 5 - Saída do Minitab - análise de variância (ANOVA).	23
Tabela 8 – Comparação pareada de Tukey: taxa de alimentação (t/h) * RPM (%)	28
Tabela 9 – Sequência das comparações para os intervalos de confiança (ICs) de Tukey com nível de confiança de 95%.....	29
Tabela 10 – Ganhos com a redução da recirculação de pó (Base Anual).	33

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Boxplot da resistência das pelotas em função do %RPM e taxa de alimentação dos discos pelotizadores.	18
Gráfico 2 – Gráfico de Probabilidade Normal dos Resíduos – Teste de Normalidade de Anderson-Darling.	24
Gráfico 3 - Histograma dos resíduos	24
Gráfico 4 - Gráfico de dispersão dos Resíduos versus Valores Ajustados (Preditos)....	25
Gráfico 5 - Resíduos versus ordem de coleta.	25
Gráfico 6 – Gráfico das Interações	26
Gráfico 7 - Gráfico de Superfície de kgf versus RPM (%), Taxa de Alimentação (tph)	27
Gráfico 9 - Intervalos de confiança (ICs) de Tukey com nível de confiança de 95%....	29
Gráfico 10 – Resistência das Pelotas antes e depois dos trabalhos da intervenção (análises de rotina da operação).....	31
Gráfico 11 – Gráfico da Alimentação dos Fornos Rotativos (ROM + Pelotas + Pó Recirculado) o percentual de pó recirculado em função da alimentação.	32
Gráfico 12 – Gráfico dos Intervalos de Confiança Antes e Depois da Otimização dos Discos.	32

1.0 INTRODUÇÃO

Uma unidade produtora de ferroníquel, localizada no Estado de Goiás, empenhada em identificar oportunidades para melhorar os retornos do negócio, trabalha em gargalos já identificados que devem ser eliminados para aumentar a taxa de alimentação de minério “*Run of Mine*” (ROM) e conseqüentemente incrementar a produção de ferroníquel. A presença excessiva de partículas finas no minério calcinado é um dos principais aspectos que limitam o aumento da produção, pois gera ineficiência energética e instabilidades no processo. Trabalhando para ajustar a granulometria do minério calcinado, ações foram tomadas a fim de melhorar o desempenho do processo de pelotização. A pelotização é responsável por processar todo o pó gerado nos fornos elétricos e calcinadores, garantindo a recuperação metálica tendo em vista que o pó contém em média 2,4% de níquel (Ni). A taxa de sobrevivência das pelotas foi estimada em 50%, ou seja, a metade das pelotas alimentadas aos fornos calcinadores retornam ao circuito de pelotização, que é dividido em três etapas: etapa de preparação de carga, onde o pó é misturado à bentonita e aditivos; etapa de pelotização, onde a mistura é pelotizada em discos rotativos e a etapa de secagem das pelotas em fornos secadores de esteira.

2.0 OBJETIVO

Este trabalho tem como principal objetivo determinar o ponto ótimo de operação dos discos pelotizadores, visando aumentar a resistência mecânica (kgf) das pelotas, para tal utiliza-se ferramentas estatísticas de planejamento e análise de experimentos. O aumento da resistência mecânica das pelotas permite o incremento na produção de ferroníquel e a redução de custos.

3.0 A PELOTIZAÇÃO – DESCRIÇÃO DO PROCESSO

A pelotização (Luz, Sampaio e França, 2010) consiste na mistura úmida e homogênea de finos de minério na fração abaixo de $\sim 0,149$ mm com quantidades pré-definidas de aglomerantes que, nos discos de pelotização, pela ação da tensão superficial de capilaridade, promove a formação de um aglomerado esférico de tamanho entre 8 e 18mm. As pelotas, depois de submetidas a um tratamento térmico específico, apresentam elevada resistência mecânica ao manuseio e propriedades metalúrgicas superiores quando submetidas ao processo de redução.

3.1 O Processo de Pelotização

Etapa 1: Armazenamento, dosagem e homogeneização

Os finos de minério, bentonita e aditivos são armazenados em silos. As dosagens preestabelecidas para cada um desses insumos e determinada quantidade de água são homogeneizadas em misturadores mecânicos, criando condições favoráveis para a formação das pelotas, fornecendo as características físico-químicas necessárias ao produto final.

Etapa 2: Pelotização

Na etapa de pelotização, os finos de minério, devidamente preparados, já tendo recebido os aditivos necessários, são alimentados aos discos pelotizadores, equipamentos responsáveis pela formação das pelotas cruas (ver Figura 1).

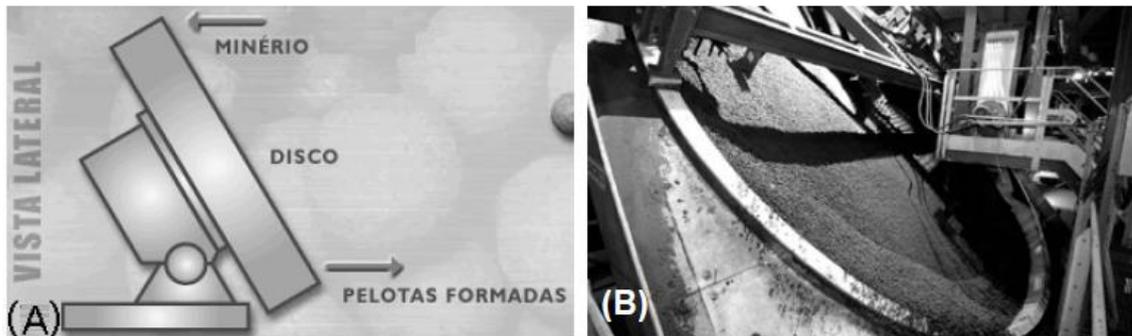


Figura 1 – (A) Disco pelotizador (B) Fotografia de um disco em operação.

Fonte: Luz, Sampaio e França (2010).

Ao ser alimentada no disco, a mistura sofre um rolamento em sentido circular, provocado inicialmente pela rotação e inclinação do disco. Com esse movimento as partículas sólidas revestidas por uma película de água se tocam formando o aglomerado ou pelotas cruas. A Figura 2 sintetiza o mecanismo de formação de pelotas cruas.

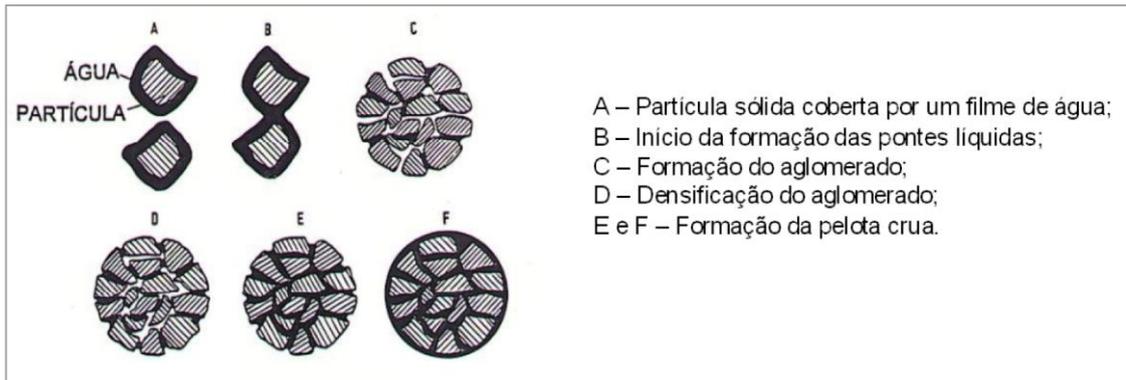


Figura 2 - Estágios de formação das pelotas cruas.

Fonte: Luz, Sampaio e França (2010).

Etapa 3: Endurecimento

Para que as pelotas formadas nos discos de pelotização possam resistir às operações de manuseio e transporte é necessário submetê-las a um tratamento térmico cuidadoso e bem balanceado, proporcionando às mesmas a resistência mecânica apropriada. Este tratamento é denominado processo de endurecimento ou secagem e queima das pelotas, o qual é realizado em fornos chamados de forno de endurecimento.

A Figura 3 apresenta o desenho esquemático de um forno de endurecimento do tipo grelha móvel.

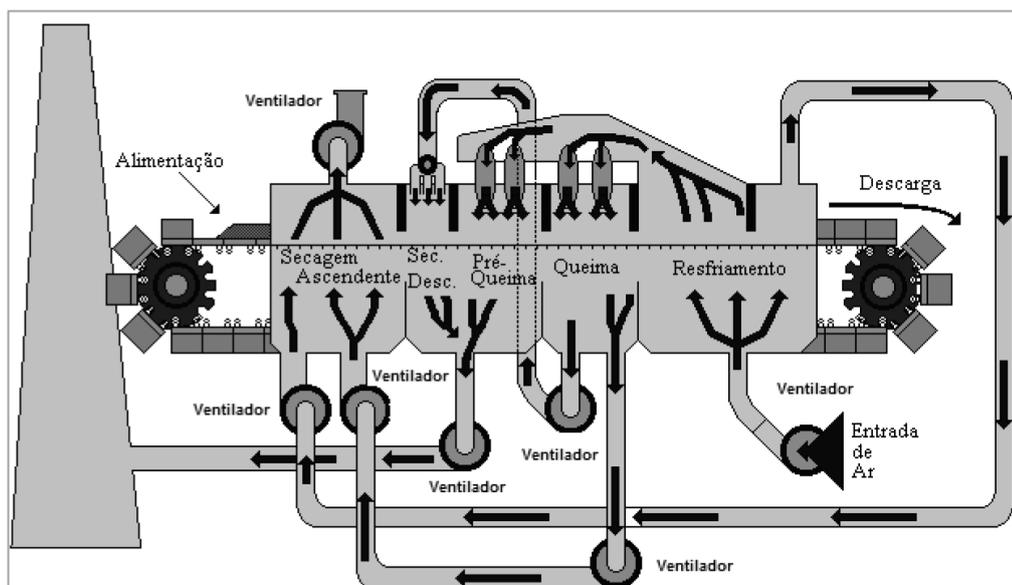


Figura 3 - Forno de secagem e queima ou endurecimento das pelotas.

Fonte: Luz, Sampaio e França (2010).

3.2 Variáveis de Processo

As principais variáveis de processo e suas influências nas características das pelotas cruas são mostradas na Tabela 1, a seguir:

Tabela 1 - Principais variáveis de processo nas características das pelotas cruas.

Disco de Pelotização - Variáveis de Processo						
			Tempo de Residência do Material	Acabamento Superficial	Tamanho das Pelotas	Homogeneidade das Pelotas na Descarga dos Discos
Pellet Feed	S. Específica	Maior	Maior	Melhor	Menor	Maior
	Umidade	Maior	Menor	Pior	Maior	Menor
	% < 325 #	Maior	Maior	Melhor	Menor	Maior
Discos	Rotação	Maior	Maior	Melhor	Maior	Menor
	Profundidade Útil	Maior	Maior	Melhor	Maior	Maior
	Taxa de Alimentação	Maior	Menor	Pior	Menor	Menor
	Inclinação	Maior	Menor	Pior	Menor	Menor
	Granulometria dos insumos	Maior	Maior	Melhor	-	Maior

No processo de produção de ferroníquel não há controle e nem medição da granulometria abaixo de 325 # (*mesh*), da superfície específica e da granulometria dos insumos. Contudo, devido às características do processo, essas três variáveis são relativamente constantes. A umidade é controlada no intervalo entre 25 e 28%, em massa, devido à limitação da capacidade de secagem do forno secador de pelotas. A inclinação e a profundidade útil dos discos são características do projeto dos discos e a sua modificação requer engenharia. Assim, a rotação e a taxa de alimentação são as variáveis de processo controladas e o foco desse trabalho.

4.0 PLANEJAMENTO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS

O experimento é um procedimento no qual níveis das variáveis de entrada de um processo, previamente determinados, são testados para avaliar as possíveis alterações sofridas pela variável resposta, bem como as razões de sua alteração. Os objetivos de um experimento planejado são: a redução da variabilidade do processo, sua previsibilidade, o aumento da produtividade, a redução do custo operacional e melhoria no rendimento do processo.

4.1 Planejamentos fatoriais com dois fatores

Para o experimento foram variadas a velocidade do disco (*fator A*) e a taxa de alimentação (*fator B*). Assim, o problema recai no caso dos experimentos fatoriais com: *a* níveis do *fator A*; *b* níveis do *fator B* e *n* réplicas, sendo que, cada réplica contém todas as combinações dos fatores *A* e *B*. O efeito de um fator é definido como a variação na variável resposta produzida pela mudança no nível do fator. É denominado *efeito principal* por se referir aos fatores primários. Em alguns experimentos, a diferença numérica na variável resposta entre os níveis de um fator não é a mesma em todos os níveis do outro fator, isso ocorre quando há interação entre eles. Nesse tipo de experimento, quando ambos os fatores têm dois níveis, o efeito da interação AB é a diferença nas médias da diagonal. No caso de os fatores possuírem vários níveis, o mesmo procedimento é feito de modo iterativo, produzindo uma superfície de resposta. Na prática a maioria dos softwares usados para análise de dados geram os gráficos automaticamente. Na Figura 4, são apresentados exemplos dos gráficos gerados para análise dos fatores e as interações entre eles (Coleman e Montgomery, 1993).

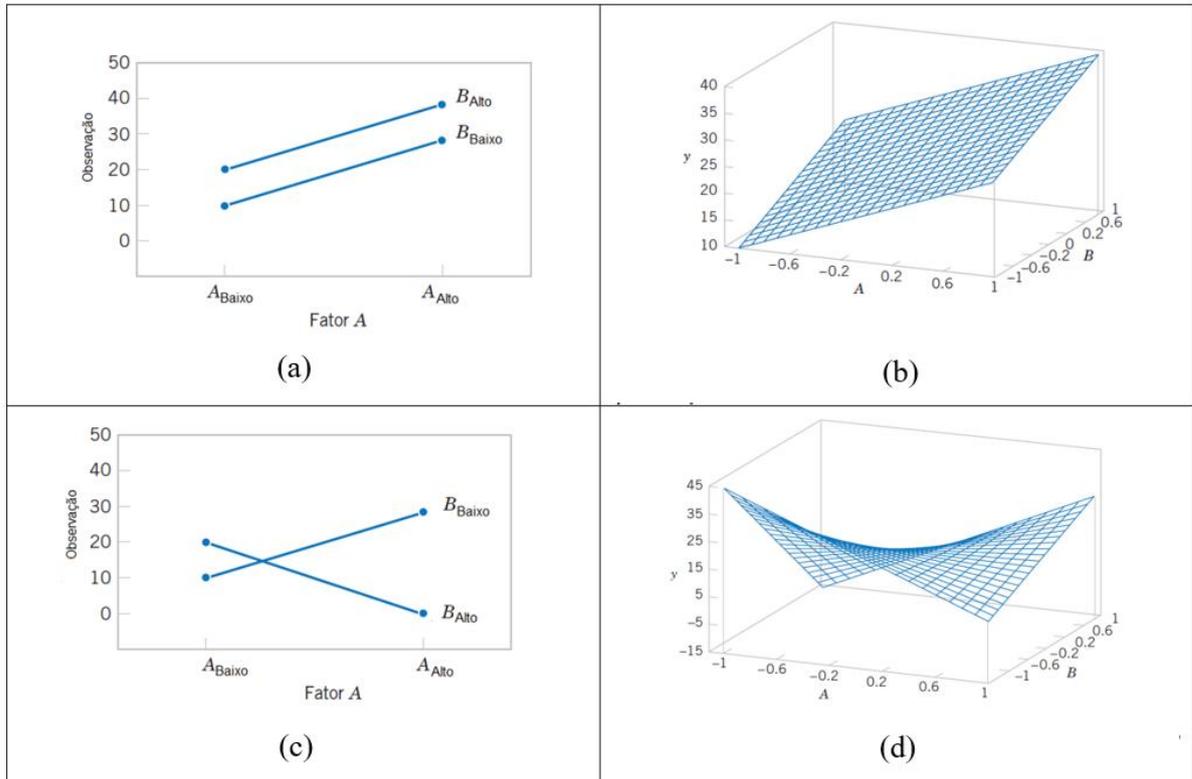


Figura 4 - (a) Gráfico dos efeitos principais sem interação com dois fatores em dois níveis; (b) Gráfico dos efeitos principais com a níveis do fator A e b níveis do fator B; (c) Gráfico das interações de dois fatores com dois níveis e (d) Gráfico da interação de a níveis do fator A e b níveis do fator B.

Fonte: Adaptado de Montgomery e Runger (2012)

O conceito de interação pode ser ilustrado graficamente de outras formas.

4.2 Metodologia

O planejamento fatorial com dois fatores é mostrado na

Tabela 2. As observações podem ser descritas pelo modelo estatístico linear:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}, \quad \begin{cases} i=1,2,\dots,a \\ j=1,2,\dots,b \\ k=1,2,\dots,n \end{cases}$$

sendo:

Y_{ijk} : Observação da ij -ésima célula para a k -ésima réplica;

μ : Efeito médio global;

τ_i : O efeito do i-ésimo nível do fator A (% RPM);

β_j : O efeito do j-ésimo nível do fator B (t/h);

$(\tau\beta)_{ij}$: O efeito de interação entre A e B e

ε_{ijk} : Uma componente do erro aleatório.

Tabela 2 - Arranjo das observações de planejamento fatorial com dois fatores.

		Fator B				Totais	Médias
		1	2	...	b		
Fator A	1	$y_{111}, y_{112},$ \dots, y_{11n}	$y_{121}, y_{122},$ \dots, y_{12n}	...	$y_{1b1}, y_{1b2},$ \dots, y_{1bn}	$y_{1..}$	$\bar{y}_{1..}$
	2	$y_{211}, y_{212},$ \dots, y_{21n}	$y_{221}, y_{222},$ \dots, y_{22n}	...	$y_{2b1}, y_{2b2},$ \dots, y_{2bn}	$y_{2..}$	$\bar{y}_{2..}$
	...						
	a	$y_{a11}, y_{a12},$ \dots, y_{a1n}	$y_{a21}, y_{a22},$ \dots, y_{a2n}	...	$y_{ab1}, y_{ab2},$ \dots, y_{abn}	$y_{a..}$	$\bar{y}_{a..}$
Totais		$y_{.1.}$	$y_{.2.}$...	$y_{.b.}$	$y_{...}$	
Médias		$\bar{y}_{.1.}$	$\bar{y}_{.2.}$...	$\bar{y}_{.b.}$		$\bar{y}_{...}$

Fonte: Adaptado de Montgomery e Runger (2012)

O efeito médio global é dado por:

$$\mu_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij}$$

sendo μ_{ij} : Média da combinação do i-ésimo nível do fator A com o j-ésimo nível do fator B.

Suposições do Modelo:

Os efeitos de tratamento são definidos como desvios da média geral, assim:

$$\sum_{i=1}^a \tau_i = 0 \quad \text{e} \quad \sum_{j=1}^b \beta_j = 0$$

Os efeitos de interação também são fixos e definidos tais que

$$\sum_{i=1}^a (\tau\beta)_{ij} = \sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij} = 0$$

Os erros ε_{ijk} seguem uma distribuição normal com média zero, desvio padrão σ^2

e são independentes, isto é

$$\varepsilon_{ijk} \sim \text{Normal}(0, \sigma^2) \quad \text{e} \quad \varepsilon_{ijk} \text{ são independentes}$$

Hipóteses a serem testadas:

Fator A $H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$
 $H_1 : \text{ao menos um } \tau_i \neq 0, i = 1, 2, \dots, a$

Fator B $H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$
 $H_1 : \text{ao menos um } \beta_j \neq 0, j = 1, 2, \dots, b$

Interação $H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0, \text{ para todo } i, j$
 $H_1 : \text{ao menos um } (\tau\beta)_{ij} \neq 0$

Para testar as hipóteses é utilizada a análise de variância (ANOVA) e para construção da tabela ANOVA, serão utilizadas as notações mostradas na Figura 5.

$$\begin{array}{lll} y_{i..} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} & \bar{y}_{i..} = \frac{y_{i..}}{bn} & i = 1, 2, \dots, a \\ y_{.j.} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n y_{ijk} & \bar{y}_{.j.} = \frac{y_{.j.}}{an} & j = 1, 2, \dots, b \\ y_{ij.} = \sum_{k=1}^n y_{ijk} & \bar{y}_{ij.} = \frac{y_{ij.}}{n} & i = 1, 2, \dots, a \\ y_{...} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} & \bar{y}_{...} = \frac{y_{...}}{abn} & j = 1, 2, \dots, b \end{array}$$

Figura 5 – Fórmulas e notação para totais e médias.

Fonte: Adaptado de Montgomery e Runger (2012)

Através da ANOVA (Montgomery, 2012) as hipóteses são testadas pela decomposição da variabilidade total dos dados em pares de componentes, comparando os vários elementos dessa decomposição. A variabilidade total é medida pela soma total dos quadrados das observações em relação a média global.

$$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2$$

A Figura 6 mostra a soma da decomposição dos quadrados e seus graus de liberdade:

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 = bn \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2 + an \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...})^2$$

$$+ n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{ij.})^2$$

ou simbolicamente,

$$SQ_T = SQ_A + SQ_B + SQ_{AB} + SQ_E$$

graus de liberdade: $abn - 1 = (a - 1) + (b - 1) + (a - 1)(b - 1) + ab(n - 1)$

Figura 6 – Decomposição da soma dos quadrados e graus de liberdade.

Fonte: Adaptado de Montgomery e Runger (2012)

Se dividirmos cada uma das somas quadráticas pelo número correspondente de graus de liberdade, obteremos os quadrados médios para A, B, a interação e o erro.

$$QM_A = \frac{SQ_A}{(a-1)} = \frac{bn \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2}{(a-1)}$$

$$QM_B = \frac{SQ_B}{(b-1)} = \frac{an \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...})^2}{(b-1)}$$

$$QM_{AB} = \frac{n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...})^2}{(a-1)(b-1)}$$

$$QM_{\text{Erro}} = \frac{SQ_{\text{Erro}}}{ab(n-1)} = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{ij.})^2}{ab(n-1)}$$

Considerando que os fatores A e B sejam fixos, os valores esperados das médias quadráticas são:

$$E(QM_A) = \sigma^2 + \frac{bn \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a-1}$$

$$E(QM_B) = \sigma^2 + \frac{an \sum_{j=1}^b \beta_j^2}{b-1}$$

$$E(QM_{AB}) = \sigma^2 + \frac{n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij}^2}{(a-1)(b-1)}$$

$$E(QM_{Erro}) = \sigma^2.$$

A partir da análise dos valores esperados dessas médias quadráticas, se as hipóteses nulas a respeito dos efeitos principais, $H_0: \tau_i = 0$, $H_0: \beta_j = 0$, e a hipótese a respeito das interações $H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0$, forem todas verdadeiras, todas as quatro médias quadráticas serão estimativas não tendenciosas de σ^2 . Para testar o fato de os efeitos dos fatores nas linhas serem iguais a zero ($H_0: \tau_i = 0$), usaremos a razão:

Teste F para o fator A:

$$F_0 = \frac{MQ_A}{MQ_E}$$

que terá uma distribuição F , com $(a-1)$ e $ab(n-1)$ graus de liberdade, se $H_0: \tau_i = 0$, $i = 1, \dots, a$, for verdadeira. Essa hipótese nula será rejeitada com um nível de significância $0 < \alpha < 1$, se $f_0 > f_{\alpha, a-1, ab(n-1)}$. Similarmente, para testar a hipótese de que todos os efeitos dos fatores nas colunas são iguais a zero ($H_0: \beta_j = 0$), usaremos a razão:

Teste F para o fator B:

$$F_0 = \frac{MQ_B}{MQ_E}$$

que tem uma distribuição F , com $(b - 1)$ e $ab(n - 1)$ graus de liberdade, se $H_0: \beta_j = 0, j = 1, \dots, b$, for verdadeira. Essa hipótese nula é rejeitada com um nível de significância $0 < \alpha < 1$, se $f_0 > f_{\alpha, b-1, ab(n-1)}$.

Finalmente, para testar a hipótese $H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0$, que é a hipótese de que todos os efeitos de interações sejam iguais a zero, usaremos a razão:

Teste F para a interação AB:

$$F_0 = \frac{MQ_{AB}}{MQ_E}$$

Que tem uma distribuição F , com $(a - 1)(b - 1)$ e $ab(n - 1)$ graus de liberdade, se a hipótese nula $H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0$. Essa hipótese é rejeitada com um nível de significância $0 < \alpha < 1$, se $f_0 > f_{\alpha, (a-1)(b-1), ab(n-1)}$.

As formulas de cálculo para as somas quadráticas são mostradas na Figura 7, abaixo:

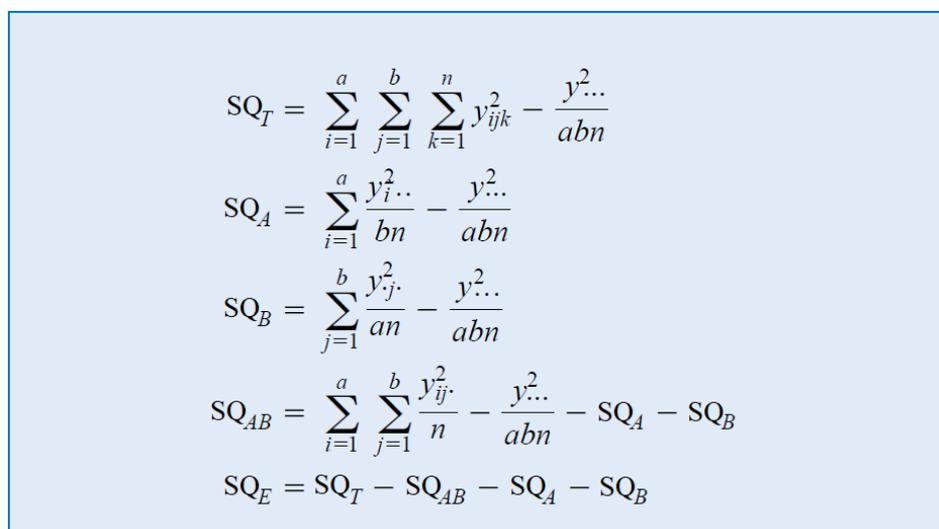

$$\begin{aligned}SQ_T &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abn} \\SQ_A &= \sum_{i=1}^a \frac{y_{i\dots}^2}{bn} - \frac{y_{\dots}^2}{abn} \\SQ_B &= \sum_{j=1}^b \frac{y_{\dots j}^2}{an} - \frac{y_{\dots}^2}{abn} \\SQ_{AB} &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij\dots}^2}{n} - \frac{y_{\dots}^2}{abn} - SQ_A - SQ_B \\SQ_E &= SQ_T - SQ_{AB} - SQ_A - SQ_B\end{aligned}$$

Figura 7 – Fórmulas de cálculo para as somas quadráticas.

Fonte: Adaptado de Montgomery e Runger (2012)

Os resultados dos cálculos são geralmente mostrados em uma tabela de análise de variância, tal como na Tabela 3 (Montgomery, 2012).

Tabela 3 – ANOVA para um fatorial com dois fatores, modelos de efeitos fixos.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F_0
Tratamentos A	SQ_A	$a - 1$	$MQ_A = \frac{SQ_A}{a - 1}$	$\frac{MQ_A}{MQ_E}$
Tratamentos B	SQ_B	$b - 1$	$MQ_B = \frac{SQ_B}{b - 1}$	$\frac{MQ_B}{MQ_E}$
Interações	SQ_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	$MQ_{AB} = \frac{SQ_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$\frac{MQ_{AB}}{MQ_E}$
Erro	SQ_E	$ab(n - 1)$		
Total	SQ_T	$abn - 1$	$MQ_E = \frac{SQ_E}{ab(n - 1)}$	

Fonte: Adaptado de Montgomery e Runger (2012)

4.3 Verificação da adequação do modelo

A análise de variância (Montgomery, 2012) considera que as observações sejam provenientes de uma distribuição normal e sejam independentemente distribuídas, com a mesma variância para cada tratamento ou nível do fator. Essas suposições devem ser verificadas por meio do exame dos resíduos. Os resíduos de um planejamento fatorial desempenham um papel importante na verificação da adequação de um modelo. Os resíduos estimados de um fatorial com dois fatores são

$$y_{ijk} - \hat{y}_{ijk} = \bar{y}_{ij}$$

$$\hat{e}_{ijk} = y_{ijk} - \bar{y}_{ij}$$

ou seja, os resíduos são somente a diferença entre as observações e as médias das células correspondentes. A suposição de normalidade pode ser verificada pela construção de um gráfico de probabilidade normal dos resíduos e testes estatísticos para normalidade. Para verificar a suposição de igualdade de variâncias em cada nível do fator, plota-se os resíduos contra os níveis do fator para verificar o comportamento da variância dos resíduos com relação aos valores ajustados. Também é útil plotar os resíduos contra \bar{y}_i , $i = 1, 2, \dots, a$; a variabilidade nos resíduos não deve depender, de forma alguma, do valor de \bar{y}_i . Quando um padrão de comportamento aparece nesses gráficos, sugere-se a necessidade de uma transformação; isto é, analisar os dados sob uma métrica diferente. A suposição da independência pode ser verificada plotando-se os resíduos contra o tempo ou a ordem na qual o experimento foi realizado. Um

padrão de comportamento nesse gráfico, como sequência de resíduos positivos ou negativos, pode indicar que as observações não são independentes. Isso sugere que o tempo ou a ordem da corrida é importante ou que as variáveis que se alteram com o tempo são importantes e não foram incluídas no planejamento de experimentos. A seguir, destacam-se os gráficos mais utilizados:

- Gráfico de Probabilidade Normal dos resíduos;
- Resíduos versus preditos pelo modelo;
- Resíduos versus variáveis no modelo;
- Resíduos versus variáveis fora do modelo; e
- Resíduos versus ordem de coleta (se houver).

5.0 COMPARAÇÕES MÚLTIPLAS EM SEGUIDA À ANOVA

Quando na análise da variância (ANOVA) é rejeitada a hipótese nula $H_0: \mu_{11} = \dots = \mu_{ij}$, com $i=1, \dots, a$ e $j=1, \dots, b$, sabemos que algumas das médias dos tratamentos ou níveis dos fatores são diferentes. Para determinar a diferença entre os tratamentos são empregados os métodos de comparações múltiplas para avaliar a significância estatística das diferenças entre médias usando um conjunto de intervalos de confiança, um conjunto de testes de hipóteses ou ambos. Será apresentado a seguir o método de Tukey (Montgomery, 2012).

5.1 Teste de Tukey para comparação de médias

Tukey (1953) propôs um procedimento para testar hipóteses para as quais o nível de significância é exatamente α quando os tamanhos das amostras são iguais e no máximo α quando os tamanhos das amostras são diferentes. Seu procedimento também pode ser usado para construir intervalos de confiança sobre as diferenças em todos os pares de médias. Para esses intervalos, o nível de confiança para comparações simultâneas é de $100(1 - \alpha)\%$ quando os tamanhos das amostras são iguais e pelo menos $100(1 - \alpha)\%$ quando os tamanhos das amostras são diferentes. Em outras palavras, o procedimento de Tukey controla a taxa do erro experimental ou “família” no nível selecionado α . Este é um excelente procedimento de investigação dos dados quando o interesse se concentra em pares de médias. O procedimento de Tukey utiliza a amplitude da distribuição *studentizada*:

$$q = \frac{\bar{y}_{max} - \bar{y}_{min}}{\sqrt{MQ_E/n}}$$

onde \bar{y}_{max} e \bar{y}_{min} são as maiores e menores médias amostrais, respectivamente, de um grupo a de médias de amostra. No Anexo 2 - Tabela para o teste de Tukey. contém valores de $q_\alpha(a, f)$, os pontos percentuais de α superiores de q , em que f é o número de graus de liberdade associados ao MQ_E . Para tamanhos de amostras iguais, o teste de Tukey declara duas médias significativamente diferentes se o valor absoluto de suas diferenças amostrais exceder:

$$T_\alpha = q_\alpha(a, f) \sqrt{\frac{MQ_E}{n}}$$

Equivalentemente, poderíamos construir um conjunto de $100(1 - \alpha)\%$ de intervalos de confiança para todos os pares de médias da seguinte forma:

$$\bar{y}_i - \bar{y}_j - q_\alpha(a, f) \sqrt{\frac{MQ_E}{n}} \leq \bar{\mu}_i - \bar{\mu}_j \leq \bar{y}_i - \bar{y}_j + q_\alpha(a, f) \sqrt{\frac{MQ_E}{n}}, i \neq j.$$

Quando os tamanhos das amostras não são iguais, são utilizadas as Equações:

$$T_\alpha = \frac{q_\alpha(a, f)}{\sqrt{2}} \sqrt{MQ_E \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)}$$

e,

$$\bar{y}_i - \bar{y}_j - \frac{q_\alpha(a, f)}{\sqrt{2}} \sqrt{MQ_E \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)} \leq \bar{\mu}_i - \bar{\mu}_j \leq \bar{y}_i - \bar{y}_j + \frac{q_\alpha(a, f)}{\sqrt{2}} \sqrt{MQ_E \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)}, i \neq j.$$

A versão desigual do tamanho da amostra é chamada de procedimento de Tukey-Kramer. Ao usar qualquer procedimento para o teste par a par de médias, ocasionalmente encontra-se um valor de teste F global da ANOVA significativo, mas a comparação paritária de médias não revela diferenças significativas. Essa situação ocorre porque o teste F está considerando simultaneamente todos os possíveis contrastes envolvendo as médias dos tratamentos, e não apenas comparações entre pares. Assim, nos dados em questão, os contrastes significativos podem não ser da forma $\mu_i - \mu_j$. A derivação do intervalo de confiança de Tukey da Equação,

$$\bar{y}_i - \bar{y}_j - q_\alpha(a, f) \sqrt{\frac{MQ_E}{n}} \leq \bar{\mu}_i - \bar{\mu}_j \leq \bar{y}_i - \bar{y}_j + q_\alpha(a, f) \sqrt{\frac{MQ_E}{n}}, i \neq j.$$

para tamanhos iguais de amostra é direta. Para a estatística *amplitude studentizada* q , temos:

$$p \left(\frac{\max(\bar{y}_i - \mu_i) - \min(\bar{y}_i - \mu_i)}{\sqrt{MQ_E/n}} \leq q_\alpha(a, f) \right) = 1 - \alpha$$

Se $\max(\bar{y}_i - \mu_i) - \min(\bar{y}_i - \mu_i)$ for menor ou igual a $q_\alpha(a, f)\sqrt{MQ_E/n}$, deve ser verdade

que $|(\bar{y}_i - \mu_i) - (\bar{y}_j - \mu_j)| \leq q_\alpha(a, f)\sqrt{MQ_E/n}$ para cada par de médias. Assim sendo

$$p \left(-q_\alpha(a, f)\sqrt{MQ_E/n} \leq \bar{y}_i - \bar{y}_j - (\mu_i - \mu_j) \leq q_\alpha(a, f)\sqrt{MQ_E/n} \right) = 1 - \alpha$$

Reorganizando esta expressão para isolar $\mu_i - \mu_j$ entre as desigualdades, levará ao conjunto de $100(1 - \alpha)\%$ dos intervalos de confiança simultâneos apresentados na equação:

$$\bar{y}_i - \bar{y}_j - \frac{q_\alpha(a, f)}{\sqrt{2}} \sqrt{MQ_E \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)} \leq \bar{\mu}_i - \bar{\mu}_j \leq \bar{y}_i - \bar{y}_j + \frac{q_\alpha(a, f)}{\sqrt{2}} \sqrt{MQ_E \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)}, i \neq j.$$

em que:

- α = Nível de significância
- a = Número de médias
- f = Graus de liberdade do erro
- n = Número de réplicas

6.0 PLANEJAMENTO E ANÁLISE DO EXPERIMENTO

Todo o experimento foi executado em apenas um disco pelotizador, alterando as variáveis % RPM (fator A) e Taxa de Alimentação (t/h) (fator B), mantendo todas as outras variáveis fixas, mantendo-se fixos os percentuais de aditivos e de adição de água. Após o processo entrar em regime, as pelotas verdes, amostradas na descarga dos discos, foram secadas em laboratório com ambiente controlado a 150°C durante 4 horas, evitando assim o efeito da variabilidade do forno secador de pelotas. Todos os testes seguiram o mesmo protocolo para garantir, ao máximo, a condição de produção e secagem constante. Todas as medições de resistência à compressão foram realizadas no mesmo equipamento e nas mesmas condições.

6.1 Coleta dos dados (amostragem)

Para avaliar o impacto das variáveis de processo, velocidade do disco e taxa de alimentação, na qualidade das pelotas verdes, foram realizados testes, em ordem aleatória (Tabela 4), modificando os níveis de velocidade dos discos (fator A) em 40, 50 e 60 %RPM e da taxa de alimentação (fator B) em 9, 10, 11 e 12 t/h.

Tabela 4 – Aleatorização da ordem do experimento (Minitab).

OrdemPad	OrdemEns	RPM (%)	tph
2	1	40	10
7	2	50	11
12	3	60	12
8	4	50	12
4	5	40	12
5	6	50	9
10	7	60	10
9	8	60	9
1	9	40	9
11	10	60	11
6	11	50	10
3	12	40	11

Para cada ponto de operação, 30 pelotas verdes foram amostradas na descarga do disco e secadas em estufa a 150°C (Figura 8) por 4 horas, evitando assim o efeito do forno secador de pelotas e as oscilações naturais desse processo.



Figura 8 – Estufa (150 °C)

Após 30 minutos de resfriamento, foram medidas as resistências à compressão das pelotas secas. Os testes de compressão foram realizados utilizando o aparato Kratos (Figura 9) que possui precisão de 0,01 *kgf*. Os resultados serão apresentados com a seguinte nomenclatura: os dois primeiros dígitos representam a velocidade percentual do disco (*% RPM*) e os dois últimos a taxa de alimentação (*t/h*) (e.g.: 40% *RPM* e 09 *t/h* = 4009).

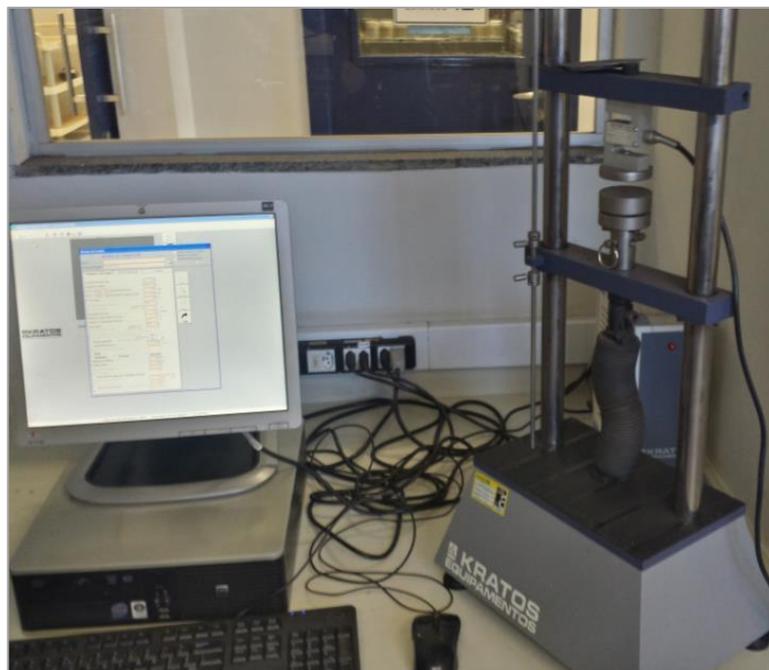


Figura 9 - Aparato Kratos – Teste de compressão

6.2 Análise Descritiva dos Dados Observados

No Gráfico 1, Boxplot das resistências das pelotas agrupadas pela velocidade do disco e pela taxa de alimentação, podem ser observados os seguintes comportamentos:

Em **40 %RPM** a resistência média das pelotas tende a aumentar de 9 a 11 *t/h* com tendência de decaimento após 11 *t/h*, isso se explica pelo fato de que em maiores rotações há a redução do tempo de residência no disco enquanto que o aumento da velocidade de rotação aumenta o tempo de residência.

Em **50 %RPM** ocorreu o aumento gradual da resistência média das pelotas, há a expectativa que se houvesse como aumentar ainda mais a taxa de alimentação o comportamento seria semelhante ao observado com a rotação em 50%*RPM*, ou seja, em algum ponto ocorreria o

decaimento da resistência. Na condição 50 %RPM e 12 t/h observou-se um comportamento atípico da variabilidade.

Em **60 %RPM** observou-se que houve um incremento mais acentuado da resistência das pelotas em função do aumento da taxa de alimentação. Quando comparado com as outras velocidades dos discos, espera-se que a resistência das pelotas atinja um ponto de máximo e volte a decair.

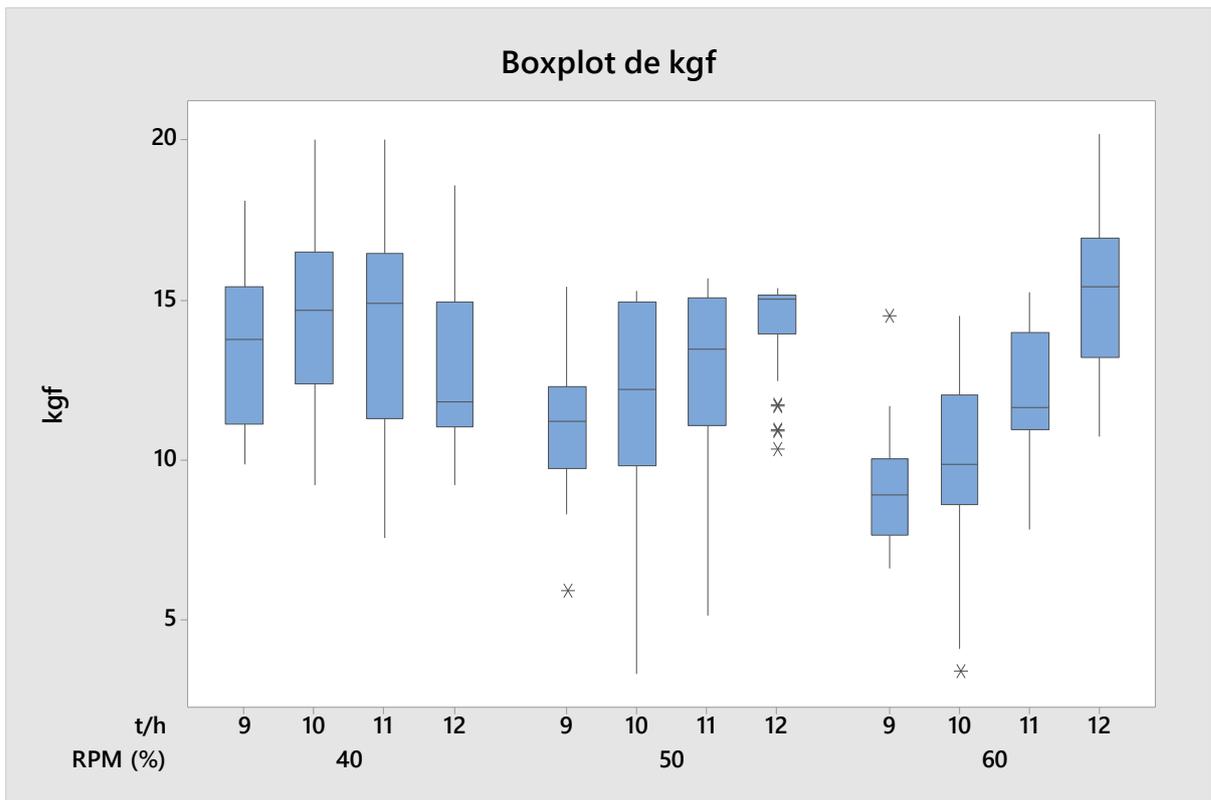


Gráfico 1 - Boxplot da resistência das pelotas em função do %RPM e taxa de alimentação dos discos pelletizadores.

Nota: Saída do software Minitab.

Na Figura 10, 40 %RPM e 9, 10, 11 e 12 t/h, os resultados das resistências observadas, testando as hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: \text{Os dados seguem uma distribuição normal} \\ H_1: \text{Os dados não seguem uma distribuição normal.} \end{cases}$$

Nas taxas de alimentação 9, 10 e 11 t/h o p-valor $> \alpha = 5\%$, assim para não se rejeita a hipótese nula de que os valores observados em cada um desses testes seguem uma distribuição normal. Por outro lado, o teste em 40 %RPM e 12 t/h, o p-valor $< \alpha = 5\%$, rejeita-se a hipótese nula em favor da hipótese alternativa de que os dados não seguem uma distribuição normal.

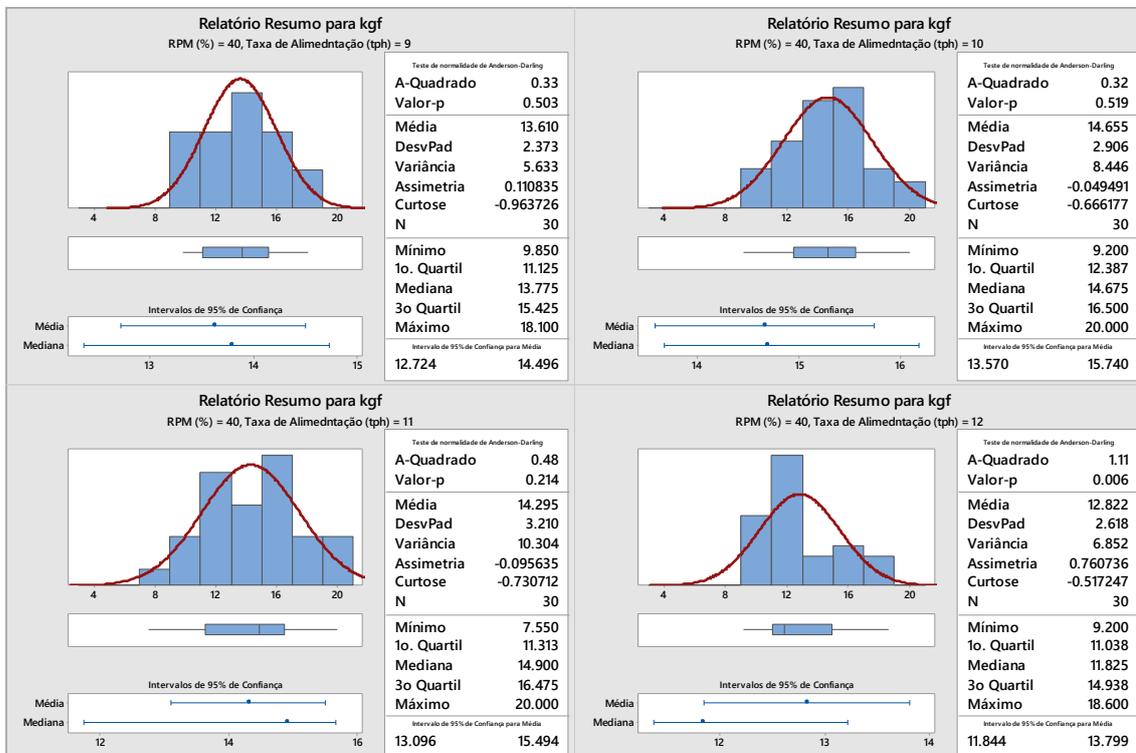


Figura 10 – Gráfico resumo para 40 %RPM e 9, 10, 11 e 12 t/h.

Nota: Saída do software Minitab.

Na Figura 11 , 50 %RPM e 9, 10, 11 e 12 t/h, os resultados das resistências observadas, testando as hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: \text{Os dados seguem uma distribuição normal} \\ H_1: \text{Os dados não seguem uma distribuição normal.} \end{cases}$$

Nas taxas de alimentação 9 e 10 t/h o p-valor $> \alpha = 5\%$, assim para não se rejeita a hipótese nula de que os valores observados em cada um desses testes seguem uma distribuição normal. Por outro lado, o teste em 50 %RPM 11 e 12 t/h, o p-valor $< \alpha = 5\%$, rejeita-se a hipótese nula em favor da hipótese alternativa de que os dados não seguem uma distribuição normal.

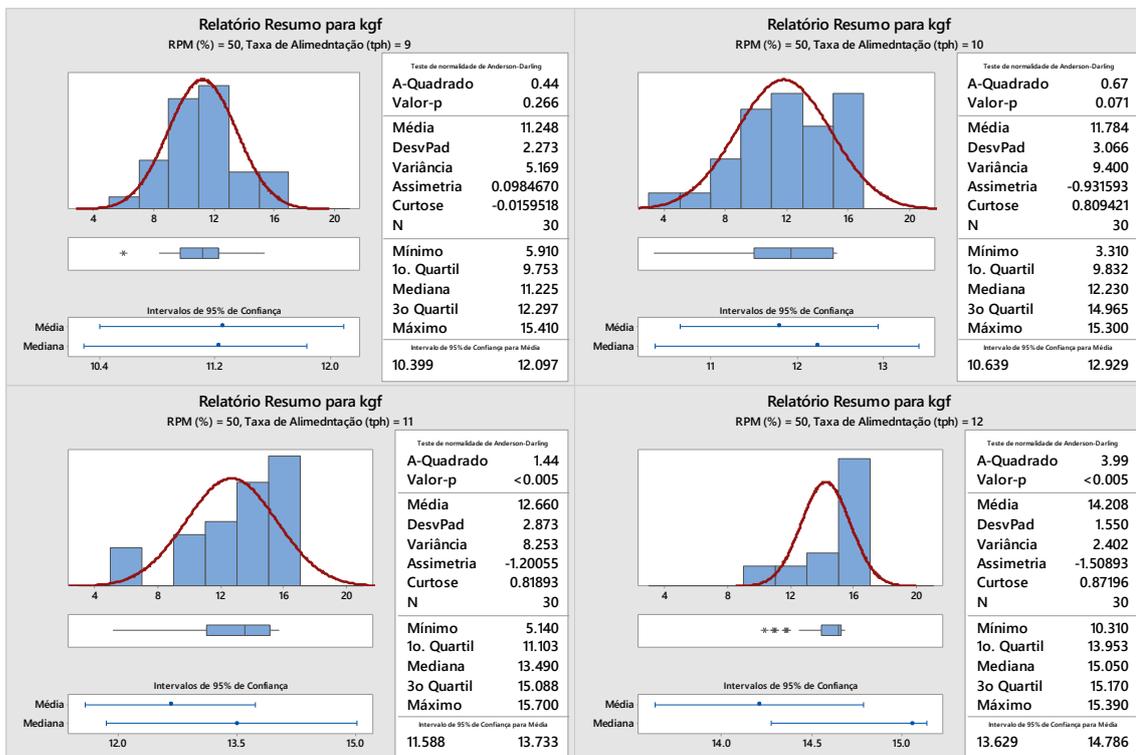


Figura 11 – Gráfico resumo para 50 %RPM e 9, 10, 11 e 12 t/h.

Nota: Saída do software Minitab.

Na Figura 12, 60 %RPM e 9, 10, 11 e 12 t/h, os resultados das resistências observadas, testando as hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: \text{Os dados seguem uma distribuição normal} \\ H_1: \text{Os dados não seguem uma distribuição normal.} \end{cases}$$

Nas taxas de alimentação 9, 10, 11 e 12 t/h o p-valor $> \alpha = 5\%$, assim para não se rejeita a hipótese nula de que os valores observados em cada um desses testes seguem uma distribuição normal.

Nos resumos acima, observa-se, principalmente na rotação de 50 %RPM, que há a tendência de ocorrer um deslocamento à esquerda das resistências à compressão quando ocorre o incremento da taxa de alimentação.

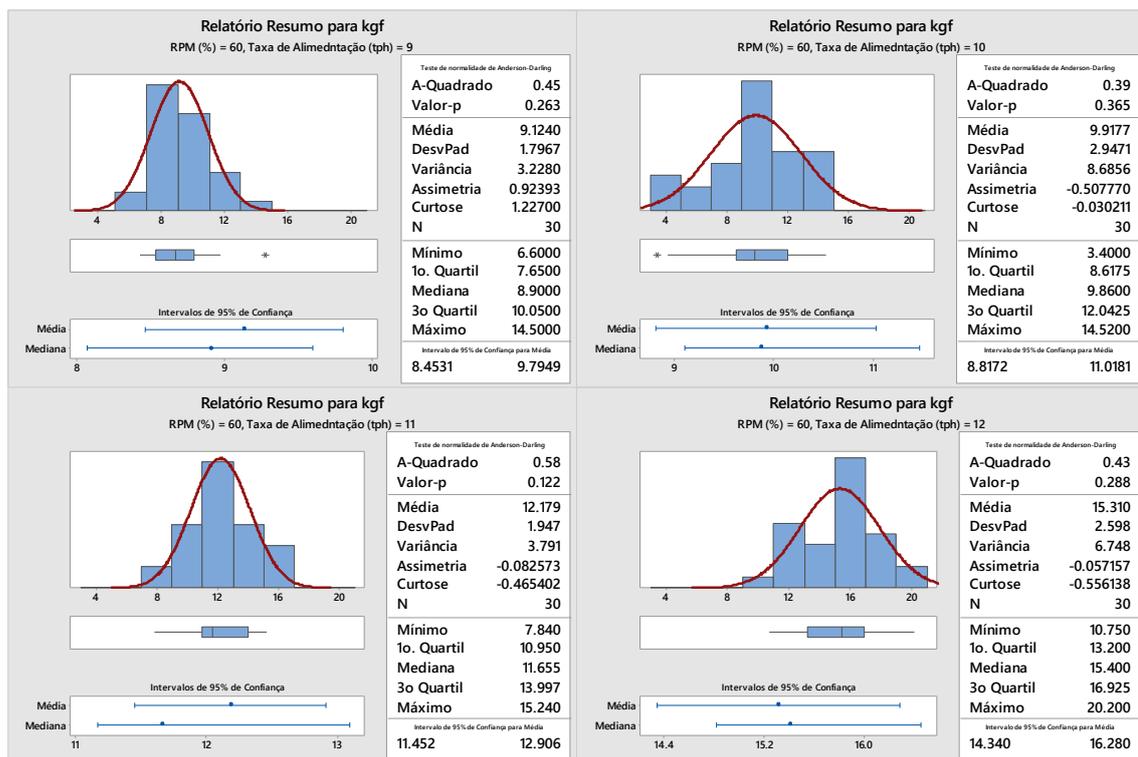


Figura 12 – Gráfico resumo para 60 %RPM e 9, 10, 11 e 12 t/h.

Nota: Saída do software Minitab.

6.3 Análise de Variância (ANOVA)

Analisando a Tabela 5 - Saída do Minitab - análise de variância (ANOVA). verifica-se que os valores da estatística F são relativamente altos para os fatores A, B e a interação entre eles. Abaixo, os testes de hipóteses para os fatores %RPM (*Fator A*), taxa de alimentação (t/h) (*Fator B*) e a interação entre eles

$$\textbf{Fator A:} \quad \begin{cases} H_0: \tau_1 = \tau_2 \dots \tau_a = 0 \\ H_1: \text{ao menos um } \tau_i \neq 0 \end{cases}$$

Para o fator A, o p-valor $\approx 0 < \alpha = 0,05$. Logo, rejeita-se a hipótese nula (H_0) em favor da hipótese alternativa (H_1) de ao menos um τ_i seja diferente de 0, ao nível de significância de 5%.

$$\textbf{Fator B:} \quad \begin{cases} H_0: \beta_1 = \beta_2 \dots \beta_b = 0 \\ H_1: \text{ao menos um } \beta_i \neq 0 \end{cases}$$

Para o fator B, o p-valor $\approx 0 < \alpha = 0,05$. Logo, rejeita-se a hipótese nula (H_0) em favor da hipótese alternativa (H_1) de ao menos um β_j seja diferente de 0, ao nível de significância de 5%.

$$\textbf{Interação AB:} \quad \begin{cases} H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0; \text{ para todo } i, j \\ H_1: \text{ao menos um } (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \end{cases}$$

Para a interação entre os fatores A e B, o p-valor $\approx 0 < \alpha = 0,05$. Logo, rejeita-se a hipótese nula (H_0) em favor da hipótese alternativa (H_1) de ao menos uma interação $(\tau\beta)_{ij}$ seja diferente de 0, ao nível de significância de 5%.

Tabela 5 - Saída do Minitab - análise de variância (ANOVA).

Informações dos Fatores						
Fator	Níveis	Valores				
RPM (%)	3	40, 50, 60				
Taxa de Alimentação (tph)	4	9, 10, 11, 12				

Análise de Variância						
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	
Modelo	11	1200.4	109.131	16.60	0.000	
Linear	5	688.9	137.774	20.95	0.000	
RPM (%)	2	299.3	149.667	22.76	0.000	
Taxa de Alimentação (tph)	3	389.5	129.845	19.75	0.000	
Interações de 2 fatores	6	511.6	85.262	12.97	0.000	
RPM (%)*Taxa de Alimentação (tph)	6	511.6	85.262	12.97	0.000	
Erro	348	2288.4	6.576			
Total	359	3488.9				

Sumário do Modelo			
S	R2	R2(aj)	R2(pred)
2.56436	34.41%	32.33%	29.81%

Nota: Saída do software Minitab.

Assim, ao nível de significância de 5% rejeita-se a hipótese de igualdade das médias entre os **a** níveis do fator A, entre os **b** níveis do fator B e entre os **(ab)** níveis das interações, pois todos os p-valores correspondentes são próximos de zero ($< 0,05$).

6.4 Verificação do Modelo

Análise dos resíduos:

- O Gráfico de probabilidade normal (Gráfico 2): Como $p\text{-valor} = 0,264 > \alpha = 0,05$ não se rejeita a hipótese nula de que os resíduos seguem uma distribuição normal.

$$\begin{cases} H_0: \text{Os dados seguem uma distribuição normal} \\ H_1: \text{Os dados não seguem uma distribuição normal.} \end{cases}$$

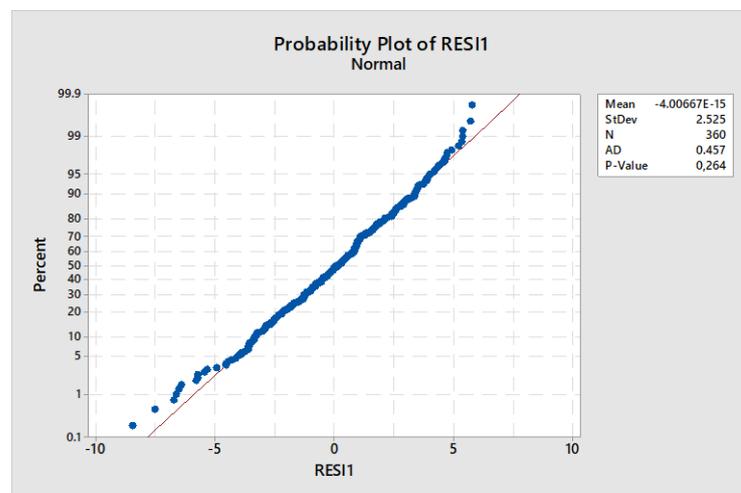


Gráfico 2 – Gráfico de Probabilidade Normal dos Resíduos – Teste de Normalidade de Anderson-Darling.

Nota: Saída do software Minitab.

- Histograma dos resíduos(Gráfico 3): O histograma sugere a normalidade dos resíduos e apresenta boa simetria e segue uma distribuição normal.

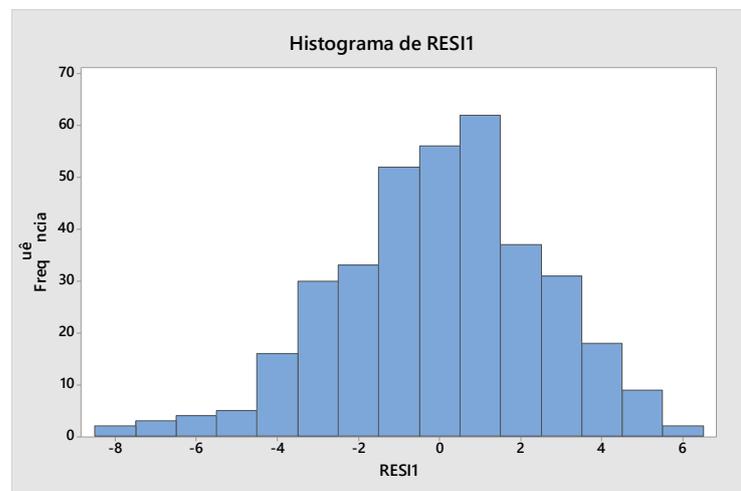


Gráfico 3 - Histograma dos resíduos

Nota: Saída do software Minitab.

- Resíduos versus Valores Ajustados (Gráfico 4): Não se verificam tendências nos valores observados.

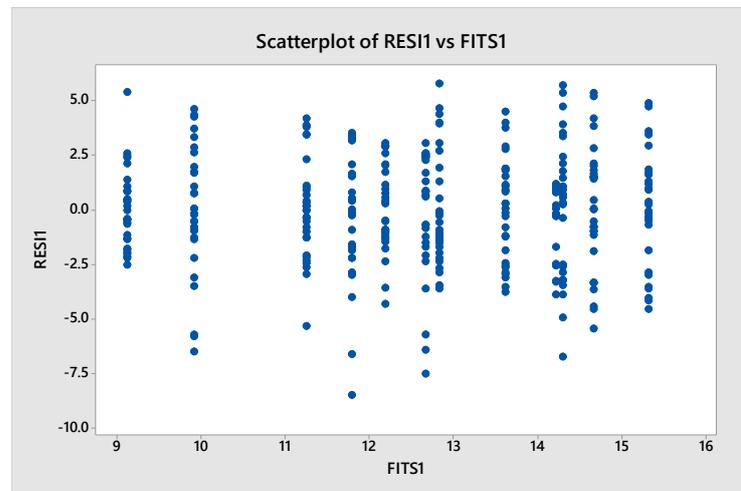


Gráfico 4 - Gráfico de dispersão dos Resíduos versus Valores Ajustados (Preditos)

Nota: Saída do software Minitab.

- Resíduos versus ordem de coleta (Gráfico 5): Observando os resíduos em função da ordem de coleta não se observa nenhuma tendência ou periodicidade, notam-se algumas sequências, mas nada tão evidente que possa comprometer o trabalho.

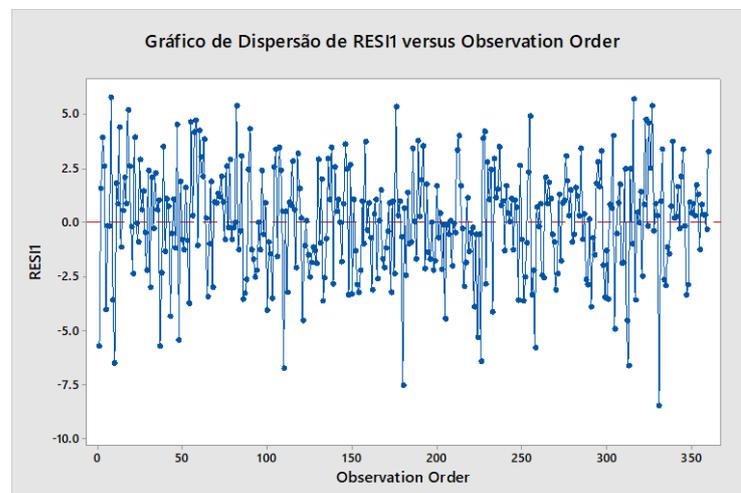


Gráfico 5 - Resíduos versus ordem de coleta.

Nota: Saída do software Minitab.

Após avaliar a suposição de normalidade dos erros por meio do gráfico de probabilidade normal e testes de normalidade; avaliar a suposição de variância constante por meio dos gráficos de dispersão dos resíduos contra as variáveis explicativas no modelo e dos resíduos contra os preditos pelo modelo; avaliar o ajuste do modelo por meio do gráfico de dispersão dos resíduos contra os preditos; observa-se que não houve em nenhum dos gráficos de dispersão dos resíduos

um padrão diferente de um padrão de distribuição aleatória em torno do valor 0, isto é um indício de que não há problema nas suposições avaliadas.

7.0 COMPARAÇÕES MÚLTIPLAS

Após a interpretação da ANOVA, pela qual pode-se verificar que o fator A, o fator B e a interação entre eles possui efeito significativo sobre a resistência das pelotas. No Gráfico 6, para o experimento fatorial com interação, pode-se verificar que há indícios que a melhor condição de operação é a 6012 com resistência média de 15,31 kgf, em seguida as condições 4010, 4011 e 5012, com resistências médias de 14,66 kgf, 14,29 kgf e 14,20 kgf, respectivamente. Contudo, a condição de operação em 4010 é um ponto de maior equilíbrio na qual oscilações na alimentação do disco causam pequenas variações na resistência das pelotas.

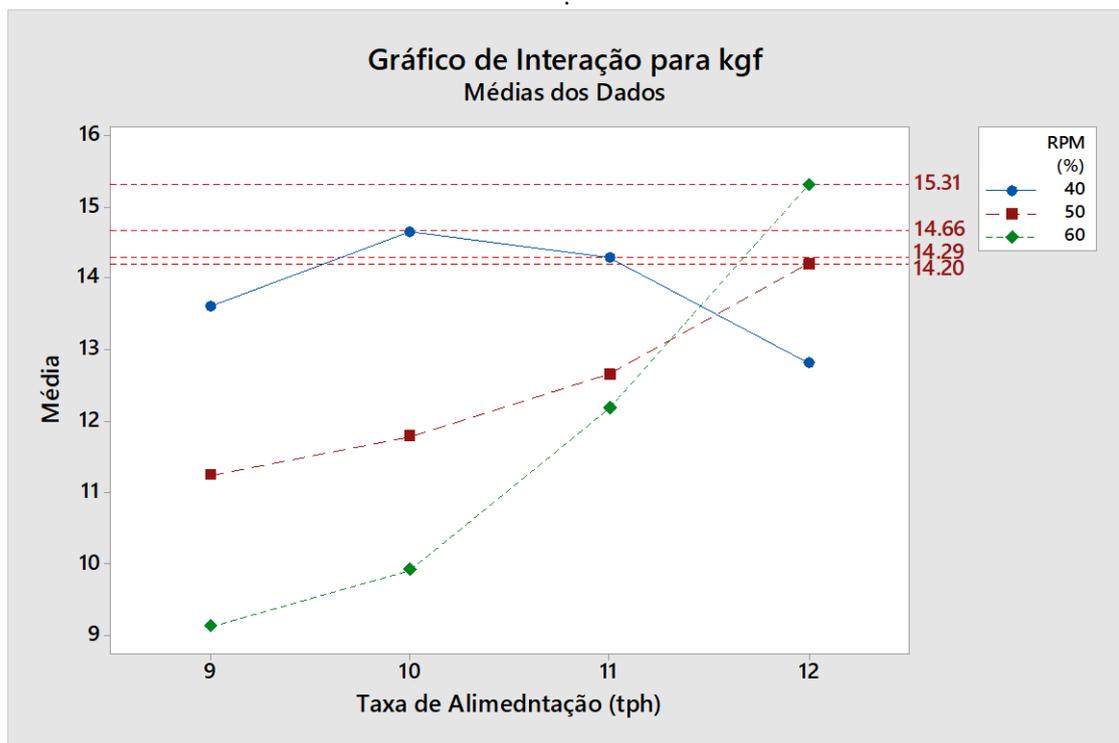


Gráfico 6 – Gráfico das Interações

Nota: Saída do software Minitab.

Observa-se no Gráfico 7, uma superfície de resposta que combina as linhas observadas no Gráfico 6, que há um comportamento anômalo entre as rotações de 40 %RPM e 60%RPM, sugerindo que a condição de operação 50 %RPM está na região na qual ocorre a interação entre

a torração e a taxa de alimentação de forma tal que não apresenta bons resultados e não deve ser utilizada. Esse fato não é intuitivo e deve-se, provavelmente, à interação entre os fatores.

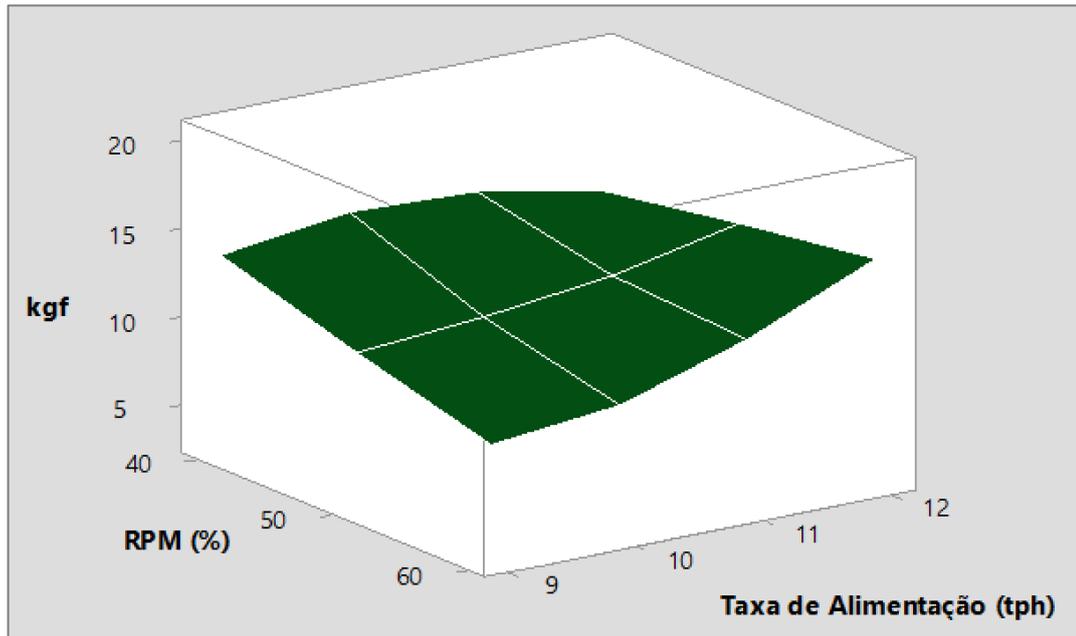


Gráfico 7 - Gráfico de Superfície de kgf versus RPM (%), Taxa de Alimentação (tph)

7.1 Teste de Tukey Para Comparações Múltiplas

Através da comparação de Tukey (Tabela 6), foram classificados os melhores pontos de operação e os as médias observadas nesses pontos de operação que não compartilham ao menos uma letra são significativamente diferentes, nos quais melhores condições pertencem ao agrupamento A e a resistência das pelotas vai decaindo para as piores condições de operação no agrupamento J, ver . Na comparação de Tukey as melhores condições de operação são: ponto A: 6012, ponto B: 4010, agrupamento C: 4011, 1250.

Tabela 6 – Comparação pareada de Tukey: taxa de alimentação (t/h) * RPM (%)

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 95%

Taxa de Alimentação (tph)*RPM (%)	N	Média	Agrupamento
12 60	30	15.3100	A
10 40	30	14.6550	A B
11 40	30	14.2950	A B C
12 50	30	14.2077	A B C
9 40	30	13.6100	A B C D
12 40	30	12.8217	B C D E
11 50	30	12.6603	B C D E
11 60	30	12.1793	C D E
10 50	30	11.7840	D E F
9 50	30	11.2480	E F G
10 60	30	9.9177	F G
9 60	30	9.1240	G

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Nota: Saída do software Minitab.

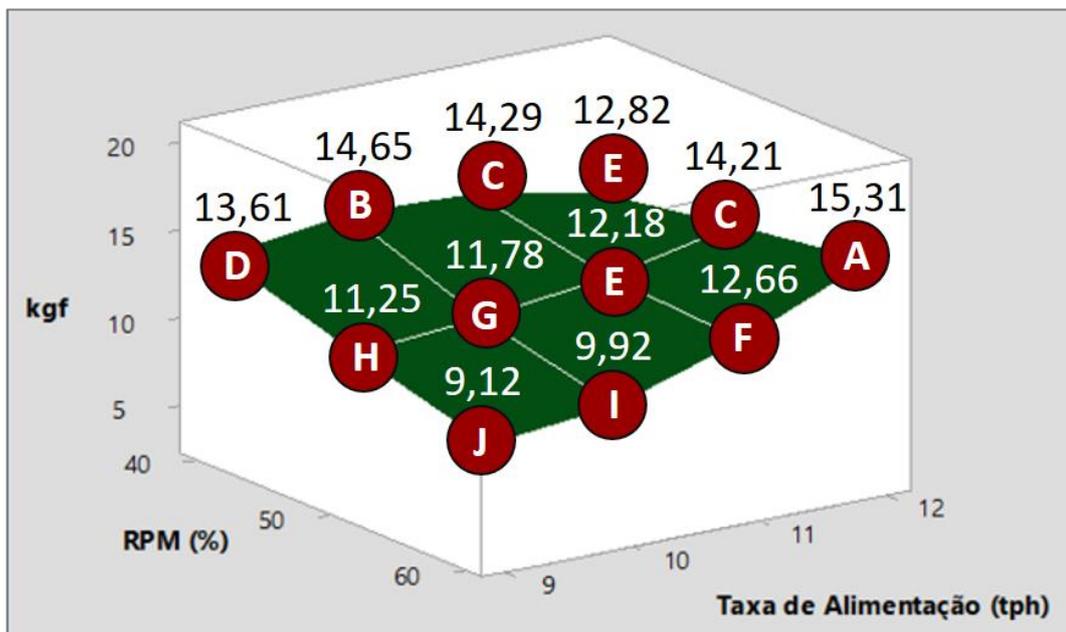


Figura 13 – Agrupamento usando o Método de Tukey e Confiança de 95%

No gráfico de intervalo de confiança de 95% de Tukey (Gráfico 8) a seguir, os intervalos de confiança que não incluem o zero indicam os pares que possuem diferenças significativas.

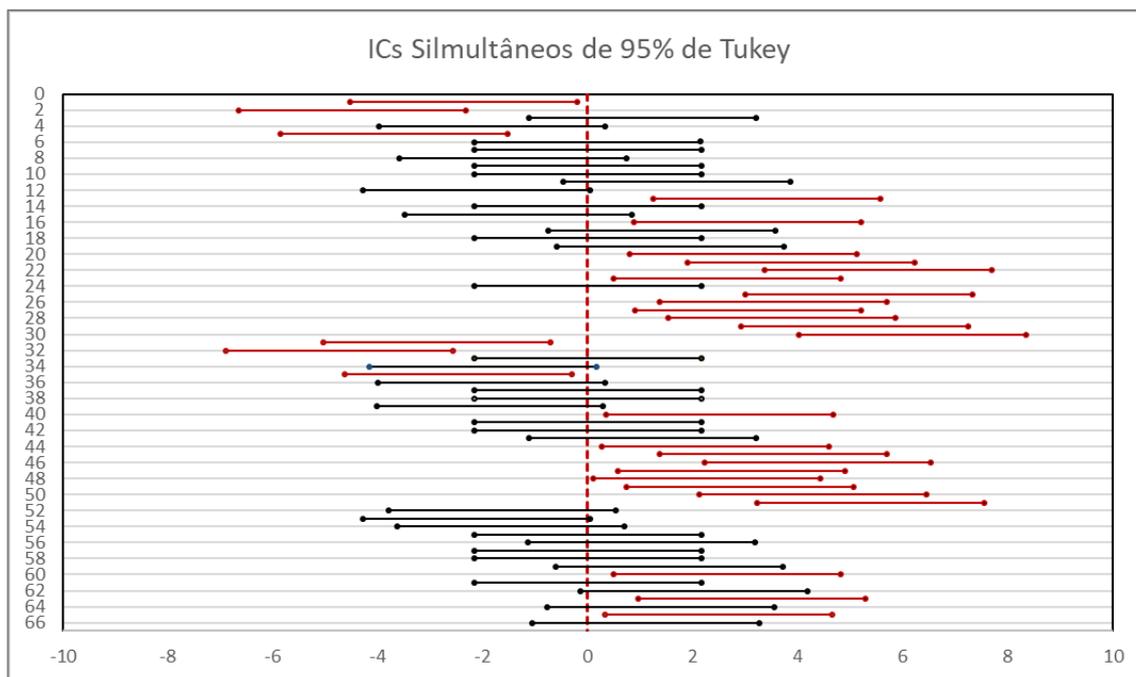


Gráfico 8 - Intervalos de confiança (ICs) de Tukey com nível de confiança de 95%.

A Tabela 7, apresenta a sequência das comparações apresentadas no Gráfico 8 - Intervalos de confiança (ICs) de Tukey com nível de confiança de 95%.

Tabela 7 – Sequência das comparações para os intervalos de confiança (ICs) de Tukey com nível de confiança de 95%.

ICs de Tukey					
1	(9 50) - (9 40)	23	(10 50) - (9 60)	45	(12 60) - (10 50)
2	(9 60) - (9 40)	24	(10 60) - (9 60)	46	(11 40) - (10 60)
3	(10 40) - (9 40)	25	(11 40) - (9 60)	47	(11 50) - (10 60)
4	(10 50) - (9 40)	26	(11 50) - (9 60)	48	(11 60) - (10 60)
5	(10 60) - (9 40)	27	(11 60) - (9 60)	49	(12 40) - (10 60)
6	(11 40) - (9 40)	28	(12 40) - (9 60)	50	(12 50) - (10 60)
7	(11 50) - (9 40)	29	(12 50) - (9 60)	51	(12 60) - (10 60)
8	(11 60) - (9 40)	30	(12 60) - (9 60)	52	(11 50) - (11 40)
9	(12 40) - (9 40)	31	(10 50) - (10 40)	53	(11 60) - (11 40)
10	(12 50) - (9 40)	32	(10 60) - (10 40)	54	(12 40) - (11 40)
11	(12 60) - (9 40)	33	(11 40) - (10 40)	55	(12 50) - (11 40)
12	(9 60) - (9 50)	34	(11 50) - (10 40)	56	(12 60) - (11 40)
13	(10 40) - (9 50)	35	(11 60) - (10 40)	57	(11 60) - (11 50)
14	(10 50) - (9 50)	36	(12 40) - (10 40)	58	(12 40) - (11 50)
15	(10 60) - (9 50)	37	(12 50) - (10 40)	59	(12 50) - (11 50)
16	(11 40) - (9 50)	38	(12 60) - (10 40)	60	(12 60) - (11 50)
17	(11 50) - (9 50)	39	(10 60) - (10 50)	61	(12 40) - (11 60)
18	(11 60) - (9 50)	40	(11 40) - (10 50)	62	(12 50) - (11 60)
19	(12 40) - (9 50)	41	(11 50) - (10 50)	63	(12 60) - (11 60)
20	(12 50) - (9 50)	42	(11 60) - (10 50)	64	(12 50) - (12 40)
21	(12 60) - (9 50)	43	(12 40) - (10 50)	65	(12 60) - (12 40)
22	(10 40) - (9 60)	44	(12 50) - (10 50)	66	(12 60) - (12 50)

8.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o trabalho de otimização da planta de pelotização, através das técnicas de planejamento e análise de experimentos, determinou-se o ponto ótimo de operação, 60% RPM e 12 t/h, pois nessa condição as pelotas verdes produzidas apresentaram a melhor resistência. Contudo, a variável %RPM depende da diferença de potencial e da amperagem aplicada aos motores elétricos e como são constantes garantem grande estabilidade na rotação dos discos. Por outro lado, a taxa de alimentação pode sofrer grandes variações em função de entupimentos, qualidade dos materiais de revestimento dos silos, etc. Com isso a redução de uma tonelada na taxa de alimentação do disco faz com que a resistência mecânica passe de 15,31 para 12,66 kgf que é o quinto melhor ponto de operação, isso pode ser verificado na **Figura 14** a seguir.

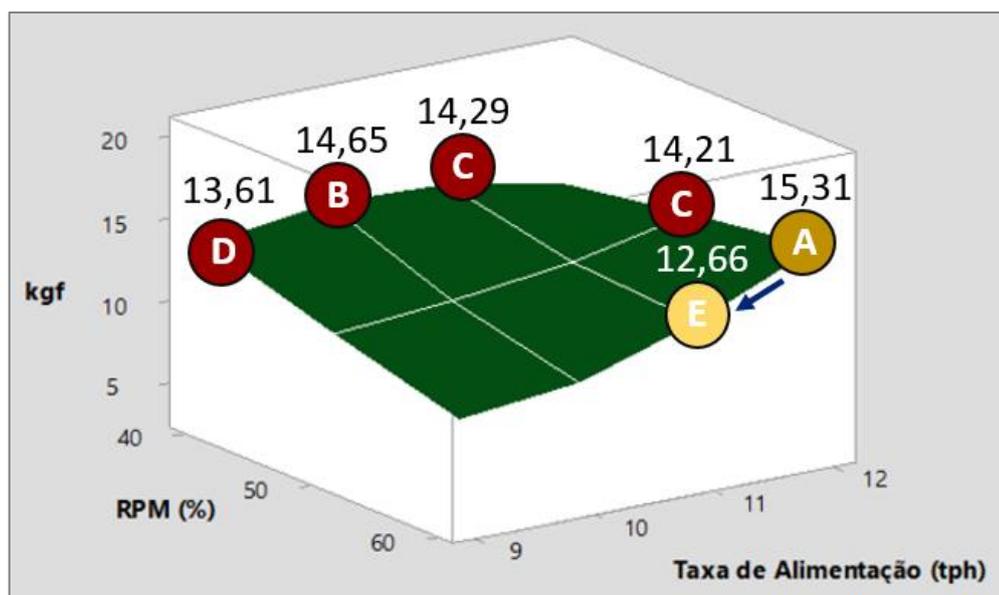


Figura 14 – Maior média observada de resistência mecânica das pelotas.

Então, a condição de operação recomendada foi com 40% RPM e 10 t/h na qual a resistência média da pelota é de 14,65 kgf. Nessa condição as pelotas verdes são produzidas com boa resistência mecânica e em uma região de operação onde oscilações da taxa de alimentação não causam grandes impactos na resistência média das pelotas reduzindo a variabilidade do processo. Pode-se verificar na Figura 15 que caso a taxa de alimentação oscile em uma tonelada, para mais ou para menos, a resistência média passa de 16,65 para 14,29 ou 13,62kgf, respectivamente.

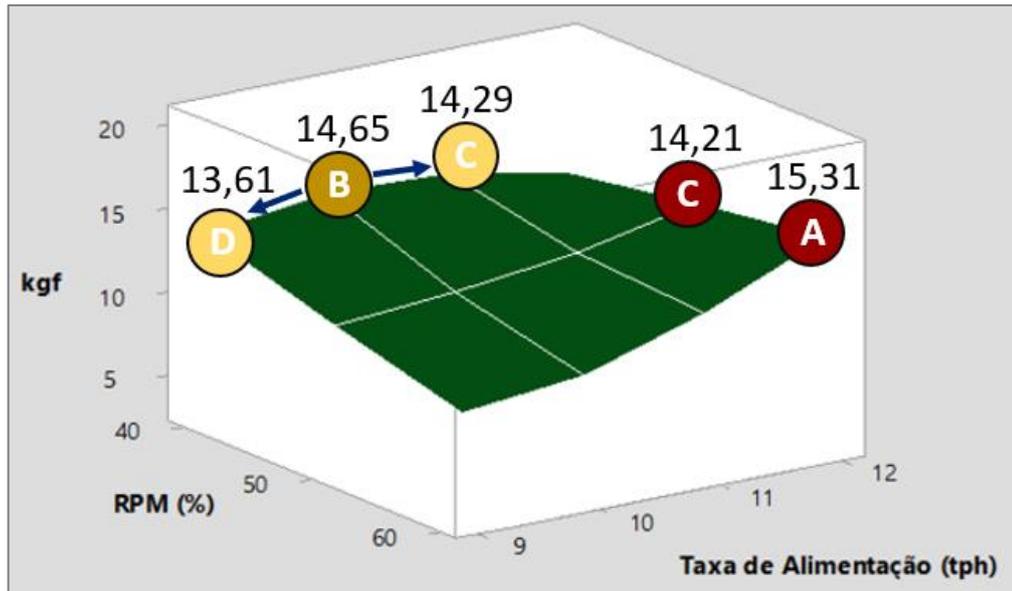


Figura 15 – Ponto de operação recomendado.

As melhores condições de operação foram replicadas para todos os quatro discos pelotizadores. No Gráfico 9, observa-se a resistência das pelotas nas análises de rotina da operação onde verifica-se a redução da variabilidade e o aumento da resistência média das pelotas após o início dos trabalhos de intervenção na linha de operação da usina.

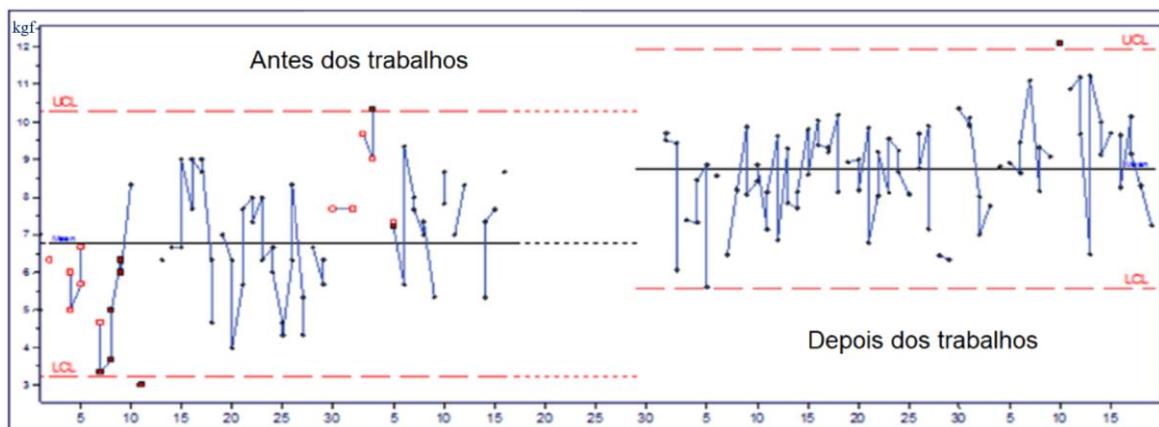


Gráfico 9 – Resistência das Pelotas antes e depois dos trabalhos da intervenção (análises de rotina da operação).

O aumento da resistência mecânica das pelotas propiciou uma melhor característica física do produto calcinado, aumento da produção de ferroníquel e a redução da carga circulante de pó. No Gráfico 10, abaixo, através de dados oficiais publicados, pode-se verificar a redução e estabilização da carga circulante de pó após o início dos trabalhos de otimização do processo em maio.

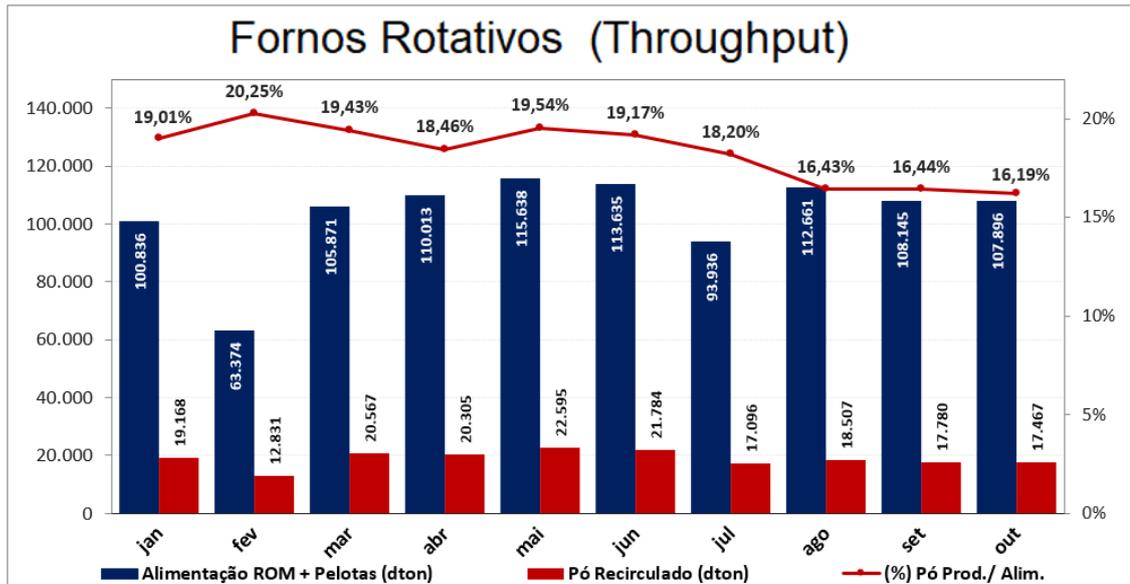


Gráfico 10 – Gráfico da Alimentação dos Fornos Rotativos (ROM + Pelotas + Pó Recirculado) o percentual de pó recirculado em função da alimentação.

A redução da recirculação de pó manteve-se constante durante três meses de monitoramento. A redução da taxa média da recirculação de pó foi estimada em aproximadamente 3% (Gráfico 11).

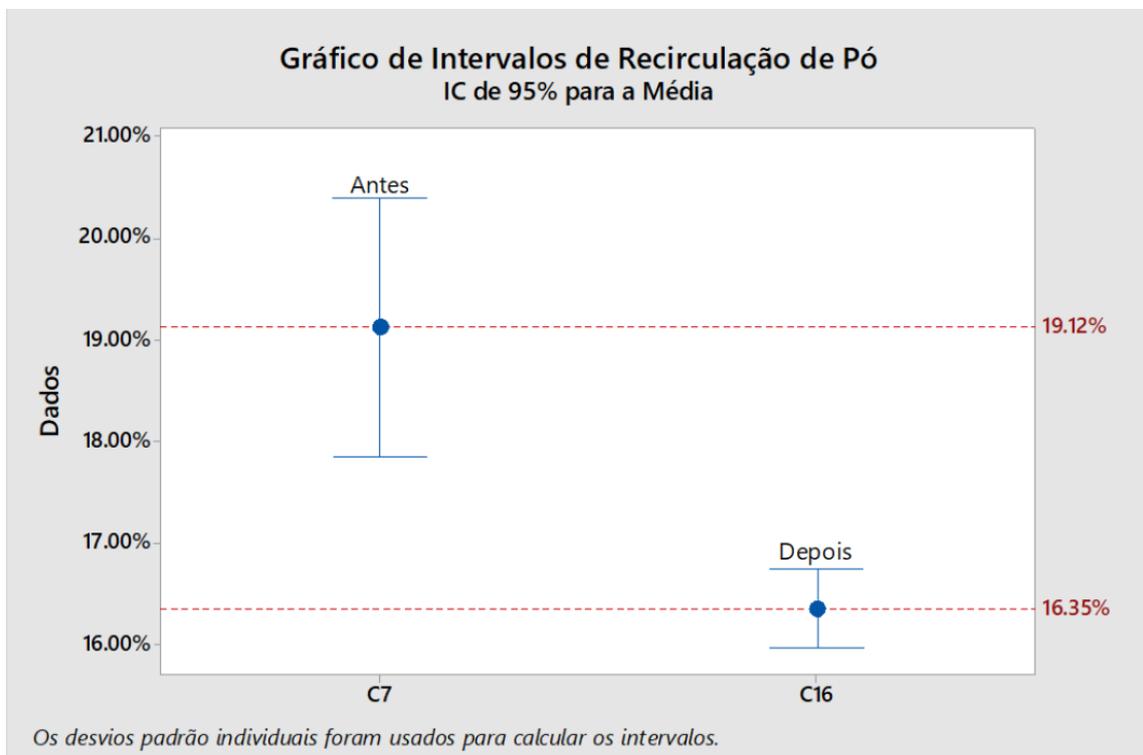


Gráfico 11 – Gráfico dos Intervalos de Confiança Antes e Depois da Otimização dos Discos.

Nota: Saída do software Minitab.

A partir da estimativa de redução da recirculação do pó foram calculados os ganhos com base nos consumos específicos e valores base 2017. A Tabela 8 apresenta os ganhos: **1,3** milhões de Reais/ano; redução de **3,2** mil m³ de água/ano; **11,7** mil GJ/ano e redução de **1,5** mil toneladas de CO_{2eq}/ano.

Tabela 8 – Ganhos com a redução da recirculação de pó (Base Anual).

Taxa de sobrevivência		1%	2%	3%
Ganhos para 1%		Valores em Reais		
Bentonita	136 t/ano	46.318,23	92.636,46	138.954,69
Amido	32 t/ano	37.963,46	75.926,91	113.890,37
GLP	69 t/ano	164.411,12	328.822,24	493.233,36
Substituição Pelota/ROM	38 t Ni/ano	165.921,08	331.842,16	497.763,23
Calor contido nas pelotas	625 GJ/ano	27.696,39	55.392,77	83.089,16
TOTALS				
Reais		442.310,27	884.620,54	1.326.930,81
USD		121.848,56	243.697,12	365.545,68
Água (m ³)		1.077	2.154	3.231,60
Energia (GJ)		3.906	7.813	11.719,16
Footprint (t CO _{2eq})		507	1.015	1.522,33

Nos próximos trabalhos, recomenda-se investigar o comportamento da resistência das pelotas quando o disco opera em 50 %RPM, faixa de operação em que parece ocorrer o efeito da interação entre a taxa de alimentação e a rotação do disco. Variar as dosagens e investigar o comportamento da resistência das pelotas em taxas de alimentação e rotações superiores a 12 t/h e 60 %RPM.

9.0 ANEXOS

Anexo 1 – Resultados dos testes de compressão (kgf)

RESULTADOS DOS TESTE DE COMPRESSÃO (kgf)											
4009	4010	4011	4012	5009	5010	5011	5012	6009	6010	6011	6012
13,45	16,20	18,20	16,75	8,91	7,76	15,23	15,05	8,65	4,19	14,23	15,15
15,40	13,50	14,85	18,60	15,41	10,85	15,25	15,20	11,50	3,40	14,24	11,70
14,45	19,85	15,75	17,20	11,22	8,77	14,92	15,13	10,20	9,69	12,74	15,00
16,50	9,20	19,00	13,35	9,96	15,26	6,94	15,39	9,30	7,69	7,84	12,30
14,65	13,85	16,40	10,45	9,96	13,40	11,40	15,14	11,25	10,65	11,19	11,25
12,40	18,50	10,85	12,75	12,28	10,08	11,82	13,97	11,70	9,38	15,08	18,75
18,10	12,75	11,75	11,45	14,70	9,57	13,53	10,93	14,50	14,16	15,24	10,75
15,50	13,70	17,65	17,45	11,23	11,78	13,97	15,12	8,70	9,12	11,26	13,45
9,85	16,65	7,55	11,75	10,25	10,19	15,07	14,39	10,00	9,10	11,09	18,25
13,90	11,00	11,05	15,85	10,88	12,29	15,05	11,65	9,60	8,64	15,08	12,45
15,50	13,90	15,35	12,55	9,13	12,57	15,20	10,89	6,60	14,24	14,74	18,90
10,05	11,30	11,05	10,15	8,78	14,94	15,05	15,16	7,95	6,40	10,86	16,20
15,15	14,70	15,35	12,25	15,02	12,28	13,24	15,11	7,80	12,75	10,98	15,55
17,35	16,15	11,70	11,35	9,08	8,91	10,57	15,17	7,30	9,98	13,14	15,20
10,65	20,00	13,90	11,30	5,91	12,18	13,50	14,24	8,45	10,97	12,47	15,25
11,75	13,65	11,05	15,50	15,12	15,19	15,14	12,49	10,50	6,80	11,25	17,00
14,75	14,65	14,95	10,60	12,35	15,30	11,95	13,90	7,00	11,88	13,92	11,15
10,75	10,20	16,70	11,10	13,57	11,65	10,30	10,31	7,75	9,98	12,58	16,30
13,65	14,10	17,80	16,80	10,70	15,13	5,14	15,25	6,90	8,55	11,63	20,20
12,35	18,85	15,00	11,50	14,67	11,53	10,96	15,17	7,35	10,67	11,68	17,15
12,80	17,45	11,75	9,20	10,43	13,31	14,34	14,01	7,10	11,60	15,12	16,90
11,15	11,30	14,60	14,10	11,63	9,57	11,95	15,06	8,65	12,53	13,30	16,50
11,05	16,15	11,40	14,75	11,40	13,85	6,24	15,04	8,55	8,94	11,25	14,60
10,50	16,45	10,40	11,90	11,90	9,92	9,06	15,30	9,55	4,10	9,82	11,75
14,50	16,30	9,35	10,85	8,59	5,16	13,34	15,20	7,20	9,37	10,40	14,80
13,90	10,10	15,20	9,35	8,31	3,31	15,70	15,00	11,60	13,22	10,86	20,05
10,95	15,10	16,05	11,65	11,42	15,15	11,15	11,72	9,10	9,74	11,16	14,90
16,40	16,05	20,00	12,65	12,17	13,42	15,14	15,05	9,55	14,52	8,60	15,60
17,60	16,75	19,65	9,95	11,56	15,16	13,48	15,17	9,96	13,63	10,71	16,60
13,30	11,30	14,55	11,55	10,90	15,04	15,18	15,02	9,46	11,64	12,92	15,65

Anexo 2 - Tabela para o teste de Tukey.

VII Percentage Points of the Studentized Range Statistic^a
 $q_{0.01}(p, f)$

f	p																		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	90	135	164	186	202	216	227	237	246	253	260	266	272	272	282	286	290	294	298
2	14.0	19.0	22.3	24.7	26.6	28.2	29.5	30.7	31.7	32.6	33.4	34.4	34.8	35.4	36.0	36.5	37.0	37.5	37.9
3	8.26	10.6	12.2	13.3	14.2	15.0	15.6	16.2	16.7	17.1	17.5	17.9	18.2	18.5	18.8	19.1	19.3	19.5	19.8
4	6.51	8.12	9.17	9.96	10.6	11.1	11.5	11.9	12.3	12.6	12.8	13.1	13.3	13.5	13.7	13.9	14.1	14.2	14.4
5	5.70	6.97	7.80	8.42	8.91	9.32	9.67	9.97	10.24	10.48	10.70	10.89	11.08	11.24	11.40	11.55	11.68	11.81	11.93
6	5.24	6.33	7.03	7.56	7.97	8.32	8.61	8.87	9.10	9.30	9.49	9.65	9.81	9.95	10.08	10.21	10.32	10.43	10.54
7	4.95	5.92	6.54	7.01	7.37	7.68	7.94	8.17	8.37	8.55	8.71	8.86	9.00	9.12	9.24	9.35	9.46	9.55	9.65
8	4.74	5.63	6.20	6.63	6.96	7.24	7.47	7.68	7.87	8.03	8.18	8.31	8.44	8.55	8.66	8.76	8.85	8.94	9.03
9	4.60	5.43	5.96	6.35	6.66	6.91	7.13	7.32	7.49	7.65	7.78	7.91	8.03	8.13	8.23	8.32	8.41	8.49	8.57
10	4.48	5.27	5.77	6.14	6.43	6.67	6.87	7.05	7.21	7.36	7.48	7.60	7.71	7.81	7.91	7.99	8.07	8.15	8.22
11	4.39	5.14	5.62	5.97	6.25	6.48	6.67	6.84	6.99	7.13	7.25	7.36	7.46	7.56	7.65	7.73	7.81	7.88	7.95
12	4.32	5.04	5.50	5.84	6.10	6.32	6.51	6.67	6.81	6.94	7.06	7.17	7.26	7.36	7.44	7.52	7.59	7.66	7.73
13	4.26	4.96	5.40	5.73	5.98	6.19	6.37	6.53	6.67	6.79	6.90	7.01	7.10	7.19	7.27	7.34	7.42	7.48	7.55
14	4.21	4.89	5.32	5.63	5.88	6.08	6.26	6.41	6.54	6.66	6.77	6.87	6.96	7.05	7.12	7.20	7.27	7.33	7.39
15	4.17	4.83	5.25	5.56	5.80	5.99	6.16	6.31	6.44	6.55	6.66	6.76	6.84	6.93	7.00	7.07	7.14	7.20	7.26
16	4.13	4.78	5.19	5.49	5.72	5.92	6.08	6.22	6.35	6.46	6.56	6.66	6.74	6.82	6.90	6.97	7.03	7.09	7.15
17	4.10	4.74	5.14	5.43	5.66	5.85	6.01	6.15	6.27	6.38	6.48	6.57	6.66	6.73	6.80	6.87	6.94	7.00	7.05
18	4.07	4.70	5.09	5.38	5.60	5.79	5.94	6.08	6.20	6.31	6.41	6.50	6.58	6.65	6.72	6.79	6.85	6.91	6.96
19	4.05	4.67	5.05	5.33	5.55	5.73	5.89	6.02	6.14	6.25	6.34	6.43	6.51	6.58	6.65	6.72	6.78	6.84	6.89
20	4.02	4.64	5.02	5.29	5.51	5.69	5.84	5.97	6.09	6.19	6.29	6.37	6.45	6.52	6.59	6.65	6.71	6.76	6.82
24	3.96	4.54	4.91	5.17	5.37	5.54	5.69	5.81	5.92	6.02	6.11	6.19	6.26	6.33	6.39	6.45	6.51	6.56	6.61
30	3.89	4.45	4.80	5.05	5.24	5.40	5.54	5.65	5.76	5.85	5.93	6.01	6.08	6.14	6.20	6.26	6.31	6.36	6.41
40	3.82	4.37	4.70	4.93	5.11	5.27	5.39	5.50	5.60	5.69	5.77	5.84	5.90	5.96	6.02	6.07	6.12	6.17	6.21
60	3.76	4.28	4.60	4.82	4.99	5.13	5.25	5.36	5.45	5.53	5.60	5.67	5.73	5.79	5.84	5.89	5.93	5.98	6.02
120	3.70	4.20	4.50	4.71	4.87	5.01	5.12	5.21	5.30	5.38	5.44	5.51	5.56	5.61	5.66	5.71	5.75	5.79	5.83
∞	3.64	4.12	4.40	4.60	4.76	4.88	4.99	5.08	5.16	5.23	5.29	5.35	5.40	5.45	5.49	5.54	5.57	5.61	5.65

f = Degrees of freedom.
^aFrom J. M. May, "Extended and Corrected Tables of the Upper Percentage Points of the Studentized Range," *Biometrika*, Vol. 39, pp. 192-193, 1952. Reproduced by permission of the trustees of *Biometrika*.

90.05% J J

f	p																		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	18.1	26.7	32.8	37.2	40.5	43.1	45.4	47.3	49.1	50.6	51.9	53.2	54.3	55.4	56.3	57.2	58.0	58.8	59.6
2	6.09	8.28	9.80	10.89	11.73	12.43	13.03	13.54	13.99	14.39	14.75	15.08	15.38	15.65	15.91	16.14	16.36	16.57	16.77
3	4.50	5.88	6.83	7.51	8.04	8.47	8.85	9.18	9.46	9.72	9.95	10.16	10.35	10.52	10.69	10.84	10.98	11.12	11.24
4	3.93	5.00	5.76	6.31	6.73	7.06	7.35	7.60	7.83	8.03	8.21	8.37	8.52	8.67	8.80	8.92	9.03	9.14	9.24
5	3.64	4.60	5.22	5.67	6.03	6.33	6.58	6.80	6.99	7.17	7.32	7.47	7.60	7.72	7.83	7.93	8.03	8.12	8.21
6	3.46	4.34	4.90	5.31	5.63	5.89	6.12	6.32	6.49	6.65	6.79	6.92	7.04	7.14	7.24	7.34	7.43	7.51	7.59
7	3.34	4.16	4.68	5.06	5.35	5.59	5.80	5.99	6.15	6.29	6.42	6.54	6.65	6.75	6.84	6.93	7.01	7.08	7.16
8	3.26	4.04	4.53	4.89	5.17	5.40	5.60	5.77	5.92	6.05	6.18	6.29	6.39	6.48	6.57	6.65	6.73	6.80	6.87
9	3.20	3.95	4.42	4.76	5.02	5.24	5.43	5.60	5.74	5.87	5.98	6.09	6.19	6.28	6.36	6.44	6.51	6.58	6.65
10	3.15	3.88	4.33	4.66	4.91	5.12	5.30	5.46	5.60	5.72	5.83	5.93	6.03	6.12	6.20	6.27	6.34	6.41	6.47
11	3.11	3.82	4.26	4.58	4.82	5.03	5.20	5.35	5.49	5.61	5.71	5.81	5.90	5.98	6.06	6.14	6.20	6.27	6.33
12	3.08	3.77	4.20	4.51	4.75	4.95	5.12	5.27	5.40	5.51	5.61	5.71	5.80	5.88	5.95	6.02	6.09	6.15	6.21
13	3.06	3.73	4.15	4.46	4.69	4.88	5.05	5.19	5.32	5.43	5.53	5.63	5.71	5.79	5.86	5.93	6.00	6.06	6.11
14	3.03	3.70	4.11	4.41	4.64	4.83	4.99	5.13	5.25	5.36	5.46	5.56	5.64	5.72	5.79	5.86	5.92	5.98	6.03
15	3.01	3.67	4.08	4.37	4.59	4.78	4.94	5.08	5.20	5.31	5.40	5.49	5.57	5.65	5.72	5.79	5.85	5.91	5.96
16	3.00	3.65	4.05	4.34	4.56	4.74	4.90	5.03	5.15	5.26	5.35	5.44	5.52	5.59	5.66	5.73	5.79	5.84	5.90
17	2.98	3.62	4.02	4.31	4.52	4.70	4.86	4.99	5.11	5.21	5.31	5.39	5.47	5.55	5.61	5.68	5.74	5.79	5.84
18	2.97	3.61	4.00	4.28	4.49	4.67	4.83	4.96	5.07	5.17	5.27	5.35	5.43	5.50	5.57	5.63	5.69	5.74	5.79
19	2.96	3.59	3.98	4.26	4.47	4.64	4.79	4.92	5.04	5.14	5.23	5.32	5.39	5.46	5.53	5.59	5.65	5.70	5.75
20	2.95	3.58	3.96	4.24	4.45	4.62	4.77	4.90	5.01	5.11	5.20	5.28	5.36	5.43	5.50	5.56	5.61	5.66	5.71
24	2.92	3.53	3.90	4.17	4.37	4.54	4.68	4.81	4.92	5.01	5.10	5.18	5.25	5.32	5.38	5.44	5.50	5.55	5.59
30	2.89	3.48	3.84	4.11	4.30	4.46	4.60	4.72	4.83	4.92	5.00	5.08	5.15	5.21	5.27	5.33	5.38	5.43	5.48
40	2.86	3.44	3.79	4.04	4.23	4.39	4.52	4.63	4.74	4.82	4.90	4.98	5.05	5.11	5.17	5.22	5.27	5.32	5.36
60	2.83	3.40	3.74	3.98	4.16	4.31	4.44	4.55	4.65	4.73	4.81	4.88	4.94	5.00	5.06	5.11	5.15	5.20	5.24
120	2.80	3.36	3.69	3.92	4.10	4.24	4.36	4.47	4.56	4.64	4.71	4.78	4.84	4.90	4.95	5.00	5.04	5.09	5.13
∞	2.77	3.32	3.63	3.86	4.03	4.17	4.29	4.39	4.47	4.55	4.62	4.68	4.74	4.80	4.84	4.88	4.93	4.97	5.01

Anexo 3 – Teste de Tukey para as Diferenças de Médias.

Diferença de Taxa de Alimedntação (tph)*RPM (%) Níveis	Diferença de Médias	EP da Diferença	IC de 95% simultâneo	Valor-T	Valor-P Ajustado
(9 50) - (9 40)	-2.362	0.662	(-4.525, -0.199)	-3.57	0.019
(9 60) - (9 40)	-4.486	0.662	(-6.649, -2.323)	-6.78	0.000
(10 40) - (9 40)	1.045	0.662	(-1.118, 3.208)	1.58	0.917
(10 50) - (9 40)	-1.826	0.662	(-3.989, 0.337)	-2.76	0.198
(10 60) - (9 40)	-3.692	0.662	(-5.855, -1.529)	-5.58	0.000
(11 40) - (9 40)	0.685	0.662	(-1.478, 2.848)	1.03	0.997
(11 50) - (9 40)	-0.950	0.662	(-3.113, 1.213)	-1.43	0.957
(11 60) - (9 40)	-1.431	0.662	(-3.594, 0.732)	-2.16	0.578
(12 40) - (9 40)	-0.788	0.662	(-2.951, 1.375)	-1.19	0.990
(12 50) - (9 40)	0.598	0.662	(-1.565, 2.761)	0.90	0.999
(12 60) - (9 40)	1.700	0.662	(-0.463, 3.863)	2.57	0.298
(9 60) - (9 50)	-2.124	0.662	(-4.287, 0.039)	-3.21	0.060
(10 40) - (9 50)	3.407	0.662	(1.244, 5.570)	5.15	0.000
(10 50) - (9 50)	0.536	0.662	(-1.627, 2.699)	0.81	1.000
(10 60) - (9 50)	-1.330	0.662	(-3.493, 0.833)	-2.01	0.687
(11 40) - (9 50)	3.047	0.662	(0.884, 5.210)	4.60	0.000
(11 50) - (9 50)	1.412	0.662	(-0.751, 3.575)	2.13	0.599
(11 60) - (9 50)	0.931	0.662	(-1.232, 3.094)	1.41	0.963
(12 40) - (9 50)	1.574	0.662	(-0.589, 3.737)	2.38	0.422
(12 50) - (9 50)	2.960	0.662	(0.797, 5.123)	4.47	0.001
(12 60) - (9 50)	4.062	0.662	(1.899, 6.225)	6.13	0.000
(10 40) - (9 60)	5.531	0.662	(3.368, 7.694)	8.35	0.000
(10 50) - (9 60)	2.660	0.662	(0.497, 4.823)	4.02	0.003
(10 60) - (9 60)	0.794	0.662	(-1.369, 2.957)	1.20	0.989
(11 40) - (9 60)	5.171	0.662	(3.008, 7.334)	7.81	0.000
(11 50) - (9 60)	3.536	0.662	(1.373, 5.699)	5.34	0.000
(11 60) - (9 60)	3.055	0.662	(0.892, 5.218)	4.61	0.000
(12 40) - (9 60)	3.698	0.662	(1.535, 5.861)	5.58	0.000
(12 50) - (9 60)	5.084	0.662	(2.921, 7.247)	7.68	0.000
(12 60) - (9 60)	6.186	0.662	(4.023, 8.349)	9.34	0.000
(10 50) - (10 40)	-2.871	0.662	(-5.034, -0.708)	-4.34	0.001
(10 60) - (10 40)	-4.737	0.662	(-6.900, -2.574)	-7.15	0.000
(11 40) - (10 40)	-0.360	0.662	(-2.523, 1.803)	-0.54	1.000
(11 50) - (10 40)	-1.995	0.662	(-4.158, 0.168)	-3.01	0.105
(11 60) - (10 40)	-2.476	0.662	(-4.639, -0.313)	-3.74	0.010
(12 40) - (10 40)	-1.833	0.662	(-3.996, 0.330)	-2.77	0.193
(12 50) - (10 40)	-0.447	0.662	(-2.610, 1.716)	-0.68	1.000
(12 60) - (10 40)	0.655	0.662	(-1.508, 2.818)	0.99	0.998
(10 60) - (10 50)	-1.866	0.662	(-4.029, 0.297)	-2.82	0.172
(11 40) - (10 50)	2.511	0.662	(0.348, 4.674)	3.79	0.008
(11 50) - (10 50)	0.876	0.662	(-1.287, 3.039)	1.32	0.976
(11 60) - (10 50)	0.395	0.662	(-1.768, 2.558)	0.60	1.000
(12 40) - (10 50)	1.038	0.662	(-1.125, 3.201)	1.57	0.921
(12 50) - (10 50)	2.424	0.662	(0.261, 4.587)	3.66	0.013
(12 60) - (10 50)	3.526	0.662	(1.363, 5.689)	5.33	0.000
(11 40) - (10 60)	4.377	0.662	(2.214, 6.540)	6.61	0.000
(11 50) - (10 60)	2.743	0.662	(0.580, 4.906)	4.14	0.002
(11 60) - (10 60)	2.262	0.662	(0.099, 4.425)	3.42	0.031
(12 40) - (10 60)	2.904	0.662	(0.741, 5.067)	4.39	0.001
(12 50) - (10 60)	4.290	0.662	(2.127, 6.453)	6.48	0.000
(12 60) - (10 60)	5.392	0.662	(3.229, 7.555)	8.14	0.000
(11 50) - (11 40)	-1.635	0.662	(-3.798, 0.528)	-2.47	0.360
(11 60) - (11 40)	-2.116	0.662	(-4.279, 0.047)	-3.20	0.062
(12 40) - (11 40)	-1.473	0.662	(-3.636, 0.690)	-2.23	0.531
(12 50) - (11 40)	-0.087	0.662	(-2.250, 2.076)	-0.13	1.000
(12 60) - (11 40)	1.015	0.662	(-1.148, 3.178)	1.53	0.932
(11 60) - (11 50)	-0.481	0.662	(-2.644, 1.682)	-0.73	1.000
(12 40) - (11 50)	0.161	0.662	(-2.002, 2.324)	0.24	1.000
(12 50) - (11 50)	1.547	0.662	(-0.616, 3.710)	2.34	0.450
(12 60) - (11 50)	2.650	0.662	(0.487, 4.813)	4.00	0.004
(12 40) - (11 60)	0.642	0.662	(-1.521, 2.805)	0.97	0.998
(12 50) - (11 60)	2.028	0.662	(-0.135, 4.191)	3.06	0.091
(12 60) - (11 60)	3.131	0.662	(0.968, 5.294)	4.73	0.000
(12 50) - (12 40)	1.386	0.662	(-0.777, 3.549)	2.09	0.628
(12 60) - (12 40)	2.488	0.662	(0.325, 4.651)	3.76	0.009
(12 60) - (12 50)	1.102	0.662	(-1.061, 3.265)	1.66	0.884

Nível de confiança individual = 99,88%

Nota: Saída do software Minitab.

10.0 REFERÊNCIAS

COLEMAN, D. E. & MONTGOMERY, D. C. A systematic approach to planning for a designed industrial experiment, v.35, n.1. *Technometrics - American Society for Quality*, 1993.

LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A. e FRANÇA, S. C. A. *Tratamento de Minérios*. Rio de Janeiro : CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL – CETEM MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA – MCT, 2010.

MONTGOMERY, C. D, e RUNGER, G. C. *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*, 5. ed. São Paulo : LTC, 2012.

MONTGOMERY, DOUGLAS C. *Design and analysis of experiments*. 8. Danvers : John Wiley & Sons, Inc., 2012.

TUKEY, J.W. The problem of multiple comparisons. Unpublished manuscript, Princeton University, 1953.

Software Minitab® 18.1. , Minitab, Inc. , 2017