



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



João Victor Oliveira Badaró

**ANÁLISE ESTATÍSTICA COMO FERRAMENTA DE TOMADA DE
DECISÕES: ESTUDO DE CASO NA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE
NO CONTROLE TECNOLÓGICO DE UMA ESTRUTURA DE
DISPOSIÇÃO DE REJEITO FILTRADO**

Ouro Preto

2022

Análise estatística como ferramenta de tomada de decisões:
estudo de caso na determinação da umidade no controle
tecnológico de uma estrutura de disposição de rejeito filtrado

João Victor Oliveira Badaró

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 22/06/2022

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Felipe de Campos Loch – UFOP

Ouro Preto

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

B132a Badaro, Joao Victor Oliveira.

Análise estatística como ferramenta de tomada de decisões: estudo de caso na determinação da umidade no controle tecnológico de uma estrutura de disposição de rejeito filtrado. [manuscrito] / Joao Victor Oliveira Badaro. - 2022.
64 f.

Orientador: Prof. Dr. Felipe de Campos Loch.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Análise Estatística. 2. Determinação da Umidade. 3. Controle Tecnológico. 4. Rejeito Filtrado. I. Loch, Felipe de Campos. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

João Victor Oliveira Badaró

Análise estatística como ferramenta de tomada de decisões: estudo de caso da determinação da umidade no controle tecnológico de uma estrutura de disposição de rejeito filtrado.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de engenheiro civil.

Aprovada em 22 de junho de 2022

Membros da banca

Prof. Dr. Felipe de Campos Loch - Orientador - DECIV - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Adilson do Lago Leite - DECIV - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof.a Dra. Marina de Medeiros Machado - DEAMB - Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Dr. Felipe de Campos Loch, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 18/07/2022



Documento assinado eletronicamente por **Felipe de Campos Loch, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/07/2022, às 15:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0365088** e o código CRC **6CADA5E6**.

*“O homem nasceu para aprender,
aprender tanto quanto a vida lhe permita”*

Guimarães Rosa

AGRADECIMENTOS

Agradeço à toda minha família, minha mãe, Maria Selma, pela inspiração, carinho e amor incondicional; ao meu pai Gilmar, pelo exemplo, todos os ensinamentos e formação de caráter, a minha irmã, Joyce, pelo companheirismo e apoio. As famílias Oliveira e Badaró, por também acreditarem em meus sonhos, e apoiá-los de maneira primordial.

A minha segunda família, à República Hospício, todos os seus ex alunos e moradores, por todos valores e ensinamentos ali aprendidos. A Cláudia, pelos cuidados e ensinamentos.

A vida republicana, e aos amigos de Ouro Preto que, de alguma forma, fizeram parte dessa etapa.

A Escola de Minas e a UFOP, pelo ensino gratuito e de qualidade. A Fundação Gorceix pela assistência e formação complementar. A Liga de Acadêmica de Geotecnia da Escola de Minas (LAGEM) por todo aprendizado e amizades construídas.

A Samarco Mineração, pela oportunidade, confiança, e todo o aprendizado desenvolvido, em especial, a Gerência de Geotecnia, a Viviane, Flávia, Rodrigo, Leone, Wanderson, Gabriel, Juliano e Renato Marques.

A Pattrol Investigações Geotécnicas pelo apoio, e suporte a pesquisa, em especial, Andiara e Glauciana.

A todos os meus professores da UFOP, que de uma maneira ou de outra contribuíram com minha formação. E por fim, ao meu professor orientador Felipe Campos Loch, pelo suporte e apoio a esse trabalho.

RESUMO

As novas técnicas de disposição de rejeito filtrado trazem novos desafios para a indústria da mineração, exigindo um maior controle, não só em seu monitoramento e inspeção, mas também no seu controle tecnológico de disposição. Devido ao grande volume de dados gerados nessa atividade, a aplicação de ferramentas estatísticas se torna fundamental para o entendimento e controle do comportamento de diversos parâmetros geotécnicos. No que tange a análise desses parâmetros por meio da estatística, aplicações como análise de variâncias, regressões lineares, correlações podem indicar tendências ou variações de dados que são importantes no controle da operação. De outra forma, com um viés investigativo, o planejamento fatorial também pode avaliar a influência de certos fatores em um determinado parâmetro. Buscou-se na literatura as formas mais comuns de disposição de rejeito, descrever os parâmetros geotécnicos que orientam o controle tecnológico de uma estrutura de disposição, além de noções de estatística e do planejamento experimental. No estudo de caso, procurou-se comparar metodologias de determinação da umidade no rejeito, tendo a estufa como referência. Por fim, foi possível indicar as semelhanças e diferenças entre cada método, apontando um melhor desempenho da balança infravermelho do que a frigideira, ao se comparar com a estufa. Além disso, foi possível ajustar a curva de secagem da balança infravermelho de acordo o peso adotado, garantindo maior precisão em seus resultados.

Palavras-chaves: Análise Estatística, Determinação da Umidade, Controle Tecnológico, Rejeito Filtrado.

ABSTRACT

The new techniques for the disposal of filtered tailings bring new challenges to the mining industry, requiring a bigger control, not only in monitoring and inspection, but also in the technological control of disposal. Due to the large volume of data generated in this activity, the application of statistical tools becomes fundamental for the understanding and for the control of the behavior in several geotechnical parameters. Regarding the analysis of these parameters through statistics, applications such as analysis of variances, linear regressions, correlations can indicate trends or variations in data that are important in controlling the operation. On the other hand, with an investigative bias, factorial design can also measure the influence of certain factors on a given parameter. The literature searched for the most common forms of tailings disposal, to describe the geotechnical parameters that guide the technological control of a disposal structure, in addition to notions of statistics and experimental planning. In the case study, we sought to compare methodologies for determining moisture in the tailings, using the greenhouse as a reference. Finally, it was possible to indicate the similarities and differences between each method, pointing out a better performance of the infrared scale than the frying pan, when compared to the oven. In addition, it was possible to adjust the drying curve of the infrared scale according to the adopted weight, ensuring greater precision in its results.

Keywords: Statistical Analysis, Determination of Moisture, Technological Control, Filtered Tailings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Métodos de alteamento de barragens.....	3
Figura 2 - Diferentes tipos de rejeitos, seus aspectos e tipos de depósito.....	5
Figura 3 - Tendência no uso de rejeitos desaguados na mineração.....	6
Figura 4 - Filtro prensa de placas verticais.....	8
Figura 5 - Esquema simplificado de filtro prensa.....	8
Figura 6 - Empilhamento a seco de rejeitos usando caminhões como transporte.....	9
Figura 7 - Representação de zonas estruturais em pilhas de rejeito filtrado.....	10
Figura 8 - Processo de compactação com rolo compressor liso de rejeito filtrado.....	11
Figura 9 - Aspecto da curva de compactação do solo.....	13
Figura 10 - Influência da energia de compactação de um mesmo solo.....	14
Figura 11 - Estrutura de solos compactados.....	14
Figura 12 - Representação esquemática de ensaio Proctor.....	18
Figura 13 - Coeficientes de correlação.....	24
Figura 14 - Princípios do planejamento de experimentos.....	26
Figura 15 - Interpretação gráfica do planejamento 2^2	28
Figura 16 - Superfície de resposta de um planejamento fatorial, gerado pelo software Statistica.....	29
Figura 17 - Fluxograma para comparação do teor de umidade gravimétrico.....	32
Figura 18 - Fluxograma de execução para o planejamento fatorial.....	33
Figura 19 - Pilha de pulmão de rejeito do material coletado.....	33
Figura 20 - a) Execução do ensaio pelo método da estufa. b) Recipientes com rejeito para execução do ensaio.....	35
Figura 21 - a) e b): Execução do ensaio pelo método da frigideira.....	36

Figura 22 - a) Preparação de recipientes com rejeito. b) Execução do ensaio pelo método da balança infravermelho.....	37
Figura 23 - Representação espacial de experimento 3^3	39
Figura 24 - Gráfico de dispersão para os ensaios de umidade realizados.....	39
Figura 25 - Gráficos box plot para cada método analisado.....	40
Figura 26 - Histograma de resíduos gerados pelo modelo.....	42
Figura 27 - Gráfico de probabilidade normal dos resíduos.....	42
Figura 28 - Gráfico de regressão entre Frigideira e Estufa.....	43
Figura 29 - Gráfico de regressão entre Balança Infravermelho (1) e Estufa.....	44
Figura 30 - Gráfico de regressão entre Balança Infravermelho (2) e Estufa.....	44
Figura 31 - Superfície de resposta do planejamento fatorial aplicado para 30 gramas de rejeito.....	47
Figura 32 - Projeção da superfície de resposta do planejamento fatorial aplicado para 30 gramas de rejeito.....	47
Figura 33 - Superfície de resposta do planejamento fatorial aplicado para 35 gramas de rejeito.....	48
Figura 34 - Projeção da superfície de resposta do planejamento fatorial aplicado para 35 gramas de rejeito.....	48
Figura 35 - Superfície de resposta do planejamento fatorial aplicado para 40 gramas de rejeito.....	49
Figura 36 - Projeção da superfície de resposta do planejamento fatorial aplicado para 40 gramas de rejeito.....	49
Figura 37 - Histograma e curva de distribuição normal de resíduos gerados pelo modelo.....	52
Figura 38 - Gráfico de probabilidade normal dos resíduos.....	53
Figura 39 - Gráfico de resíduos versus valores previstos.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos métodos convencionais de represamento de rejeitos.....	4
Tabela 2 - Tipos de filtragem.....	7
Tabela 3 - Principais parâmetros verificados no controle tecnológico.....	15
Tabela 4 - Estudos de comparação de métodos de determinação da umidade.....	20
Tabela 5 - Principais parâmetros da estatística descritiva.....	21
Tabela 6 - Classificação do coeficiente de correlação.....	24
Tabela 7 - Numero de ensaios tratamentos ou combinações de esquemas fatoriais completos.....	26
Tabela 8 - Exemplo de resultados de um planejamento fatorial.....	27
Tabela 9 - Métodos para comparação do teor de umidade gravimétrico.....	31
Tabela 10 - Quantidade de material em função da dimensão dos grãos.....	35
Tabela 11 - Fatores e níveis escolhidos no planejamento fatorial.....	38
Tabela 12 - Estatísticas descritivas para os dados analisados.....	39
Tabela 13 - Hipóteses consideradas na análise de variância.....	40
Tabela 14 - Análise de variância para métodos de determinação da umidade.....	41
Tabela 15 - Informações de Agrupamento Usando o Método LSD de Fisher e 95% de Confiança.....	41
Tabela 16 - Coeficientes de correlação e regressão gerado nas comparações.....	45
Tabela 17 - Combinações de variáveis e desvios correspondentes do planejamento fatorial.....	46
Tabela 18 - Análise de variância das interações do planejamento fatorial adotado.....	51

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

NBR - Norma Brasileira

ANOVA - Análise de Variância

h - Teor de Umidade

h_{ot} - Umidade ótima

γ_d - Peso específico aparente seco

$\gamma_{d\ máx}$ - Peso específico seco máximo

γ_s - Peso específico dos sólidos

e - Índice de vazios

k - Coeficiente de permeabilidade

GC - Grau de compactação

LL - Limite de liquidez

LP - Limite de plasticidade

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	2
1.1.1	Objetivos Específicos	2
2	Revisão Bibliográfica	3
2.1	Sistemas de Disposição de Rejeito	3
2.2	Disposição a Seco (Dry stacking)	6
2.3	Teoria Geral da Compactação	11
2.4	Controle Tecnológico e Parâmetros Geotécnicos	15
2.4.1	Ensaio de Compactação	16
2.4.2	Determinação da Umidade	17
2.5	Análise Estatística	20
2.5.1	Estatística Descritiva	21
2.5.2	Erros de Medição e Identificação de Outliers	22
2.5.3	Análise de Variância	22
2.5.4	Correlação e Regressão Linear	23
2.5.5	Planejamento Fatorial de Experimentos	25
3	Materiais e Métodos	30
3.1	Materiais	30
3.2	Abordagem Estatística	30
3.3	Procedimento Experimental	32
3.4	Coleta das Amostras	33
3.5	Determinação da Umidade	34

3.5.1	Método da Estufa	35
3.5.2	Método da Frigideira	36
3.5.3	Método da Balança Infravermelho	36
3.6	Planejamento Experimental.....	37
4	Resultados e Discussões	39
5	Conclusão	54
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	55
	Referências.....	56
	Apêndice A – Resultados de Umidade	60

1 INTRODUÇÃO

A mineração tem grande importância para economia brasileira, fundamental no desenvolvimento de empregos, representando 5% do PIB brasileiro, segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). Em números relativos o IBRAM apontou que em 2021, esse setor registrou aumento de 62% no faturamento em relação ao 2020, totalizando R\$ 339,1 bilhões (excluindo-se petróleo e gás).

Como produto desta atividade industrial, o rejeito é um material sem valor agregado que ganhou contornos críticos a sua forma disposição, após os rompimentos das barragens de rejeitos em Minas Gerais, nas minas de Germano e Córrego do Feijão, ocorridos em Mariana (2015) e Brumadinho (2019) respectivamente. Para tanto, o investimento em métodos alternativos como a disposição de rejeito filtrado, disposição em pasta, disposição da lama espessada e disposição subaérea ganhou relevância na atividade minerária.

Para Luz e Lins (2010), novas tecnologias para o tratamento dos rejeitos, que possibilitem uma disposição alternativa às barragens, foram necessárias em decorrência da responsabilidade ambiental e social. Isso implicou o desenvolvimento de novos estudos de metodologias que reduzam grandes áreas para disposição e grande impacto ambiental.

A disposição de rejeito filtrado em pilhas exige um alto controle tecnológico, direcionado por um programa de controle e garantia da qualidade. Nesse sentido, a sua operação envolve um conjunto significativo de dados que são tratados e analisados, verificando as diretrizes de projeto e os parâmetros geotécnicos de qualidade especificados que norteiam a operação de uma estrutura em execução.

Os dados gerados em um controle tecnológico são necessariamente resultados sobre determinado parâmetro de controle. Para tanto, organizar, descrever, interpretar e analisar esses dados é um dever da estatística, sendo considerada uma ferramenta importante para tomada de decisões. Não tendo fim em si própria, mas como ciência

de apoio, a estatística é um instrumento fornecedor de informações que subsidiarão, a tomada de melhores decisões (COSTA NETO, 2002).

Nesse contexto, esse trabalho aborda a importância da aplicação da análise estatística para tomada de decisão na rotina operacional de disposição considerando a aplicação de ferramentas estatísticas no controle tecnológico da umidade, comparando métodos de determinação desse parâmetro, que está envolvido desde o controle de compactação, a etapas de ensaios de caracterização do rejeito.

1.1 Objetivo

Esse trabalho tem o objetivo de avaliar o potencial da análise estatística no controle tecnológico de uma estrutura de disposição de rejeito filtrado, a partir da comparação entre métodos de determinação de umidade (balança infravermelho, frigideira e estufa).

1.1.1 Objetivos Específicos

- Identificar o melhor método de determinação da umidade entre a frigideira e a balança infravermelho, tendo a estufa como referência, a partir da aplicação de correlação e da regressão linear entre os métodos.
- Estabelecer um ajuste linear, gerando uma equação que descreva a relação entre os métodos.
- Determinar a melhor curva de secagem para a balança infravermelho, especificando o tempo, e temperatura de secagem de acordo o peso adotado para o rejeito arenoso filtrado, a partir da aplicação do planejamento fatorial como estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistemas de Disposição de Rejeito

A atividade mineradora gera por natureza grandes volumes de resíduos sólidos, sejam eles de processos de extração (o estéril) e os de beneficiamento (os rejeitos). Para Boscov (2008), tanto a lavra, como o beneficiamento geram grande quantidade de resíduos, os quais devem ser tratados e dispostos adequadamente para minimizar o impacto ambiental. Segundo o IPEA (2012), estima-se que a quantidade de rejeitos gerados em 2030 será da ordem de 684 milhões de toneladas.

De acordo com o IPEA (2012), o método mais utilizado pelas mineradoras do segmento metálico é a disposição de rejeitos em reservatórios criados por diques de contenção ou em barragens de contenção de rejeitos (do tipo a montante, a jusante e “em linha de centro”) de acordo Figura 1.

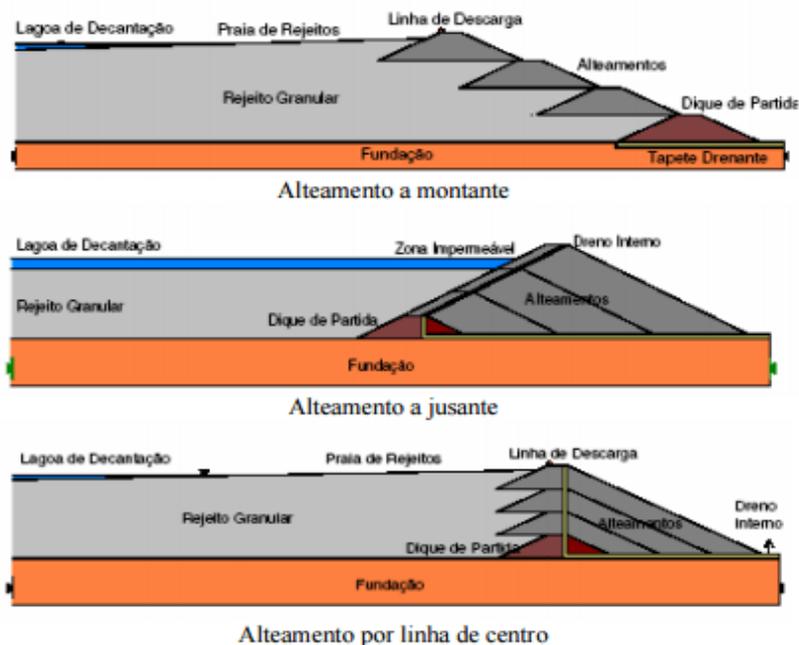


Figura 1: Métodos de alçamento de barragens. Fonte: Albuquerque Filho (2004).

Entre as principais vantagens da disposição de rejeitos em diques de contenção ou barragens, está o baixo custo em relação aos outros métodos. Entretanto, esse método nem sempre é o mais seguro, além de necessitar de grandes áreas para disposição. Essa contradição, tornou o olhar das mineradoras para as outras formas de disposição, não só como alternativa, mas também como investimento em segurança. Na Tabela 1, podemos verificar as principais vantagens e desvantagens da disposição por alteamento de barragens.

Tabela 1: Vantagens e desvantagens dos métodos convencionais de represamento de rejeitos.

	Método de montante	Método de jusante	Método de Linha de Centro
Método Construtivo	Método mais antigo e mais empregado. Construção de dique inicial e os diques do alteamento periféricos com material de empréstimo, estéreis de lavra ou com "underflow" de ciclonagem. Lançamento a partir da crista por ciclonagem ou "spigots".	Construção de dique inicial impermeável. Separação dos rejeitos na crista do dique do meio de hidrociclones. Dreno interno e impermeabilização a montante.	Varição do método de jusante.
Vantagens	Menor custo. Maior velocidade de alteamento. Utilizado em lugares onde há limitante de área.	Maior segurança. Compactação de todo o corpo da barragem. Pode-se misturar os estereis da lavra.	Varição do volume de "underflow" necessário com relação ao método da jusante
Desvantagens	Baixa segurança devido á linha freática próxima ao talude de jusante, susceptibilidade de liquefação, possibilidade de "piping".	Necessidades de grandes quantidades de "underflow" (problemas nas 1 ^{as} etapas). Deslocamento do talude de jusante (proteção superficial só no final da consturção).	Necessidade de sistemas de drenagem e sistemas de contenção a jusante

Fonte: Nieble, (1986), modificado por Soares, (2010).

Com os diversos rompimentos de barragens ocorridos no Brasil e no mundo, outros métodos de disposição se tornaram alternativas à disposição em barragens, seja com a disposição em minas subterrâneas; em cavas exauridas de minas; por empilhamento drenado; por empilhamento a seco (dry stacking); por disposição de rejeitos espessados ou em pasta; por codisposição de rejeitos e estéreis (mistura); e

por disposição compartilhada de rejeitos e estéreis.

A escolha do método a ser adotado, avaliará a natureza do processo de mineração (beneficiamento); as condições geológicas e topográficas da região; as propriedades mecânicas dos materiais; o poder de impacto ambiental de contaminantes dos rejeitos e as condições climáticas da região (IBRAM, 2016).

Para características mecânicas do rejeito, que estão ligadas as suas propriedades mineralógicas e condições de beneficiamento, avalia-se o método de disposição com a tensão de escoamento do rejeito e o percentual de sólidos em massa, de acordo Figura 2. Essas características definirão o modo de transporte do rejeito, em que em estados não bombeáveis, é viável o uso de correias transportadoras ou o uso de caminhões.

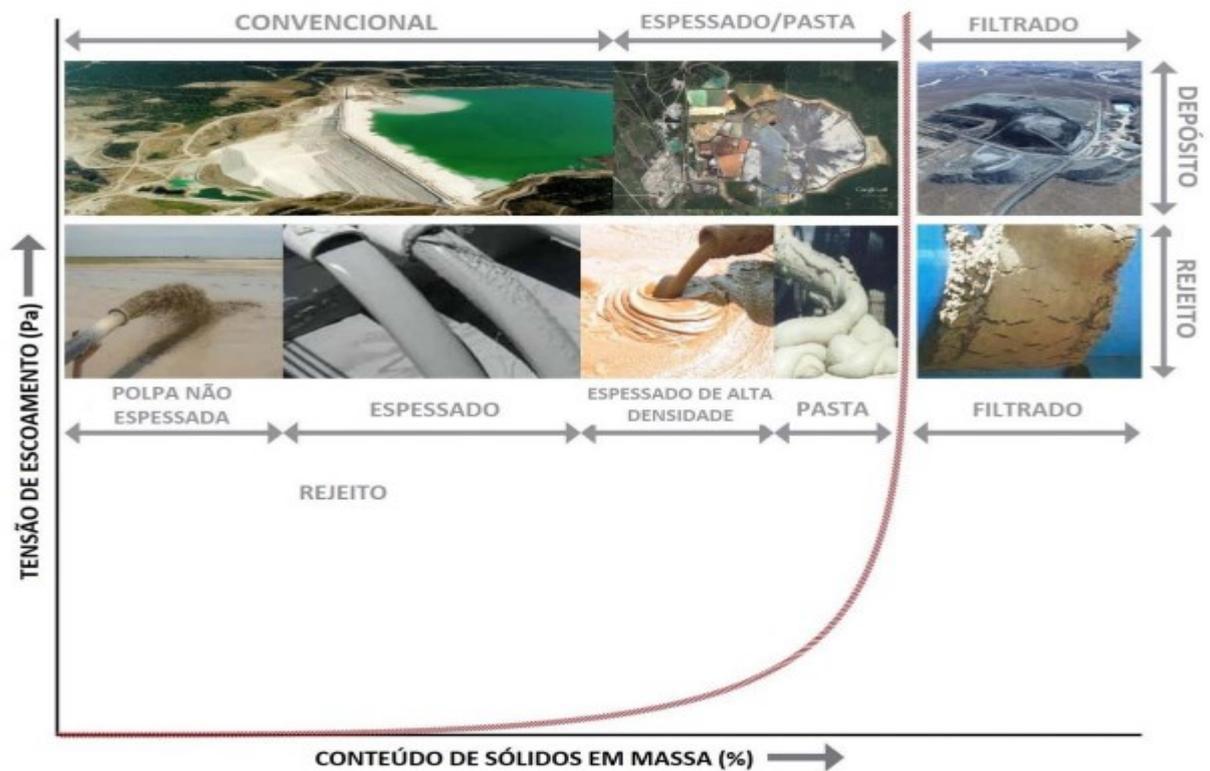


Figura 2- Diferentes tipos de rejeitos, seus aspectos e tipos de depósito Fonte: Mend (2017).

Dentre esses métodos, Davies (2011), constata que tanto a técnica do espessamento quanto a técnica de filtragem de rejeitos são as que mais vem ganhando força na mineração, de acordo Figura 3.

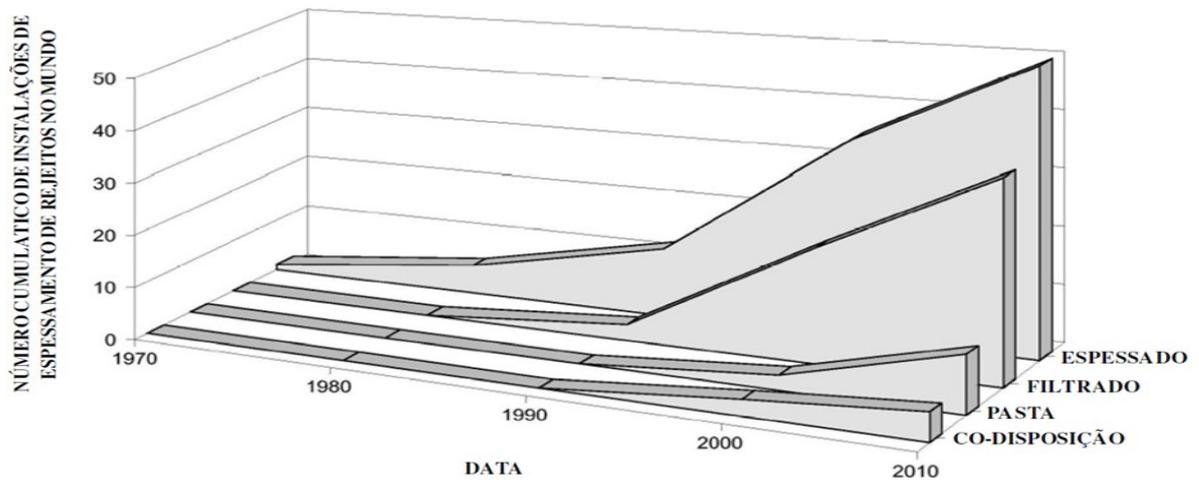


Figura 3- Tendência no uso de rejeitos desaguados na mineração. Fonte: Davies (2011).

De acordo com Guimarães (2011), a filtragem de rejeitos é uma prática usual nas minerações do deserto de Atacama, região norte do Chile, para reduzir as perdas de água devido a sua escassez na região. Além disso, a grande vantagem da disposição de rejeitos espessados, além de aumentar a recuperação de água do processo, é a redução significativa da área necessária de disposição, diminuindo o custo global do empreendimento e gerando menor impacto ambiental.

2.2 Disposição a Seco (Dry stacking)

Na disposição a seco, o rejeito é filtrado e empilhado em camadas. De acordo com Portes (2013), a filtragem é a separação dos sólidos e dos líquidos, a partir de um meio filtrante, na qual o rejeito, em formato de polpa, é forçado a passar pressionado por esse meio, retendo as partículas sólidas e expulsando líquido.

Como produto da filtração, o líquido que atravessa o meio filtrante é denominado “filtrado” e os sólidos retidos constituem a chamada “torta”. Davies (2011), classifica essa torta em dois tipos:

- Rejeitos filtrados úmidos (wet cake): aspecto saturado ou quase-saturado, não bombeável, próximo de 100% de saturação.
- Rejeitos filtrados secos (dry cake): aspecto não saturado, não bombeável, grau de saturação geralmente em torno 70% a 85%.

Ainda assim, segundo Guimarães (2011), para que ocorra a filtração é necessária a existência de uma força incidente sobre as partículas através de um meio poroso e pode ser conseguida através de: gravidade, vácuo, pressão ou centrifugação. Conforme a Tabela 2, podemos verificar tipos de filtração, de acordo com seu princípio de ação.

Tabela 2: Tipos de filtração.

Tipo	Modelos de Filtros	Características
Filtração a Vácuo	Filtro de tambor, de disco convencional, filtro horizontal de mesa e filtro horizontal de correia	Criada uma pressão negativa debaixo do filtrante
Filtração sob pressão	Filtro prensa horizontal, filtro prensa vertical	Uma pressão positiva é aplicada na polpa
Filtração Centrífuga	Centrífugas verticais e Decanters	Utiliza a força centrífuga para forçar a passagem do líquido
Filtração Hiperbárica	Filtro de disco encapsulado ou Hiperbárico	Em que se combinam vácuo e pressão
Filtração Capilar	Ceramec	Utiliza a ação de capilares de meios cerâmicos porosos para efetuar o desaguamento

Fonte: Guimarães (2011).

Como exemplo, o filtro prensa é constituído por um conjunto de placas que formam câmaras, sendo a superfície dessas placas revestidas por um tecido filtrante (Figura 4). Quando a polpa de rejeito é bombeada por pressão para o interior dessas câmaras, as placas são prensadas e agrupadas por pistões, de acordo com a Figura 5, assim o fluido é forçado a atravessar o tecido filtrante, que é recolhido através de

canaletas. Já o material sólido fica assim retido, formando as “tortas”, sendo posteriormente descarregado a partir da separação das placas (ALVES, 2020).

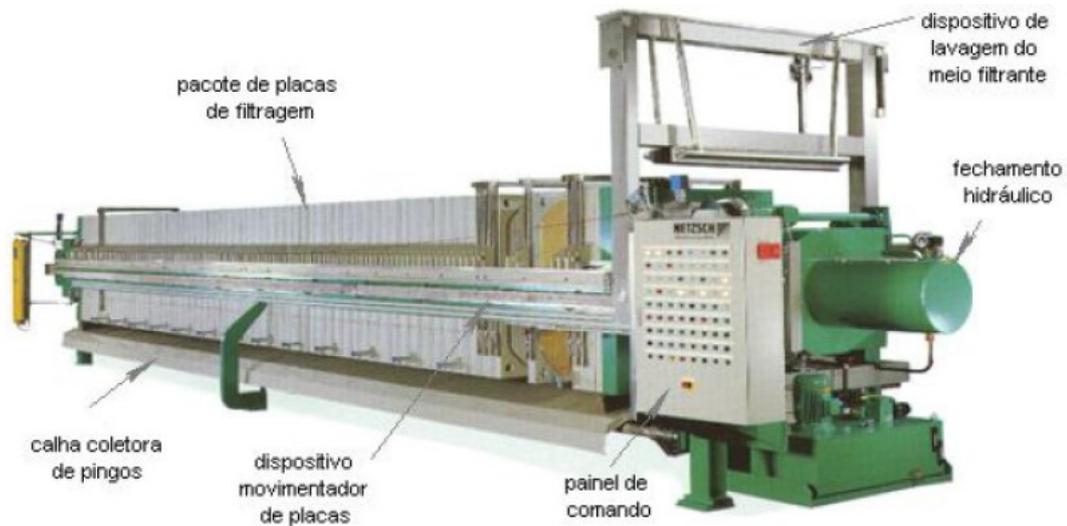


Figura 4- Filtro prensa de placas verticais. Fonte: Guimarães (2011).

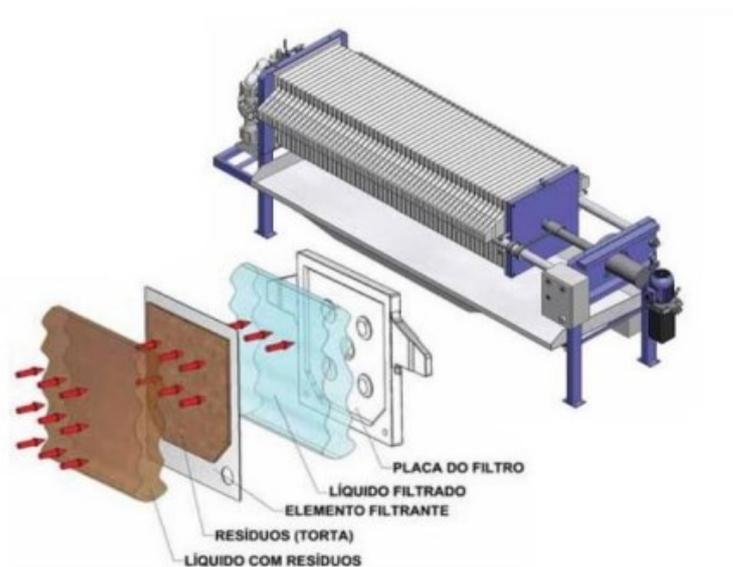


Figura 5- Esquema simplificado de filtro prensa.

Fonte: Bomax (2014), modificado por Vasconcelos (2021).

Davies (2011), pondera que, a escolha do modelo de filtragem, deve considerar não apenas a distribuição granulométrica, que tem importância no processo de filtragem, mas também a composição mineralógica dos rejeitos, uma vez que

materiais muito finos tem maior aptidão a reter água entre os seus grãos, assim como certos tipos de minerais.

Conforme Gomes (2009), o rejeito deixa a planta de filtragem com uma umidade pré-determinada, sendo transportado via correias transportadoras e ou caminhões até o local de disposição, de acordo configuração da planta de disposição. Assim esses materiais são lançados, espalhados e compactados em camadas ou dispostos em formas de pilhas. Para tanto, é importante que essa umidade esteja próxima da ótima, o que facilita o processo de compactação. A Figura 6, exemplifica o processo de disposição a partir do transporte por caminhões.



Figura 6- Empilhamento a seco de rejeitos com caminhões de transporte. Fonte: Engels (2006).

Em termos econômicos, Crystal et al. (2018), pondera que o custo unitário desse método é bem mais caro em relação ao método convencional, uma vez que fatores como a distância média de transporte, locação, compactação e a necessidade de remanejamento de água e de materiais elevam o custo de operação.

Essa disposição de rejeitos também pode ser feita de forma compartilhada com estéril. Engels (2006), avalia como uma forma de codisposição entre rejeito e estéril, na qual a mistura entre o estéril, normalmente de granulometria grossa, com rejeitos, proporciona o preenchimento dos vazios dos grãos do estéril pelos finos do rejeito,

aumentando a resistência e estabilidade dos rejeitos. Já a disposição desses materiais, sem previa mistura, pode ser definida como uma disposição compartilhada, onde os estéreis são usados para criar uma berma ou diques de contenção para depósito dos rejeitos.

Davies (2011) afirma que, em regiões chuvosas, as pilhas de disposição de rejeito devem conter uma zona estrutural mais externa do perímetro do depósito onde ocorre a disposição de material, funcionando como espaldares para a contenção dos rejeitos filtrados que vierem a ser depositados na porção mais interna do depósito durante a estação chuvosa. A zona estrutural deve atender a um controle mais rigoroso, principalmente de umidade e compactação, obedecendo a especificações de aterro similares à construção de uma estrutura de contenção, de acordo Figura 7.

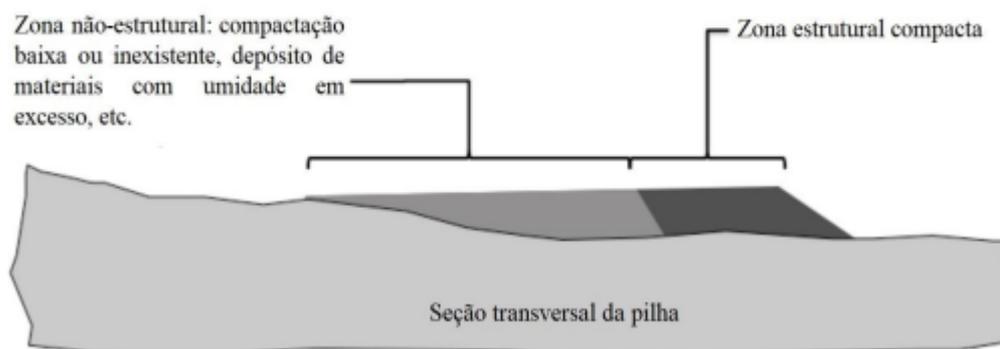


Figura 7- Representação de zonas estruturais em pilhas de rejeito filtrado. Fonte: Lupo e Hall (2010).

Além disso, Crystal et al. (2018), também ressalta a importância para o controle da taxa de alteamento do depósito, de forma que garanta tempo suficiente para ocorrência da drenagem, consolidação do material depositado e dissipação do excesso de poropressões. Para tanto, isso leva a prática do controle por meio espessura de lançamento das camadas.

2.3 Teoria Geral da Compactação

A compactação do solo é um processo induzido que visa a melhoria das suas qualidades mecânicas devido ao aumento da sua densidade, com a expulsão do ar dos vazios do solo, através da aplicação de uma energia mecânica. A partir disso, é possível garantir maior resistência, capacidade de suporte, redução da condutividade hidráulica, redução da compressibilidade (adensamento) e redução da expansão e contração no caso de argilas. Essa densificação do solo é feita por meio de equipamentos mecânicos, como o rolo compressor ou até mesmo o soquete manual (CAPUTO, 1975).

Para Pinto (2006), a compactação pode ser usada em diversas obras de engenharia, com diferentes finalidades, como por exemplo, barragens de terra, camadas de pavimentação, aterros, e no caso, camadas de pilhas de rejeito.



Figura 8- Processo de compactação com rolo compressor liso de rejeito filtrado. Fonte: Do autor.

Segundo Pinto (2006):

“O início da técnica de compactação é creditado ao engenheiro norte-americano Proctor que, em 1933, publicou suas aferições sobre a compactação de aterros, mostrando que, ao aplicar-se um certo número de passadas de um determinado equipamento no campo ou um elevado número de golpes de um soquete sobre o solo contido em um molde, a massa específica resultante é função da umidade em que o solo estiver.”

No processo de compactação a quantidade de água no solo tem grande importância, uma vez que a água atua como um lubrificante entre as partículas do solo, reduzindo o atrito entre elas, e promovendo um arranjo mais compacto. Nesse sentido, conhecer o teor de umidade é fundamental para um melhor controle de compactação.

Entretanto, Pinto (2006), pondera que em altos teores, essa umidade deixa o ar preso, dificultando a sua saída e, portanto, a redução de vazios. Por outro lado, em baixos teores, o atrito entre as partículas do solo é muito alto, o que torna difícil também a redução dos vazios. Ou seja, existe um teor de umidade ideal (umidade ótima) para atingir uma densidade específica máxima do solo (Figura 9), a uma determinada energia de compactação aplicada.

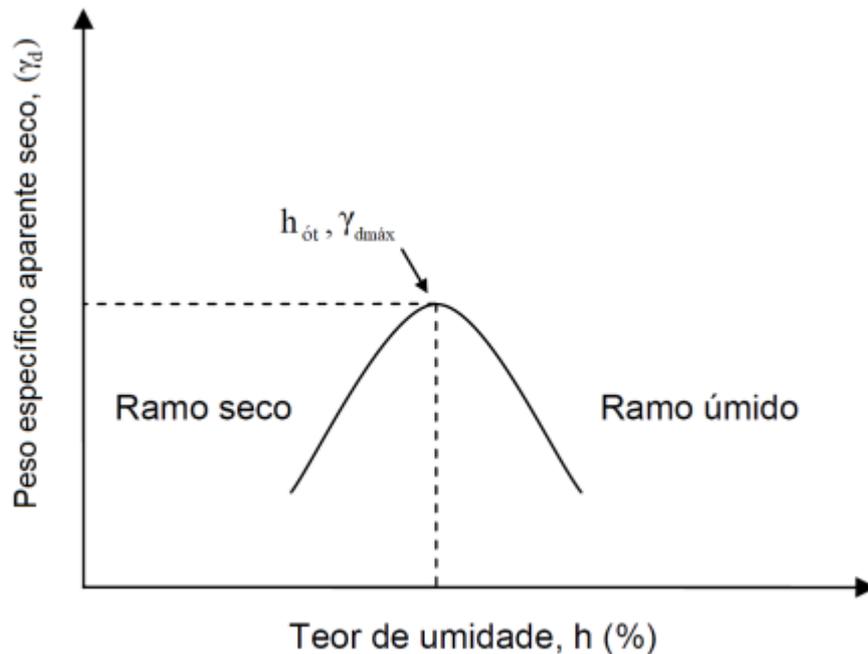


Figura 9- Aspecto da curva de compactação do solo.

Fonte: Crispim (2007), modificado por Vasconcelos (2021).

Nesse contexto, quando a compactação é feita com a umidade acima da ótima, diz-se que a compactação está no ramo úmido, e quando está abaixo, diz-se que está no ramo seco. Ainda assim, segundo Pinto (2006), quando um solo está no ramo seco, a aplicação de maior energia provoca o aumento da densidade seca, entretanto, quando está no ramo úmido, a aplicação de maior energia, pouco ou nada provoca no aumento de densidade. O que teoricamente representa um deslocamento da curva de compactação para a esquerda de acordo o aumento de energia de compactação, representado pela Figura 10.

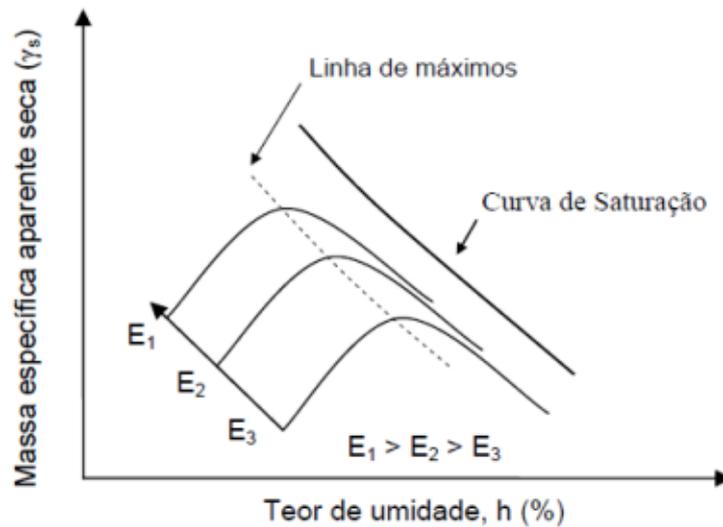


Figura 10- Influência da energia de compactação de um mesmo solo.

Fonte: DNIT (2006), modificado por Vasconcelos (2021).

Nesse sentido, o solo pode atingir mesmas densidades com umidades diferentes, isso é possível devido ao arranjo estrutural que o solo assume quando compactado. No caso de uma compactação em baixa umidade (ramo seco), a atração das partículas não é vencida e solo assume uma estrutura floculada. Já para uma compactação no ramo úmido, a água auxilia na orientação das partículas, promovendo uma estrutura alinhada, de acordo com a Figura 11.

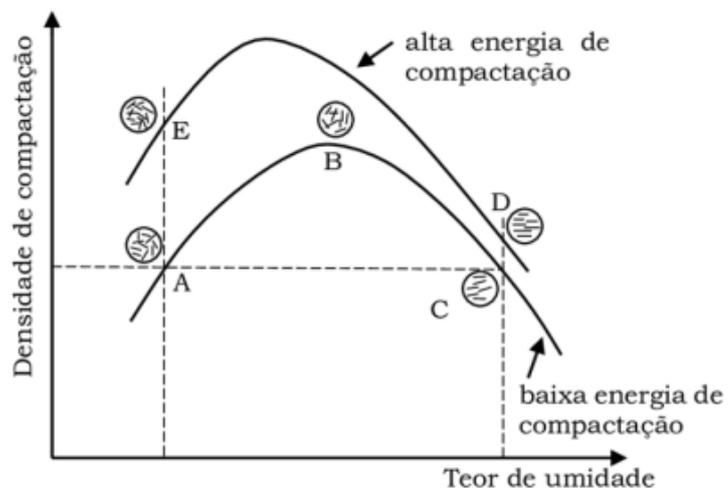


Figura 11- Estrutura de solos compactados.

Fonte: Lambe (1958), modificado por Vasconcelos (2021).

2.4 Controle Tecnológico e Parâmetros Geotécnicos

O controle tecnológico é um conjunto de métodos, conceitos, formas, ferramentas e equipamentos que acompanham o desenvolvimento de uma atividade ou produto, de forma a atingir requisitos de qualidade pré-definidos. Esse controle é aplicado do planejamento ao resultado de um produto ou atividade, garantindo a conformidade entre projeto e execução.

Na Geotecnia, os parâmetros de controle tecnológico de aterros são atribuídos a partir de suas características, índices físicos e propriedades mecânicas. Estes, por sua vez, são determinados por meio de ensaios geotécnicos ou por fórmulas de correlação. Na Tabela 3, podemos verificar alguns parâmetros que são avaliados em um controle tecnológico de acordo sua finalidade.

Tabela 3 – Principais parâmetros verificados no controle tecnológico.

Finalidade	Parâmetro	Símbolo/Relação	Norma de Referência
Determinação de Índice Físico	Índice de Vazios	$e = V_v / V_s$	NBR 12004:2015 (Máximo); NBR 16843:2020 (Mínimo)
	Peso específico dos sólidos	$\gamma_s = P_s / V_s$	NBR 6508:1984
	Umidade	$h = P_w / P_s$	NBR 6457:2016 (Estufa)
	Peso específico aparente seco	$\gamma_d = P_s / V$	NBR 7185:1986 (Cilindro Biselado); NBR 9813:2016 (Frasco de Areia)
Determinação de Propriedade Mecânica	Umidade Ótima	h_{ot}	NBR 7182:1986
	Peso específico seco máximo	$\gamma_d \text{ máx}$	NBR 7182:1986
	Permeabilidade	k	NBR 13292:1995 (Carga Constante); NBR 14545:2021 (Carga Variável)
Caracterização	Limites de Consistência	$LL \text{ e } LP$	NBR 7180:1984
	Granulometria	—	NBR 6502:1995

Fonte: Do autor.

Onde:

V_v é o volume de vazios, V_s é o volume de sólidos e V é o volume total;

P_w é o peso da água e P_s é o peso de sólidos.

Neste contexto, os ensaios de compactação e de determinação da umidade, acompanham a disposição de acordo a rotina de operação, como modo de controle, com frequência e especificações a serem regidas pelo controle de qualidade executado para a obra. Por outro lado, os ensaios de caracterização visam estudar as características do rejeito que está sendo lançado, como modo de verificação ao material previsto em projeto, como por exemplo, o ensaio de permeabilidade, que visa determinar uma propriedade mecânica, ou os ensaios de granulometria e limites de consistência que podem classificar o tipo de solo.

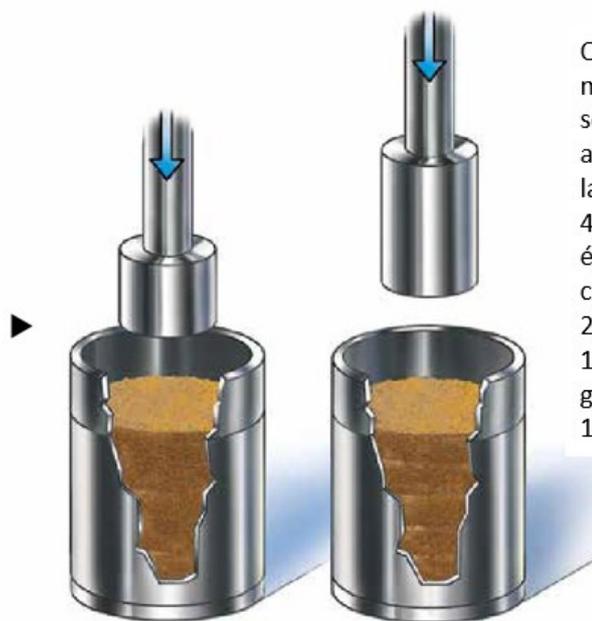
2.4.1 Ensaio de Compactação

O ensaio de Proctor busca conhecer essa umidade e qual massa específica seca máxima esse solo atinge a uma determinada energia, sua execução é normatizada pela NBR 7182:1986.

O procedimento se baseia em aplicar uma série de golpes utilizando um soquete, a uma altura padronizada em um cilindro com o solo variando a sua umidade, a partir disso é traçada a curva de compactação do solo em análise.

Em certos casos, verifica-se esse ensaio em diferentes níveis de energia (Normal, Intermediária e Modificada), como mostra a Figura 12. Assim, avalia-se o aumento da densificação variando o impacto causado pelo soquete. Na prática isso pode representar variação no número de passadas do rolo compactador.

O teste de Proctor tradicional utiliza um soquete de aproximadamente 2,5 kg lançado de uma altura de 305 mm. A amostra de solo é compactada em três camadas separadas. 26 golpes para o molde de 100mm por camada.



O teste de Proctor modificado utiliza um soquete de aproximadamente 4,5 kg lançado de uma altura de 457 mm. A amostra de solo é compactada em cima de cinco camadas separadas. 26 golpes para o molde de 100 mm por camada. 55 golpes para o molde de 152,4 mm por camada.

Figura 12 – Representação esquemática de ensaio Proctor. Fonte: Dynapac, modificado pelo autor.

Um das relações importantes nesse controle tecnológico é o Grau de Compactação (GC), que é por definição a relação entre o peso específico do solo do aterro, obtido pelo ensaio do cilindro biselado ou frasco de areia, e o peso específico máximo da mesma amostra obtido através de um ensaio de compactação, de acordo a Equação (1).

$$GC = \frac{\gamma_{d\text{campo}}}{\gamma_{d\text{max}}(\text{lab})} \times 100 \quad \text{Eq(1).}$$

2.4.2 Determinação da Umidade

A determinação da umidade é uma verificação primordial em um laboratório de solos, uma vez que permite relações de massa em condições secas, sendo uma etapa de vários outros ensaios. Além disso, o controle da umidade em campo indica condições para execução da compactação de camadas de rejeito.

O conteúdo de água em um solo pode ser verificado tanto por uma relação de volume (Umidade Volumétrica) como por uma relação de massa (Umidade

Gravimétrica). Na geotecnia, esse conteúdo é verificado em base de massa, na qual Caputo (1975), define a umidade (h) de um solo como a razão entre a massa da água (M_a) contida num certo volume de solo e a massa da parte sólida (M_s) existente nesse mesmo volume, de acordo Equação (2).

$$h (\%) = \frac{M_a}{M_s} \times 100 \quad Eq(2).$$

De maneira geral, os métodos de determinação da umidade podem ser divididos em:

- Métodos diretos, que podem ser medidos com peso de água presente em uma amostra de solo;
- Métodos indiretos, onde se verifica a umidade em função de outra propriedade.

2.4.2.1 Método da Estufa

É o método tradicional sendo normatizado pela NBR 6457:2016. Com maior precisão, sua determinação consiste na determinação da massa da amostra no seu estado natural e após secagem em estufa, verificando assim a relação da Equação (2). Esse ensaio é feito à uma temperatura de 105 - 110 °C, onde deve permanecer até apresentar constância de massa. De acordo com essa norma, solos orgânicos, turfosos ou contendo gipsita devem ser secados em estufa à temperatura de 60 - 65 °C, exigindo maior tempo de secagem, geralmente, entre 16 a 24 horas, entretanto, dependendo do tipo de solo ou se este estiver muito úmido, esse tempo pode ser maior.

Embora tenha alta precisão e resultados confiáveis em sua determinação, este método tem o excessivo tempo necessário para determinação da umidade como desvantagem, o que por vezes processos que necessitam de uma resposta rápida desse parâmetro, optam por métodos alternativos.

2.4.2.2 Método da Frigideira

Este método é orientado pela NBR 16097:2012, e consiste em secar uma determinada amostra de solo em uma frigideira por meio de um fogareiro. A principal vantagem do método é a significativa redução no tempo de secagem e possibilidade de ser empregado diretamente no campo. Contudo, esse processo tem baixa precisão, na qual a própria norma frisa que a precisão e confiabilidade dos resultados dependem exclusivamente da habilidade e do conhecimento do operador, uma vez que pode ocorrer a queima de matéria orgânica e retirada da água de cristalização da argila, além de estar sujeito a maiores interferências humanas na medição.

2.4.2.3 Método da Balança Infravermelho

O método da balança infravermelho consiste em aquecer uma certa quantidade de material em uma temperatura pré-determinada em um certo intervalo de tempo. Assim é necessário primeiramente, a determinação da curva de secagem do material a ser analisado, determinado tempo e temperatura, para uma certa quantidade de massa. A elaboração da curva é feita com a secagem de uma amostra, a uma determinada temperatura, na qual se verifica em qual tempo a perda da umidade mostrada pela própria balança passa a ser constante.

2.4.2.4 Método “Speedy”

O método de determinação do teor de umidade pelo aparelho “Speedy” (Umímetro) é normatizado pela NBR16097:2012, este aparelho é composto por um manômetro e uma câmara conjugada, na qual o teor de umidade é determinado de forma indireta pela pressão do gás resultante da reação da água contida na amostra com o carbureto de cálcio que se introduz no aparelho. A própria norma frisa que esse método é mais recomendável para solos arenosos, na qual a sua aplicação requer sempre a calibração do aparelho mediante uma correlação entre leituras obtidas no manômetro com leituras obtidas pela secagem do material em estufa.

2.4.2.5 Precisão dos Métodos

Como referência, o método da estufa é utilizado como parâmetro de calibragem para os outros métodos, visto a sua precisão e confiabilidade nos resultados. Entretanto, a busca por resultados rápidos incentivou a comparação e a validação entre a estufa e outros métodos na pesquisa. Essa validação por sua vez, depende do procedimento e do material que está sendo analisado, já que tanto fatores de execução do ensaio, quanto fatores de composição do material podem afetar a precisão dos resultados.

Na Tabela 4, podemos verificar estudos realizados que comparam esses métodos de determinação da umidade.

Tabela 4 – Estudos de comparação de métodos de determinação da umidade.

Autor	Métodos de Comparação	Material de Análise	Conclusão
Quintino et al. (2005)	Estufa, Balança Infravermelho e Micro-ondas	5 perfis de solo	O forno de micro-ondas e balança infravermelho, apresentaram resultados semelhantes.
Lucas (2019)	Estufa, Speedy	4 perfis de solo	O método speedy pode ser utilizado, devendo ser calibrado para maior precisão.
Santos et al. (2019)	Estufa, Balança Infravermelho	Sinter Feed	O método da balança infravermelho obteve mesma precisão do método convencional da estufa

Fonte: Do autor.

2.5 Análise Estatística

Costa Neto (2002), define a estatística como a ciência que se preocupa com a organização, descrição análise e interpretação de dados experimentais, visando a tomada de decisões. Na qual, pode ser dividida em duas partes: a estatística descritiva que se preocupa com a organização e descrição dos dados experimentais, e a estatística indutiva, que cuida da sua análise e interpretação.

O grande volume de dados experimentais gerados na rotina operacional do controle tecnológico de uma pilha de disposição de rejeito filtrado exige a aplicação de análises estatísticas para análise e interpretação dos resultados. A verificação de tendências e variâncias permitem a identificação de possíveis mudanças nas variáveis do processo de disposição de rejeito.

2.5.1 Estatística Descritiva

Para a estatística descritiva os principais parâmetros para descrever e sumarizar um conjunto de dados, estão apresentados na Tabela 5:

Tabela 5 – Principais parâmetros da estatística descritiva.

Parâmetro	Descrição	Equação
Média	É o valor que aponta para onde mais se concentram os dados de uma distribuição. Pode ser considerada o ponto de equilíbrio das frequências, num histograma.	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
Mediana	O valor intermediário que separa a metade superior da metade inferior do conjunto de dados. A mediana é menos sensível a valores extremos de um conjunto de observações, assim, é preferível usar a mediana a usar a média em situações onde o histograma do conjunto de valores for assimétrico, ou seja, quando houver predominância de valores discrepantes em uma das caudas.	
Variância	Quando a variação entre os dados é muito grande, a média não é suficiente para avaliar um conjunto de dados. A variância mede a diferença (dispersão) existente entre a média e os valores do conjunto. A unidade de variância é o quadrado da unidade de observação. Este fato é inconveniente e levou muitos estatísticos a usar a raiz quadrada da variância, conhecida como o desvio padrão, como um sumário da dispersão.	$S_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ii} - \bar{x}_i)^2}{n - 1}$
Desvio Padrão	Valor que quantifica a dispersão dos eventos sob distribuição normal, ou seja, a média das diferenças entre o valor de cada evento e a média central.	$\sigma = \frac{\sqrt{(x_i - \bar{x})^2}}{n - 1}$
Coefficiente de Variação	É uma medida de dispersão que se presta para a comparação de parâmetros diferentes. O desvio padrão relativo à parâmetros com valores médios diferentes não é comparável sendo recomendado nesses casos usar o coeficiente de variação, que é igual ao desvio padrão dividido pela média. O coeficiente de variação pode ainda ser multiplicado por 100, passando a ser expresso como percentagem.	$C_v = \frac{\sigma}{\mu}$

Fonte: Roriz (2009), adaptado pelo autor.

2.5.2 Erros de Medição e Identificação de Outliers

De acordo com Campello (2020), os erros de medição podem surgir a partir de três fontes, sendo:

- Erros de equipamentos, que são originados a partir de instrumentos e aparatos mal calibrados e com acurácia reduzida;
- Erros de procedimento, que são decorrentes de conhecimento insuficiente do operador e/ou procedimentos não padronizados;
- Erros aleatórios de ensaios, que não são causados pela variabilidade espacial dos solos nem por erros de equipamentos ou de procedimento.

Quando um conjunto de dados experimentais possuem uma certa tendência estatística, esses erros podem ser indicados como “outliers”, que são valores demasiadamente discrepantes desta tendência. Neste contexto, a identificação desses outliers pode ser verificada a partir de métodos estatísticos como: distribuição normal de probabilidade, histogramas, box plot, análise de resíduos, entre outros.

2.5.3 Análise de Variância

A análise de variância (ANOVA) visa, fundamentalmente, verificar se existe uma diferença significativa entre duas ou mais médias populacionais, através de testes de hipóteses utilizando a Distribuição de Fisher.

Witte (2005), pondera que a variância entre as observações é identificada a partir de várias fontes, indicando se as diferenças entre os grupos são estaticamente significativas, ou se são meramente decorrentes do acaso.

Considerando que as médias amostrais são diferentes, avalia-se a origem dessas diferenças pela variação dentro da população e entre populações. Quanto maior for essa variabilidade dentro, maior será a dificuldade para concluir se as médias entre as populações são diferentes. Desta forma, calcula-se as variâncias de duas formas diferentes, na qual se obtém o valor de F pela Equação (3).

$$F = \frac{\text{Variância Entre}}{\text{Variância Dentro}} = \frac{S_E^2}{S_D^2} \quad \text{Eq(3).}$$

O teste de hipótese indica que caso o valor de F seja maior que o F crítico, conclui-se que as médias, ou ao menos uma das médias amostrais, são significativamente diferentes, rejeitando-se a hipótese nula, de que todas as médias são iguais, de acordo com o grau de confiança adotado.

A aplicação da análise de variância supõe que as populações sigam uma distribuição normal, com variâncias iguais (ou desvio padrão), e que as amostras são aleatórias e mutuamente independentes. Entretanto, segundo Witte (2005), a desobediência moderada dessas premissas não invalida o teste, devido a robustez do Teste F.

2.5.4 Correlação e Regressão Linear

A correlação consiste na verificação de um grau de relação entre duas ou mais variáveis de um problema, expressando uma medida da associação linear entre essas variáveis.

Essa medida pode expressa pelo cálculo do coeficiente de correlação de Pearson, de Spearman, Análise Fatorial, entre outros. O coeficiente de correlação de Pearson (p) é utilizado para uma relação linear existente entre duas variáveis “x” e “y”, o que também configura uma regressão linear, de acordo Equação (4).

$$p = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum(x_i - \bar{x})^2)(\sum(y_i - \bar{y})^2)}} \quad \text{Eq(4).}$$

Para valores de $p = 1$, a correlação entre as duas variáveis é perfeita e positiva, para um caso do valor $p = -1$, a correlação é perfeita, porem negativa. No caso de

valores $\rho = 0$, não existe correlação entre as variáveis. Pela Figura 13, verifica-se correlações entre os gráficos “a”, “b” e “d”.

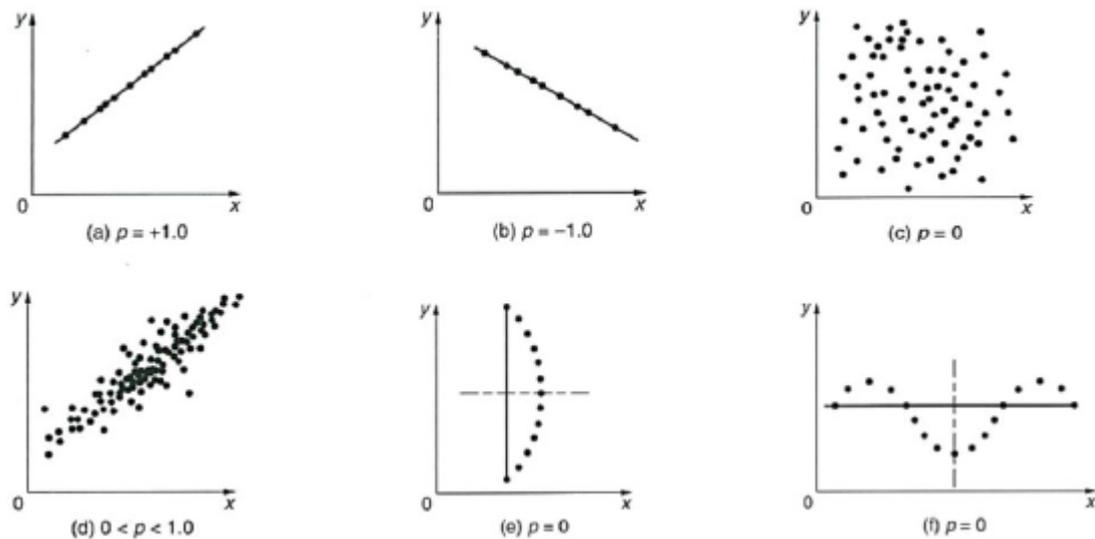


Figura 13 – Coeficientes de correlação. Fonte: Ang e Tang (1975).

Os valores de correlação de Pearson também podem ser classificados de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 – Classificação do coeficiente de correlação.

Coeficiente de Correlação (ρ)	Classificação
0,0 a 0,1	Muito Baixa
0,1 a 0,3	Baixa
0,3 a 0,5	Moderada
0,5 a 0,7	Alta
0,7 a 0,9	Muito Alta
0,9 a 1,0	Quase Perfeita

Fonte: Ang e Tang (1975).

Ainda assim, segundo Naghettini e Pinto (2007), desde que haja a relação entre duas variáveis, uma função de regressão linear poderá explicar uma parcela significativa dessas duas variáveis, tratando-se de um modelo de ajuste, a parte dos

pontos observadas não explicada, que apresentam uma variação em torno da linha de tendência, ocorre devido a uma variação aleatória chamada de variação residual.

Supondo duas variáveis que sejam X e Y , e sua regressão seja uma reta, a função desta reta será dada pela Equação (5), onde uma variável é tida como independente e outra dependente, sendo chamada de regressão linear simples.

$$Y = \alpha + \beta X + e \quad Eq(5).$$

Onde Y seria a variável dependente, X a independente α e β coeficientes do modelo, e e os resíduos da regressão.

2.5.5 Planejamento Fatorial de Experimentos

Segundo Montgomery (2009), o planejamento de experimentos possibilita o estudo de diversas variáveis simultâneas em processo, a partir de um experimento definido que reduz o número de ensaios, sem prejudicar a confiabilidade em seus resultados.

Fundamentada na teoria estatística, o planejamento fatorial relacionado à análise de superfícies de resposta, gera informações confiáveis sobre um processo, reduzindo o empirismo das técnicas de tentativa e erro (BOX et al. 1978).

O planejamento fatorial pode ser definido como o estudo de um parâmetro, variando em níveis as observações de dois ou mais fatores. Assim, se definem os níveis dos fatores como valores prefixados, e suas combinações são testadas. Em um planejamento fatorial completo, todos os níveis são testados (Cornell, 2002).

Segundo Montgomery (2009), o design de experimentos deve seguir os princípios de acordo com a Figura 14:

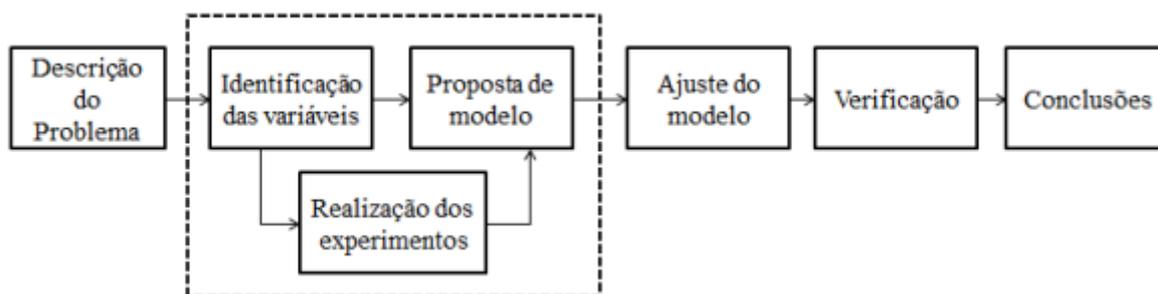


Figura 14- Princípios do planejamento de experimentos.

Fonte: Montgomery & Runger (2003), modificado por Loch (2019).

Barros Beto et al. (2010), explica que os fatores são com variáveis que podem ser controlados, e dessa forma, definida em níveis que possa exercer influência nas respostas. Considerando K o número de fatores presentes em um estudo e N um número de níveis definidos por um experimentador, o planejamento fatorial completo pode ser da ordem de N^2 , indicando um número mínimo de ensaios que devem ser feitos no estudo, de acordo com a Tabela 7.

Tabela 7 – Número de ensaios, tratamentos ou combinações de esquemas fatoriais completos.

Níveis(N)	Fatores (K)							...	K
	2	3	4	5	6	7			
2	4	8	16	32	64	128	...	2^k	
3	9	27	81	243	729	2187	...	3^k	
...	
N	N^2	N^3	N^4	N^5	N^6	N^7	...	N^k	

Fonte: Rodrigues e Lemma (2009), adaptado pelo autor.

Esses fatores também podem ser aplicados de forma qualitativa, ou seja, não necessariamente são valores numéricos. Neste caso, os fatores podem ser chamados também de classes, como por exemplo, classe superior e inferior, sendo representados por símbolos matemáticos de adição (+) e subtração (-).

Supondo um planejamento fatorial 2^2 , com quatro ensaios distintos entre os fatores A e B, com a1 e a2 como níveis mínimo e máximo do fator A e, b1 e b2 do fator B, as combinações dessa ordem indicariam resultados de acordo a Tabela 8.

Tabela 8 – Exemplo de resultados de um planejamento fatorial.

Ensaio	Fator A	Fator B	Respostas		Média
1	a ₁	b ₁	y ₁₁	y ₁₂	\bar{y}_1
2	a ₂	b ₂	y ₂₁	y ₂₂	\bar{y}_2
3	a ₁	b ₂	y ₃₁	y ₃₂	\bar{y}_3
4	a ₂	b ₁	y ₄₁	y ₄₂	\bar{y}_4

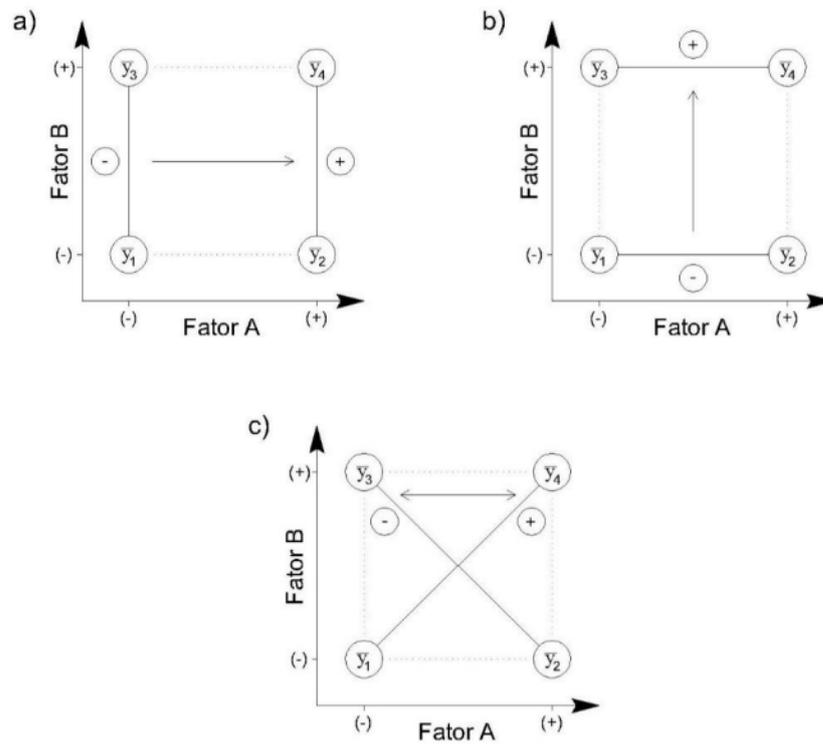
Fonte: Barros Neto et al. (2010), adaptado pelo autor.

Segundo Barros Beto et al (2010), o efeito principal e o efeito de interação podem ser calculados pelas seguintes equações, o principal efeito de A pela equação (6), e o efeito de interação AB pela Equação (7).

$$A = \frac{(\bar{y}_2 - \bar{y}_1) + (\bar{y}_4 - \bar{y}_3)}{2} \quad \text{ou} \quad A = \left(\frac{\bar{y}_2 + \bar{y}_4}{2} \right) - \left(\frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_3}{2} \right) \quad Eq(6).$$

$$AB = \left(\frac{\bar{y}_4 - \bar{y}_3}{2} \right) - \left(\frac{\bar{y}_2 - \bar{y}_1}{2} \right) \quad \text{ou} \quad AB = \left(\frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_4}{2} \right) - \left(\frac{\bar{y}_2 + \bar{y}_3}{2} \right) \quad Eq(7).$$

Esses efeitos podem ser interpretados graficamente em um sistema cartesiano de coordenadas, no qual cada eixo representa um fator, como indica a Figura 15.



a) Efeito principal do fator *A*; b) Efeito principal do fator *B*; c) Efeito de interação *AB*.

Figura 15 – Interpretação gráfica do planejamento 2^2 . Fonte: Barros Neto et al. (2010), adaptado por Leite (2018).

Além disso, Montgomery (2009), afirma que por meio de uma regressão, pode-se determinar uma equação matemática que relacione as variáveis de entrada com a variável de saída, o que possibilita verificar valores da variável de saída a partir de combinações da variável de entrada dentro dos níveis.

Essa interpretação pode ser apresentada a partir de um gráfico tridimensional com uma superfície de resposta, com a aplicação de softwares estatísticos. Em um planejamento fatorial 3^k , onde cada fator conta com três níveis de variação, pode-se obter um modelo quadrático de ajuste, resultando em uma superfície com curvatura como exemplifica a Figura 16.

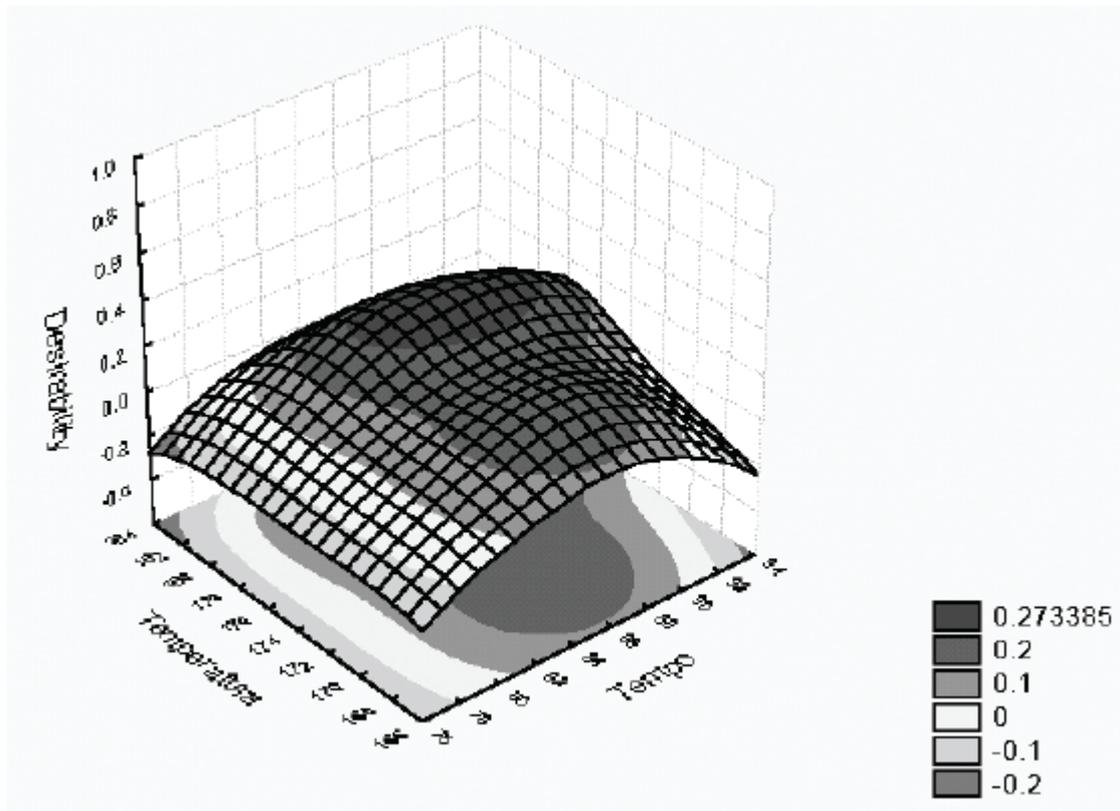


Figura 16 – Superfície de resposta de um planejamento fatorial, gerado pelo software Statistica.

Fonte: Calado (2009)

Ainda assim, Hinkelmann & Kempthorne (2008), ressaltam que é importante avaliar a qualidade de ajuste do modelo a partir de uma análise de variância (ANOVA). Entretanto Montgomery (2009), pondera que para que esta análise seja validada é preciso que os erros estejam distribuídos normalmente e de forma independente em torno da média zero e com variância constante.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Neste estudo, o material de análise, trata-se de um rejeito arenoso filtrado de beneficiamento de minério de ferro. Em termos de granulometria, o rejeito de estudo pode ser classificado como areia siltosa, com porcentagens significativas de areia (56%) e silte (42%), baixa porcentagem de argila (2%), e sem a presença de pedregulhos. Para os limites de consistência, esse rejeito não apresentou plasticidade, nem limite de liquidez.

3.2 Abordagem Estatística

Dentre os parâmetros físicos no controle tecnológico de uma pilha de disposição de rejeito filtrado, o teor de umidade mostra sua importância quando a água presente no rejeito melhora o desempenho do processo de compactação, além disso, a determinação da umidade é uma etapa presente em vários ensaios geotécnicos. Diante disso, a precisão e acurácia nos resultados de determinação da umidade, são fundamentais para confiança não só no teor de umidade, mas também em outros parâmetros vinculados a umidade.

Parâmetros que podem ser medidos de formas diferentes oferecem uma forma de “cross check” ao método de medição adotado a partir de um comparativo com os resultados obtidos por outro método. No caso de proximidade entre os resultados, gera-se maior confiança no valor do parâmetro, ao contrário disso, sugere-se uma revisão nos modelos que identifique e justifique diferenças.

No comparativo, verificou-se em um estudo de caso, a determinação do teor de umidade a partir de três métodos de medição de acordo Tabela 9.

Tabela 9 – Métodos para comparação do teor de umidade gravimétrico.

Parâmetro de Comparação	Métodos de Determinação
Teor de Umidade (%)	Estufa Balança Infravermelho Frigideira

Fonte: Do autor.

O método da estufa, comumente utilizado da determinação da umidade em vários segmentos da indústria e da pesquisa, por norma é o método mais indicado, e no estudo de caso foi utilizado como referência para as devidas comparações.

O método da balança infravermelho exige também um conhecimento da curva de secagem do material, estabelecendo-se assim o tempo e a temperatura para medição.

Aplicando a análise estatística no conjunto de dados formado por esses métodos, procurou-se indicar e qualificar proximidades ou diferenças dos resultados, validando ou não de certa forma um método de medição. Neste contexto, aplicou-se a análise de variância para avaliar afirmações hipotéticas sobre as médias das populações. Além disso, fez-se a representação dos resultados por meio de gráficos box plot buscando identificar possíveis outliers.

Para uma verificação mais direta, também comparou-se cada método com a estufa a partir de regressões lineares, buscando verificar a correlação entre esses métodos, e conseqüentemente, indicar a força dessa relação, além da equação de ajuste.

Uma vez, que o método da estufa é a referência, procurou-se desenvolver a curva de secagem da balança infravermelho aplicando o planejamento fatorial, vinculando a variável de resposta com resultados da estufa.

A análise estatística foi realizada com o uso dos softwares MiniTab 19, e do Statística, tendo como suporte o Excel, na organização de gráficos e tabelas.

3.3 Procedimento Experimental

Os procedimentos experimentais adotados foram executados nas seguintes etapas:

- 1) Coleta das amostras.
- 2) Coleta de informações sobre as características do material.
- 3) Determinação da umidade.
- 4) Aplicação estatística e análise dos resultados.
- 5) Proposta de planejamento experimental.
- 6) Análise dos resultados.

A determinação da umidade seguiu o fluxograma de execução da Figura 17, já a aplicação do planejamento experimental seguiu o fluxograma de execução da Figura 18 para o planejamento fatorial adotado.

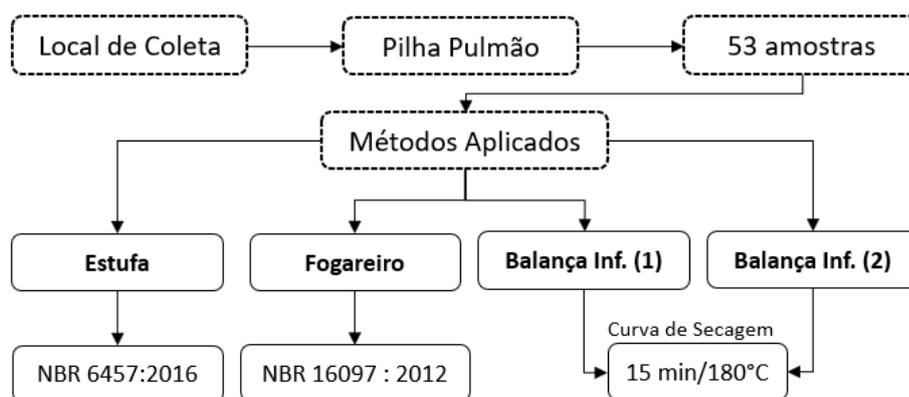


Figura 17 – Fluxograma para comparação do teor de umidade gravimétrico. Fonte: Do autor.

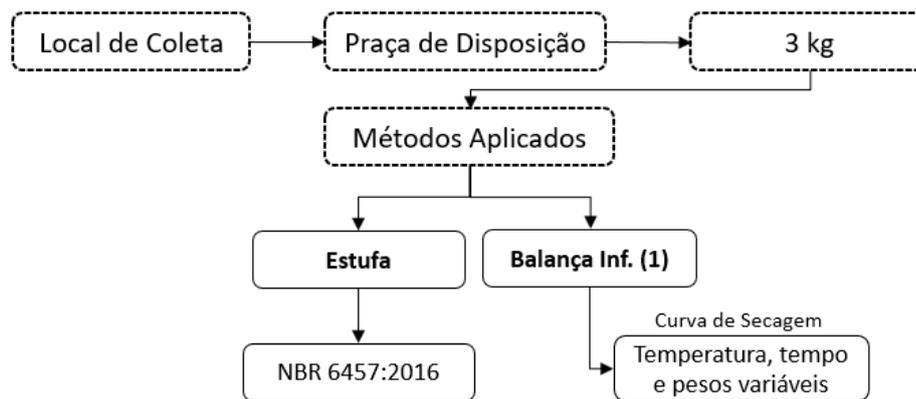


Figura 18 – Fluxograma de execução para o planejamento fatorial. Fonte: Do autor.

3.4 Coleta das Amostras

Esse trabalho, inicialmente foi pautado na comparação de métodos de determinação da umidade coletados na pilha cônica (pulmão) de rejeito (Figura 19), que compõe a planta de operação de uma pilha de disposição de rejeito filtrado.



(a)



(b)

Figura 19 – a) e b) Pilha de pulmão de rejeito do material coletado. Fonte: Do autor.

Neste comparativo, foram coletadas 53 amostras de rejeito, sempre em torno das 12 horas, procurando-se evitar influências da temperatura ambiente nas determinações de umidade.

Posteriormente, para o planejamento experimental, coletou-se uma amostra de 3 kg de rejeito em uma praça de disposição, antes da compactação da camada. Em laboratório manteve-se amostra lacrada, evitando possíveis perdas de umidade para execução de ensaios.

3.5 Determinação da Umidade

Para a determinação da umidade realizou-se 3 verificações por método, sendo a média das 3 verificações, o valor representativo para a amostra e para o método. Assim, a amostra foi coletada na pilha cônica com o ensaio da frigideira realizado logo em seguida, ao mesmo tempo em que parte da amostra era armazenada em um saco fechado e encaminhado ao laboratório para determinação pelo outros métodos.

Embora nenhuma norma não tenha nenhuma orientação a esse respeito, desprezou-se os resultados de cápsulas que apresente resultados discrepantes em relação aos demais, de forma que represente uma possível perda de umidade durante o processo de coleta ou armazenamento das amostras.

Para os métodos de determinação foram utilizados:

- 1 Estufa.
- 1 Fogareiro.
- 1 Frigideira.
- 2 Balanças Infravermelho.
- Recipiente com identificação.
- Espátula.
- Balança.
- Ficha de execução.
- Saco plástico.
- Peneira.

3.5.1 Método da Estufa

A determinação pela estufa seguiu orientações normativas da NBR 6457:2016, estando a 105°C por 24 horas na estufa (Figura 20). A norma prevê que sejam pelo menos três determinações por amostra de solo, com o resultado expresso com uma casa decimal. Além disso, a norma prevê a secagem total da amostra, na qual o recipiente atinja uma constância de massa, além disso uma quantidade de solo a ser usado em função dos tamanhos dos grãos, de acordo tabela 10.

Tabela 10 – Quantidade de material em função da dimensão dos grãos.

Dimensão dos grãos maiores contidos na amostra, determinada visualmente (mm)	Quantidade de material (em massa seca) a tomar (g)	Balança a ser utilizada	
		Capacidade nominal (g)	Resolução (g)
< 2	30	200	0,01
2 a 20	30 a 300	1500	0,1
20 a 76	300 a 3000	5000	0,5

Fonte: NBR 6457:2016.

Dessa forma, a partir das características do rejeito, realizou-se a verificação da perda de peso na estufa a partir de 30 gramas de rejeito, considerando o peso perdido a massa da água, e posteriormente determinou-se o teor de umidade a partir da Equação (2).



Figura 20 – a) Execução do ensaio pelo método da estufa. b) Recipientes com rejeito para execução do ensaio. Fonte: Do autor.

3.5.2 Método da Frigideira

A determinação pelo método da frigideira seguiu orientações da NBR 16097:2012. Desta forma, utilizou-se 200 gramas de rejeito para sua determinação em fogo baixo (Figura 21), na qual interrompeu-se o aquecimento ao perceber a não presença de vapor de água ao colocar uma placa de vidro um pouco acima da amostra, posteriormente foi determinada a umidade pela Equação (2)



Figura 21 – a) e b): Execução do ensaio pelo método da frigideira. Fonte: Do autor.

3.5.3 Método da Balança Infravermelho

A determinação pelas balanças seguiu orientações de seu manual de instrução, a princípio com um tempo de secagem de 15 minutos a 180°C, que considerou a máxima temperatura possível do equipamento para determinar a umidade proporcionaria um menor tempo de ensaio. Esses valores foram indicados após um teste com duas amostras que tiveram estabilização da perda de peso em um tempo em 15 minutos a 180°C.

A balança infravermelho utilizada foi a Marte (Modelo ID200), com carga máxima de até 210 gramas, a própria balança faz o cálculo da Equação (2), já emitindo o próprio teor de umidade no final. No estudo, foi feita o ensaio com um peso de 35 gramas, quantidade que preenchia boa parte do recipiente (Figura 22).

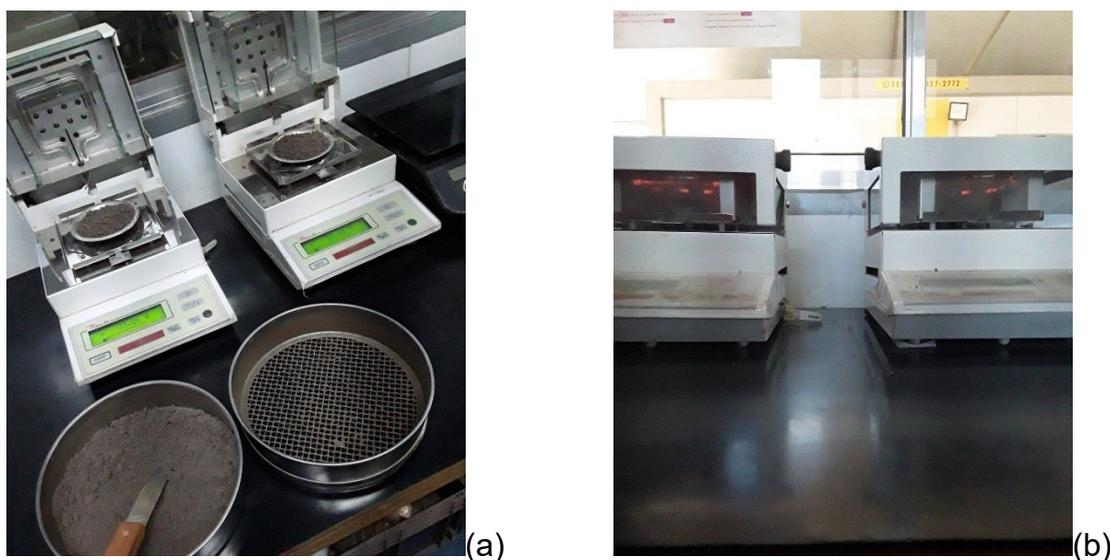


Figura 22 – a) Preparação de recipientes com rejeito. b) Execução do ensaio pelo método da balança infravermelho. (Fonte: Do autor).

3.6 Planejamento Experimental

A partir dos resultados e análises, considerou-se revisar o peso, tempo e temperatura adotados a partir de uma curva de secagem determinada por um planejamento fatorial como estudo complementar, na qual os fatores foram justamente, o peso amostra, temperatura e tempo de secagem, sendo a variável de resposta, a diferença entre medições da estufa e da balança infravermelho. Ou seja, buscou-se um experimento que determina a curva de secagem da balança infravermelho, tendo a estufa como um parâmetro de calibração. Assim, essa diferença entre a umidade determinada pela estufa e pela balança infravermelho foi

estabelecida em termo percentuais, para ampliação dos intervalos da superfície de resposta.

O planejamento adotado foi da ordem 3^3 , com seus níveis definidos conforme Tabela 11, representado por um total de 27 interações, de acordo com a Figura 23.

Tabela 11 – Fatores e níveis escolhidos no planejamento fatorial.

Fatores	Níveis		
	Inferior	Médio	Superior
Massa (g)	30	35	40
Tempo (min)	10	15	20
Temperatura (°C)	140	160	180

Fonte: Do autor.

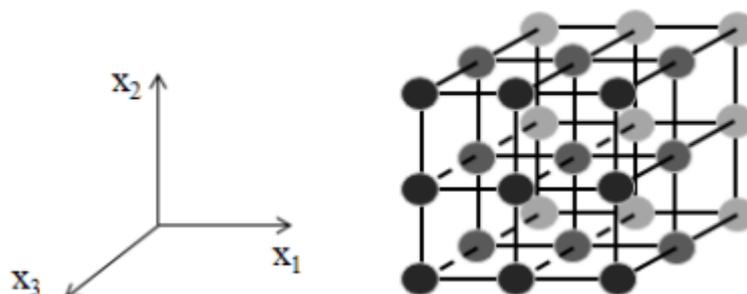


Figura 23 – Representação espacial de experimento 3^3 .

Fonte: Montgomery (2009), modificado pelo autor.

A realização dos ensaios seguiu as mesmas considerações para balança infravermelho e estufa descritas anteriormente, para cada determinação na balança infravermelho, houve um respectivo ensaio correspondente de determinação realizado na estufa. A realização destes ensaios, seguiram ordem aleatória de interações, para melhor distribuição dos erros no experimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O comparativo entre os métodos de determinação da umidade, considerando a média dos ensaios, apresentou os seguintes resultados para as 53 amostras, de acordo com a Figura 24 e no Apêndice A, seguindo a ordem de execução dos ensaios.

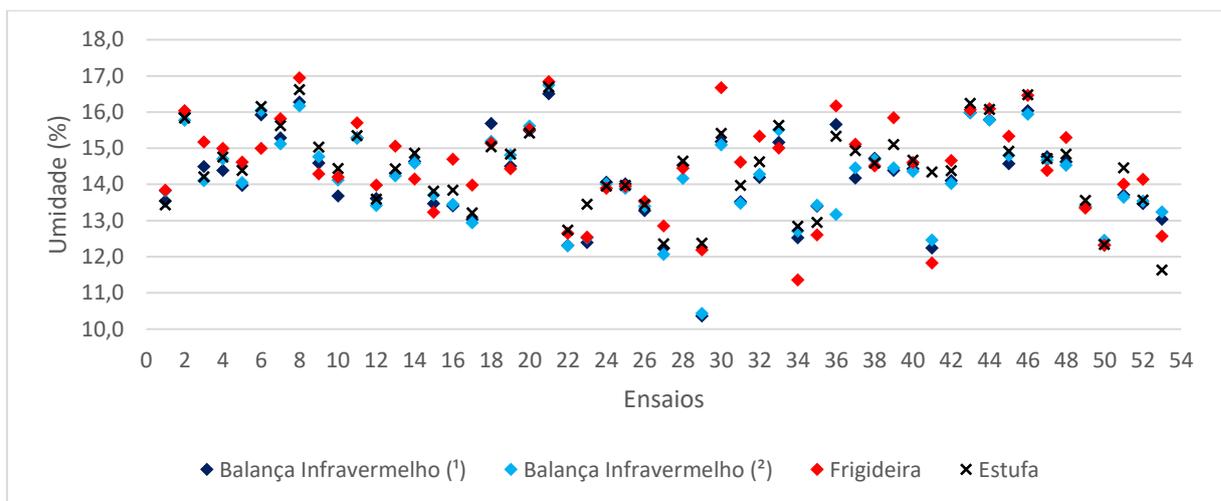


Figura 24 – Gráfico de dispersão para os ensaios de umidade realizados. Fonte: Do autor.

Observando a dispersão dos dados, e considerando os pontos da estufa como referência podemos verificar uma proximidade entre as duas balanças infravermelho. Por outro lado, verifica-se um maior distanciamento entre os pontos da frigideira, em relação a estufa, essas discrepâncias também podem ser observadas pelos desvios padrões da Tabela 12.

Tabela 12 – Estatísticas descritivas para os dados analisados.

Variável	Contagem	Média	DesvPad	Variância	Mínimo	Máximo	Amplitude
Balança Infravermelho (1)	53	14,197	1,246	1,553	10,36	16,5	6,14
Balança Infravermelho (2)	53	14,176	1,213	1,47	10,433	16,737	6,303
Frigideira	53	14,488	1,324	1,753	11,36	16,947	5,587
Estufa	53	14,452	1,163	1,353	11,633	16,687	5,053

Fonte: Do autor.

Pelo gráfico “box plot” da Figura 25, podemos verificar a ocorrência de outliers presentes nos dados amostrais das duas balanças infravermelho, e da frigideira, representados pelas amostras 29 e 34. Quando comparamos esses pontos diretamente com seus respectivos pontos de outro método de determinação percebemos uma diferença significativa entre os métodos para estas amostras, indicando uma possível perda de umidade da amostra no caso das balanças, ou uma possível mediação precoce no ensaio na frigideira. Além disso, as amostras 41 e 53, demonstram uma discrepância significativa com a estufa, indicando um possível erro de execução do ensaio na conservação da umidade da amostra.

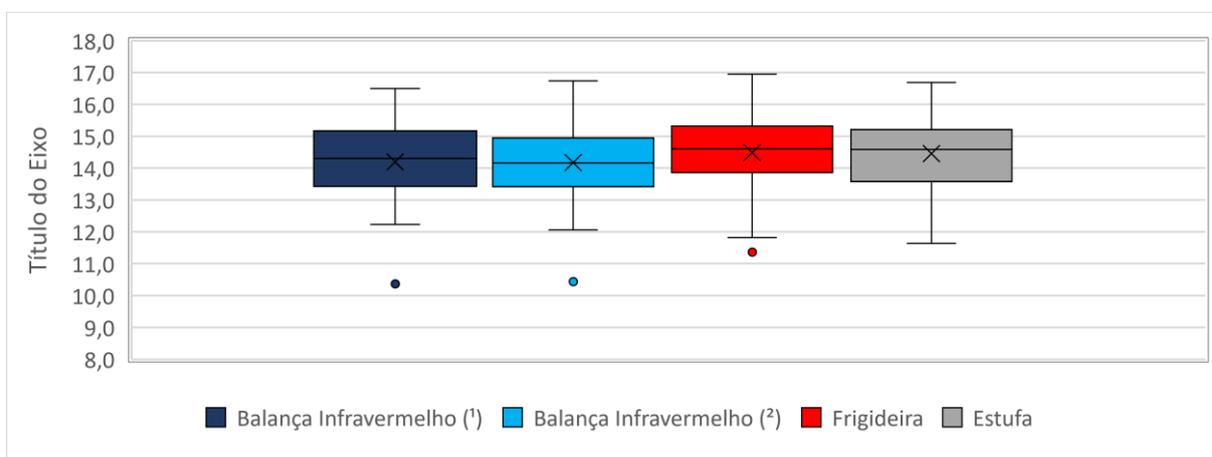


Figura 25 – Gráficos box plot para cada método analisado. Fonte: Do autor.

Com a identificação dos outliers, e consequente, tratamento do conjunto amostral. Para a análise das médias, a aplicação da análise de variâncias considerou duas hipóteses, sendo elas apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Hipóteses consideradas na análise de variância.

Hipótese nula	Todas as médias são iguais
Hipótese alternativa	Nem todas as médias são iguais
Nível de significância	$\alpha = 0,05$
Linhas não usadas	4
<i>*Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise</i>	

Fonte: Do autor.

Tabela 14 – Análise de variância para métodos de determinação da umidade.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	4,272546202	3	1,42418207	1,1913578	0,314284	2,65164
Dentro dos grupos	229,5221125	192	1,19542767			
Total	233,7946587	195				

Fonte: Do autor.

A partir do valor F inferior ao F crítico pode-se corroborar que não existem diferenças entre os métodos de determinação da umidade, rejeitando-se a hipótese alternativa. Além disso, utilizando o método LSD de Fisher, também pode-se verificar esta constatação.

Tabela 15 – Informações de Agrupamento Usando o Método LSD de Fisher e 95% de Confiança.

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Média</i>	<i>Agrupamento</i>
Balança Infravermelho (¹)	49	14,373	A
Balança Infravermelho (²)	49	14,337	A
Frigideira	49	14,692	A
Estufa	49	14,587	A

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Fonte: Do autor.

A validação do modelo e dos testes aplicados nos dados pode ser verificada a partir da análise dos resíduos. Para tanto, o histograma (Figura 26) e o gráfico probabilístico normal dos resíduos (Figura 27) evidenciam a normalidade dos erros, na qual os pontos alinhados na reta que representa a identidade dos dados amostrais e teóricos, o que quer dizer uma boa modelagem para as comparações.

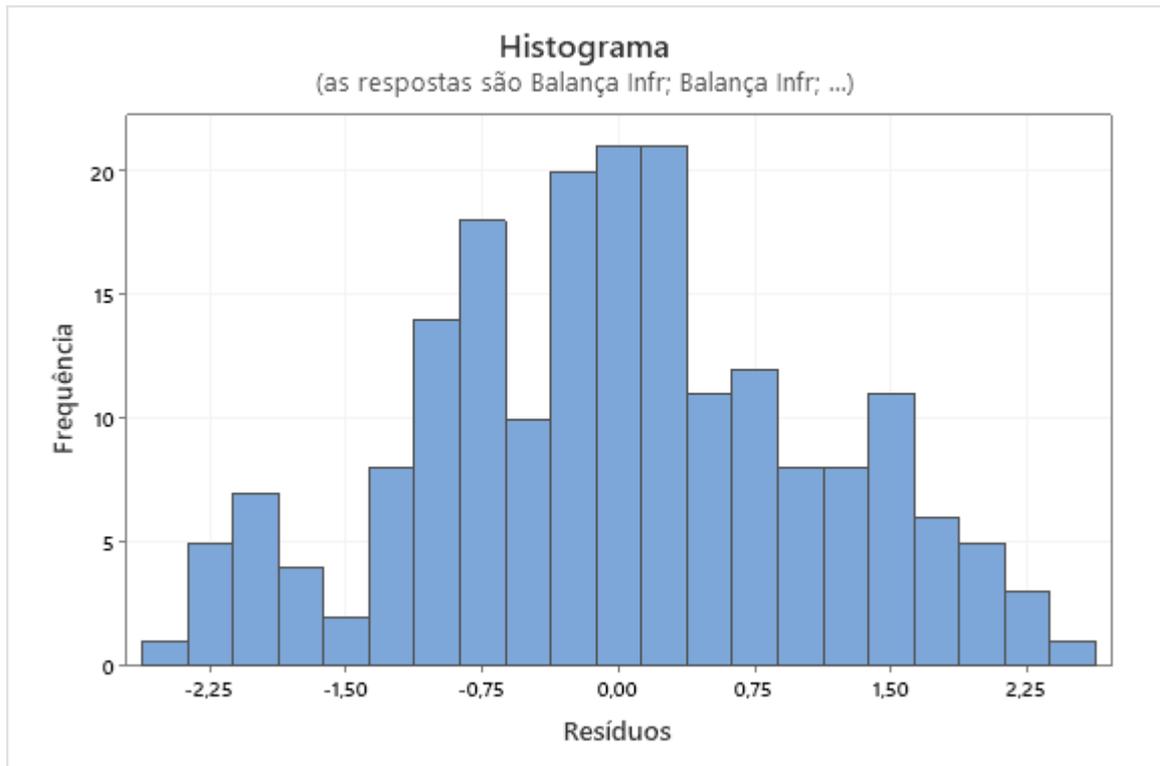


Figura 26 – Histograma de resíduos gerados pelo modelo. Fonte: Do autor.

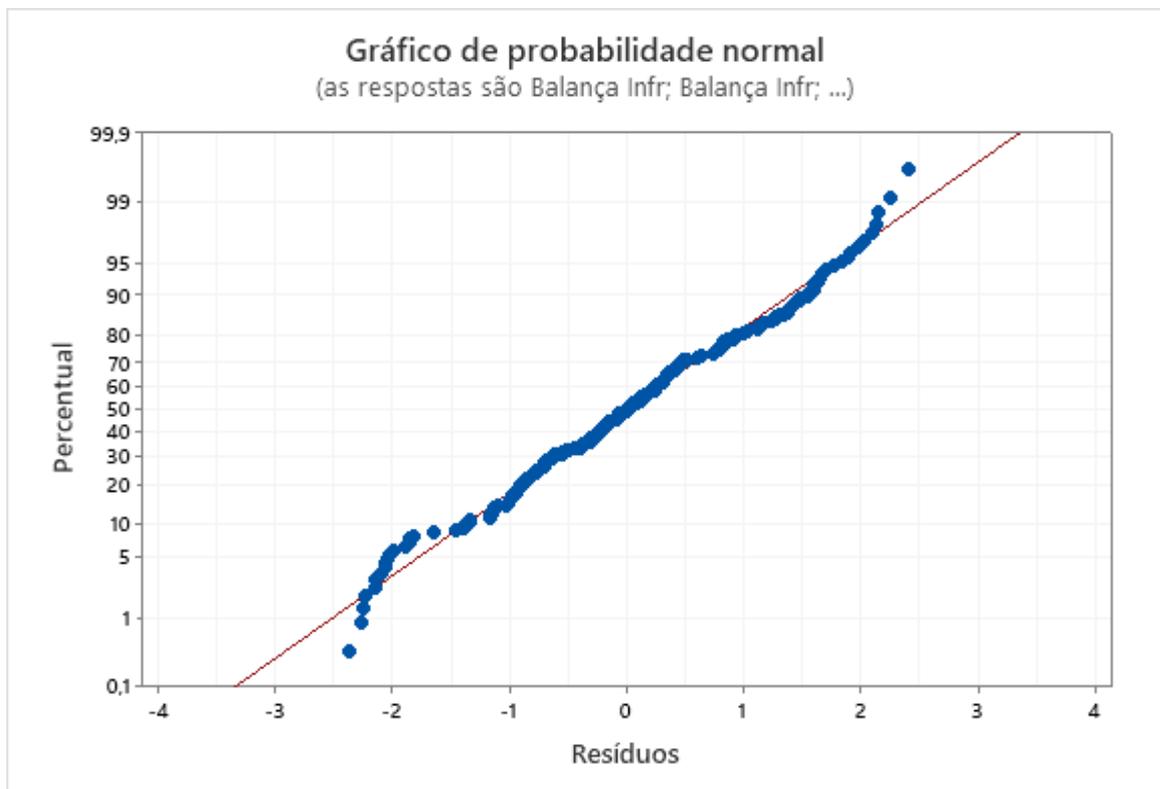


Figura 27 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos. Fonte: Do autor.

Considerando os valores médios e o desvio de cada método, a melhor relação está entre a balança infravermelho (1) e a balança infravermelho (2), obviamente por se tratarem do mesmo método. Contudo comparando-se com a estufa, observamos que a partir da média, tendemos a dizer que a frigideira tem um melhor desempenho que as balanças, entretanto o seu desvio padrão indica uma maior dispersão dos dados que a estufa, provavelmente devido a susceptibilidade ao erro de execução no ensaio, uma vez que a manipulação do ensaio está submetida a maiores interferências humanas que os outros métodos, como influência da temperatura e do ar durante sua execução.

Com as balanças infravermelho tem-se uma diferença maior na média com a estufa, comparado ao método da frigideira, entretanto o desvio de ambas as balanças é mais próximo ao desvio da estufa. Assim, para uma melhor comparação entre os métodos aplicou-se uma regressão linear, estabelecendo uma reta de ajuste linear, e a significância da correlação entre métodos.

Assim as Figuras 28, 29 e 30 apresentam as regressões aplicadas, comparando estufa com a frigideira e posteriormente, estufa com a balança infravermelho 1 e 2, de acordo. Além disso, a Tabela 16 resume os dados de coeficiente de determinação para os modelos, bem como o coeficiente de correlação.

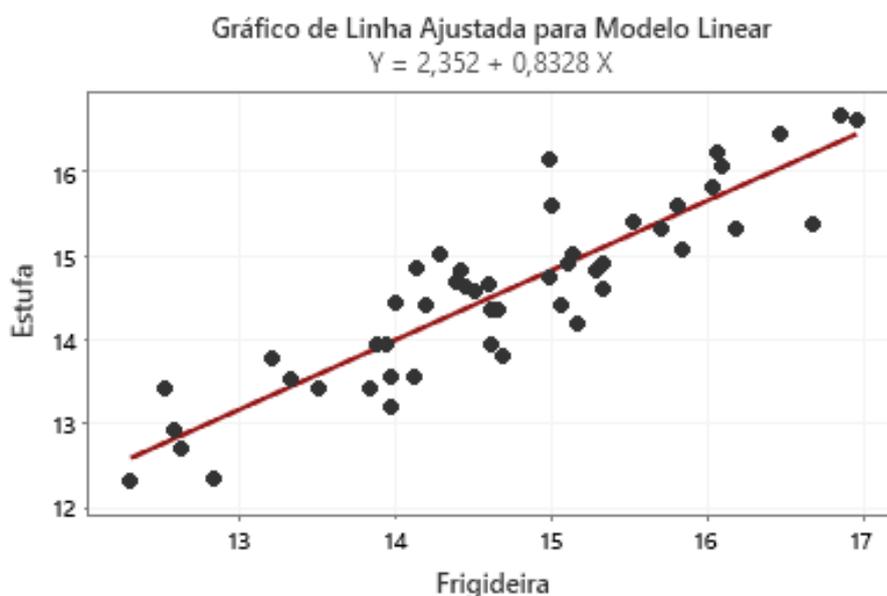


Figura 28 – Gráfico de regressão entre Frigideira e Estufa. Fonte: Do autor.

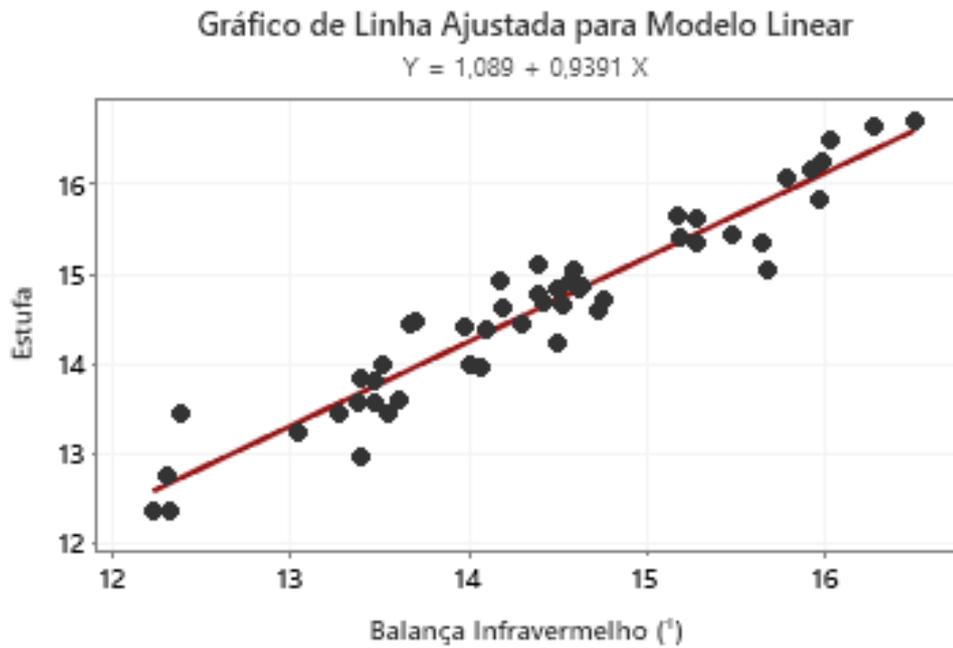


Figura 29 – Gráfico de regressão entre Balança Infravermelho (1) e Estufa. Fonte: Do autor.

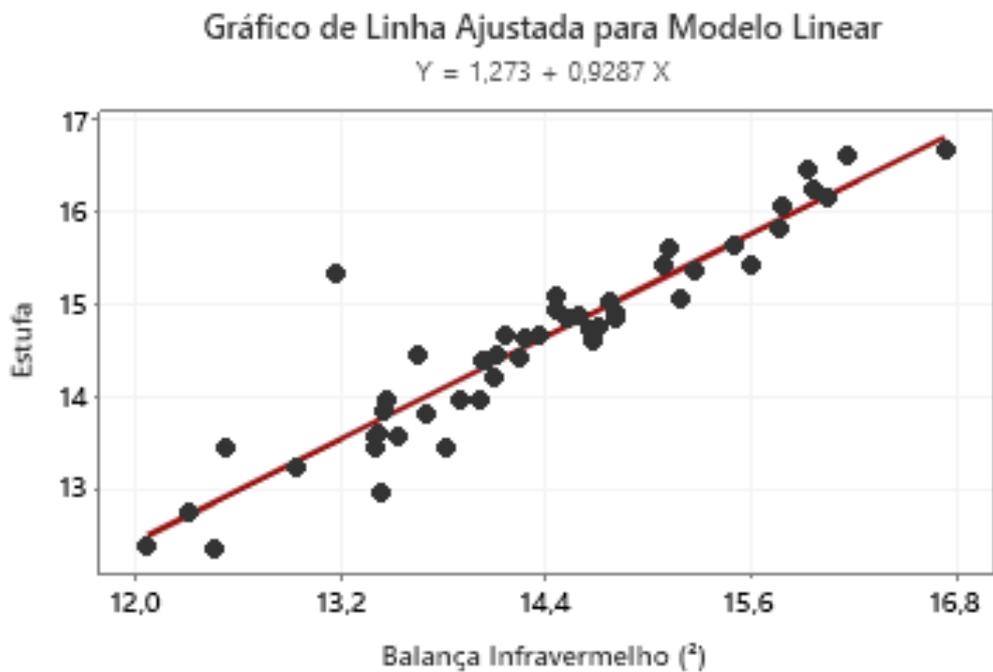


Figura 30 – Gráfico de regressão entre Balança Infravermelho (2) e Estufa. Fonte: Do autor.

Tabela 16 – Coeficientes de correlação e regressão gerado nas comparações.

Método de Referência	Comparação	Coeficiente de Determinação - (R ²)	Coeficiente de Correlação - (ρ)
Estufa	Balança Infravermelho (1)	91,41%	0,96
	Balança Infravermelho (2)	87,29%	0,93
	Frigideira	80,43%	0,90

Fonte: Do autor.

Considerando os resultados da Tabela 16, com o coeficiente de correlação de cada comparação, e da Tabela 6, podemos classificar como uma correlação quase perfeita entre os métodos, de acordo Ang e Tang (1975).

De outra forma, a partir do coeficiente de determinação gerado nas regressões podemos afirmar que a melhor relação é entre a Balança Infravermelho (1) e a Estufa. Na qual, pode ser descrita pela Equação (8).

$$y = 1,089 + 0,9391x \quad \text{Eq(8).}$$

Onde “ x “ seria uma determinação pelo método da balança infravermelho e “ y “ seu valor ajustado para o método da estufa.

Ainda assim, a semelhança entre esses métodos pelo desvio padrão e diferença entre as médias, sugere talvez uma descalibrarem do equipamento, ou provavelmente, uma configuração inadequada dos fatores de secagem. Diante disso, o planejamento fatorial buscou revisar esses parâmetros para uma melhor relação entre a balança infravermelho (1) com a estufa.

O planejamento fatorial 3³ aplicado teve as seguintes interações e variáveis, de acordo Tabela 17, na células com “ * “, indicam parâmetros que não puderam ser medidos no experimento.

Tabela 17 – Combinações de variáveis e desvios correspondentes do planejamento fatorial.

Combinação	T (°C)	P (g)	t (min)	Desvio (%)		
				1	2	3
1	140	30	10	17,96	17,96	17,42
2	140	30	15	0,04	-0,51	*
3	140	30	20	-1,05	-1,05	-1,05
4	140	35	10	25,27	24,73	25,81
5	140	35	15	6,32	5,78	6,32
6	140	35	20	-0,18	-1,26	-0,72
7	140	40	10	24,93	32,05	32,60
8	140	40	15	8,49	12,88	12,88
9	140	40	20	1,92	3,01	1,92
10	160	30	10	18,37	16,76	15,68
11	160	30	15	3,33	2,26	2,79
12	160	30	20	-0,43	-0,43	-0,43
13	160	35	10	17,51	16,44	15,37
14	160	35	15	1,98	1,98	1,45
15	160	35	20	0,37	0,37	*
16	160	40	10	23,29	23,83	22,74
17	160	40	15	5,88	6,96	5,33
18	160	40	20	2,07	1,52	0,98
19	180	30	10	-4,00	-5,11	-0,13
20	180	30	15	-6,77	-6,77	*
21	180	30	20	-6,77	-6,77	-2,90
22	180	35	10	5,78	5,23	4,15
23	180	35	15	-1,81	-2,35	*
24	180	35	20	-1,81	-2,35	*
25	180	40	10	15,72	12,44	9,70
26	180	40	15	1,50	-0,15	0,40
27	180	40	20	0,95	-0,15	-0,15

Nota: * valores não determinados; Fonte: Do autor.

Assim, como o desvio representa a diferença entre os métodos de forma percentual, valores positivos do desvio indicam teor de umidade menor determinado pela balança em relação ao medido pela estufa, de outra forma, valores negativos indicam um teor maior determinado pela balança, representando uma possível queima de material pela balança. Assim, com esses resultados e com o auxílio do software Statistica, foram geradas as superfícies de respostas para cada nível do fator peso, de acordo as Figuras 31, 33, 35, e suas respectivas projeções nas Figuras 32,34,36.

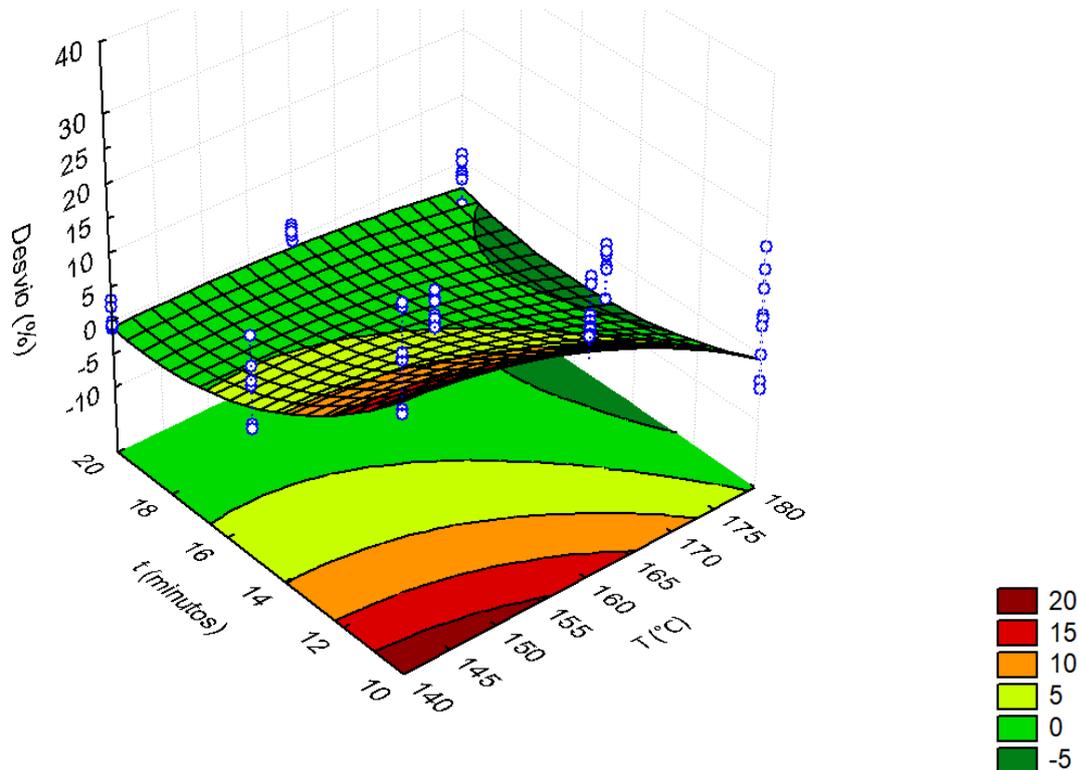


Figura 31 – Superfície de resposta do planejamento fatorial aplicado para 30 gramas de rejeito.
 Fonte: Do autor.

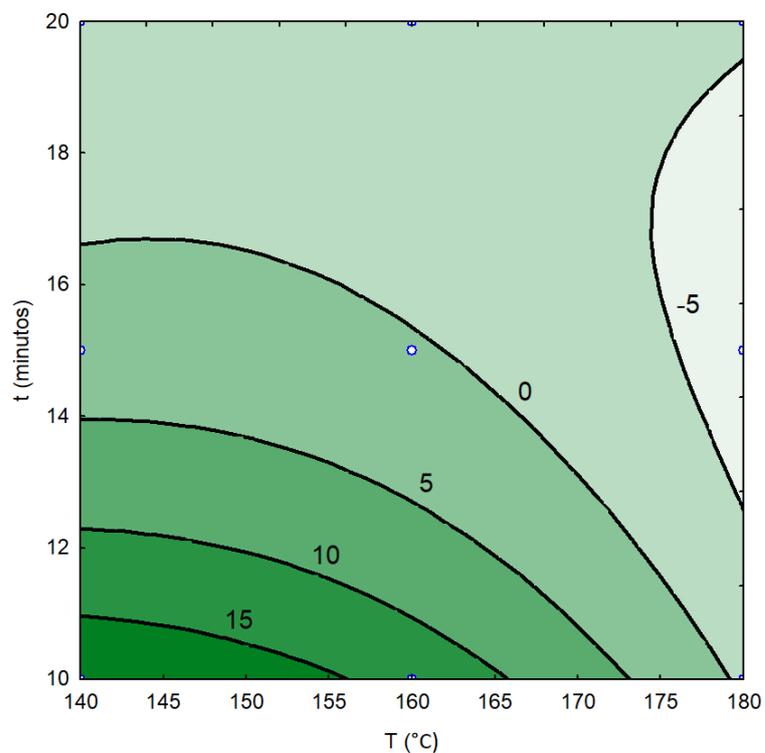


Figura 32 – Projeção da superfície de resposta do planejamento fatorial aplicado para 30 gramas de rejeito. Fonte: Do autor.

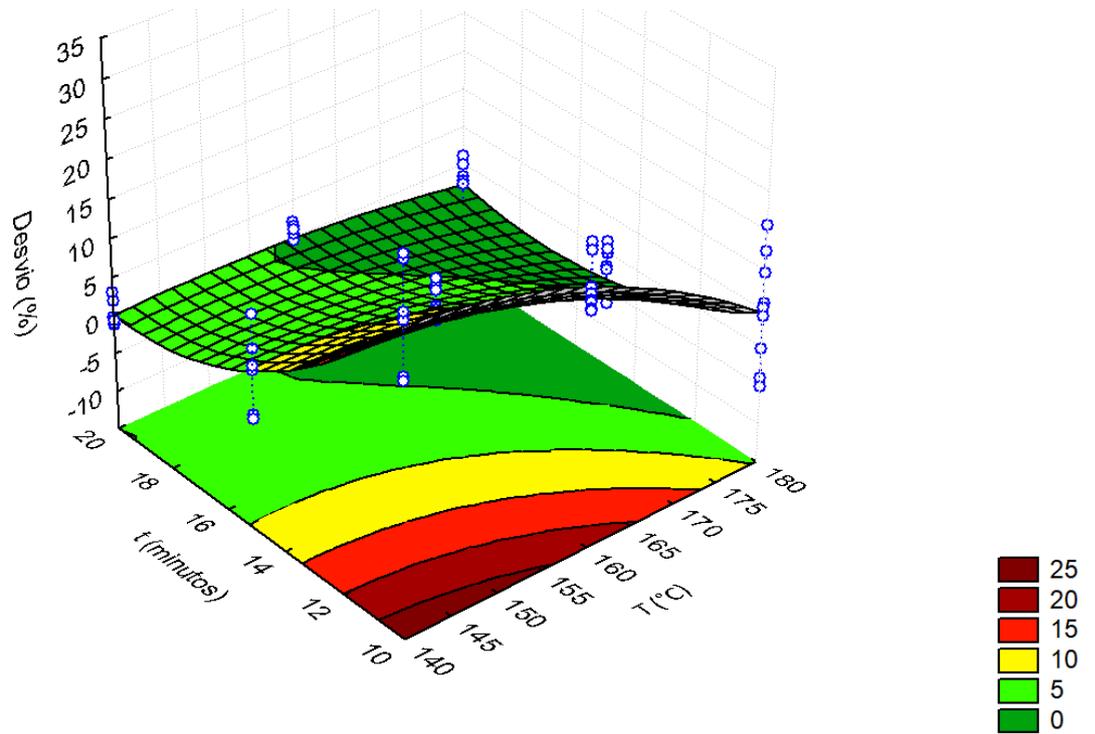


Figura 33– Superfície de resposta do planejamento fatorial aplicado para 35 gramas de rejeito.
 Fonte: Do autor.

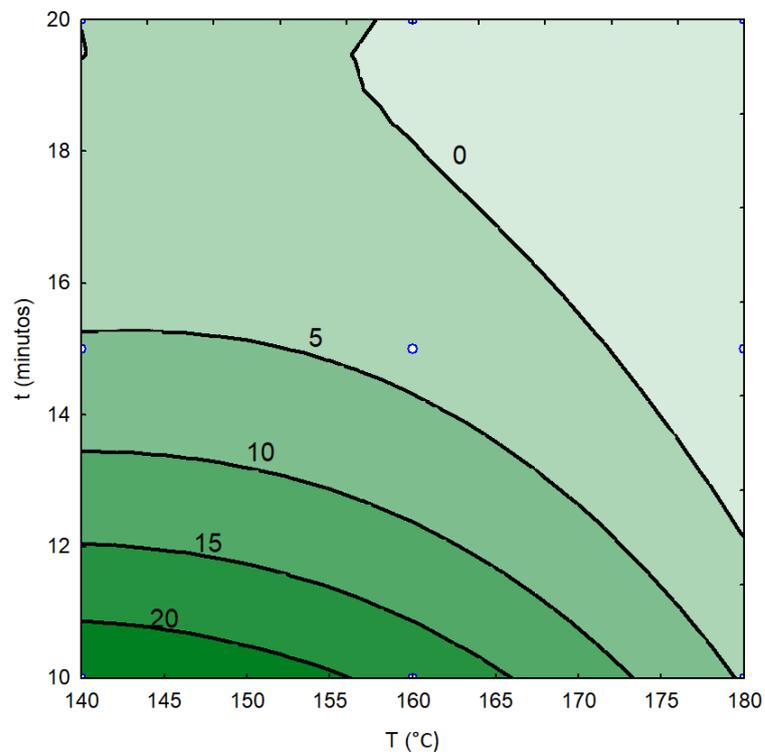


Figura 34 – Projeção da superfície de resposta do planejamento fatorial aplicado para 35 gramas de rejeito. Fonte: Do autor.

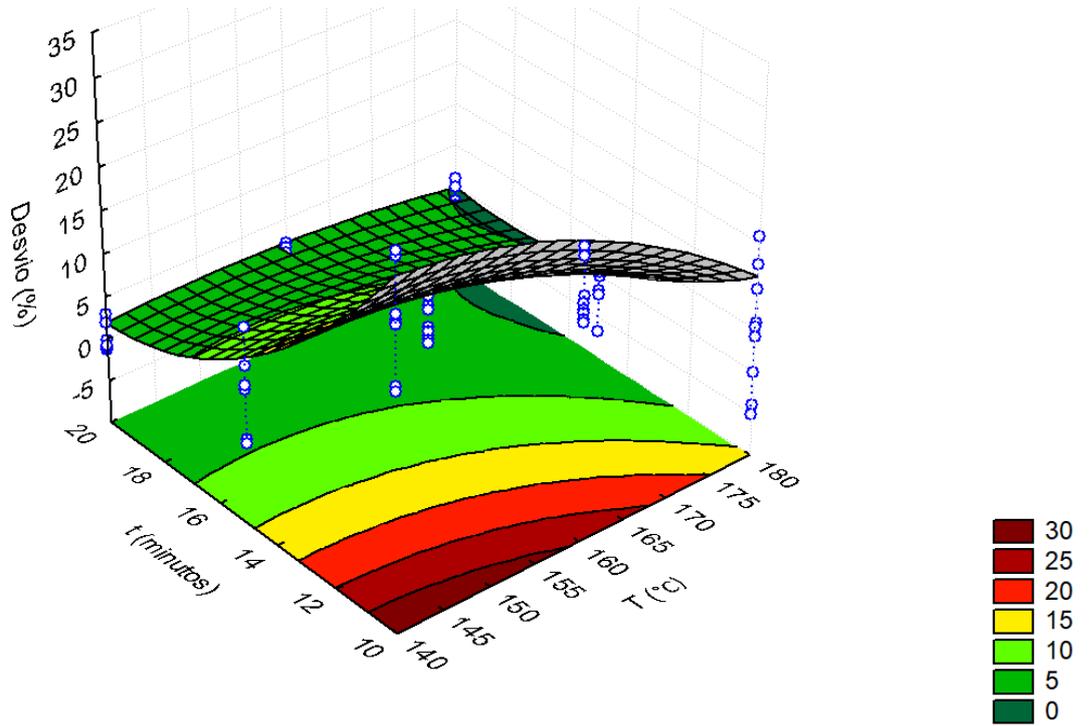


Figura 35 – Superfície de resposta do planejamento fatorial aplicado para 40 gramas de rejeito.

Fonte: Do autor.

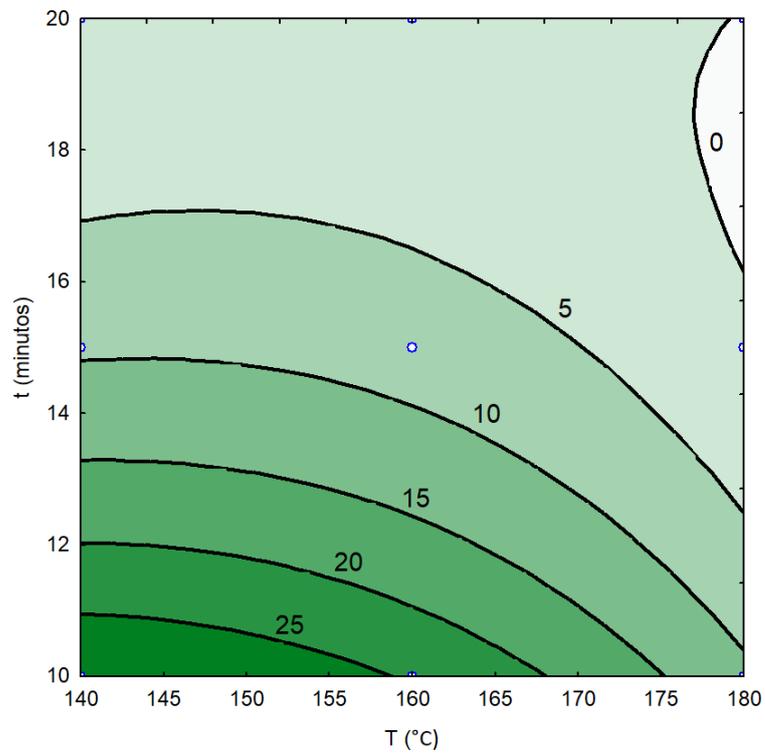


Figura 36 – Projeção da superfície de resposta do planejamento fatorial aplicado para 40 gramas de rejeito. Fonte: Do autor.

A partir das Figuras 31 a 36 constatamos que o aumento da temperatura reduz o tempo de determinação, da mesma forma que o aumento do peso na balança, aumenta também a energia necessária a ser envolvida no ensaio, obviamente as próprias projeções indicam que é necessário mais tempo e mais energia térmica para os pesos maiores.

Além disso os resultados para a determinação da umidade com 30 gramas de rejeito com uma temperatura de 180°C, e tempo de secagem acima de 12 minutos mostram que a balança infravermelho tende a apresentar teores de umidade maiores que a estufa, indicando uma possível queima de material no rejeito. No caso de sua aplicação com a temperatura de 140°C, o tempo mínimo para de determinação para melhor precisão nos resultados seria em torno de 17 minutos.

Para a determinação com 35 gramas de rejeito, verifica-se uma temperatura mínima a ser aplicada em torno de 160°C dentro do intervalo de tempo estudado, na qual com suposta aplicação de 180C o tempo mínimo de secagem seria em torno de 13 minutos.

Para a determinação com 40 gramas de rejeito, verifica-se uma temperatura mínima a ser aplicada próxima de 180°C com um tempo mínimo de secagem seria em torno de 17 minutos.

Essas limitações na determinação por 35 e 40 gramas de rejeito, sugerem um estudo mais detalhado com outra faixa de intervalo de tempo com valores superiores a 20 minutos, ou seja, uma redefinição nos níveis do fator tempo do planejamento fatorial adotado. Da mesma, forma que rejeitos com teores de umidade superiores ou inferiores ao estudado aqui exigiria uma nova cura de secagem e, portanto, um novo estudo, uma vez que mais água no material demandaria mais energia no processo para sua determinação.

Assim, considerando que a as determinações de umidade são feitas com 35 gramas de rejeito, pode-se indicar uma temperatura de 170°C com 16 minutos, valores estes que representam uma boa precisão ao se comparar com estufa.

Os resultados da análise de variância dos resultados de determinação da umidade com o modelo, são apresentados na tabela 18. Adotando um nível de significância de (α) 0,025, para o teste de hipóteses, a análise de variância apresentou uma proporção de variabilidade de $R^2 = 0,972$ e o modelo não apresenta falta de ajuste ($p = 0,034021$), ou seja, as interações entre os fatores mostraram-se significantes para o modelo.

Tabela 18 – Análise de variância das interações do planejamento fatorial adotado.

Fator	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F	p
T	1308,539	1	1308,539	599,640	3,86E-29
T ²	115,669	1	115,669	53,006	2,44E-09
P	727,563	1	727,563	333,407	1,66E-23
t	3593,910	1	3593,910	1646,915	0,00E+00
t ²	498,066	1	498,066	228,239	4,52E-20
T ² x P	87,693	1	87,693	40,185	7,01E-08
T ² x P ²	27,323	1	27,323	12,521	8,92E-04
T x t	620,422	1	620,422	284,309	4,87E-22
T x t ²	12,403	1	12,403	5,684	2,10E-02
T ² x t	23,190	1	23,190	10,627	2,03E-03
P x t	133,994	1	133,994	61,403	3,41E-10
Falta de ajuste	65,764	15	4,384	2,009	3,40E-02
Erro	106,928	49	2,182		
Total	7291,066	75			

Fonte: Do autor.

A equação final ajustada para o modelo pode ser representada pela Equação (9), na qual x_1 representa os valores para o fator temperatura, x_2 representa os valores para o fator peso, e x_3 representa os valores para o fator tempo.

$$D(\%) = 4,018x_1 - 0,016x_1^2 + 1,672x_2 - 5,005x_3 + 0,546x_3^2 - 4,96 \cdot 10^{-5}x_1^2x_2 + 8,33 \cdot 10^{-7}x_1^2x_2^2 - 0,112x_1x_3 - 0,002x_1x_3^2 + 0,001x_1^2x_3 - 0,077x_2x_3 \quad Eq(9).$$

Para avaliar a adequação do modelo (Equação 9) foram plotados os gráficos da probabilidade normal dos resíduos (Figuras 37 e 38) e a verificação dos resíduos versus valores previstos (Figuras 39). Estes gráficos mostram que os valores residuais seguem uma distribuição normal e estão aleatoriamente distribuídos. Portanto, o modelo aplicado é adequado para descrever a diferença na determinação da umidade entre a estufa e a balança infravermelho como uma função da temperatura (T), do tempo (t) e da quantidade de rejeito (P).

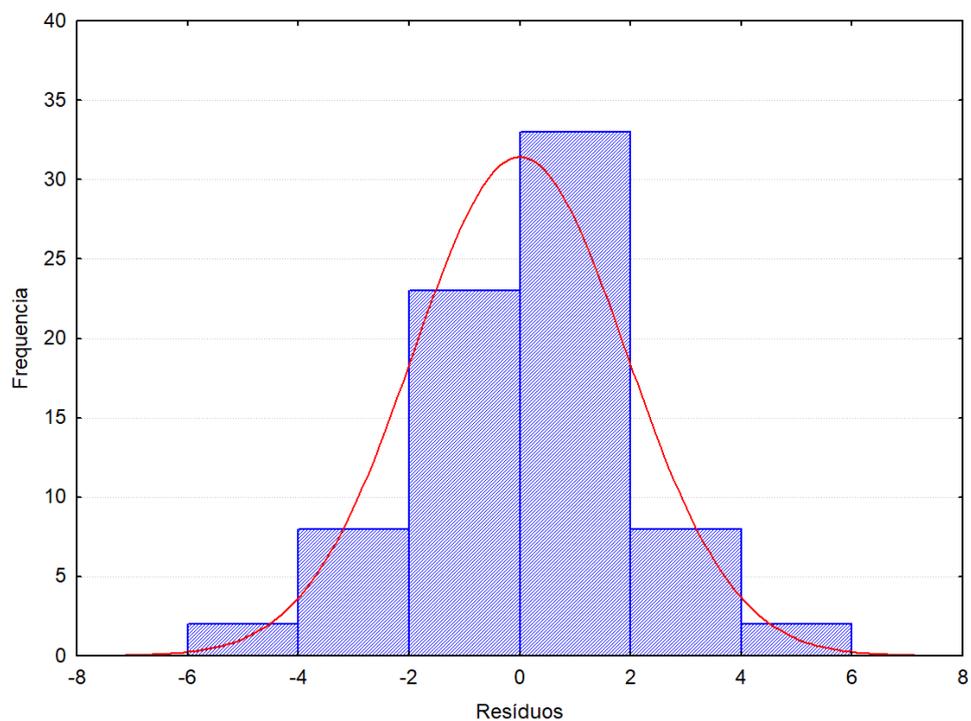


Figura 37 – Histograma e curva de distribuição normal de resíduos gerados pelo modelo.

Fonte: Do autor.

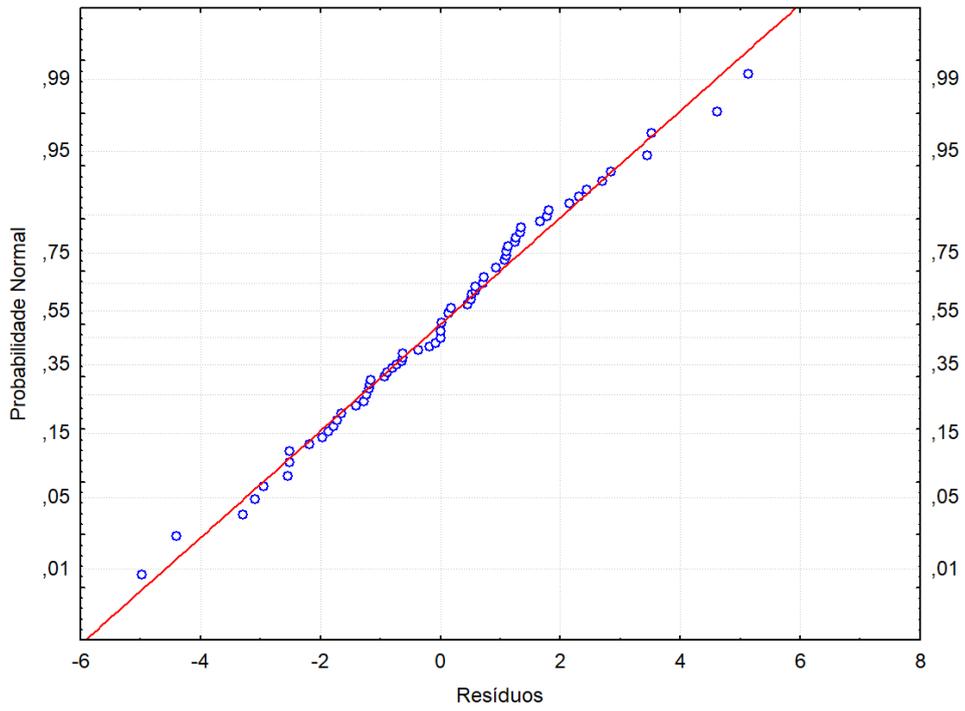


Figura 38 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos. Fonte: Do autor.

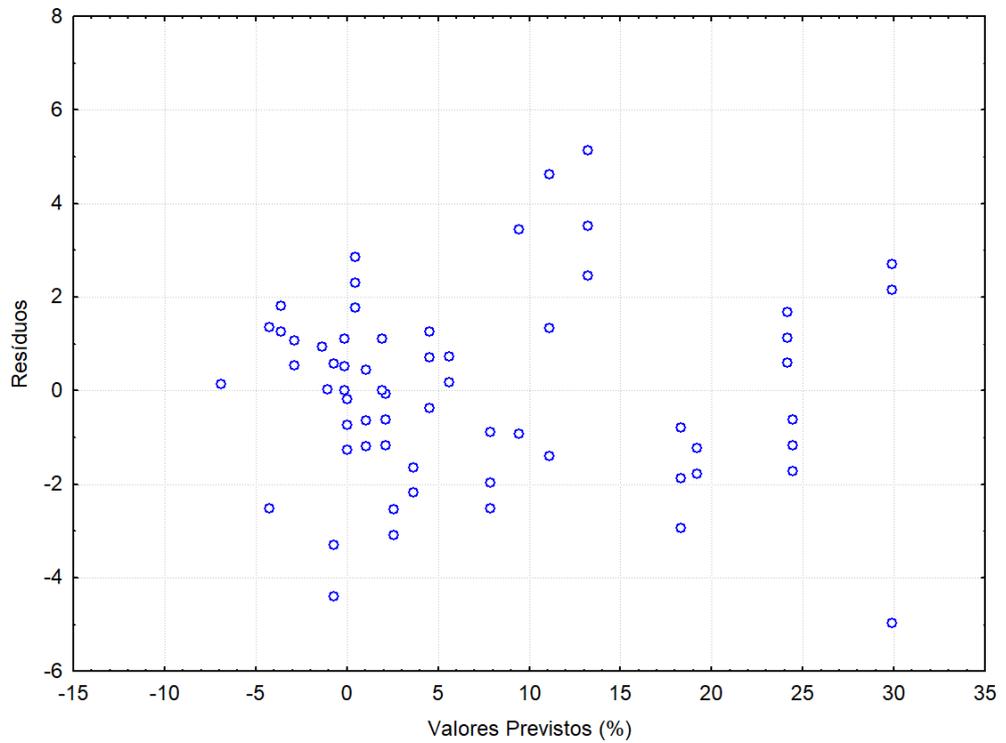


Figura 39 – Gráfico de resíduos versus valores previstos. Fonte: Do autor.

5 CONCLUSÃO

A análise estatística traz uma melhor compreensão, e confiança na interpretação de dados. A análise dos dados de forma conjunta em termos de população pela estatística, permitiu o apontamento de conclusões que podem subsidiar a tomada de decisões no processo de determinação da umidade.

Para tanto, pode-se dizer que suas ferramentas, desde de a análise ao planejamento de experimentos, possibilitam a previsão de tendências ou variâncias ao em torno de um processo, neste caso, em especial no controle tecnológico de uma pilha de disposição de rejeito filtrado que gera dados geotécnicos a todo momento de disposição.

Nesse trabalho foi proposto a avaliação três metodologias de determinação da umidade (balança infravermelho, frigideira e estufa), aplicando a análise estatística para melhor compreender a relação entre estes métodos. De tal maneira, que métodos estáticos, permitiram avaliar tanto a dispersão dos dados com a estatística descritiva, a identificação erros de medição (outliers) para consequente tratamento dos dados, e posterior análise.

No comparativo, estes métodos não diferiram estatisticamente entre si a partir de uma análise de variância, na qual o método da balança infravermelho (1) teve um melhor desempenho, considerando a aplicação de regressões lineares e correlações e o método da estufa como referência. Assim, pode-se usar este método como uma forma pratica e rápida de determinação da umidade como alternativa ao método da estufa, utilizando a Equação (8) como fator de ajuste entre os métodos, caso a curva de secagem não fosse revisada.

A aplicação do planejamento fatorial permitiu a revisão dessa curva e uma melhor compreensão entre os fatores que influenciam a determinação da umidade pela balança infravermelho, indicando pontos para os fatores de secagem de acordo ao peso de rejeito adicionado na balança, na qual o aumento do peso na balança, aumenta também a energia necessária a ser envolvida no ensaio. Para tanto, o caso

estudado, a determinação com 35 gramas de rejeito, em 16 minutos a 170°C, resultaria em valores precisos comparado a estufa.

Essa interpretação minuciosa e detalhada de dados de processos e parâmetros envolvidos em uma operação de rejeitos, coloca a análise estatística como uma ferramenta poderosa para tomada de decisão e consequente, melhoria em seus processos.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Diante do exposto, fica como indicação a aplicação do planejamento fatorial em um estudo com amplitude maior para os fatores de peso e tempo, visando melhor verificação da influência dessas variáveis na determinação da umidade, bem como em teores de umidades mais elevados ou mais secos para o material a ser analisado, uma vez que a quantidade de água no material influenciará na energia necessária para determinação do teor de umidade, assim como materiais com outras frações granulométricas, de forma a avaliar a influência da argila na determinação, considerando sua facilidade de adesão a água.

Além disso, uma verificação de tão quanto o nível precisão e exatidão nos resultados da umidade podem afetar demais parâmetros observados em um controle tecnológico de uma pilha de disposição de rejeito filtrado. Ainda assim, aplicação de análises de variâncias, regressões e planejamento fatorial, também podem ser aplicados em métodos diferentes que determinem outros parâmetros geotécnico, como por exemplo, grau de compactação, índice de vazios, gradiente de energia de acordo a espessura camada, entre outros fatores.

REFERÊNCIAS

ALVES, P. I. **Empilhamento de Rejeito Filtrado: A Expansão de uma Alternativa para a Substituição de Barragens**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Engenharia Mineral. Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. 2020.

ALBUQUERQUE FILHO, L. H. **Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de Piezocone**. 2004. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6457/2016. Amostras de Solo – Preparação para ensaio de compactação e ensaios de caracterização**.

_____. **NBR 7182:1986. Ensaio de Compactação**.

_____. **NBR 16097: Solo - Determinação do teor de umidade - Métodos expeditos de ensaio**.

ASSIS, A. P.; ESPÓSITO, T. J. B.; GARDONI, M. G. A.; MAIA, J. A. C. **Métodos Estatísticos e Probabilísticos Aplicados a Geotecnia**. Notas de aula, Departamento Engenharia Civil e Ambiental - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 2018.

ANG, A. H-S.; TANG, W. H. **Probabilistic Concepts in Engineering – Emphasis on Applications in Civil & Environmental Engineering**. 2 ed. San Francisco: JOHN WILEY & SONS, INC., 2007.

BARROS NETO, B. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria** | Benício de Barros Neto, Ieda Spacino Scarminio, Roy Edward Bruns. -- Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2001.

BOMAX. (s.d.). **Catálogo de Filtros-Prensa Prensamax**. Taboão da Serra, São Paulo, 2014. Acesso 25 de abril de 2022, disponível em: Bomax do Brasil: <https://www.bomax.com.br/produtos/item/filtros-prensa-prensamax>.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S. **Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis, and model building**. New York. John Wiley & Sons, inc. 1978.

CALADO, V., MONTGOMERY, D. C. **Planejamento de experimentos usando o "Statistica"**. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editorias, 260p. 2003.

CAMPELLO, I. C. **Abordagem probabilística aplicada ao estudo da variabilidade geotécnica dos solos**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 2020.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos Solos**. Volume I, Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos S.S., 1975.

CORNELL, J.A. **Experiments with Mixtures: Design, Models, and the Analysis of Mixture Data**. John Wiley & Sons, New York, 2002.

COSTA NETO, P.L. **Estatística**. 2ª ed, São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

CRISPIM, F. A. Compactação de Solos: **Influência de métodos e de parâmetros de compactação na estrutura dos solos**. Viçosa, Minas Gerais, Brasil, 2007.

CRYSTAL, C., CHORE, C., & EZAMA, I. **Filter-pressed dry stacking: design consideration based on practical experience**. Fonte: In: Proceedings Tailings and Mine Waste. Keystone, Colorado, EUA, Anais. 2018.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 8 ed. Tradução All Tasks. São Paulo. Cengage Learning. 2014.

DAVIES, M. P. **Filtered Dry Stacked Tailings - The Fundamentals**. Acesso 16 de abril de 2022, disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325976393_Filtered_Dry_Stacked_Tailings-The_Fundamentals. 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 088/94 – **Solos – determinação da umidade pelo método expedito o álcool**. DNER, 1994.

DYNAPAC. **Porque os testes de compactação em laboratório são tão importantes e como devem ser utilizados em uma obra**. Manual da compactação, pavimentação e fresagem – Capítulo 04. Acesso 12 de maio de 2022, disponível em: <http://dynapac.blog/manual-de-compactacao-pavimentacao-e-fresagem/porque-os-testes-de-compactacao-em-laboratorio-sao-tao-importantes-e-como-devem-ser-utilizados-em-uma-obra/?lang=pb>.

ENGELS, J. **An expert management system for surface tailings storage**. Tese de Doutorado. University of Leeds, Reino Unido, 2006.

GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando sua disposição em pilhas**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em

Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. 2011.

GOMES, M. A. **Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. 2009.

HINKELMAN, K. KEMPTHORNE, O. **Design and Analysis of Experiments**. Volume 1: Introduction to Experimental Design. 2nd Edit. John Wiley & Sons, 631p. 2008.

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. **Infográfico – Mineração em Números – 2021**. Acesso 6 de abril de 2022, disponível em:https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2022/02/Infografico_Minerao_em-Numeros_2021-2.pdf.2021

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. 1a ed. Brasília, 2016. Acesso 5 de abril de 2022, disponível em:<https://portaldamineracao.com.br/gestao-e-manejo-de-rejeitos-da-mineracao/>

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas: Relatório de pesquisa**. Brasília: Silva, A. P. M., Viana, J. P., Cavalcante, A. L. B., 2012. Acesso 6 de abril de 2022, disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7702/1/RP_Diagn%C3%B3stico_2012.pdf. 2012

LEITE, G. U. **Uso de planejamento experimental na otimização da pasta e no empacotamento de agregados para produção de CAA**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal da Paraíba - UFPB. João Pessoa, 134 f., 2018.

LOCH, F. C. **Estudo integrado do comportamento de misturas de solo arenoso, argila e cimento para aplicação em barreiras de proteção ambiental**. Tese de Doutorado – Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos, 2019.

LUCAS, F. C. O. **Validação do método speedy para determinação da Umidade de diferentes tipos de solos**. Trabalho de Conclusão de Curso 2019. Universidade Federal Rural Do Semiárido – Ufersa – Curso De Bacharelado Em Ciência E Tecnologia. Acesso 21 de junho de 2022, disponível em: https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/4630/1/FranciscoROL_ART.pdf.

LUZ, A. B., & LINS, F. A. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. 5ª edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 2010.

MEND. Mine Environment Neutral Drainage Project. MEND. **Report 2.50.1. Study of Tailings Management Technologies**. Klohn Crippen Berger. The Mining Association of Canada (MAC). Canadá. 2017.

MARTE, C. **Manual do Usuário. Modelos V1.8 ID50; ID200.** Marte Científica e Instrumentação Industrial Ltda. 22p.

MONTGOMERY, D.C. **Introduction to Statistical Quality Control.** 6th Edition, John Wiley & Sons, New York. 2009.

MONTGOMERY, D.C; RUNGER, G.C. **Applied Statistics for Engineers.** 3th Edition, John Wiley & Sons, New York. 656p. 2009.

NIEBLE, C.M. **Deposição de Rejeitos. Curso de Geotecnia Aplicada a Minas a Céu Aberto.** Paulo Abib Engenharia S.A. Apostila, 28p. II. Itabira, MG. 1986

PINTO, C. D. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas.** Oficina de Textos. São Paulo, Brasil. 2006.

QUINTINO, A. C. *et al.* **Métodos de determinação de umidade nos solos de cerrado.** 2015 - Universidade Federal de Mato Grosso. Acesso 21 de junho de 2022, disponível em: <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2015c/agrarias/metodos%20de%20%20%20de%20terminacao.pdf>

RODRIGUES, M. I.; LEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos.** Campinas: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor 2. ed. Ano de publicação: 358 p. 2009.

RORIZ, C. O. **Análise Estatística do Comportamento de Solos Finos.** Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. 2009.

SANTOS, L. G. F., AGUIAR, V.A.F., & MANCINI, M. C. **Estudo da determinação da umidade de *sinter feed* em medidor de infravermelho, como técnica alternativa à proposta na norma NBR ISO 3087:2011.** 2019 - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - Instituto de Tecnologia Departamento de Engenharia Química. Acesso 21 de junho de 2022, disponível em: <http://pdf.blucher.com.br.s3-sa-east-1.amazonaws.com/chemicalengineeringproceedings/cobecic2019/FTSP11.pdf>

SOARES, L. **Barragem de rejeitos. Tratamento de minérios.** Rio de Janeiro: CETEM / MCT, 2010.

VASCONCELOS, G.C. **Construção de aterros compactados com rejeito de mineração filtrado.** 2021. 86 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

WITTE, J. S. WITTE, R. S.: **Estatística.** LTC. 7a edição 506p. 2005.

APÊNDICE A – RESULTADOS DE UMIDADE

Tabela – Resultados de teor de umidade determinados por diferentes métodos.

Amostra	Método de Determinação - Umidade (%)			
	Balança Infravermelho (1)	Balança Infravermelho (2)	Frigideira	Estufa
1	13,5	13,8	13,8	13,4
2	16,0	15,8	16,0	15,8
3	14,5	14,1	15,2	14,2
4	14,4	14,7	15,0	14,8
5	14,0	14,0	14,6	14,4
6	15,9	16,0	15,0	16,2
7	15,3	15,1	15,8	15,6
8	16,3	16,2	16,9	16,6
9	14,6	14,8	14,3	15,0
10	13,7	14,1	14,2	14,4
11	15,3	15,3	15,7	15,3
12	13,6	13,4	14,0	13,6
13	14,3	14,2	15,1	14,4
14	14,6	14,6	14,1	14,9
15	13,5	13,7	13,2	13,8
16	13,4	13,5	14,7	13,8
17	13,0	12,9	14,0	13,2
18	15,7	15,2	15,1	15,0
19	14,5	14,8	14,4	14,8
20	15,5	15,6	15,5	15,4
21	16,5	16,7	16,8	16,7
22	12,3	12,3	12,6	12,7
23	12,4	12,5	12,5	13,4
24	14,1	14,0	13,9	14,0
25	14,0	13,9	14,0	14,0
26	13,3	13,4	13,5	13,4
27	12,2	12,1	12,8	12,4
28	14,5	14,2	14,4	14,6
29	10,4	10,4	12,2	12,4
30	15,2	15,1	16,7	15,4
31	13,5	13,5	14,6	14,0

Tabela – (continuação)

Amostra	Método de Determinação - Umidade (%)			
	Balança Infravermelho (¹)	Balança Infravermelho (²)	Frigideira	Estufa
32	14,2	14,3	15,3	14,6
33	15,2	15,5	15,0	15,6
34	12,5	12,7	11,4	12,8
35	13,4	13,4	12,6	12,9
36	15,7	13,2	16,2	15,3
37	14,2	14,5	15,1	14,9
38	14,7	14,7	14,5	14,6
39	14,4	14,5	15,8	15,1
40	14,4	14,4	14,6	14,7
41	12,2	12,5	11,8	14,3
42	14,1	14,0	14,7	14,4
43	16,0	16,0	16,1	16,2
44	15,8	15,8	16,1	16,1
45	14,6	14,8	15,3	14,9
46	16,0	15,9	16,5	16,5
47	14,8	14,7	14,4	14,7
48	14,6	14,5	15,3	14,8
49	13,4	13,4	13,3	13,6
50	12,3	12,5	12,3	12,3
51	13,7	13,6	14,0	14,5
52	13,5	13,5	14,1	13,6
53	13,0	13,2	12,6	11,6

Fonte: do autor.