



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS - DEMIN



PAULO LUAN DAMASCENO OLIVEIRA

**PLANEJAMENTO E OPERACIONALIZAÇÃO DE PILHAS DE REJEITO
FILTRADO: ESTUDO DE CASO EM UMA MINA NO QUADRILÁTERO
FERRÍFERO**

**Ouro Preto – MG
2026**

PAULO LUAN DAMASCENO OLIVEIRA

paulo.damasceno@aluno.ufop.edu.br

**PLANEJAMENTO E OPERACIONALIZAÇÃO DE PILHAS DE REJEITO
FILTRADO: ESTUDO DE CASO EM UMA MINA NO QUADRILÁTERO
FERRÍFERO**

Monografia submetida à apreciação da banca examinadora de graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

O482p Oliveira, Paulo Luan Damasceno.

Planejamento e operacionalização de pilhas de rejeito filtrado
[manuscrito]: estudo de caso em uma mina no Quadrilátero Ferrífero. /
Paulo Luan Damasceno Oliveira. - 2026.
67 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Beneficiamento de minério - Disposição de rejeitos. 2. Planejamento
- Minas e mineração. 3. Barragens de rejeitos. 4. Geotecnia - Controle
geotécnico. I. Ortiz, Carlos Enrique Arroyo. II. Universidade Federal de
Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.79

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Paulo Luan Damasceno Oliveira

Planejamento e Operacionalização de Pilhas de Rejeito Filtrado: Estudo de Caso em uma Mina no Quadrilátero Ferrífero

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 21 de julho de 2026

Membros da banca

Dr. - Carlos Enrique Arroyo Ortiz - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. - Hernani Mota de Lima - Universidade Federal de Ouro Preto
M.Sc. Luiz Felipe Baginski - Hexagon Mining

Carlos Enrique Arroyo Ortiz, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 21/07/2026



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Enrique Arroyo Ortiz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/07/2026, às 16:51, 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 **1144632** e o código CRC **3D75F131**.

Dedico este trabalho à minha família.

Sem vocês, nada teria sido possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a toda a minha família pelo apoio incondicional, em especial aos meus pais, irmãos e sobrinho. Com vocês, tudo é possível.

À minha companheira de vida, Laura, minha parceira e alicerce durante os anos em Ouro Preto.

À grandiosa República Alforria, aos seus ex-alunos e moradores, por todas as experiências, aprendizados e valores compartilhados.

À UFOP e à gloriosa Escola de Minas de Ouro Preto, pela oferta de ensino público e de qualidade.

Ao Professor Carlos Arroyo, pelo apoio e orientação durante a graduação e neste trabalho.

À Hexagon Mining pela oportunidade de aprimorar meus conhecimentos, em especial a Israel e Patrícia.

A todos os professores, amigos e demais pessoas que fizeram parte desta jornada e que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a minha formação.

“Tudo o que temos de decidir é o que fazer com o tempo que nos é dado.”

J. R. R. Tolkien

RESUMO

A disposição de rejeitos filtrados da mineração em pilhas tem se consolidado como alternativa às barragens convencionais, exigindo maior controle geotécnico, operacional e logístico durante sua construção. Nesse contexto, este trabalho propõe uma metodologia de planejamento operacional aplicada ao avanço construtivo de pilhas de rejeito filtrado, com apoio de ferramentas computacionais de modelagem, integração de dados e sequenciamento. A metodologia foi desenvolvida a partir de um estudo de caso em uma mina localizada no Quadrilátero Ferrífero, contemplando o mapeamento do processo operacional, a organização e validação dos dados de entrada, a modelagem tridimensional da pilha, sua discretização em setores e camadas, a estruturação de um modelo de blocos e o desenvolvimento do sequenciamento operacional no software MinePlan. Os resultados demonstraram que a integração entre modelo tridimensional, dados geotécnicos, relatórios operacionais e gráfico de Gantt permite ampliar a rastreabilidade do material, avaliar a utilização da frota, acompanhar volumes trabalhados por período e discutir gargalos relacionados ao direcionamento do rejeito, uso das praças de redução de umidade e produtividade dos equipamentos. Conclui-se que a metodologia contribui para um planejamento mais estruturado, rastreável e orientado por dados na disposição de rejeitos filtrados, sendo possível utilizar do estudo para mitigar gargalos operacionais.

Palavras-chave: Disposição de rejeitos; empilhamento a seco; planejamento operacional; controle geotécnico.

A B S T R A C T

The disposal of mining filtered tailings in piles has become an important alternative to conventional tailings dams, requiring greater geotechnical, operational, and logistical control during construction. In this context, this study proposes an operational planning methodology applied to the construction advance of filtered tailings piles, supported by computational tools for modeling, data integration, and scheduling. The methodology was developed based on a case study in a mine located in the Quadrilátero Ferrífero, including the mapping of the operational process, organization and validation of input data, three-dimensional modeling of the pile, discretization into sectors and layers, structuring of a block model, and development of the operational schedule using MinePlan software. The results showed that the integration of the three-dimensional model, geotechnical data, operational reports, and Gantt chart expands material traceability, supports fleet utilization analysis, enables monitoring of material volumes handled per period, and helps discuss bottlenecks related to tailings routing, use of moisture reduction areas, and equipment productivity. It is concluded that the proposed methodology contributes to a more structured, traceable, and data-driven planning approach for filtered tailings disposal, providing support for mitigating operational bottlenecks.

Keywords: Tailings disposal; Dry stacking; Operational planning; Geotechnical control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Métodos construtivos de barragens de rejeitos	17
Figura 2 - Formatos de pilhas mais comuns.....	21
Figura 3 - Divisão em zonas estruturais e não estruturais	22
Figura 4 - Modelo de uma pilha de rejeito filtrado	23
Figura 5 - Representação conceitual de umidade do rejeito filtrado.....	24
Figura 6 – Topografia real triangularizada.....	29
Figura 7 - Representação do Modelo de Blocos	31
Figura 8 - Esquema conceitual de krigagem	32
Figura 9 - Visualização de uma topografia e seus elementos	33
Figura 10 – Gráfico de Gantt de atividades de mineração.	34
Figura 11 - Fluxograma metodológico.....	36
Figura 12 - Sequência das etapas do empilhamento	41
Figura 13 - Topografia importada para o <i>software</i>	43
Figura 14 - Setorização definida para a pilha	44
Figura 15 - Modelo Tridimensional da PDR	45
Figura 16 - Camada de cota 1035, dividida pelos setores	46
Figura 17 - Planilha de dados importados no <i>software</i>	48
Figura 18 - Visualização das amostras importadas dentro do MinePlan3D.	48
Figura 19 - Modelo de blocos da pilha setorizada	49
Figura 20 - Modelo de blocos filtrado por tipo de material.....	50
Figura 21 - Possíveis origens de material	52
Figura 22 - Fluxo macro das atividades na PDR	53
Figura 23 - Tabela e Gráfico Gantt das atividades	56
Figura 24 - Gráfico de horas trabalhadas por equipamento no período analisado....	57
Figura 25 - Quantidade de material trabalhado por período e origem.....	58
Figura 26 - Atributos do modelo de blocos.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos tipos de barragens de rejeitos.	18
Tabela 2 - Comparativo dos horizontes de planejamento	27
Tabela 3 - Gargalos identificados na Operação	42
Tabela 4 - Equipamento e respectiva tarefa.....	53
Tabela 5 - Gargalos identificados e melhorias propostas pela metodologia	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANM – Agência Nacional de Mineração

CNMP - Conselho Nacional do Ministério Público

DEMIN – Departamento de Engenharia de Minas

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração

MPAS – MinePlan *Activity Scheduler*

NBR - Norma Brasileira

PDR - Pilha de Disposição de Rejeito

PRU - Praça de Redução de Umidade

UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Formulação do Problema	13
1.2	Justificativa.....	14
1.3	Objetivos	15
1.3.1	Objetivo Geral	15
1.3.2	Objetivos Específicos.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Disposição de rejeitos na mineração.....	16
2.1.1	Marco regulatório e legislação vigente aplicada ao empilhamento	19
2.2	Empilhamento de rejeito filtrado	20
2.3	Fundamentos geotécnicos aplicados ao empilhamento.....	23
2.4	Planejamento e sequenciamento de lavra	26
2.5	Modelagem tridimensional e discretização de estruturas.....	28
2.6	Modelos de blocos e integração de dados geotécnicos	30
2.7	Aplicação de softwares de planejamento de mina	33
3	METODOLOGIA.....	36
4	ESTUDO DE CASO.....	39
4.1	Mapeamento do processo operacional	39
4.1.1	Principais restrições e gargalos operacionais identificados	41
4.2	Coleta, organização e validação dos dados de entrada.....	42
4.3	Modelagem tridimensional e discretização da pilha	44
4.4	Integração dos dados geotécnicos e modelo de blocos.....	47
4.4.1	Interpolação dos dados e modelo de blocos.....	49
4.5	Desenvolvimento do sequenciamento operacional	51
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5.1	Sequenciamento gerado	55
5.2	Relatórios operacionais do sequenciamento.....	56
5.3	Rastreabilidade dos dados geotécnicos no modelo de blocos.....	58
5.4	Discussão dos gargalos operacionais identificados	59
6	CONCLUSÕES	62
6.1	Sugestões para estudos futuros.....	63
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

1 INTRODUÇÃO

A atividade mineral desempenha um papel estratégico no desenvolvimento socioeconômico do Brasil, com destaque histórico para a extração de minério de ferro na região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. Ao longo das etapas de beneficiamento necessárias para a obtenção do produto comercial, o processo gera volumes massivos de materiais sem aproveitamento econômico imediato, definidos pela NBR 13028 como rejeitos. Tradicionalmente, a gestão desses resíduos baseou-se no armazenamento em grandes reservatórios na forma de polpa. De acordo com dados do Conselho Nacional do Ministério Público (CNMP), a geração contínua desses rejeitos apresenta uma tendência global de crescimento, impondo ao setor o desafio de adotar métodos de disposição cada vez mais seguros e eficientes.

No entanto, o modelo convencional de disposição em barragens, sobretudo as alteadas pelo método a montante, passou por uma profunda reavaliação, após rupturas ocorridas no estado. Diante desse cenário, a busca por alternativas que eliminem a necessidade de grandes reservatórios de polpa tornou-se uma prioridade mandatória, impulsionada tanto pela evolução da fiscalização quanto pelas diretrizes defendidas pelo Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2019). Nesse contexto, a tecnologia de filtragem de rejeitos ganhou protagonismo, permitindo que o material passe por um desaguamento prévio e se comporte como um solo granular passível de manuseio e empilhamento a seco (*dry stacking*).

Como esses rejeitos filtrados apresentam grande variabilidade física conforme sua origem no processo de beneficiamento, eles exigem faixas operacionais de umidade e compactação rigorosamente controladas para evitar anomalias de campo (ALVES, 2020). No contexto deste estudo, focado em uma operação real de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero, torna-se fundamental avaliar como a gestão e a construção dessas pilhas podem ser aprimoradas por meio de ferramentas computacionais, voltadas ao sequenciamento operacional da construção da estrutura.

Diante disso, este trabalho traz a possibilidade de aplicar conceitos práticos de modelagem e planejamento de lavra para solucionar problemas de controle de qualidade na disposição de rejeitos. Espera-se demonstrar que o uso de um *software* especializado, pode otimizar a alocação de frotas, produtividade operacional e

registro das etapas e estrutura, atuando diretamente como uma ferramenta de governança técnica, mitigando riscos geotécnicos e assegurando a conformidade da pilha com as rígidas exigências regulatórias vigentes.

1.1 Formulação do Problema

A operação deste estudo situa-se no Quadrilátero Ferrífero, onde a proibição de barragens convencionais de polpa exige um controle muito mais rígido na forma de dispor o rejeito em pilhas (ABNT, 2006). No processo de empilhamento a seco, a estrutura funciona como um maciço geotécnico que exige o cumprimento estrito de limites de umidade (faixa operacional de 11% a 14%) e metas específicas de densidade seca para garantir a sua estabilidade.

Do ponto de vista logístico e de campo, a movimentação planejada de cerca de 1.000.000 de metros cúbicos de rejeito gera um desafio imediato para a frota de infraestrutura, que envolve o sincronismo entre tratores de esteira, motoniveladoras e rolos compactadores e tratores agrícolas. Contudo, a usina de filtragem frequentemente entrega o material com umidade excessiva (acima de 16%), exigindo o direcionamento para as Praças de Redução de Umidade (PRUs), para que, finalmente, o material ser disposto e compactado em camadas de 30 cm ou 50 cm conforme a sua condição.

A problemática consiste no fato de que a falta de uma padronização para esse direcionamento e a baixa rastreabilidade espacial do material depositado geram ociosidade de frotas e gargalos logísticos na coordenação das frentes. O equilíbrio operacional reside em conciliar a cadência e o ritmo de recebimento do rejeito vindo da usina com a produtividade e o tempo de ciclo dos equipamentos de suporte em campo. Por conseguinte, faz-se necessário analisar: De que forma a integração de dados de campo a um modelo computacional, utilizando a ferramenta *Activity Scheduler (MPAS)* do *software* MinePlan, pode otimizar o sequenciamento operacional e garantir a aderência do cronograma logístico?

1.2 Justificativa

A presente pesquisa justifica-se pela necessidade de integrar a gestão de transporte e a distribuição do rejeito filtrado às diretrizes de planejamento, superando decisões no ambiente de campo. Como aponta Curi (2014), o planejamento de curto prazo lida de forma detalhada com as instruções diárias e semanais da operação mecânica da frota. Ao consolidar os fluxos logísticos e as características do material dentro de um modelo de blocos, a tomada de decisão a respeito das frentes de disposição assume um caráter preditivo, o que pode reduzir a variabilidade no tempo de ciclo dos equipamentos e a ociosidade da frota de transporte.

Sob essa ótica, a simulação de cenários operacionais baseada no rendimento real da frota, como tratores de esteira e rolos compactadores, eleva a exequibilidade dos planos de disposição. O uso de ferramentas de sequenciamento dinâmico permite criar regras lógicas para destinar e classificar os volumes planejados em cada período (CRYSTAL, 2018). Esse alinhamento é indispensável para compatibilizar a cadência contínua de produção da usina de filtragem com a capacidade de recepção do material em campo, viabilizando o controle do tempo de permanência do rejeito nas Praças de Redução de Umidade (PRUs) e otimizando a produtividade global dos ativos de infraestrutura.

Ademais, a pesquisa se justifica pela inovação metodológica ao transpor conceitos consolidados do planejamento de lavra de minas, como modelos de blocos discretizados e cronogramas integrados, para o gerenciamento e disposição de rejeitos filtrados. A parametrização dessas restrições no *software* MinePlan oferece um ganho expressivo de governança técnica, demonstrando como o planejamento pode atuar como o elo definitivo entre a produção mecânica da frota e a segurança física da estrutura.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Propor uma metodologia de planejamento operacional para a coordenação do avanço construtivo de pilhas de rejeitos filtrados, fundamentada no uso de ferramentas computacionais para a otimização logística de frotas e garantia da rastreabilidade do fluxo de massa.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Mapear os ciclos de transporte, direcionamento e regularização do rejeito filtrado entre a saída da usina, as Praças de Redução de Umidade (PRUs) e as frentes de empilhamento;
- Discretizar e modelar geometricamente os sólidos de avanço construtivo e o fatiamento por camadas da pilha utilizando o ambiente computacional do *software* MinePlan;
- Estruturar e parametrizar um modelo de blocos, para espacializar os indicadores de campo e garantir a rastreabilidade geométrica da pilha;
- Desenvolver o sequenciamento dinâmico e o cronograma logístico da frota, por meio do módulo *MinePlan Activity Scheduler (MPAS)*, estabelecendo as regras lógicas de direcionamento do material;
- Avaliar a aderência e a exequibilidade operacional do cronograma em termos de produtividade de frotas e mitigação de gargalos logísticos na disposição final do rejeito.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Disposição de rejeitos na mineração

A atividade mineral envolve uma série de etapas voltadas à extração, beneficiamento e concentração de bens minerais de interesse econômico. Durante o beneficiamento, além do produto destinado à comercialização, são gerados materiais sem aproveitamento econômico imediato, denominados rejeitos. De acordo com a NBR 13028 (ABNT, 2006), rejeito corresponde ao material não aproveitável economicamente gerado durante o processo de beneficiamento de minérios. Esses materiais podem apresentar características físicas, químicas e geotécnicas distintas, variando conforme a mineralogia do minério, o grau de cominuição, o método de concentração empregado e a presença de frações finas ou argilosas.

No caso do minério de ferro, os rejeitos gerados no beneficiamento podem apresentar comportamentos distintos conforme sua origem no processo, sua granulometria e seu teor de umidade. Alvarenga (2023) apresenta faixas granulométricas de diferentes rejeitos provenientes de operações do Quadrilátero Ferrífero, como lamas, rejeitos de flotação e rejeitos da concentração magnética, demonstrando que esses materiais não devem ser tratados de forma homogênea do ponto de vista geotécnico. Essa distinção é importante porque rejeitos mais finos tendem a apresentar maior dificuldade de drenagem, enquanto rejeitos mais granulares podem favorecer soluções de disposição com maior capacidade de percolação. Portes (2013), ao também abordar a disposição de rejeitos de minério de ferro, reforça a importância de considerar as características do material e da estrutura de disposição na avaliação do desempenho e da segurança das soluções adotadas.

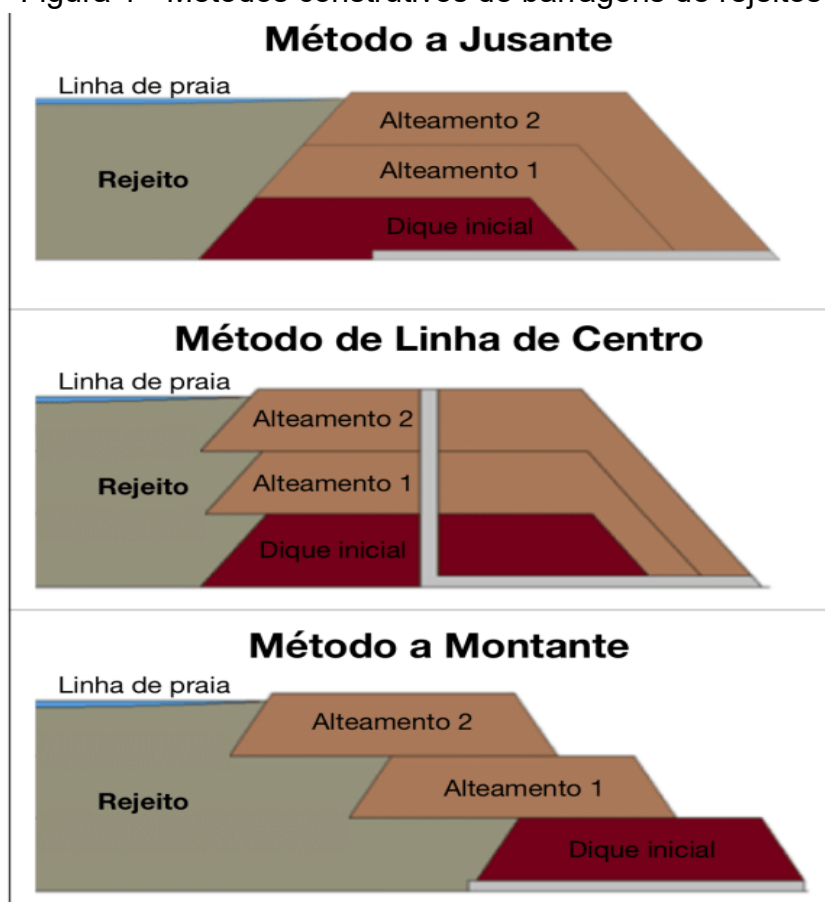
Deste modo, a disposição de rejeitos representa um dos principais desafios da mineração moderna, uma vez que envolve aspectos técnicos, ambientais, econômicos e sociais (IBRAM, 2019). Tradicionalmente, nas minas de ferro do Quadrilátero Ferrífero, esses materiais foram dispostos em barragens de rejeitos, geralmente na forma de polpa, exigindo estruturas projetadas para conter grandes volumes de sólidos e água. A forma de disposição adotada está diretamente relacionada ao tipo de minério, ao processo de beneficiamento e ao teor de sólidos

presente no rejeito no momento da disposição, conforme discutido por Guimarães (2011).

De acordo com o CNPM (2021), a geração de rejeitos minerais no Brasil apresenta tendência de crescimento, o que aumenta a necessidade de estruturas e métodos de disposição capazes de atender às demandas de segurança, estabilidade e controle ambiental. Nesse contexto, a escolha do método de disposição deve considerar não apenas a capacidade de armazenamento, mas também as condições operacionais, ambientais e geotécnicas associadas ao empreendimento.

No segmento da mineração de metais, uma das formas mais utilizadas historicamente para a disposição de rejeitos consiste no armazenamento em reservatórios formados por diques ou barragens de contenção. Essas estruturas podem ser construídas e alteadas por diferentes métodos, entre os quais se destacam os métodos a jusante, por linha de centro e a montante, conforme apresentado por Cardozo, Ruver e Gehling (2020). A Figura 1 ilustra, de forma esquemática, os principais métodos construtivos empregados em barragens de rejeitos.

Figura 1 - Métodos construtivos de barragens de rejeitos



Fonte: Cardozo, Ruver e Gehling (2020)

A disposição de rejeitos em barragens apresenta como vantagem o menor custo relativo em comparação a algumas alternativas de disposição. Entretanto, essas estruturas demandam grandes áreas, controle contínuo de estabilidade, drenagem adequada e monitoramento permanente. Diante dessas limitações, métodos alternativos de disposição passaram a ser avaliados pelo setor mineral não apenas como soluções operacionais, mas também como medidas voltadas à redução de riscos geotécnicos e socioambientais. A Tabela 1 resume as principais vantagens e desvantagens dos métodos convencionais de alteamento de barragens de rejeitos.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos tipos de barragens de rejeitos.

	Método de jusante	Método da linha de centro	Método de montante
Método construtivo	Construção de dique inicial impermeável e barragem de pé. Separação dos rejeitos na crista do dique por meio de hidrociclones. Dreno interno e impermeabilização a montante.	Variação do método de jusante.	Método mais antigo, e o mais empregado. Construção de dique inicial e os diques do alteamento periféricos com material de empréstimo, estéreis da lavra ou com " <i>underflow</i> " de ciclonagem. Lançamento a partir da crista por ciclonagem ou " <i>spigots</i> ".
Vantagens	Maior segurança. Compactação de todo o corpo da barragem. Pode-se misturar os estéreis da lavra.	Variação do volume de " <i>underflow</i> " necessário com relação ao método da jusante.	Menor custo. Maior velocidade de alteamento. Utilizado em lugares onde há limitante de área.
Desvantagens	Necessidade de grandes quantidades de " <i>underflow</i> " (problemas nas primeiras etapas). Deslocamento do talude de jusante (proteção superficial só no final da construção)	Necessidade de sistemas de drenagem eficientes e sistemas de contenção a jusante.	Baixa segurança devido à linha freática próxima ao talude de jusante, susceptibilidade de liquefação, possibilidade de " <i>piping</i> ".

Fonte: Adaptado de Soares (2004).

Os desastres envolvendo barragens de rejeitos no Brasil, sobretudo os rompimentos de Mariana, em 2015, e Brumadinho, em 2019, reforçaram a necessidade de reavaliar os métodos tradicionais de disposição empregados na

mineração. Esses eventos provocaram graves impactos sociais, ambientais e econômicos, atingindo comunidades, cursos d'água e extensas áreas das bacias dos rios Doce e Paraopeba (LASCHEFSKI, 2020). Nesse cenário, alternativas como disposição em cavas exauridas, minas subterrâneas, empilhamento drenado, dry stacking, rejeitos espessados ou em pasta, codisposição e disposição compartilhada de rejeitos e estéreis passaram a ser consideradas com maior atenção pelo setor mineral.

Nesse contexto, a filtragem de rejeitos surge como uma alternativa relevante para reduzir a quantidade de água associada ao material antes de sua disposição final. Como descrito por Guimarães (2011), a filtragem ocorre pela aplicação de uma força sobre as partículas por meio de um meio poroso, podendo ser realizada por gravidade, vácuo, pressão ou centrifugação. Ao diminuir o teor de umidade do rejeito, esse processo possibilita que o material deixe de ser disposto predominantemente na forma de polpa e passe a apresentar condições mais adequadas para transporte, espalhamento e compactação.

Deste modo, o empilhamento a seco de rejeitos filtrados, passa a se destacar entre as alternativas de disposição por permitir a formação de pilhas estruturadas, com menor dependência de grandes reservatórios de rejeitos e maior possibilidade de controle operacional e geotécnico.

2.1.1 Marco regulatório e legislação vigente aplicada ao empilhamento

A transição tecnológica para os métodos de disposição a seco no Brasil, foi impulsionada por mudanças marcantes no cenário regulatório, o colapso das estruturas alteadas a montante resultou em mudanças profundas na postura dos órgãos fiscalizadores. O grande ponto de virada na legislação ocorreu com a publicação da Resolução nº 13 de 2019 da Agência Nacional de Mineração (ANM).

Essa norma proibiu em todo o território nacional a construção ou o alteamento de barragens pelo método a montante, além de estipular prazos rígidos para a desativação das estruturas existentes desse tipo. Esse cenário de restrição legal consolidou o empilhamento de rejeitos filtrados (*dry stacking*) como uma alternativa viável para a continuidade da disposição de rejeitos minerais no Brasil.

Do ponto de vista normativo específico para estruturas de empilhamento, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) fornece as diretrizes para a engenharia de pilhas através da NBR 13029:2024 (Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha), que orienta os critérios de estabilidade, taludes, bermas e sistemas de drenagem superficial e interna.

É importante destacar que o rigor regulatório da ANM não se restringe às barragens clássicas; a própria Resolução ANM nº 13/2019 estabelece em seu Artigo 12 que os empilhamentos drenados construídos por meio de disposição hidráulica de rejeitos que apresentem suscetibilidade ao fenômeno de liquefação ficam sujeitos às mesmas obrigações, fiscalizações e restrições atribuídas às barragens de mineração.

Sendo assim, o cumprimento rigoroso das normas e o acompanhamento das condições de campo são fundamentais para atender às demandas exigidas. O controle diário de parâmetros como umidade e compactação não é só uma meta técnica, mas também uma exigência direta de conformidade legal.

2.2 Empilhamento de rejeito filtrado

Existem vários métodos de disposição de rejeitos em uso. Para este trabalho, destaca-se o empilhamento de rejeitos filtrados, tecnologia que tem demonstrado eficácia como alternativa às tradicionais barragens convencionais. Também conhecido como *dry stacking*, a técnica consiste em uma alternativa de disposição na qual o rejeito passa por um processo de desaguamento antes de sua disposição final. Diferentemente da disposição convencional em polpa, esse método reduz significativamente o teor de umidade do material, permitindo que o rejeito seja transportado, espalhado e compactado em camadas.

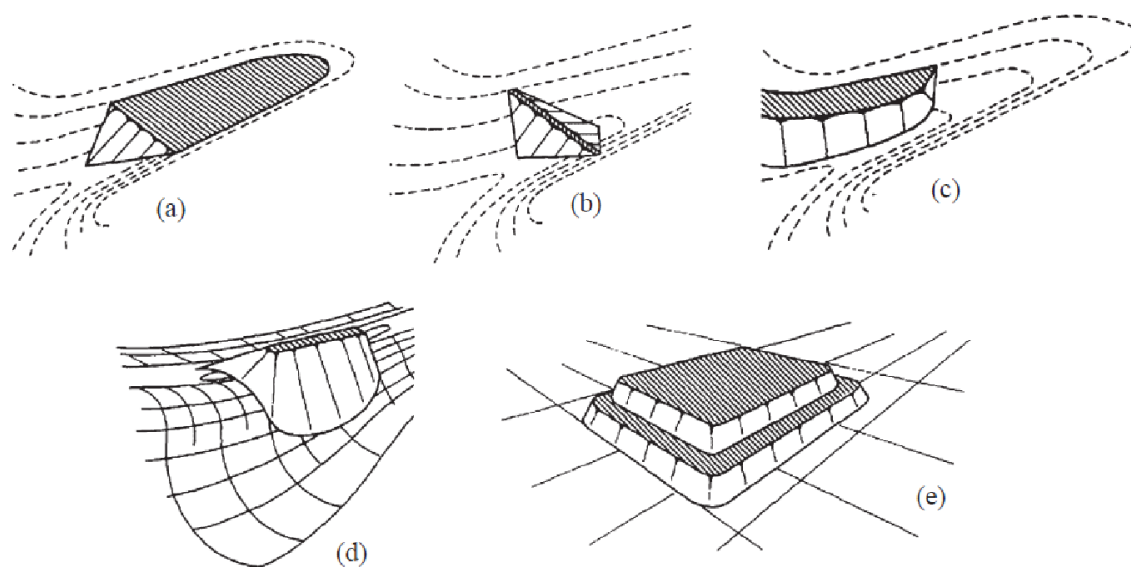
A viabilidade do empilhamento está diretamente relacionada à eficiência da filtração. Guimarães, Valadão e Peres (2012) realizaram ensaios com diferentes tecnologias de filtração, como vácuo, pressão, capilar e hiperbárica, observando que, com exceção das lamas, é possível obter rejeitos com umidade adequada para empilhamento. Após a filtração, o material passa a apresentar melhores condições de manuseio, podendo ser transportado por caminhões ou correias transportadoras até a área de disposição, onde é lançado, espalhado, regularizado e compactado.

Do ponto de vista operacional e geotécnico, o empilhamento de rejeitos filtrados exige controle rigoroso de parâmetros como teor de umidade, densidade, grau de compactação, drenagem, taxa de alteamento e geometria da pilha. A disposição em camadas compactadas contribui para o aumento da densidade do material. Além disso, a pilha pode ser organizada em zonas com diferentes funções, destinando-se os materiais que atendem às especificações técnicas mais rigorosas às regiões estruturais do depósito.

É importante mencionar que o desempenho geotécnico de pilhas depende do controle das tensões geradas pelo alteamento progressivo da estrutura. Crystal et al. (2018) ressaltam que a altura da pilha, a taxa de alteamento, a dissipação de poropressões e a posição da linha freática devem ser avaliadas cuidadosamente, pois esses fatores influenciam diretamente a estabilidade do depósito. Além disso, a resistência do material disposto deve ser compatível com o acréscimo de tensões provocado pela sobreposição das camadas.

A geometria da pilha também deve ser definida com atenção, considerando as condições topográficas e os critérios de estabilidade. Entre os arranjos mais comuns estão as pilhas em vale, transversais a vales e de encosta, entre outras configurações possíveis. A Figura 2 exemplifica os formatos mais comuns.

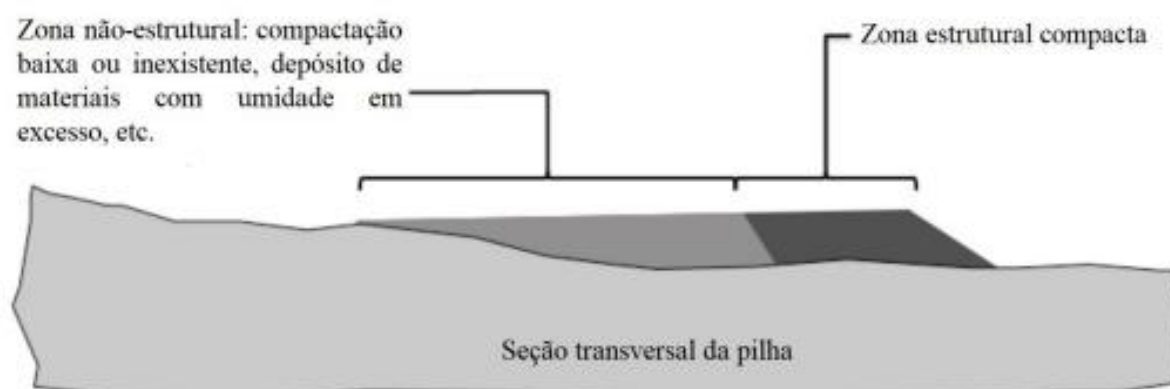
Figura 2 - Formatos de pilhas mais comuns



Fonte: Wahler (1979), apud Hawley; Cunning, (2017)

Ademais, em alguns contextos, faz-se necessário a presença de uma zona estrutural, geralmente localizada na porção externa do depósito, que deve receber materiais que atendam aos critérios mais rigorosos de umidade, compactação e resistência, funcionando como uma envoltória de contenção para os rejeitos dispostos internamente. Crystal et al. (2018) destacam que materiais fora das especificações mais restritivas devem ser direcionados para zonas não responsáveis pela estabilidade do empilhamento, enquanto Davies (2011) ressalta a importância da compactação controlada nas regiões externas do depósito. A Figura 3 ilustra essa divisão em zonas estruturais e não estruturais, conforme representação de Lupo e Hall (2010).

Figura 3 - Divisão em zonas estruturais e não estruturais



Fonte: Lupo e Hall (2010)

Dessa forma, a técnica consolida-se como uma alternativa relevante à disposição convencional em barragens, ao permitir maior controle geotécnico e menor dependência do armazenamento de rejeitos em polpa. A formação de maciços mais densos, não saturados e com menor potencial de dano, conforme discutido por Portes (2013), reforça o potencial técnico dessa solução.

Entretanto, como destacado por Alves (2020), os custos operacionais elevados, a necessidade de controle rigoroso da umidade e as dificuldades associadas a rejeitos finos indicam que sua aplicação deve ser acompanhada de planejamento detalhado e avaliação das condições operacionais. Portanto, o sucesso do método depende da integração entre projeto geotécnico, controle tecnológico, logística de disposição e planejamento da construção da pilha.

2.3 Fundamentos geotécnicos aplicados ao empilhamento

O empilhamento de rejeitos filtrados pode ser entendido como a construção progressiva de um maciço geotécnico, formado pela sobreposição de camadas sucessivamente lançadas, espalhadas e compactadas. Nesse tipo de estrutura, cada camada executada passa a atuar não apenas como material disposto, mas também como suporte para as etapas posteriores de alteamento, influenciando o estado de tensões, a drenagem, a densificação e o comportamento mecânico do depósito.

De forma complementar, Crystal (2018) destaca que o projeto e a operação dessas estruturas devem considerar aspectos como espessura das camadas, estratégia de disposição, taxa de alteamento, umidade e possível geração de poropressões, evidenciando que a estabilidade da pilha depende diretamente do controle construtivo aplicado ao longo de sua formação. Assim, a pilha deve ser analisada como uma estrutura em evolução, na qual o desempenho geotécnico resulta da interação entre as propriedades do rejeito, a forma de compactação e a sequência de construção adotada. A Figura 4 representa um modelo de uma pilha.

Figura 4 - Modelo de uma pilha de rejeito filtrado



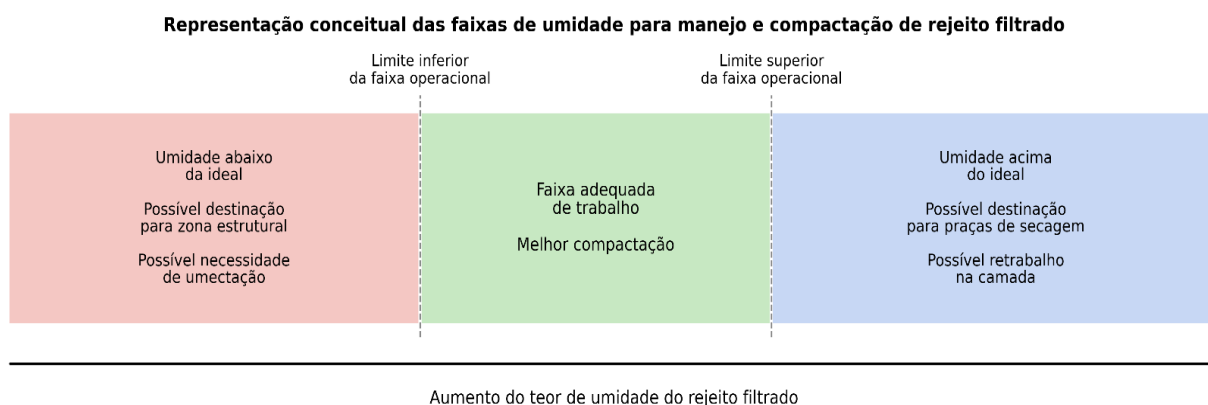
Fonte: Adaptado de Cacciuttolo e Atencio (2023)

A caracterização geotécnica do rejeito é essencial para compreender seu comportamento durante o empilhamento, pois propriedades como granulometria, plasticidade, permeabilidade e teor de finos influenciam diretamente o trabalho, a drenagem e a compactação do material. No caso dos rejeitos de minério de ferro, Portes (2013) diferencia os rejeitos finos, usualmente associados às lamas, dos rejeitos granulares, indicando que a distribuição granulométrica exerce papel importante na forma de disposição.

Alves (2020), por sua vez, destaca a importância do controle da granulometria e da densidade da polpa que alimenta a planta de filtragem. Além disso, Sanchez et al. (2023) apontam que densidade, grau de saturação, índice de vazios, forma de disposição e precipitação influenciam o comportamento de percolação em pilhas de rejeitos filtrados. Dessa forma, a caracterização do rejeito constitui a base para a definição dos critérios de atuação e controle tecnológico da pilha.

O controle de umidade na pilha é uma etapa essencial para garantir a adequada compactação dos rejeitos filtrados. Quando o material chega à praça de disposição com umidade acima da condição desejada, podem ser necessárias práticas de manejo, como espalhamento ou retrabalho do rejeito para secagem antes da compactação. Esse processo contribui para melhorar a condição do material, favorecer a densificação e reduzir o grau de saturação das camadas. Alves (2020) ressalta que o empilhamento de rejeitos filtrados exige cuidados operacionais, incluindo controle das características do material, áreas de armazenamento temporário como praças de secagem e drenagem eficiente. A Figura 5 mostra um esquema voltado à umidade do rejeito.

Figura 5 - Representação conceitual de umidade do rejeito filtrado



Fonte: Autor

O controle tecnológico é essencial para garantir que cada camada da pilha seja liberada com base em critérios objetivos de qualidade. No empilhamento de rejeitos filtrados, esse controle permite verificar se o material apresenta umidade adequada, densidade compatível, baixo índice de vazios e condição de saturação controlada antes da execução da camada seguinte. Davies (2011) destaca que pilhas de rejeitos filtrados são geralmente projetadas para serem compactadas e mantidas em condição não saturada, exigindo controle de qualidade elevado, com atenção especial à umidade e à densidade do material.

Principais ensaios e verificações de controle:

- Controle de umidade de campo;
- Determinação da densidade úmida in situ;
- Determinação da densidade seca;
- Determinação da densidade dos grãos;
- Cálculo do índice de vazios;
- Verificação do grau de saturação;
- Controle granulométrico;
- Inspeção visual da camada compactada;
- Coleta de amostras indeformadas ou ensaios complementares, quando necessário.

Os testes realizados nas camadas compactadas envolvem a verificação da umidade, densidade e condição física do rejeito antes da liberação para novas etapas de alteamento. O teor de umidade indica se o material está adequado para compactação ou se exige manejo prévio, enquanto a densidade úmida in situ e a densidade seca permitem avaliar a eficiência da compactação em campo. Esses controles são usualmente associados a procedimentos normatizados para preparação de amostras, determinação de umidade, densidade em campo e compactação de solos, como os previstos em normas técnicas da ABNT.

Além disso, parâmetros como densidade dos grãos, índice de vazios, grau de saturação e granulometria auxiliam na avaliação da qualidade geotécnica da camada compactada. A densidade dos grãos promove o cálculo dos índices físicos, enquanto

o índice de vazios e o grau de saturação indicam, respectivamente, o nível de densificação e a parcela dos vazios preenchida por água. O controle granulométrico permite acompanhar variações na composição do rejeito, e a inspeção visual complementa os ensaios ao verificar a ausência de comportamento “borrachudo”, heterogeneidades ou excesso de umidade. Dessa forma, a liberação da camada depende da integração entre resultados laboratoriais, medições de campo e avaliação visual da qualidade executiva.

Dessa forma, a coleta de amostras indeformadas ou a realização de ensaios complementares pode ser adotada quando houver necessidade de avaliar com maior detalhe o comportamento mecânico do material compactado. Esses registros fortalecem a rastreabilidade da construção, permitindo relacionar cada camada executada aos resultados de controle tecnológico e às decisões de liberação.

Cacciuttolo e Atencio (2023) também tratam a gestão de rejeitos filtrados como um sistema integrado, envolvendo desaguamento, transporte, disposição e monitoramento da estrutura. Assim, parâmetros como umidade, densidade seca, índice de vazios, grau de saturação e granulometria deixam de ser apenas resultados de ensaios e passam a funcionar como critérios para sequenciar atividades, registrar a rastreabilidade das camadas e representar a evolução da pilha em modelos operacionais.

Por fim, os fundamentos geotécnicos aplicados ao empilhamento de rejeitos filtrados devem orientar diretamente o planejamento operacional e a modelagem da pilha. As etapas de espalhamento, regularização, homogeneização, compactação, controle tecnológico e liberação de camada precisam ser organizados de forma integrada, pois cada uma interfere na qualidade da camada executada e na estabilidade da camada seguinte.

2.4 Planejamento e sequenciamento de lavra

O planejamento de mina constitui uma etapa fundamental para o desenvolvimento de empreendimentos minerais, pois orienta a forma como o depósito será aproveitado ao longo do tempo. Segundo Curi (2014), o planejamento correto da lavra é determinante para garantir a segurança do projeto, maximizar seu potencial econômico e limitar seus impactos na natureza, considerando aspectos geotécnicos,

tecnológicos, econômicos, operacionais e ambientais desde a análise da jazida até a definição dos limites da lavra e seu sequenciamento.

Como mostrado por Flores (2008), o planejamento pode ser dividido em três níveis complementares: estratégico, tático e operacional. O nível estratégico relaciona-se às decisões de longo prazo e à viabilidade global do empreendimento; o tático transforma essas diretrizes em planos intermediários, ajustando metas e recursos; enquanto o operacional concentra-se no curto prazo, detalhando e controlando as atividades executadas em campo. Nesse contexto, o planejamento de mina também é estruturado em diferentes horizontes, tradicionalmente sendo planejamento de longo prazo, médio e curto prazo. A Tabela 2 sintetiza os horizontes e suas aplicações.

Tabela 2 - Comparativo dos horizontes de planejamento

Horizonte de Planejamento	Nível Associado	Características principais	Aplicação no planejamento de mina
Longo Prazo	Estratégico	Maior amplitude, menor nível de detalhe, maior foco na viabilidade global do empreendimento	Define diretrizes gerais, vida útil da mina, estratégia de lavra, investimentos, metas globais e aproveitamento do depósito
Médio Prazo	Tático	Elo entre a estratégia e a operação, com detalhamento intermediário e ajuste das metas às condições reais	Programas executáveis, avaliando frentes, recursos, equipamentos, acessos e restrições operacionais
Curto Prazo	Operacional	Maior nível de detalhe, menor horizonte temporal e maior flexibilidade para ajustes de campo	Organiza atividades diárias, semanais ou mensais, definindo sequência de execução, alocações e controles de aderência

Fonte: Autor

Adicionalmente, o sequenciamento é uma etapa essencial para transformar o planejamento em uma lógica executável de avanço da operação. Em vez de tratar apenas de volumes globais, essa etapa organiza a ordem das atividades, a disponibilidade de frentes, a alocação de equipamentos, os tempos de execução e as restrições que condicionam o avanço da mina ou da estrutura planejada. A abordagem apresentada por Curi (2014) permite compreender o sequenciamento como parte do próprio processo de planejamento de lavra, uma vez que a definição da geometria, dos limites e da sequência de extração deve considerar simultaneamente os fatores e restrições da operação. Assim, o sequenciamento atua como o elo entre a concepção do plano e sua viabilidade prática em campo.

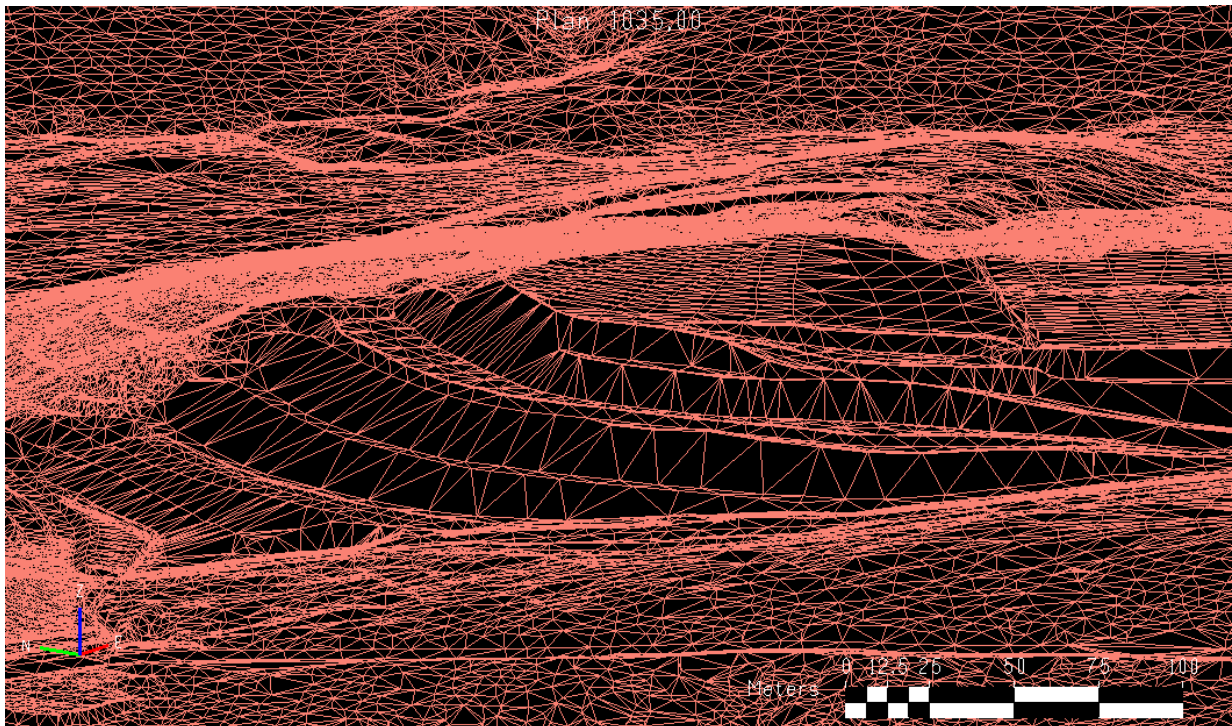
No empilhamento de rejeitos filtrados, essa lógica pode ser transferida para a construção progressiva da pilha, em que setores e camadas de disposição passem a ser tratados como unidades operacionais a serem programadas e controladas. Nesse caso, o planejamento deve ordenar as atividades construtivas da pilha, respeitando as condições geotécnicas e a capacidade dos equipamentos disponíveis. Portanto, a modelagem tridimensional surge como suporte necessário para representar espacialmente essas unidades, organizar o avanço construtivo da pilha e criar uma base para o sequenciamento operacional e a rastreabilidade das camadas.

2.5 Modelagem tridimensional e discretização de estruturas

A modelagem de formas naturais ou estruturas, como topografias, depósitos minerais, feições geológicas, pilhas e escavações mineiras, é realizada por meio de um processo computacional denominado triangulação, que consiste na representação matemática de dados em três dimensões. Nesse contexto, a modelagem de superfícies por meio de uma malha irregular triangulada resulta em um conjunto de polígonos, cujas faces são formadas por triângulos. Essa representação pode ser aplicada à geração de modelos digitais de terreno, utilizados para descrever a distribuição espacial de uma superfície real a partir de algoritmos e de um conjunto de coordenadas tridimensionais (XYZ), enquanto os volumes tridimensionais podem ser representados por meio de modelos conhecidos como *wireframes*. (CORRÊA, 2021).

A construção de um modelo digital de terreno permite a realização de diversas análises, como cálculos de volumes e áreas, além da geração de perfis e seções transversais. Para isso, são utilizados dados provenientes de levantamentos topográficos, obtidos por técnicas como fotogrametria e escaneamento a laser, que possibilitam a reprodução tridimensional precisa das superfícies analisadas. A figura 6 traz uma superfície topográfica que foi modelada por meio de triangularização dos pontos levantados.

Figura 6 – Topografia real triangularizada



Fonte: Autor

Após a modelagem de um objeto tridimensionalmente, parte-se para a etapa de discretização, que é feita a partir da divisão de uma estrutura contínua em unidades menores e controláveis, como setores, camadas ou blocos. Essa abordagem permite converter a geometria global de uma pilha em unidades de planejamento, às quais podem ser associados atributos como volume, localização, tipo de material e etapa construtiva. A aplicação de um modelo de blocos em estruturas de rejeitos segue a mesma lógica do planejamento de mina, em que cada unidade possui localização espacial e características próprias, podendo ser analisada conforme sua função no sequenciamento. Assim, a discretização permite acompanhar a evolução da pilha de forma mais detalhada, relacionando cada unidade modelada às atividades operacionais e aos critérios geotécnicos necessários para sua execução.

No contexto do empilhamento de rejeitos filtrados, a modelagem tridimensional e a discretização da estrutura permitem transformar a pilha em um conjunto de unidades operacionais planejáveis e rastreáveis. Setores e camadas passam a funcionar como referências espaciais para o sequenciamento das atividades, para a alocação de equipamentos e para o registro dos resultados de controle tecnológico.

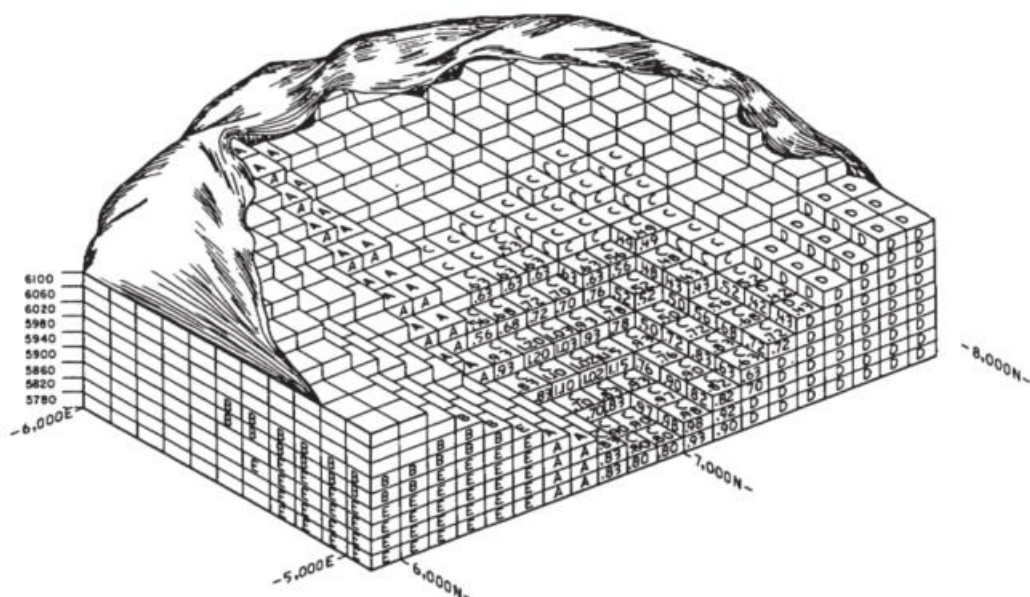
Essa organização cria a base para integrar dados de campo, informações geotécnicas e parâmetros operacionais ao modelo digital da pilha, permitindo que a estrutura seja tratada como um sistema integrado de operações e controle, conforme visto pela ótica de Cacciuttolo e Atencio (2023). Assim, o próximo passo consiste em compreender como os modelos de blocos podem ser utilizados para armazenar, espacializar e interpretar esses atributos, conectando a geometria da estrutura aos dados que orientam sua construção e controle.

2.6 Modelos de blocos e integração de dados geotécnicos

O modelo de blocos representa uma das principais formas de discretização espacial utilizadas na mineração, consistindo na subdivisão de um volume em unidades tridimensionais às quais podem ser atribuídos diferentes atributos técnicos. Essa abordagem permite transformar a geometria de um depósito ou de uma estrutura em uma base de dados estruturada, na qual cada bloco possui posição definida no espaço, coordenadas espaciais referenciadas em relação aos eixos X, Y e Z, e pode armazenar informações como teor, granulometria, densidade, tipo de material, recuperação metalúrgica e propriedades físicas.

Hustrulid, Kuchta e Martin (2013) evidenciam que o modelo de blocos constitui uma ferramenta fundamental no planejamento de mina, pois possibilita representar a variabilidade espacial dos materiais e apoiar análises e decisões relacionadas à lavra e ao sequenciamento, interpretando e quantificando o depósito mineral. Sendo assim, o modelo de blocos representa a geometria do sistema e viabiliza a integração entre dados e planejamento, permitindo que parâmetros técnicos sejam incorporados diretamente à estrutura modelada. Para complementar o entendimento, a Figura 7 apresenta uma representação padrão de um modelo de blocos.

Figura 7 - Representação do Modelo de Blocos



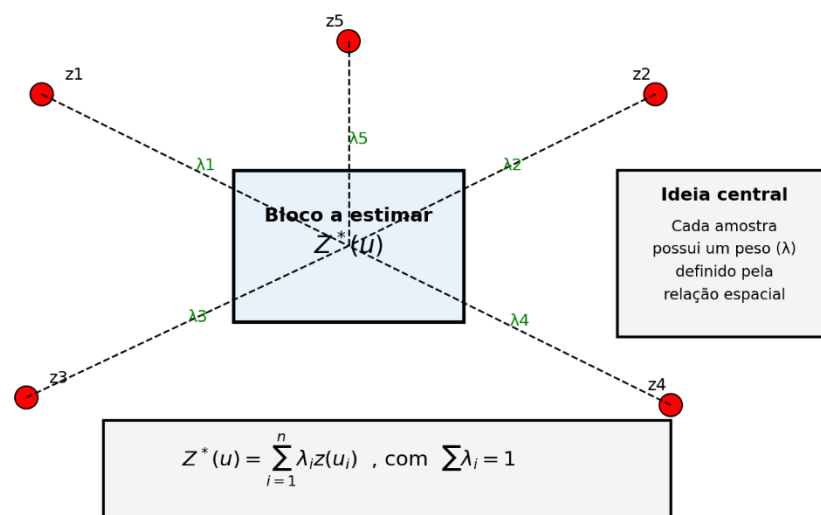
Fonte: Hustrulid e Kuchta e Martin (2013).

Para a confiabilidade e utilização dos modelos de blocos, aplicam-se os métodos de estimativa. Tais métodos têm como objetivo atribuir valores a cada unidade discretizada a partir de dados amostrais disponíveis. Entre os métodos mais utilizados destacam-se o inverso do quadrado da distância e a krigagem, sendo este último amplamente empregado por considerar a continuidade espacial das variáveis. Isaaks e Srivastava (1989) explicam que a krigagem baseia-se na análise da correlação espacial entre os dados, permitindo estimativas mais consistentes ao incorporar a estrutura de variabilidade do fenômeno analisado. Dessa forma, esses métodos possibilitam preencher o modelo de blocos com atributos representativos, fundamentais para análises posteriores e tomada de decisão.

Outro método amplamente difundido consiste na krigagem ordinária. Se trata de um método geoestatístico de estimativa que utiliza combinações lineares ponderadas dos dados amostrais, com o objetivo de produzir estimativas sem viés e com mínima variância do erro. Esse método se destaca por considerar explicitamente a continuidade espacial da variável, o que permite representar de forma mais realista a distribuição dos atributos ao longo do domínio.

Isaaks e Srivastava (1989) ressaltam que, em aplicações práticas, a média dos dados raramente é conhecida com precisão, o que torna a krigagem ordinária mais adequada do que abordagens que exigem esse parâmetro previamente definido. Nesse sentido, a estimativa é obtida impondo-se a condição de que a soma dos pesos seja unitária, garantindo consistência estatística. Devido a essas características, a krigagem ordinária é amplamente adotada em softwares de geologia e mineração para a construção de modelos de blocos, sendo considerada um dos métodos mais confiáveis para a estimativa de variáveis espaciais. A Figura 8 apresenta um esquema da krigagem ordinária e a influência das amostras.

Figura 8 - Esquema conceitual de krigagem



Fonte: Autor

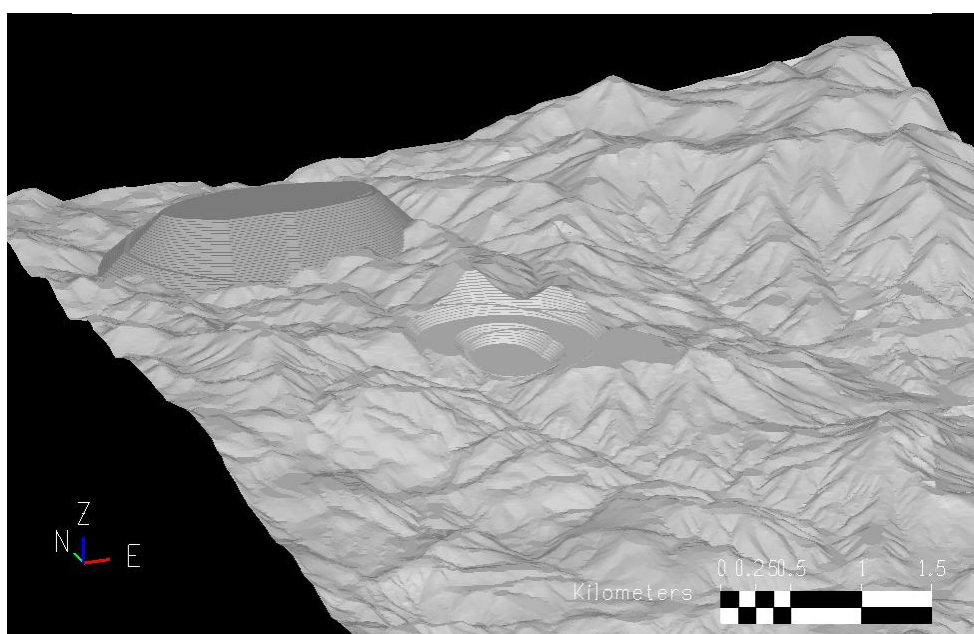
Portanto, a utilização de modelos de blocos associada a métodos de estimativa, como a krigagem ordinária, permite estruturar espacialmente os dados coletados e representar a variabilidade dos parâmetros ao longo de um modelo de interesse. No caso do empilhamento de rejeitos filtrados, essa abordagem possibilita integrar aos blocos informações provenientes de ensaios geotécnicos, como umidade, tipo de material, densidade e grau de compactação, criando uma base tridimensional de dados. Essa integração torna-se útil para acompanhar a qualidade construtiva da pilha, avaliar a distribuição dos parâmetros ao longo da estrutura e apoiar decisões relacionadas ao sequenciamento, controle e otimização da operação.

2.7 Aplicação de softwares de planejamento de mina

O avanço das ferramentas computacionais tem ampliado a capacidade de planejamento e controle das operações de mineração, permitindo a integração entre dados técnicos, modelos espaciais e sequenciamento de atividades. Nesse contexto, os *softwares* de planejamento de mina assumem papel essencial ao transformar informações geológicas e operacionais em planos executáveis, apoiando a tomada de decisão em diferentes horizontes. Segundo Hustrulid, Kuchta e Martin (2013), essas ferramentas são fundamentais para organizar o desenvolvimento da lavra, possibilitando a análise de cenários, o controle da produção e a otimização da operação ao longo do tempo.

A visualização tridimensional dentro desses softwares permite representar, de forma integrada, superfícies, sólidos, modelos de blocos e dados associados, facilitando a interpretação espacial das estruturas e das condições operacionais. No caso de estruturas de disposição, essa capacidade é ainda mais relevante, pois possibilita acompanhar a geometria da pilha e sua evolução construtiva ao longo do tempo. Corrêa (2021) destaca que a modelagem tridimensional de depósitos de rejeitos permite organizar informações espaciais e apoiar análises relacionadas ao sequenciamento e à disposição do material. A Figura 9 traz a visualização de uma topografia e seus elementos dentro de um *software*.

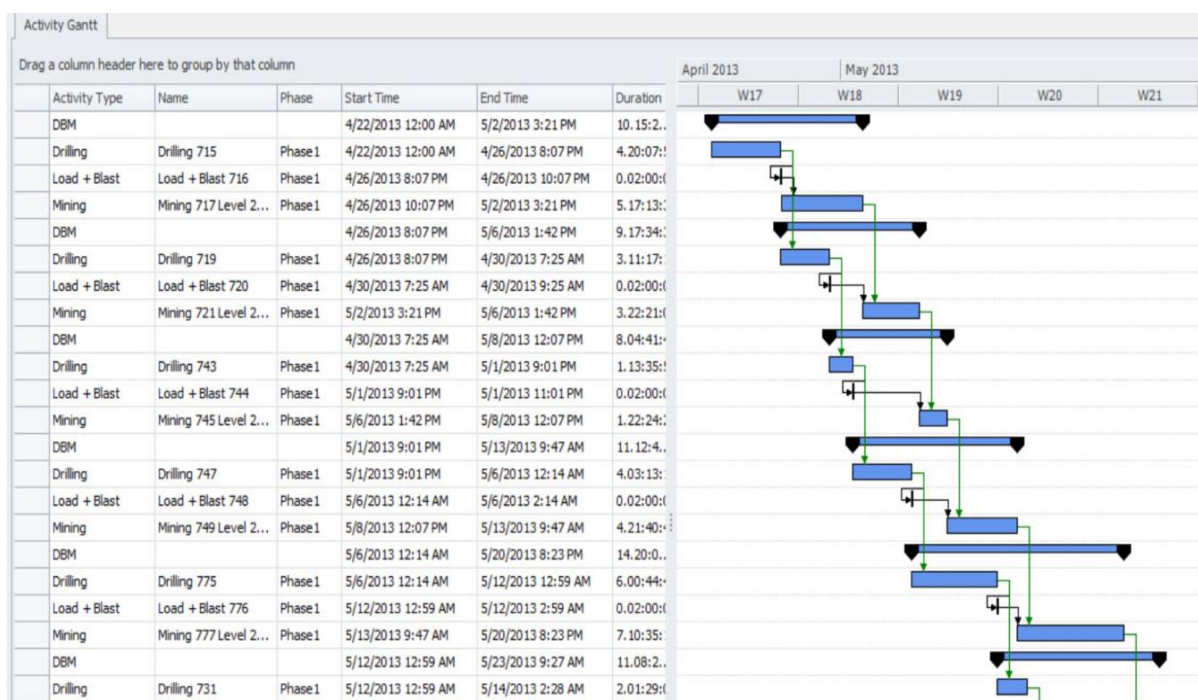
Figura 9 - Visualização de uma topografia e seus elementos



Fonte: Autor

Além das visualizações tridimensionais, mais voltado ao planejamento e sequenciamento de atividades, uma das principais ferramentas utilizadas nesses ambientes é o gráfico de Gantt, que consiste em uma representação temporal das atividades ao longo de um eixo de tempo. Por meio desse tipo de gráfico, é possível visualizar a duração das tarefas, sua sequência de execução e as relações de dependência entre as atividades, facilitando o planejamento, o monitoramento e o controle da operação. De acordo com o Project Management Institute (2017), os gráficos de Gantt são amplamente utilizados na gestão de projetos para organizar cronogramas, identificar restrições e acompanhar a evolução das atividades ao longo do tempo. A Figura é uma exemplificação de um gráfico de Gantt de atividades de mineração.

Figura 10 – Gráfico de Gantt de atividades de mineração.



Fonte: Autor

Em *softwares* de planejamento de mina, esses gráficos são integrados a modelos espaciais e operacionais, possibilitando o controle do avanço das frentes de trabalho e a alocação de recursos. Dessa forma, tornam-se ferramentas importantes para planejamento, acompanhamento e otimização das operações, contribuindo para maior aderência entre o planejado e o executado.

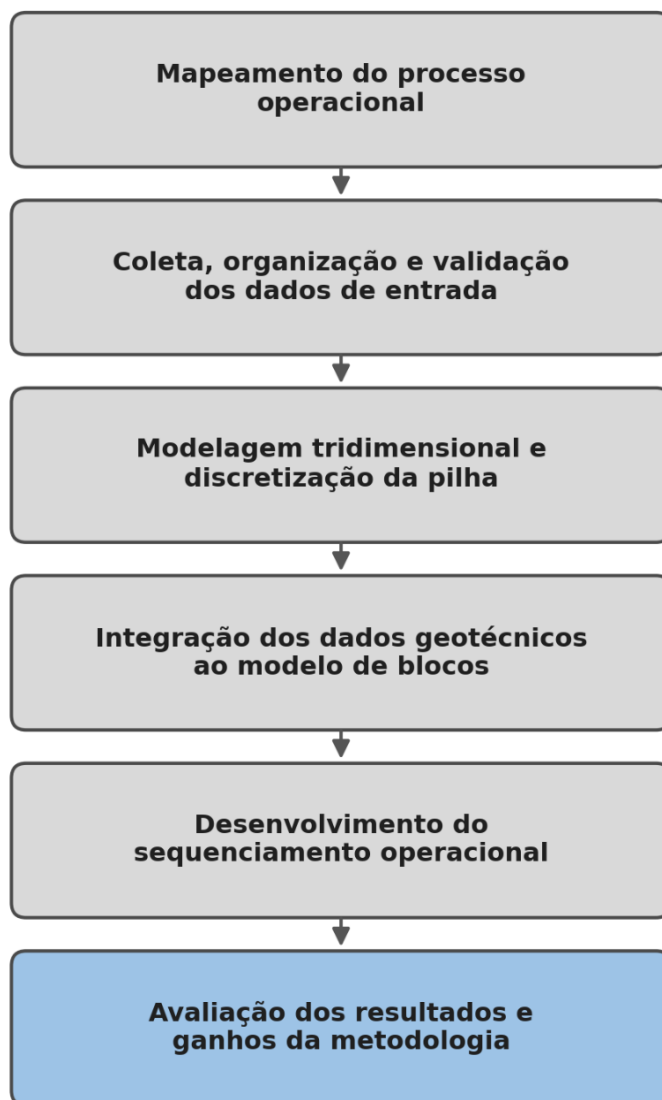
Buscando abordar a prática da disposição de rejeitos em pilhas, o uso dessas ferramentas permite organizar a execução das atividades de forma estruturada, distribuindo-as no tempo e no espaço conforme as condições operacionais da pilha. A associação entre setores, camadas e cronogramas possibilita uma melhor coordenação das etapas construtivas, reduzindo interferências e aumentando o controle sobre a operação. De acordo com Sanches (2011), a organização sistemática das atividades é essencial para garantir maior eficiência e previsibilidade nos processos produtivos. Assim, o planejamento passa a atuar como um guia operacional e como instrumento de controle e tomada de decisão ao longo da construção da estrutura.

No contexto deste trabalho, as etapas de modelagem, discretização, incorporação de dados geotécnicos e sequenciamento operacional foram desenvolvidas com o uso do *software* MinePlan, que permite a integração entre modelos tridimensionais, modelos de blocos e ferramentas de planejamento.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de abordagem predominantemente quantitativa e caráter técnico, desenvolvida a partir de um estudo de caso relacionado ao empilhamento de rejeitos filtrados. Neste estudo, o fluxograma metodológico apresentado na Figura 11, representa as etapas adotadas para aplicação.

Figura 11 - Fluxograma metodológico



Fonte: Autor

A metodologia baseia-se na utilização de ferramentas computacionais para modelagem tridimensional, discretização espacial, integração de dados geotécnicos e sequenciamento operacional de uma pilha de rejeito filtrado de mineração. Buscou-

se compreender as etapas construtivas, os pontos de controle e as principais restrições que poderiam interferir no planejamento e na rastreabilidade da operação.

Para a implementação dessa abordagem, foram utilizadas informações técnicas relacionadas ao empilhamento e ferramentas computacionais de planejamento de mina, com destaque para o *software* MinePlan, da empresa Hexagon, o qual é licenciado e utilizado no laboratório de planejamento de lavra do DEMIN da UFOP. O *software* permite a integração entre modelos tridimensionais, modelos de blocos e sequenciamento operacional. Mais especificamente, os seguintes módulos e ferramentas:

- MinePlan 3D: Visualização e modelagem tridimensional de sólidos e geometrias.
- MStorque: Importação e tratamento de dados geotécnicos de amostras.
- *Model Interpolation Tool*: Ferramenta para interpolação de dados de amostras.
- MinePlan *Activity Scheduler*: módulo de planejamento operacional que permite a criação, sequenciamento e controle de atividades por meio de cronogramas, com base em gráficos de Gantt.

De maneira breve, com base no fluxograma metodológico deste estudo, cada etapa é descrita a seguir:

Mapeamento e Diagnóstico do Processo Operacional: Inicialmente, realizou-se o mapeamento da dinâmica de campo da pilha, compreendendo o ciclo de trabalho e especificidades. Nessa fase, foram identificados os principais gargalos da operação corrente. Esses pontos serviram como base para calibrar as regras do modelo de planejamento.

Coleta, Organização e Validação dos Dados de Entrada: Com o processo mapeado, procedeu-se à consolidação da base de dados técnicos do projeto. Isso incluiu a importação e validação de topografias iniciais, contendo a base da pilha, setores e PRUs.

Modelagem Tridimensional e Discretização da Estrutura: Utilizando o *software* MinePlan, a geometria global do projeto da pilha foi triangularizada e modelada. Para transformar esse sólido em unidades espaciais, a estrutura foi

discretizada por meio da interseção entre as poligonais de setorização e o fatiamento em camadas horizontais de compactação.

Integração de Dados Geotécnicos ao Modelo de Blocos: A partir da pilha discretizada, foi construído um modelo de blocos tridimensional, utilizando ferramentas de importação e tratamento de dados de amostras e algoritmos de interpolação, os resultados de ensaios tecnológicos de campo, foram estimados e gravados diretamente nos blocos correspondentes. Essa etapa garante uma base de dados espacializada para a rastreabilidade e controle de qualidade da construção.

Desenvolvimento do Sequenciamento Operacional: Por fim, as unidades discretizadas foram integradas ao módulo de sequenciamento. Nessa atividade, estruturou-se um cronograma operacional detalhado por meio de gráficos de Gantt, parametrizando-se as frotas de equipamentos, taxas de rendimento, dependências construtivas entre setores e regras lógicas de direcionamento do material.

Ao unificar essas etapas, a construção da estrutura ganha maior previsibilidade e passa a ser guiada por melhores indicadores de controle de qualidade vinculados ao trabalho real em campo. A seguir, será apresentado o detalhamento prático de cada uma das fases, bem como os resultados, discussões e conclusões acerca da metodologia.

4 ESTUDO DE CASO

Este estudo de caso tem como objetivo descrever detalhadamente a aplicação da metodologia proposta ao processo de empilhamento de rejeitos filtrados, considerando as condições operacionais e os desafios associados à construção e controle da pilha. A abordagem adotada baseia-se na integração entre modelagem tridimensional, discretização da estrutura, incorporação de dados geotécnicos e planejamento das atividades operacionais, buscando estruturar o processo de disposição como uma sequência organizada, rastreável e orientada por dados.

4.1 Mapeamento do processo operacional

O processo operacional considerado refere-se à construção de uma pilha de disposição de rejeito (PDR), implantada em uma mina no Quadrilátero Ferrífero. Trata-se de uma estrutura operada com base em diretrizes específicas de construção, monitoramento e controle, tendo como objetivo garantir segurança, rastreabilidade e desempenho geotécnico ao longo da sua vida útil. Ao final da construção, é estimado que a estrutura possua um total de cerca de 1.000.000 de metros cúbicos de material. O rejeito total disposto na pilha é composto, no caso base, por 20% de massa de ultrafino e 80% de rejeito arenoso, sendo registrada variabilidade granulométrica associada a fatores operacionais como o tipo de minério beneficiado, a dosagem de floculantes, o controle da proporção de ultrafinos e a densidade da polpa na alimentação dos filtros a disco.

A operação parte do recebimento de material proveniente do processo de filtragem e sua destinação é definida, principalmente, em função da umidade de saída da usina. É estabelecida uma faixa alvo de umidade de compactação entre 11% e 14%, associada ao melhor desempenho de compactação com rolo liso de 12 toneladas sem vibração; abaixo desse intervalo, o ramo seco é admitido a partir de 10%, com possibilidade de compactação com vibração; acima de 16%, o material deve ser direcionado à Praça de Redução de Umidade (PRU), onde passa por secagem e revolvimento antes de retornar à praça de trabalho na pilha.

A espessura das camadas varia conforme as condições de umidade e o controle operacional adotado. Camadas de aproximadamente 30 cm são utilizadas

principalmente em situações que exigem maior secagem e controle da umidade, favorecendo a evaporação e o tratamento do material. Já camadas mais espessas, de até 50 cm, são aplicadas quando o rejeito se encontra dentro da faixa adequada de umidade e compactação, permitindo maior produtividade sem comprometer os critérios geotécnicos estabelecidos.

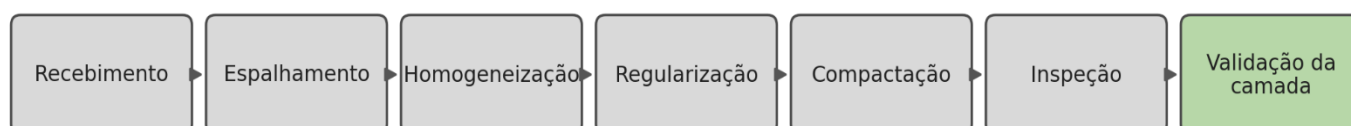
A setorização da praça de operação é fundamental para organizar a disposição do rejeito filtrado conforme sua condição de umidade, granulometria e função dentro da pilha, permitindo separar áreas destinadas ao manejo temporário, à secagem do material e à compactação definitiva. Essa estratégia é importante porque o manejo do rejeito está associado à umidade e à presença de ultrafinos: materiais com porcentagem passante em 10 micras inferior a 12% tendem a demandar menor tempo de secagem, enquanto rejeitos com passante entre 12% e 22% podem exigir maior tempo até atingir condição adequada de compactação.

Nesse contexto, a zona estrutural recebe materiais compactados dentro da faixa alvo de umidade, entre 11% e 14%, devendo atender a critérios mais rigorosos, como densidade seca mínima de $1,90 \text{ g/cm}^3$, índice de vazios máximo de 0,60, grau de saturação inferior a 80% e ausência de comportamento borrachudo. Já a zona confinada é destinada a materiais na faixa úmida, entre 14% e 16%. Portanto, a setorização permite associar as características do material com os requisitos geotécnicos de cada zona, otimizando a operação.

A liberação das camadas compactadas é condicionada ao atendimento de critérios geotécnicos e operacionais definidos para cada zona da pilha. Na zona externa, exige-se densidade seca mínima de $1,90 \text{ g/cm}^3$, índice de vazios máximo de 0,60, grau de saturação inferior a 80% e ausência de comportamento borrachudo; já na zona interna, admitem-se densidade seca mínima de $1,84 \text{ g/cm}^3$ e índice de vazios inferior a 0,65, mantendo-se o limite de saturação igual. Esses controles são verificados por ensaios de campo e laboratório, como cilindro biselado para densidade seca, aferição de umidade por métodos expeditos validados em estufa, além da verificação topográfica da espessura da camada e do cadastro dos pontos de liberação.

Essa sequência de controles é coerente com as exigências operacionais e de segurança para este tipo de trabalho, como evidenciado por Sanches (2011), como mostra a sequência das etapas na Figura 12 na qual o empilhamento é estruturado, sendo relevante destacar que nem sempre a exata sequência é adotada, ocorrendo variações, imprevistos e retrabalhos, articulando o comportamento do material às decisões operacionais de campo.

Figura 12 - Sequência das etapas do empilhamento



Fonte: Autor

Assim, o mapeamento do processo operacional evidencia que a construção da pilha não depende apenas do lançamento do rejeito, mas de uma sequência integrada de decisões relacionadas à origem do material, à sua condição de umidade, ao destino na praça ou na PRU, à zona de disposição, à espessura das camadas e aos critérios de liberação geotécnica. Esse entendimento foi fundamental para estruturar a evolução do estudo nas etapas seguintes.

4.1.1 Principais restrições e gargalos operacionais identificados

A partir da compreensão da complexidade da operação, foram identificadas restrições e gargalos associados à padronização do planejamento, à coordenação entre frentes de trabalho e ao controle tecnológico das etapas. Como exemplo destaca-se a necessidade de direcionamento do material para PRUs em condições fora da faixa adequada sem a existência de um padrão para esse direcionamento. Além disso, foram observadas lacunas relacionadas à disponibilidade de indicadores reais de produtividade da frota e à validação espacial dos dados de campo, aspectos que reforçam os possíveis ganhos de uma metodologia integrada. A Tabela 3 traz os principais pontos de melhoria mapeados, e que serão abordados posteriormente neste trabalho.

Tabela 3 - Gargalos identificados na Operação

Gargalo identificado	Impacto na operação
Atividades de infraestrutura repetitivas e de baixa produtividade	Pode gerar retrabalho e custos excessivos, especialmente na compactação
Falta de indicadores reais de produtividade da frota	Reduz a precisão do cronograma e dificulta a calibração do sequenciamento
Falta de padronização do direcionamento do material oriundo da filtragem	Uso desbalanceado das PRUs, maior tempo de secagem, acúmulo de material em áreas temporárias e atraso no retorno do rejeito à frente de disposição
Baixa rastreabilidade entre ensaios, material e localização na pilha	Reduz a confiabilidade da liberação das camadas e dificulta identificar onde estão eventuais desvios de umidade, densidade ou compactação
Gargalos na coordenação de frentes simultâneas em diferentes estágios construtivos	Pode causar interferência entre frentes, ociosidade de equipamentos e perda de continuidade no avanço construtivo da pilha

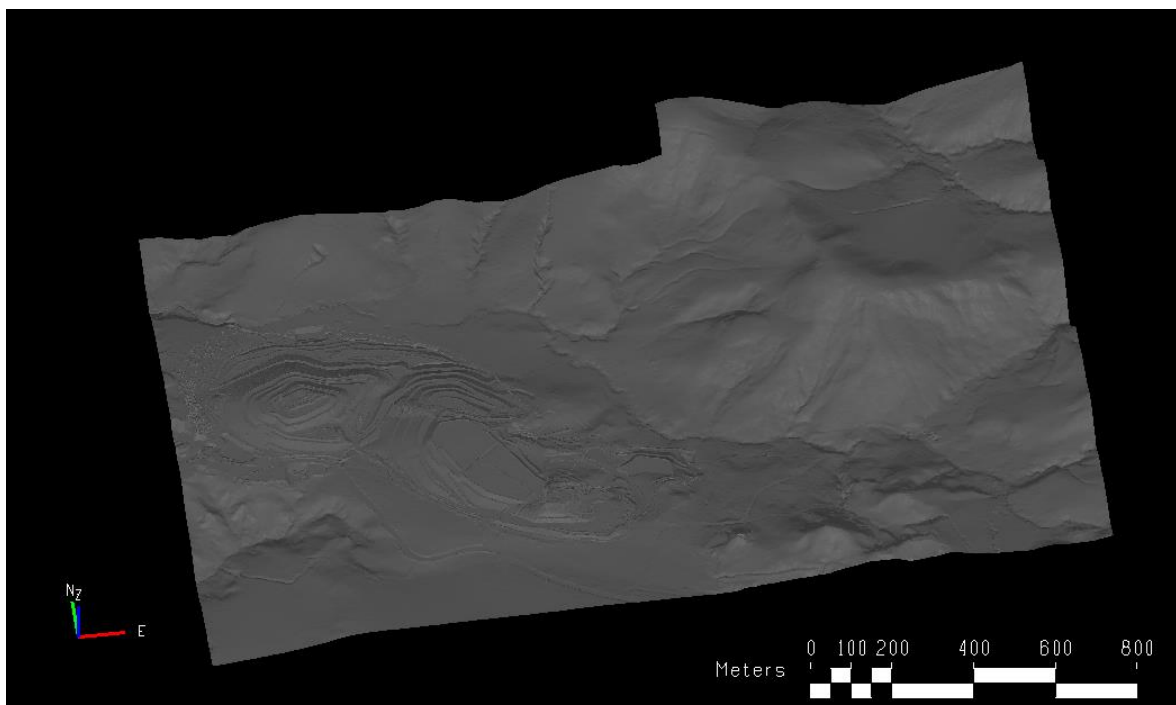
Fonte: Autor

4.2 Coleta, organização e validação dos dados de entrada

A etapa inicial do estudo consistiu na importação para o *software* MinePlan e no tratamento das superfícies topográficas da área destinada à disposição do rejeito, contemplando a base estrutural da Pilha de Disposição de Rejeitos (PDR), as áreas adjacentes e as Praças de Redução de Umidade (PRUs). A utilização de dados topográficos como base para a construção de modelos tridimensionais permite representar espacialmente a geometria da estrutura e subsidiar análises posteriores de volume, setorização e planejamento.

Corrêa (2021) destaca que a modelagem tridimensional de depósitos de rejeitos possibilita organizar informações espaciais e apoiar estudos de estimativa e sequenciamento, enquanto Hustrulid, Kuchta e Martin (2013) ressaltam a importância da representação espacial no planejamento de mina. A Figura 13 representa a visualização da topografia importada dentro do *software*.

Figura 13 - Topografia importada para o *software*



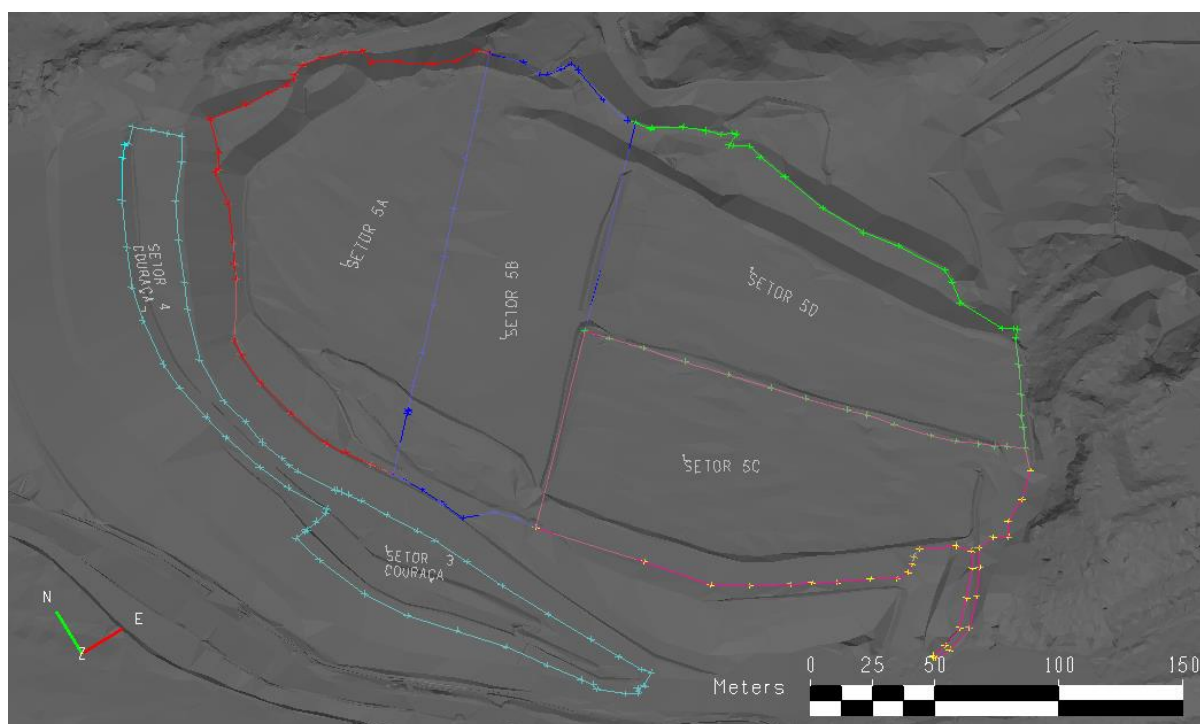
Fonte: Autor

A partir dessa base, a praça de disposição foi subdividida em setores menores e independentes, considerando a organização entre zona estrutural e zona confinada. Essa setorização constitui uma etapa fundamental para transformar a pilha em unidades operacionais planejáveis, permitindo que a construção da estrutura seja organizada de forma compatível com a dinâmica real de campo. A divisão física da área possibilita a coordenação de frentes simultâneas em diferentes estágios construtivos, como recebimento do material, espalhamento, regularização, compactação e validação da camada.

Dessa forma, enquanto um setor recebe o material filtrado proveniente da usina, outros podem avançar em etapas subsequentes do processo, reduzindo interferências e favorecendo a continuidade operacional. Essa lógica reforça a importância da organização sistemática das atividades no planejamento, uma vez que

a distribuição espacial das frentes de trabalho contribui para melhor uso dos recursos, redução de gargalos e maior aderência entre o planejamento e a execução. A Figura 14 ilustra a setorização definida para a PDR.

Figura 14 - Setorização definida para a pilha



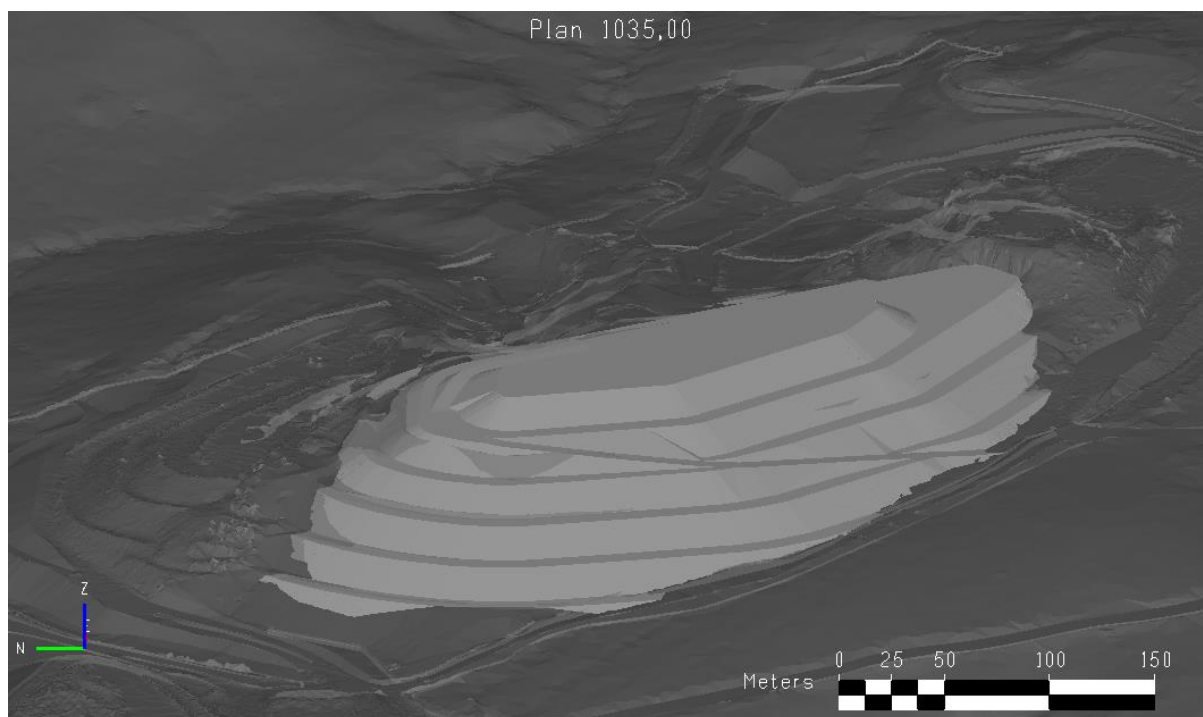
Fonte: Autor

4.3 Modelagem tridimensional e discretização da pilha

Com a base topográfica organizada e a área de disposição previamente setorizada, a etapa seguinte consistiu na construção do modelo tridimensional da pilha. Para isso, foram utilizados arquivos geométricos associados ao projeto da estrutura, os quais serviram como referência para a representação espacial da Pilha, sendo possível visualizá-la na Figura 15.

A construção do modelo volumétrico da pilha foi realizada a partir da compatibilização entre a topografia inicial, as linhas geométricas georreferenciadas do projeto, permitindo representar a estrutura no ambiente do *software*. Essa etapa foi essencial para garantir que o modelo digital estivesse aderente às condições espaciais da área de disposição e à geometria prevista para o avanço construtivo.

Figura 15 - Modelo Tridimensional da PDR



Fonte: Autor

Após a geração do sólido macro da Pilha de Disposição de Rejeitos, tornou-se necessária sua subdivisão espacial, com o objetivo de transformar a geometria contínua da estrutura em unidades operacionais independentes. Para isso, foram utilizadas as poligonais de setorização (Apresentadas na Figura 14) previamente definidas sobre a base topográfica, permitindo o seccionamento vertical do modelo tridimensional.

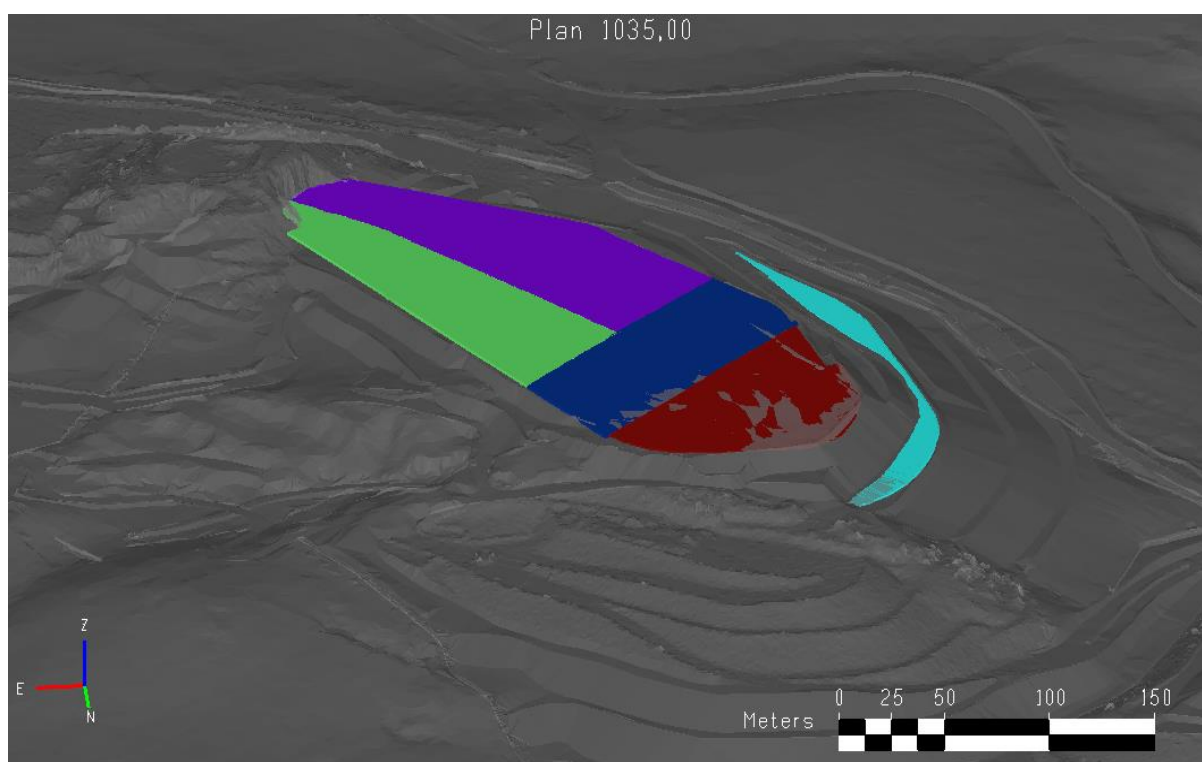
Durante essa etapa, setores inicialmente individualizados foram reorganizados quando necessário, de modo a simplificar a interpretação e a operacionalização do modelo no ambiente computacional. Essa divisão do sólido em setores planejáveis constitui uma premissa fundamental para o sequenciamento operacional, pois permite associar diferentes atividades a frentes de trabalho simultâneas, representando de forma mais adequada a dinâmica da operação em campo.

Na sequência, com o objetivo de representar a metodologia construtiva do empilhamento a seco, o modelo tridimensional previamente setorizado foi subdividido verticalmente em camadas. Esse fatiamento foi aplicado sobre os sólidos geométricos já separados pelos setores, de modo que a interseção entre cada setor e sua respectiva faixa de elevação resultasse em sólidos independentes. Assim, cada

camada passou a constituir uma unidade espacial própria, permitindo maior detalhamento da evolução construtiva da pilha.

A espessura das camadas foi parametrizada conforme as diretrizes construtivas adotadas no estudo, considerando espessuras de 30 cm ou 50 cm em função das condições de umidade e manejo do rejeito filtrado. Essa discretização é essencial para o sequenciamento operacional, pois permite que cada setor e camada sejam tratados como unidades autônomas de planejamento, possibilitando a alocação de atividades distintas em frentes simultâneas e reproduzindo com maior fidelidade a dinâmica de construção real. A Figura 16 apresenta a camada de cota 1035, dividida pelos setores, cada um com uma cor.

Figura 16 - Camada de cota 1035, dividida pelos setores



Fonte: Autor

Conforme é possível observar na Figura 16, ocorrem sobreposições e intersecções geométricas entre a superfície topográfica base e os sólidos setorizados da pilha, decorrentes da compatibilização entre diferentes bases no ambiente de modelagem tridimensional. Essas inconsistências visuais, entretanto, não inviabilizam o uso do modelo para fins de planejamento operacional, uma vez que os volumes das unidades planejadas podem ser ajustados com base nos quantitativos de projeto.

Assim, eventuais imperfeições gráficas são tratadas como limitações geométricas controláveis, sem comprometer a função principal do modelo como suporte ao sequenciamento e à organização espacial das atividades.

Portanto, a modelagem tridimensional e a discretização da pilha permitiram transformar a estrutura em unidades espaciais independentes, organizadas por setores e camadas construtivas. A partir dessa estrutura espacial, torna-se possível avançar para a integração dos dados geotécnicos a um modelo de blocos, permitindo que informações provenientes de ensaios e controles tecnológicos sejam associadas à localização correspondente na pilha.

4.4 Integração dos dados geotécnicos e modelo de blocos

Neste ponto, é apresentado o procedimento adotado para a importação e tratamento de dados provenientes de ensaios geotécnicos no ambiente do *software*, com o objetivo de permitir sua visualização, análise e posterior utilização no modelo de blocos. Essas informações constituem a base para a incorporação de parâmetros de controle ao modelo, possibilitando que os dados sejam utilizados, posteriormente, como critérios para suporte ao planejamento operacional. Inicialmente, foram identificadas as variáveis de interesse a serem incluídas no sistema, representadas por atributos associados aos dados de campo.

Na sequência, esses atributos foram estruturados e parametrizados no ambiente da ferramenta MSTorque, permitindo a recepção e organização dos dados provenientes da base utilizada para armazenamento dos resultados dos ensaios. Após a importação, os dados tornaram-se disponíveis para manipulação, análise e integração com os modelos espaciais, constituindo uma etapa fundamental para viabilizar a associação entre informações geotécnicas e a geometria da pilha no modelo digital. A Figura 17 apresenta uma planilha de dados importados no *software*.

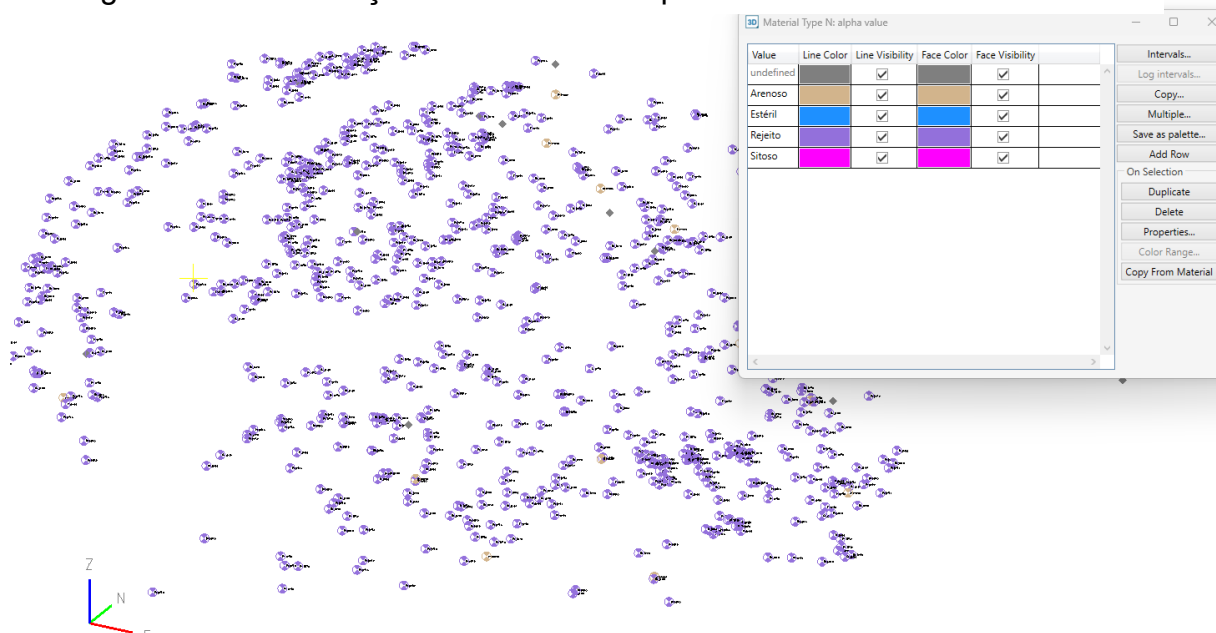
Figura 17 - Planilha de dados importados no *software*

	A	B	C	D	E	F	AA	AB
1	_id	X	Y	Z	Datum	Zone	material_classification	material_type
2	648b12bbf243b00f87748ebc	623861.131	7739727	1117.046	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
3	648b5510efa409272ad68542	623674.03	7739750	1113.511	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
4	648b5510efa409272ad6856a	623771.216	7739721	1117.687	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
5	64905ebb9f86f6b68fcb1aa4	623707.104	7739894	1122.449	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
6	64905f769f86f6b68fcb1ad8	623731.138	7739837	1121.148	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
7	64905ff39f86f6b68fcb1b00	623789.774	7739829	1120.747	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
8	649060499f86f6b68fcb1b20	623780.08	7739789	1120.144	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
9	6491f05af5b79a33c59e8c10	623778.613	7739827	1120.342	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
10	6491f05af5b79a33c59e8c22	623779.088	7739828	1120.339	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
11	6493327849e1ea8d70d358ae	623670.409	7739840	1120.855	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
12	649332e749e1ea8d70d358fc	623699.996	7739829	1121.084	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
13	649332e749e1ea8d70d35910	623688.078	7739795	1120.11	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
14	649332e849e1ea8d70d35938	623632.375	7739910	1107.764	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
15	6495da1d86f9feea178969f1	623816.501	7739682	1117.046	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
16	6495da1e86f9feea17896a00	623835.653	7739692	1118.556	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
17	6495da1f86f9feea17896a14	623831.356	7739725	1119.362	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
18	6495da1f86f9feea17896a28	623829.791	7739777	1120.525	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
19	6495da1f86f9feea17896a3c	623678.137	7739744	1114.029	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
20	6495da1f86f9feea17896a5a	623699.923	7739709	1114.251	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
21	64962d95edd4ff8df50aebee	623858.526	7739729	1119.699	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
22	649c6bb6fcf1439b1bc55df5	623806.73	7739642	1117.8	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
23	649c6bb6fcf1439b1bc55e04	623774.539	7739725	1118.201	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
24	649c6bb6fcf1439b1bc55e13	623746.018	7739700	1117.58	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
25	649c6bb6fcf1439b1bc55e22	623786.312	7739641	1117.682	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
26	649f05fca24c7de4aad57e1d	623790.626	7739814	1120.901	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
27	649f05fca24c7de4aad57e31	623742.218	7739828	1121.117	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
28	649f05fca24c7de4aad57e3a	623717.282	7739852	1121.88	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
29	649f05fda24c7de4aad57e43	623710.278	7739866	1122.866	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
30	64a80ffcb969c960e666e6	623692.263	7739835	1121.547	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
31	64a80ffcb969c960e666ef	623676.651	7739809	1120.726	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
32	64a80ffcb969c960e666f8	623696.216	7739768	1119.988	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
33	64a80ffcb969c960e666701	623739.112	7739772	1120.223	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
34	64a80ffcb969c960e66670a	623793.518	7739768	1120.427	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
35	64a80ffcb969c960e666713	623812.298	7739718	1119.524	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
36	64a80ffcb969c960e66671c	623860.446	7739715	1119.983	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito
37	64a80ffcb969c960e666725	623843.051	7739765	1120.923	WGS84	23	Marrom Arenoso	Rejeito

Fonte: Autor

Com os dados devidamente importados e validados, a interface gráfica do *software* permite a sua visualização espacial, conforme ilustra a Figura 18.

Figura 18 - Visualização das amostras importadas dentro do MinePlan3D.

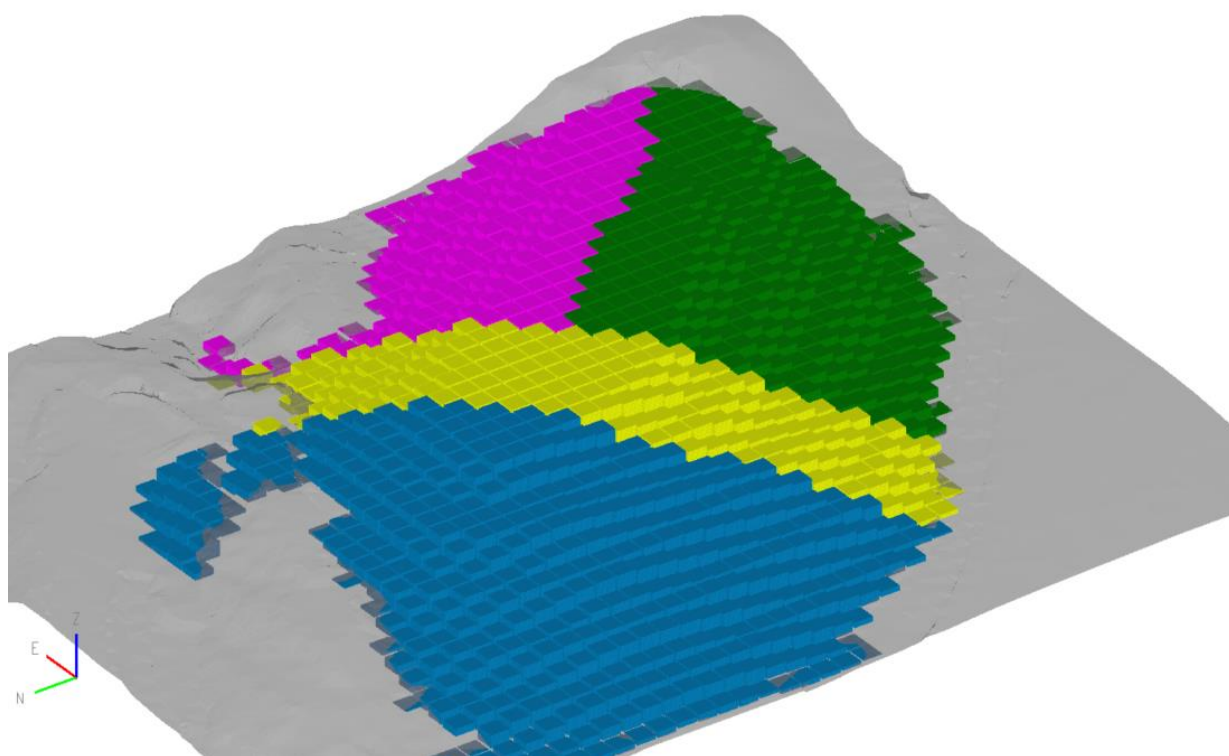


Fonte: Autor

4.4.1 Interpolação dos dados e modelo de blocos

Tratando-se da realização da estimativa e integração dos dados geotécnicos, foi previamente definido um modelo de blocos base, estruturado conforme a discretização da pilha em setores e camadas. A malha geométrica adotada foi parametrizada com dimensões de 5 m $\times$ 5 m no plano horizontal (eixos X e Y) e 0,5 m de espessura no eixo vertical (Z), compatível com a espessura das camadas de compactação definidas para a estrutura. Essa configuração permitiu que o modelo refletisse a lógica construtiva do empilhamento. A Figura 19 apresenta o modelo de blocos, com um filtro separando os blocos por seus respectivos setores.

Figura 19 - Modelo de blocos da pilha setorizada

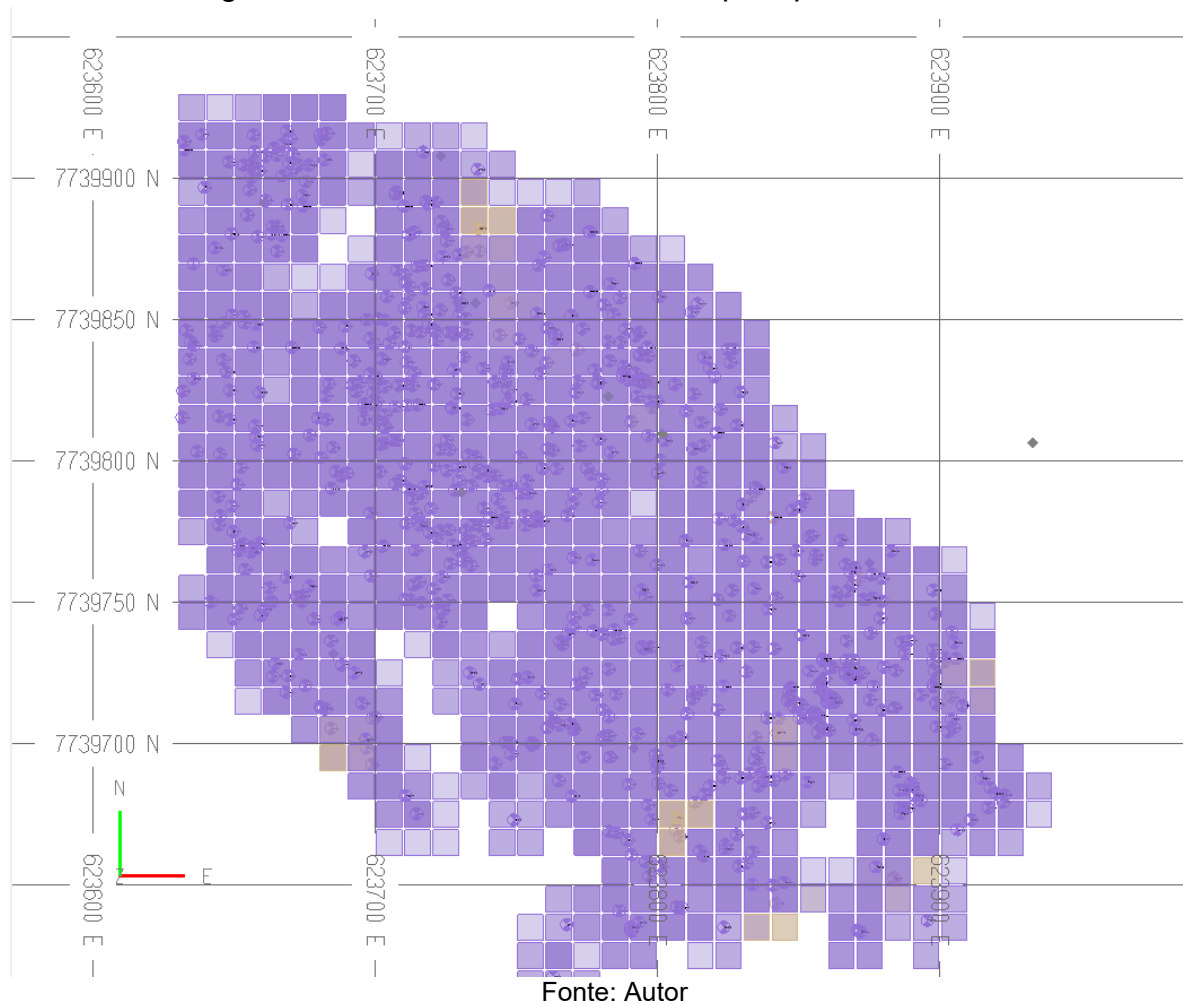


Fonte: Autor

Para viabilizar o uso das informações pontuais provenientes das amostras, utilizou-se a ferramenta *Model Interpolation*, a qual permite a estimativa dos atributos ao longo do volume modelado, adotando, entre outros métodos, a krigagem ordinária como técnica de interpolação espacial. Como teste de aplicação, para o atributo “Tipo de Material”, previamente tratado, foi utilizado o método de estimativa poligonal, que possibilita a atribuição das características observadas nas amostras aos blocos adjacentes. Dessa forma, tornou-se possível representar de maneira contínua a

distribuição dos diferentes materiais ao longo da pilha, como é possível observar na Figura 20, em que uma seção do modelo está filtrada para apresentar os diferentes tipos de material que compõem a estrutura da pilha.

Figura 20 - Modelo de blocos filtrado por tipo de material



Portanto, a integração dos dados geotécnicos ao modelo de blocos permitiu consolidar, em uma única base espacial, informações relacionadas à geometria da pilha e aos parâmetros de controle obtidos em campo. Essa estrutura possibilita a interpretação da distribuição dos atributos ao longo da pilha, ampliando a rastreabilidade das camadas e o entendimento das condições construtivas da estrutura. A partir dessa organização dos dados e da definição das unidades espaciais, estabelece-se uma base adequada para o planejamento das atividades operacionais.

4.5 Desenvolvimento do sequenciamento operacional

A etapa de planejamento operacional foi desenvolvida na ferramenta *MinePlan Activity Scheduler (MPAS)*, com o objetivo de organizar as atividades de empilhamento em uma sequência lógica. Nessa fase, foram configuradas as unidades de planejamento, as origens do material, as relações de precedência, os recursos operacionais e as premissas de produtividade, permitindo representar o ciclo construtivo da pilha. As principais configurações realizadas foram:

- Fluxo de atividades e origens do material: definição da sequência operacional para cada unidade de planejamento, considerando as etapas da operação, além das possíveis origens do material, como filtragem e PRUs.
- Relações de precedência: configuração das dependências entre atividades, garantindo que cada etapa fosse executada conforme a lógica construtiva da pilha e respeitando a ordem necessária.
- Recursos e produtividades: parametrização dos equipamentos associados às atividades, bem como das taxas de produtividade e disponibilidade consideradas.
- Estruturação do cronograma: organização das atividades em um cronograma operacional, permitindo representar frentes simultâneas em diferentes estágios construtivos, com o objetivo de analisar os resultados obtidos.

Uma das primeiras configurações realizadas consistiu no cadastro das possíveis origens do material a ser disposto na pilha, como mostra a Figura 21. Essa etapa teve como objetivo representar os diferentes pontos de partida do rejeito filtrado ao longo do processo, incluindo o material proveniente diretamente da filtragem e o material previamente direcionado às Praças de Redução de Umidade (PRUs). A inclusão dessas origens permite que o sequenciamento considere diferentes rotas operacionais do material, de acordo com sua condição de umidade, necessidade de tratamento e destino previsto na praça de disposição.

Além do cadastro das origens, foram configuradas propriedades associadas às pilhas e às unidades de planejamento, com o objetivo de padronizar a tomada de decisão dentro do modelo. Essas propriedades permitem representar atributos relevantes para a operação, como condição do material, origem, destino, faixa de

umidade e necessidade de tratamento. Sendo assim, a configuração proposta cria uma lógica mais estruturada para o direcionamento do rejeito, reduzindo a dependência de decisões pontuais e favorecendo maior uniformidade no uso das PRUs e na organização das frentes de trabalho.

Figura 21 - Possíveis origens de material

The screenshot shows a software configuration window. On the left is a 'Properties' sidebar with a search bar and a list of categories: General, Scheduling Periods, Properties (selected), Activity Types, Activity Sets, Haul Fleets, Crew Rosters, Resources, Resource Rates, and Working Calendar. The main area is titled 'Validation' and contains a table with two columns: 'Previous Name' and 'Name'. The table lists several entries, including FILTERING, PRU-B, PRU-G, PRU-BOC01, PRU-A, PRU-K, PRU-E-DIREITO, PRU-E-ESQUERDO, and PRU-E-INFERIOR. Below the table is an 'Auto Populate' button. At the bottom, there is a 'Starting Value' section with a checkbox 'Use calculation' and a dropdown menu 'Default Value' currently set to 'FILTERING'. On the right side of the window, there are sections for 'Show Reserves' (with a checked 'Show On Reserves' checkbox) and 'Serialization' (with a 'Method' dropdown set to 'Unexposed'). 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom right.

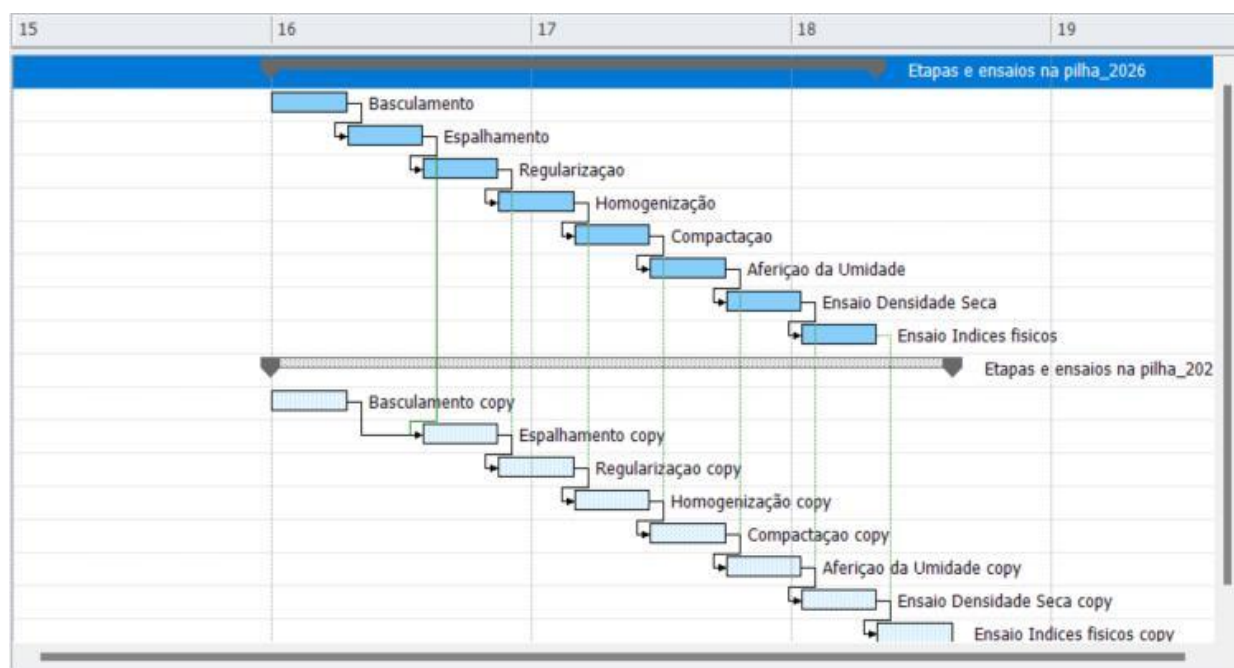
Fonte: Autor

Posteriormente, foram cadastradas e parametrizadas as atividades essenciais que compõem o ciclo construtivo do empilhamento. Para cada atividade, foram definidos parâmetros operacionais específicos, incluindo o vínculo com propriedades do material e a definição de métricas de produtividade, como unidades de medida e taxas de avanço.

Além do cadastro das atividades, foram definidos os conjuntos de atividades responsáveis por organizar a sequência do planejamento, estabelecendo as relações de precedência entre as tarefas. Essa estrutura possibilita a criação de fluxos operacionais distintos, com inclusão ou remoção de etapas conforme as condições e os objetivos do planejamento. No presente estudo, foi adotado um fluxo macro

padronizado apresentado na Figura 22, capaz de representar as principais etapas construtivas da pilha e servir como base para a posterior geração do cronograma.

Figura 22 - Fluxo macro das atividades na PDR



Fonte: Autor

O próximo passo, foi realizar a configuração da frota operacional associada às atividades de construção da pilha. Cada classe de equipamento foi vinculada à sua respectiva etapa do ciclo construtivo, como indicado na Tabela 4, permitindo que o planejamento considerasse a disponibilidade e a função de cada recurso dentro do processo.

Tabela 4 - Equipamento e respectiva tarefa

Equipamento	Atividade
Motoniveladora	Regularização
Trator de Esteiras	Espalhamento
Rolo Compactador	Compactação
Trator Agrícola	Homogeneização
Caminhão Pipa	Umectação

Fonte: Autor

Um aspecto relevante dessa configuração foi a definição das taxas de produtividade associadas a cada classe de equipamento, expressas em volume por hora. Como o histórico de rendimento da frota ainda não estava integralmente consolidado, parte dessas taxas foi inferida, baseada em estimativas e capacidades nominais. Essa condição evidencia a importância de estudos de tempos e movimentos em campo, de modo que os indicadores reais de produtividade possam ser aferidos e posteriormente utilizados para calibrar o modelo, aumentando a precisão do cronograma e a confiabilidade do sequenciamento operacional.

As configurações apresentadas correspondem aos principais parâmetros utilizados para estruturar o sequenciamento da pilha, contemplando os principais aspectos. Além desses elementos, o ambiente de planejamento também permite a definição de outros parâmetros complementares, como calendários operacionais, disponibilidade de recursos ou restrições específicas. Em conjunto, essas configurações compõem a base necessária para representar a lógica de execução da pilha e gerar um sequenciamento compatível com as premissas adotadas no estudo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

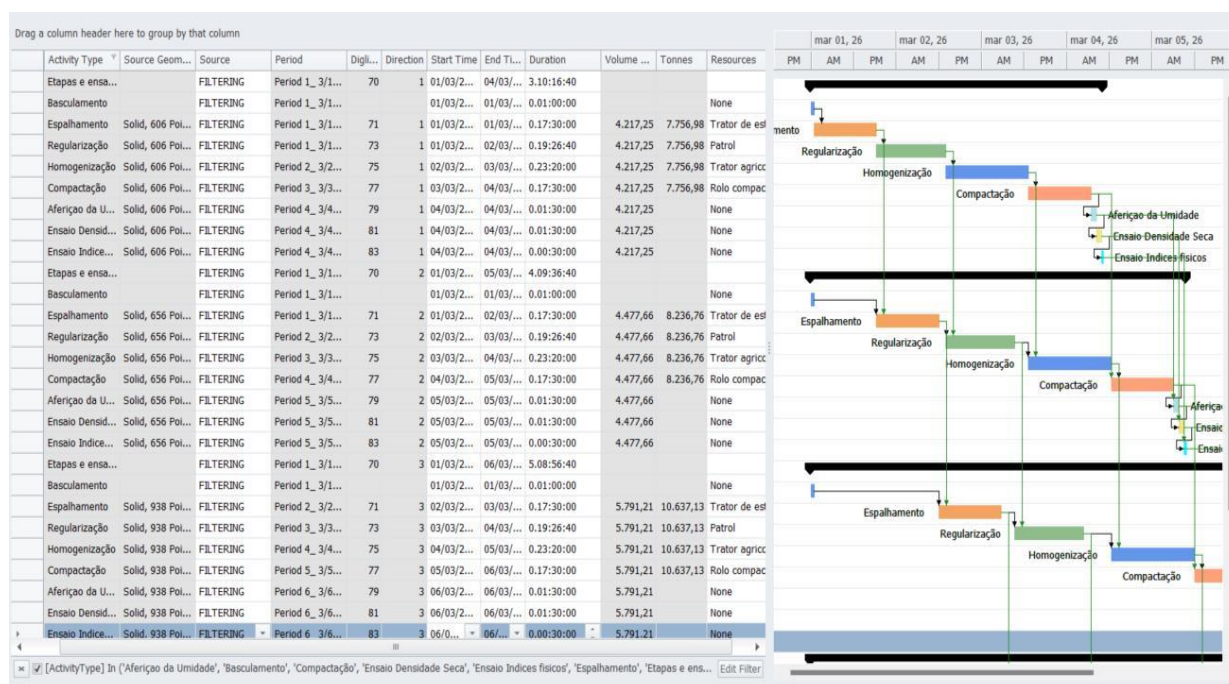
Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta para o planejamento e operacionalização do empilhamento de rejeitos filtrados. A análise concentra-se na interpretação dos produtos gerados ao longo do estudo, incluindo o sequenciamento operacional, os relatórios extraídos do *software*, a organização das frentes de trabalho e a rastreabilidade dos dados geotécnicos no modelo. A discussão busca relacionar esses resultados aos principais gargalos identificados, evidenciando como a integração das etapas pode contribuir para maior controle e suporte à tomada de decisão na construção da pilha.

5.1 Sequenciamento gerado

O sequenciamento operacional gerado representa o principal produto da etapa de configuração das atividades no MinePlan *Activity Scheduler*, consolidando em um cronograma as unidades espaciais previamente modeladas, as atividades do ciclo construtivo, as relações de precedência e os recursos operacionais associados. Nesta aplicação, o sequenciamento foi desenvolvido para a camada de elevação 1135, a partir da seleção dos sólidos correspondentes aos setores discretizados da pilha.

Para que esses sólidos fossem incorporados ao planejamento, foram atribuídos parâmetros essenciais à sua identificação e operacionalização, como setor, camada, origem do material, volume e tonelagem, atividade, tempo de execução, data de início, ordem associada e premissas de produtividade para a frota. Com isso, cada unidade geométrica passou a ser interpretada como uma unidade de planejamento, permitindo a representação do avanço construtivo por meio de uma tabela e gráfico de Gantt vinculados. A Figura 23 apresenta esses dados gerados no *software*.

Figura 23 - Tabela e Gráfico Gantt das atividades



Fonte: Autor

A análise das informações geradas é relevante porque permite verificar a coerência entre os sólidos selecionados, os parâmetros inseridos e o cronograma gerado. As informações de origem do material auxiliam na interpretação do fluxo operacional, especialmente quando há distinção entre material proveniente diretamente da filtragem e material direcionado ou tratado em PRUs. Já os campos relacionados a tonelagem, volume e tempo de trabalho permitem avaliar a magnitude de cada atividade e sua influência na duração total do sequenciamento. Além disso, as datas de início e término possibilitam identificar sobreposições, períodos de espera e a distribuição das atividades entre diferentes setores da pilha, contribuindo para uma leitura mais completa da organização do trabalho.

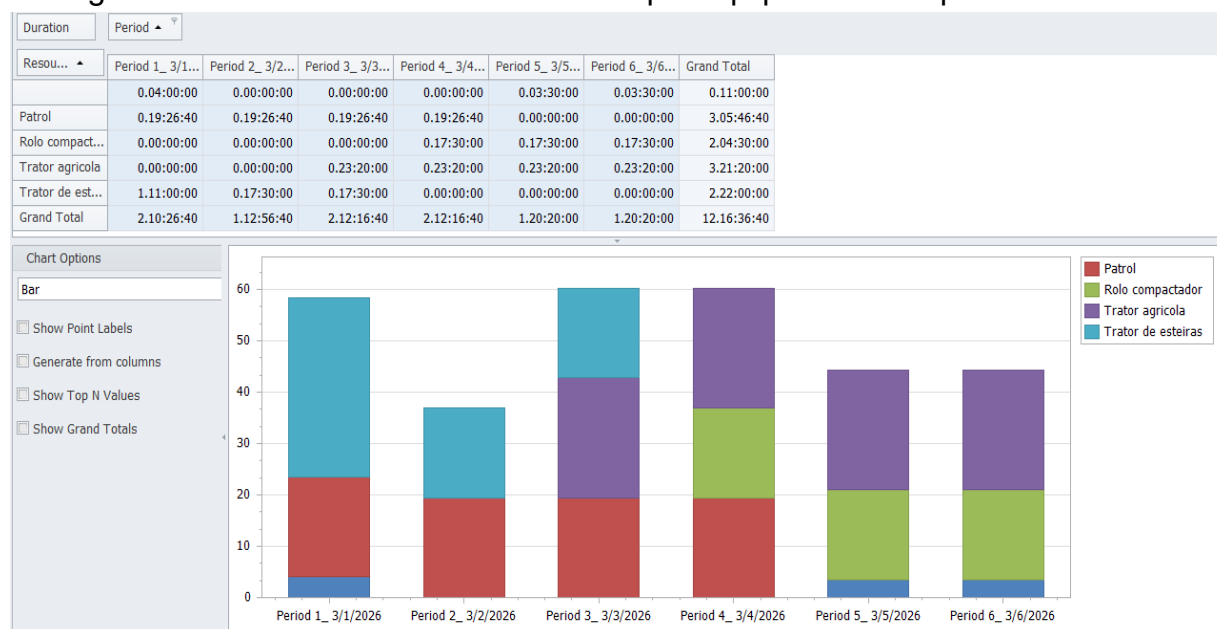
5.2 Relatórios operacionais do sequenciamento

A interpretação do sequenciamento operacional não se limita à visualização temporal das atividades no gráfico de Gantt. Para complementar a análise, foram utilizados os relatórios gerados no ambiente de planejamento, os quais permitem consolidar as informações associadas às atividades programadas, aos recursos utilizados e aos períodos de execução. Esses relatórios podem ser estruturados de

diferentes formas, conforme o indicador de interesse, possibilitando a análise de parâmetros como duração das atividades, volume movimentado, origem do material, utilização de equipamentos e distribuição das horas trabalhadas ao longo do cronograma.

A Figura 24 apresenta um exemplo de relatório gerado a partir do sequenciamento, indicando a quantidade de horas trabalhadas por equipamento em cada período previamente configurado. Cada cor representa um equipamento distinto, permitindo visualizar a variação da alocação da frota ao longo do tempo. Observa-se, por exemplo, que o trator de esteiras apresenta maior utilização nos períodos iniciais, associado às atividades de preparo e movimentação inicial do material, enquanto sua participação deixa de ocorrer nos períodos finais do cronograma. Esse comportamento indica uma mudança na demanda por equipamentos conforme a evolução do ciclo construtivo, em que determinadas etapas passam a exigir maior participação de outros recursos, como o rolo compactador ou o trator agrícola.

Figura 24 - Gráfico de horas trabalhadas por equipamento no período analisado.

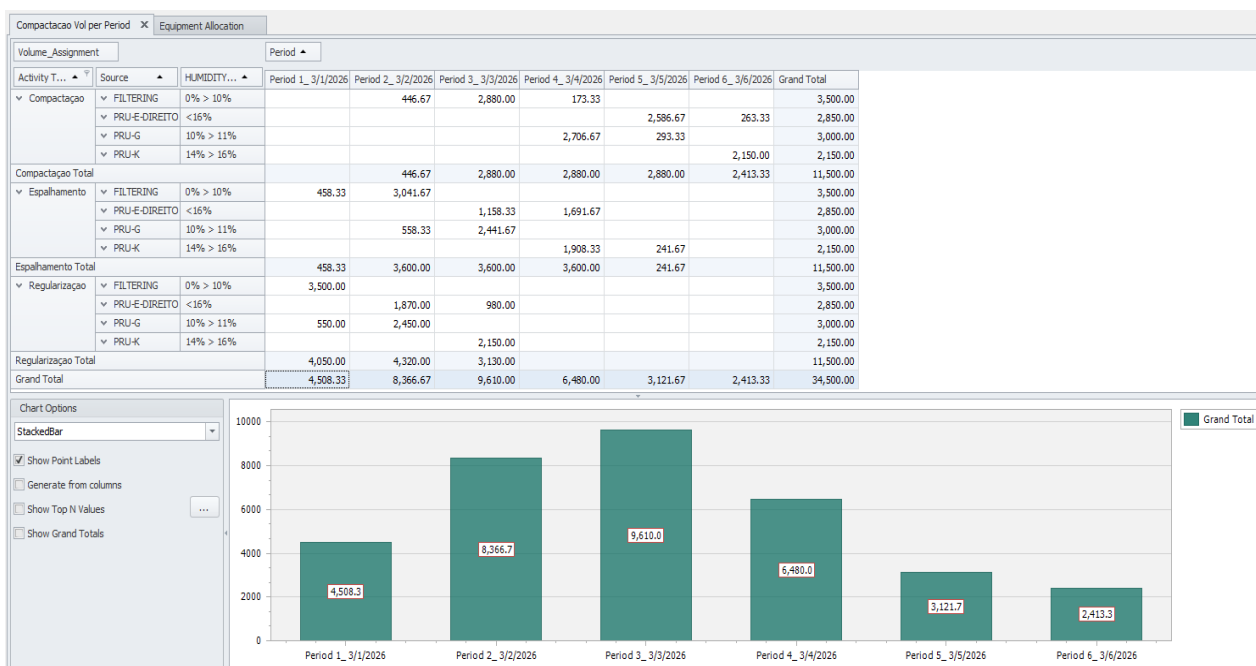


Fonte: Autor

Já a Figura 25 apresenta um relatório indicando a quantidade de material trabalhado por período vinculado a sua origem. Diferentemente do relatório de alocação de equipamentos, essa visualização permite analisar a distribuição do volume programado em função da atividade operacional, da origem do material e da condição associada ao rejeito. Dessa forma, o gráfico possibilita compreender quando

o material é movimentado ou tratado, também de onde ele se origina e em quais etapas do ciclo construtivo esse volume é incorporado ao planejamento.

Figura 25 - Quantidade de material trabalhado por período e origem



Fonte: Autor

Os relatórios gerados a partir do sequenciamento ampliam a capacidade de interpretação do planejamento operacional, pois permitem transformar as atividades programadas em informações organizadas e analisáveis. Dessa forma, esses *reports* contribuem para compreender a aderência do cronograma à lógica construtiva da pilha e fornecer subsídios para discutir gargalos relacionados à alocação de frota, ao direcionamento do rejeito para PRUs e à padronização das decisões operacionais ao longo do processo de empilhamento.

5.3 Rastreabilidade dos dados geotécnicos no modelo de blocos

Além dos produtos relacionados ao sequenciamento operacional, a metodologia também permitiu estruturar uma base espacial para representação dos dados geotécnicos da pilha. A partir do modelo de blocos previamente construído, os atributos provenientes dos ensaios puderam ser associados aos blocos, possibilitando a visualização da distribuição dos parâmetros ao longo da estrutura. Esse resultado é relevante porque amplia a rastreabilidade entre material, localização e informação geotécnica, permitindo que os dados deixem de ser analisados apenas

como registros pontuais e passem a compor uma base tridimensional integrada. A Figura 26 representa alguns dos atributos que compõem o modelo de blocos.

Figura 26 - Atributos do modelo de blocos.

Commit Action	DB	Name	Long Name	Abbr.	Data Type	Min	Max	Display Prec.	Unit	Enums	Coverages	Comments
None	✓	Material Type N	Material Type N	Material Type N	Enumeration					4	Assays, Geol...	
None	✓	Zone	Zone	Zone	Std. Integer	1	999		None		Assays, Geol...	
None	✓	Material Type	Material Type	MATYPE	String						Assays, Geol...	
None	✓	Datum	Datum	Datum	String						Assays, Geol...	
None	✓	Hemisphere	Hemisphere	Hemisphere	String						Assays, Geol...	
None	✓	Value Type	Value Type	Value Type	String						Assays, Geol...	
None	✓	Type	Type	Type	String						Assays, Geol...	
None	✓	Material Class	Material Class	Material Class	String						Assays, Geol...	
None	✓	Sector	Sector	Sector	String						Assays, Geol...	
None	✓	AchievedDate	AchievedDate	AchievedDate	Date						Assays, Geol...	
None	✓	ReceivedDate	ReceivedDate	ReceivedDate	Date						Assays, Geol...	
None	✓	Sample Type	Sample Type	Sample Type	String						Assays, Geol...	

Loaded 3 coverages from current project
 Loaded 12 sample attributes from current project
 Loaded 1 calculated sample attribute from current project

Fonte: Autor

A visualização dos atributos no modelo de blocos contribui para identificar variações espaciais do material, avaliar a coerência entre os dados de campo e a geometria da pilha e apoiar análises futuras relacionadas ao controle tecnológico e à liberação de camadas. Embora o modelo de blocos ainda não esteja diretamente integrado ao sequenciamento operacional e ainda necessite da importação de atributos adicionais relevantes, nesta etapa, sua estruturação representa uma base importante para futuras aplicações, nas quais os parâmetros geotécnicos poderão ser utilizados como critérios de decisão no planejamento das atividades.

5.4 Discussão dos gargalos operacionais identificados

A partir dos resultados apresentados, observa-se que a metodologia proposta permite relacionar os produtos gerados no estudo aos principais gargalos identificados no processo de empilhamento de rejeitos filtrados. Esses resultados fornecem uma base para interpretar a operação, avaliar restrições e propor melhorias relacionadas à organização das atividades, ao direcionamento do material, à rastreabilidade dos dados e à utilização dos recursos. Dessa forma, pontos de

aprimoramento passam a ser analisados de forma estruturada, com apoio em informações espaciais, temporais e operacionais.

Um dos principais aspectos que pode ser trabalhado por meio da metodologia está relacionado à padronização do direcionamento do material oriundo da filtragem. Ao configurar as origens do material, as PRUs, os tipos de material e os atributos associados ao sequenciamento, torna-se possível estruturar uma lógica mais clara para representar os diferentes caminhos operacionais do rejeito. Essa organização favorece a padronização de critérios associados a condições como umidade e volume trabalhado ao longo do tempo. Com isso, a metodologia melhora a gestão das PRUs, o controle e a continuidade do ciclo construtivo da pilha.

Outro gargalo relevante está associado à coordenação de frentes simultâneas e à alocação dos equipamentos ao longo do tempo. Por meio do gráfico de Gantt e dos relatórios, é possível a identificação de momentos de maior demanda por determinados equipamentos, possíveis períodos de ociosidade e mudanças na necessidade de frota conforme o avanço das etapas construtivas. Com isso, a metodologia contribui para organizar melhor as frentes, reduzir interferências entre atividades e apoiar ajustes no planejamento, especialmente em operações que envolvem diferentes setores em estágios distintos.

A metodologia também contribui para reduzir problemas relacionados à rastreabilidade dos dados geotécnicos e à ausência de indicadores consolidados de produtividade. O modelo de blocos permite associar atributos às unidades espaciais da pilha, facilitando a localização e interpretação das informações de controle tecnológico. Ao mesmo tempo, os relatórios do sequenciamento organizam dados de duração, volumes, recursos e produtividades, criando uma base para futuras calibrações com informações reais de campo. Dessa forma, o processo torna-se mais rastreável e mensurável.

A Tabela 5 consolida os gargalos da operação já levantados e como o trabalho pode ajudar a mitigá-los.

Tabela 5 - Gargalos identificados e melhorias propostas pela metodologia

Gargalo identificado	Melhoria proposta pela metodologia
Atividades de infraestrutura repetitivas e de baixa produtividade	Sequenciar as atividades para identificar etapas críticas e oportunidades de ajuste no ciclo construtivo
Falta de indicadores reais de produtividade da frota	Usar os relatórios gerados como base para calibração das taxas futuras de produtividade dos equipamentos
Falta de padronização do direcionamento do material oriundo da filtragem	Padronizar origens, destinos, PRUs e condições do material no planejamento, aplicando critérios de direcionamento do rejeito
Baixa rastreabilidade entre ensaios, material e localização na pilha	Integrar os dados geotécnicos ao modelo de blocos, associando atributos de controle às unidades espaciais da pilha e facilitando a identificação de desvios por setor ou camada.
Gargalos na coordenação de frentes simultâneas em diferentes estágios construtivos	Utilizar as ferramentas citadas para organizar frentes paralelas, reduzir interferências entre atividades e melhorar a continuidade do avanço construtivo.

Fonte: Autor

De modo geral, os resultados demonstram que a metodologia proposta contribui para organizar e interpretar o empilhamento de rejeitos filtrados de forma mais integrada. A partir do sequenciamento, dos relatórios operacionais e do modelo de blocos, é possível avaliar atividades, recursos, fluxo de material e rastreabilidade dos dados, evidenciando o potencial da abordagem como apoio ao planejamento, à tomada de decisão e a melhoria dos principais gargalos da operação.

6 CONCLUSÕES

O presente estudo cumpriu seu objetivo geral ao propor e aplicar uma metodologia de planejamento operacional para monitorar e operar o avanço construtivo de pilhas de rejeitos filtrados, utilizando ferramentas computacionais para organizar o fluxo de massa, estruturar a logística das frentes de trabalho e ampliar a rastreabilidade da operação. A partir do estudo de caso, foi possível mapear os ciclos de transporte e atividades que englobam o manejo do rejeito, considerando sua movimentação entre a usina de filtragem, as Praças de Redução de Umidade (PRUs) e as frentes de empilhamento. Esse mapeamento permitiu compreender os principais pontos de decisão do processo, especialmente aqueles relacionados ao manejo da umidade, ao direcionamento do material e à continuidade do ciclo construtivo.

A metodologia também atendeu aos objetivos de modelar e discretizar geometricamente a pilha, estruturando os sólidos de avanço construtivo em setores e camadas no ambiente computacional. Essa divisão permitiu representar a pilha como um conjunto de unidades operacionais planejáveis, compatíveis com a lógica real de execução em campo. Além disso, a criação e parametrização do modelo de blocos possibilitou a espacialização de indicadores de campo e dados geotécnicos, contribuindo para a rastreabilidade entre ensaios, material e localização na pilha.

O desenvolvimento do sequenciamento no *MinePlan Activity Scheduler* permitiu estruturar o cronograma da frota e das atividades construtivas, incorporando regras de precedência, origens do material, recursos operacionais e premissas de produtividade. Os resultados gerados, como o gráfico de Gantt e os relatórios operacionais, permitiram avaliar a distribuição temporal das atividades, a utilização dos equipamentos, os volumes trabalhados por período e a relação entre origem, tipo de material e etapa construtiva. Com isso, foi possível analisar a aderência e a exequibilidade do cronograma, bem como discutir gargalos relacionados à coordenação de frentes simultâneas, à padronização do direcionamento do rejeito e à ausência de indicadores consolidados de produtividade da frota.

Em suma, conclui-se que a metodologia proposta apresenta potencial para apoiar o planejamento e a gestão operacional de pilhas de rejeitos filtrados, ao integrar modelagem, modelo de blocos, dados geotécnicos e sequenciamento de atividades em uma abordagem única. Embora sua aplicação ainda dependa de

calibrações futuras com dados reais de campo, especialmente quanto às produtividades dos equipamentos e tempos de execução, os resultados demonstram que a metodologia contribui para tornar o processo mais estruturado, rastreável e orientado por dados, favorecendo a tomada de decisão e a mitigação de gargalos logísticos na disposição final do rejeito.

6.1 Sugestões para estudos futuros

Para a continuidade e o aprimoramento da linha de pesquisa desenvolvida nesta monografia, sugere-se, inicialmente, a realização de estudos detalhados de tempos de ciclo e movimentos, com o objetivo de substituir as taxas nominais de produtividade inferidas para os equipamentos de suporte por indicadores reais de rendimento da frota operacional, refinando a aderência do cronograma logístico.

Recomenda-se também o desenvolvimento de rotinas computacionais ou scripts automatizados para a sincronização de dados entre o banco de dados dos laboratórios de controle de qualidade e o modelo de blocos, acelerando as etapas de validação e de liberação de camadas subsequentes da pilha.

Adicionalmente, propõe-se a incorporação de restrições pluviométricas e sazonais da região nos calendários de disponibilidade do *software*, permitindo simular de forma preditiva o impacto das chuvas na percolação do maciço, na saturação de frentes abertas e no tempo limite de retenção do material nas praças de redução de umidade durante o período chuvoso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13028:** Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água. São Paulo: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13029:** Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ALVARENGA, Phillipe Silva. **Disposição de rejeitos de mineração: uma revisão.** 2023. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.

ALVES, P. I. A. **Empilhamento de rejeito filtrado - a expansão de uma alternativa para substituição de barragens.** Ouro Preto: UFOP, 2020. 114 p. Dissertação (Mestrado), Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Resolução nº 13, de 8 de agosto de 2019.** Estabelece medidas regulatórias cautelares objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado “a montante” [...]. Brasília, DF: ANM, 2019.

CACCIUTTOLO, Carlos; ATENCIO, Edison. Dry stacking of filtered tailings for large-scale production rates over 100,000 metric tons per day: envisioning the sustainable future of mine tailings storage facilities. **Minerals**, v. 13, n. 11, artigo 1445, 2023. DOI: 10.3390/min13111445. Disponível em: [artigo na MDPI](#). Acesso em: 01 mar. 2026.

CARDOZO, Fernando Alves Cantini; RUVER, Cesar Alberto; GEHLING, Wai Ying Yuk. Considerações a riscos geotécnicos em barragens de rejeito. **Tecnológica**, Santa Cruz do Sul, v. 24, n. 1, p. 1-14, fev./jul. 2020.

CONSELHO NACIONAL DO MINISTÉRIO PÚBLICO. **Gestão de resíduos em atividades minerárias.** Brasília, DF: CNMP, [s.d.]. Disponível em: [Gestão de Resíduos em Atividades Minerárias](#). Acesso em: 09 mar. 2026.

CORRÊA, Lucas Alves. **Modelagem tridimensional, estimativa e estudo de sequenciamento de lavra de um depósito de rejeitos.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Catalão, Catalão, 2021.

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

CURI, Adilson. **Minas a céu aberto: planejamento de lavra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

DAVIES, M. P. **Filtered dry stacked tailings: the fundamentals**. 2011. https://www.researchgate.net/publication/325976393_Filtered_Dry_Stacked_Tailings-The_Fundamentals. Acesso em: 10 mar. 2026.

FLORES, B. A. **Planejamento de lavra estratégico e tático de morro da mina - Conselheiro Lafaiete/MG**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

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.

GUIMARÃES, Nilton Caixeta; VALADÃO, George E. S.; PERES, Antônio E. C. Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando à sua disposição em pilhas. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 65, n. 4, p. 543-548, 2012. DOI: 10.1590/S0370-44672012000400016.

HUSTRULID, William A.; KUCHTA, Mark; MARTIN, Randall K. **Open pit mine planning & design: volume 1: fundamentals**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Guia de boas práticas: gestão de barragens e estruturas de disposição de rejeitos**. Brasília, DF: IBRAM, 2019.

ISAAKS, Edward H.; SRIVASTAVA, R. Mohan. **Applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989.

LASCHEFSKI, Klemens Augustinus. Rompimento de barragens em Mariana e Brumadinho (MG): desastres como meio de acumulação por despossessão. **AMBIENTES: Revista de Geografia e Ecologia Política**, v. 2, n. 1, p. 98, 2020. DOI: 10.48075/amb.v2i1.23299. Disponível em: [artigo na revista AMBIENTES](#). Acesso em: 13 de abr. 2026.

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2013.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. **Um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos (Guia PMBOK).** 6. ed. Newtown Square, PA: Project Management Institute, 2017.

SANCHEZ, B.; SUTTA, M.; SOTO, J.; BENITES, I. **Dry stacked filtered tailings: seepage behaviour during the construction process.** 2023. p. 620-628. DOI: 10.36487/ACG_repo/2355_47.

SOARES, L. Barragem de rejeitos. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. (Ed.). **Tratamento de minérios.** 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. p. 832-896.