



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

JOICE MARIA DE PAIVA SILVA

**USO DO MÉTODO DE ENUMERAÇÃO COMPLETA PARA OTIMIZAÇÃO DA MISTURA
DE CALCÁRIO PARA INDÚSTRIA CIMENTEIRA**

CRATEÚS - CE
2026

JOICE MARIA DE PAIVA SILVA

USO DO MÉTODO DE ENUMERAÇÃO COMPLETA PARA OTIMIZAÇÃO DA MISTURA DE
CALCÁRIO PARA INDÚSTRIA CIMENTEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Minas da
Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús,
como requisito parcial à obtenção do título de
bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Bruno do Rêgo Soares

Coorientador: Prof. Me. Emanuel Itaquê de
Negreiros Moreira

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S58u Silva, Joice Maria de Paiva.
Uso do método de enumeração completa para otimização da mistura de calcário para indústria cimenteira / Joice Maria de Paiva Silva. – 2026.
60 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia de Minas, Crateús, 2026.
Orientação: Prof. Me. Bruno do Rêgo Soares.
Coorientação: Prof. Me. Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira .
1. mineração. 2. tomada de decisão . 3. blendagem de minério . I. Título.

CDD 622

JOICE MARIA DE PAIVA SILVA

USO DO MÉTODO DE ENUMERAÇÃO COMPLETA PARA OTIMIZAÇÃO DA MISTURA DE
CALCÁRIO PARA INDÚSTRIA CIMENTEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Minas da
Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús,
como requisito parcial à obtenção do título de
bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Bruno do Rêgo Soares

Coorientador: Prof. Me. Emanuel Itaquê de
Negreiros Moreira

Aprovada em: 30/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Bruno do Rêgo Soares (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira (Coorientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Kennedy da Silva Ramos

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Rafael Chagas da Silva

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Jeová Deus, por me conceder vida, força, sabedoria e perseverança para enfrentar os desafios ao longo desta jornada acadêmica. Sua orientação e cuidado foram essenciais em todos os momentos.

À minha família, meu pai José Wilson, minha mãe Sandra Suely, expresso minha profunda gratidão pelo amor, apoio incondicional, incentivo e compreensão, que foram fundamentais para que eu pudesse seguir firme na busca pelos meus objetivos. São os maiores exemplos para mim como pessoas e profissionais. Aos meus irmãos, Julia e João Pedro por sempre me incentivarem e estarem ao meu lado ao longo dessa vida, compartilhando os bons e maus momentos. Amo muito vocês.

Aos meus amigos, Thalison Gomes, Thais Gomes, Sanmira Felício, agradeço pelo companheirismo, pelas palavras de encorajamento e por estarem presentes nos momentos de dificuldade e de conquista, tornando essa caminhada mais leve e significativa.

Aos meus colegas de graduação, Maressa Martins, Gabrielle Araújo, João Pedro Mesquita, Ariane Carvalho, Ítalo Rodrigues, Allan Jackson, expresso minha sincera gratidão pelo companheirismo, pela troca de conhecimentos e pelo apoio ao longo dessa jornada acadêmica. Cada trabalho em grupo, discussão, incentivo e momento compartilhado contribuíram de forma significativa para meu crescimento pessoal e profissional. A convivência, as experiências e a união nos momentos de dificuldade e de conquista tornaram essa caminhada mais leve e enriquecedora. Levarei comigo os aprendizados, as amizades construídas e o apoio mútuo que foram fundamentais para a conclusão desta etapa.

Aos professores, deixo meu sincero agradecimento por todo o conhecimento compartilhado, pela dedicação, paciência e contribuição essencial para a construção do meu aprendizado acadêmico e profissional.

A Universidade Federal do Ceará pelo ensino de qualidade e proporcionar vivências na minha área de formação.

A todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte dessa trajetória, minha gratidão.

“A persistência é o caminho do êxito.”

Charles Chaplin

RESUMO

O setor mineral vem passando por transformações significativas no cenário econômico global, marcado por um ambiente cada vez mais competitivo e tecnológico. As empresas do ramo têm direcionado esforços para aprimorar seus processos produtivos, com a intenção de elevar eficiência operacional e produtividade, ao mesmo tempo em que buscam reduzir os custos. Nessa perspectiva, cresce o interesse pelo uso de ferramentas da pesquisa operacional como apoio à tomada de decisões. Essa área se destaca por permitir a modelagem e análise de diferentes variáveis qualitativas e quantitativas em diversas situações, o que proporciona uma avaliação mais precisa no planejamento de soluções. Para as mineradoras, que com frequência tomam decisões com base em experiências práticas anteriores, a pesquisa operacional representa uma oportunidade de abordagem técnica e estruturada. Um exemplo prático de sua aplicação está na formação de pilhas de minérios geradas por materiais com qualidade distintas em diferentes frentes de lavra, desafio comum enfrentado por essas empresas. Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo a necessidade de otimizar o processo da mistura de minério para a produção do Cimento Portland, visando maximizar a produção de material que atenda aos teores exigidos pelo controle de qualidade e auxiliar no planejamento de curto prazo de uma mina de calcário. Para alcançar este objetivo, foi realizado um levantamento *in loco* para obter os principais parâmetros do processo produtivo da mineradora: capacidade de equipamentos, produção diária de cada túnel e o limite dos parâmetros de controle de qualidade (Fator de Saturação da Cal - FSC, Módulo de Sílica - MS e Módulo de Alumina - MA) para os diferentes tipos de calcário. Na modelagem aplicou-se o método da Enumeração Completa em conjunto com o software Excel, abordagem que possibilitou a geração de soluções que atendem as restrições operacionais e de qualidade, a fim de obter soluções viáveis para o problema observado na produção do cimento. Os resultados demonstraram que o modelo foi capaz de gerar soluções viáveis para os cenários I, II e III, atendendo aos limites de qualidade estabelecidos e produção requerida pela usina, comprovando sua eficácia na definição das proporções ideais de mistura entre as pilhas.

Palavras-chave: mineração; tomada de decisão; blendagem de minério.

ABSTRACT

The mining sector has been undergoing significant transformations in the global economic landscape, marked by an increasingly competitive and technological environment. Companies in the sector have been directing efforts towards improving their production processes, aiming to increase operational efficiency and productivity while simultaneously seeking to reduce costs. In this context, there is a growing interest in the use of operational research tools to support decision-making. This area stands out for allowing the modeling and analysis of different qualitative and quantitative variables in diverse situations, providing a more precise evaluation in the planning of solutions. For mining companies, which frequently make decisions based on previous practical experiences, operational research represents an opportunity for a technical and structured approach. A practical example of its application is in the formation of ore piles generated by materials with different qualities in different mining fronts, a common challenge faced by these companies. In this sense, the present study aims to address the need to optimize the process, aiming to maximize the production of material that meets the grades required by quality control and to assist in the short-term planning of a limestone mine. To achieve this objective, an on-site survey was conducted to obtain the main parameters of the mining company's production process: equipment capacity, daily production of each tunnel, and the limits of quality control parameters (Lime Saturation Factor - CSF, Silica Modulus - MS, and Alumina Modulus - MA) for the different types of limestone. The Complete Enumeration method was applied to the modeling in conjunction with Excel software, an approach that enabled the generation of solutions that meet operational and quality constraints, in order to obtain viable solutions for the problem observed in cement production. The results demonstrated that the model was able to generate viable solutions for scenarios I, II, and III, meeting the established quality limits and the production required by the plant, proving its effectiveness in defining the ideal mixing proportions between the stockpiles.

Keywords: mining; decision making; ore blending.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do processo de fabricação do cimento	16
Figura 2 – Modelo de blocos da reserva	17
Figura 3 – Britador de martelos	18
Figura 4 - Carregamento e transporte do calcário da bancada até o britador	19
Figura 5 - Fluxograma do processo produtivo de uma mineradora	22
Figura 6 - Interface entre frentes de lavra, pilhas e usina	24
Figura 7 - Etapas do processo de tomada de decisão.....	25
Figura 8 - Fluxograma do Processo de Modelagem	26
Figura 9 - Processo de tomada de decisão	29
Figura 10 - Fluxograma da metodologia	31
Figura 11 - Túneis de calcário britado	32
Figura 12 – Código para gerar combinações para 4 pilhas, que somadas resulte em 11 ciclos de transporte	35
Figura 13 – Código para gerar combinações para 4 pilhas, que somadas resulte em 51 ciclos de transporte	35
Figura 14 - Parâmetros para cálculo da massa da pilha.....	36
Figura 15 – Disposição das pilhas nas bancadas	37

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais setores e aplicações do Cimento Portland	15
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das rochas carbonáticas	13
Tabela 2 - Litologias do modelo de blocos com suas respectivas quantidades	16
Tabela 3 – Valores ideais para controle do clínquer.....	20
Tabela 4 – Quantidade de material transportado de cada túnel por dia.....	33
Tabela 5 – Equipamentos de carga e transporte.....	33
Tabela 6 – Quantidade de material transportado de cada túnel por dia.....	33
Tabela 7 – Limites máximos e mínimos da qualidade do calário.....	34
Tabela 8 - Teores das pilhas	37
Tabela 9 – Limite máximo e mínimo para calcário azul.	38
Tabela 10 – Limite máximo e mínimo para o calcário laranja.....	38
Tabela 11 – Limite máximo e mínimo para calcário marrom	39
Tabela 12 – Total de combinações geradas para 4 pilhas para os túneis A e C e suas respectivas massas	41
Tabela 13 – Total de combinações geradas para 4 pilhas para os túneis B e suas respectivas massas.....	41
Tabela 14 – Resultados das blendagens por óxidos e cálculo dos parâmetros do túnel A.	42
Tabela 15 - Resultados das misturas por óxidos e cálculo dos parâmetros do túnel B.....	42
Tabela 16 - Resultados das misturas por óxidos e cálculo dos parâmetros do túnel C.....	43
Tabela 17 - Média dos limites de qualidade: Cenário I.....	44
Tabela 18 - Média dos limites de qualidade: Cenário II.....	44
Tabela 19 - Média dos limites de qualidade: Cenário III	44
Tabela 20 - Verificação da melhor solução viável pelo desvio padrão do cenário I.....	45
Tabela 21 - Verificação da melhor solução viável pelo desvio padrão do cenário II.....	47
Tabela 22 - Verificação da melhor solução viável pelo desvio padrão do cenário III	48
Tabela 23 - Mistura obtida versus teores médios dos cenários.....	49

ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
CVRD	Companhia Vale do Rio Doce
FSC	Fator de Saturação da Cal
MS	Módulo de Sílica
MA	Módulo de Alumina
PO	Pesquisa Operacional
ROM	Run of mine
VBA	Visual Basic for Applications

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo Geral	12
2.2 Objetivos Específicos	12
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3.1 Calcário	13
3.2 Cimento Portland	14
3.2.1 <i>História do Cimento Portland</i>	14
3.2.2 <i>Aplicações</i>	14
3.2.3 <i>Processo de fabricação do cimento</i>	15
3.2.4 <i>Módulos e Fatores Cimenteiros</i>	19
3.3 Processos produtivos de uma mineradora	21
3.3.1 <i>Planejamento de curto prazo</i>	22
3.4 Problema da Mistura de Minérios	23
3.4.1 <i>Processo de tomada de decisão</i>	24
3.5 Pesquisa Operacional (PO)	25
3.5.1 <i>Pesquisa Operacional aplicada à mineração</i>	27
3.5.2 <i>Otimização</i>	28
3.5.3 <i>Métodos exatos</i>	29
3.5.4 <i>Método de enumeração completa</i>	29
3.5.5 <i>Planilhas Excel</i>	30
4 METODOLOGIA	31
4.1 Restrições	31
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
6 CONCLUSÃO	50
REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

Segundo o relatório anual do Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM (2024), o setor mineral brasileiro registrou um faturamento de R\$ 270,8 bilhões em 2024. Esse valor representa um aumento de 9,1% na comparação com o ano anterior. Alguns fatores corroboram para esse aumento, como a quantidade e qualidade do material de outras empresas, a abundância e demanda do produto, o que intensifica a concorrência no setor mineral, tornando-o mais competitivo. Diante desse cenário, as indústrias de mineração buscam constantemente otimizar seus processos, com o objetivo de reduzir custos e aumentar a produtividade, garantindo o cumprimento das metas dentro dos padrões exigidos de quantidade e qualidade dos minérios. (MILAGRES, 2019).

O cimento é a segunda matéria-prima mais consumida no mundo. Com isso, a indústria cimenteira desempenha um papel crucial na infraestrutura global, sendo o Cimento Portland um dos materiais de construção mais consumidos mundialmente (CBFA, 2024). A produção eficiente e de alta qualidade deste material depende da matéria-prima utilizada, principalmente o calcário. Dessa forma, a variabilidade natural na composição química do calcário dentro de um mesmo depósito é um desafio constante para as mineradoras. Pois precisam garantir uma alimentação homogênea na britagem e com teores específicos para o processo de fabricação do cimento. (WILLS *et al.*, 2016)

Para auxiliar no processo de tomada de decisões, as indústrias extrativas recorrem à Pesquisa Operacional (PO), uma área que permite a simulação de diversos cenários otimizados por meio de modelos que consideram diferentes aspectos quantitativos e qualitativos. Esses modelos possibilitam que os gestores avaliem e testem uma decisão antes de sua implantação, contribuindo para a escolha da solução mais adequada ao contexto analisado (PESSOA; ALVES, 2016).

A Pesquisa Operacional tem sido amplamente aplicada na mineração, especialmente nas operações de mistura de minérios e no planejamento operacional de lavra. Na mistura de minérios, a PO auxilia na definição da composição ótima do produto mineral, garantindo o equilíbrio entre quantidades de diferentes materiais produzidos e especificações técnicas exigidas pelas diversas indústrias. Já no planejamento de lavra, a PO contribui para a alocação eficiente dos equipamentos de carga e transporte, considerando as frentes de lavra, o teor dos minérios desejáveis e a presença de impurezas. Dessa forma, é possível direcionar corretamente o material para as usinas de beneficiamento, mantendo a qualidade do produto final e reduzindo o número de equipamentos de lavra disponíveis na operação (BARBOSA; MAPA, 2017).

O presente estudo tem por finalidade elaborar um modelo de otimização utilizando o

método da enumeração completa para contribuir no planejamento de curto prazo considerando problema da mistura de minério de um empreendimento cimenteiro. A fim de assegurar um material com qualidade e quantidade ideais, além de contribuir para a otimização do planejamento de lavra, bem como utilizar o recurso mineral de forma eficiente, garantindo maior vida da mina.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e testar um modelo de otimização via método da enumeração completa para mistura de minério visando maximizar a produção de material adequado para a produção de cimento Portland, a fim de fornecer soluções que auxiliem no planejamento de curto prazo em uma mina de calcário.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Definir o problema da mistura de minério de uma mina de calcário para produção de cimento considerando os teores CaO (óxido de cálcio), SiO_2 (óxido de silício), Fe_2O_3 (óxido de ferro), Al_2O_3 (óxido de alumínio), os parâmetros e restrições para Fator de saturação (FSC), Módulo de sílica (MS) e Módulo de alumina (MA);
- b) Identificar os parâmetros operacionais e restrições para o modelo;
- c) Criar um modelo de otimização através do método de enumeração completa em planilha Excel;
- d) Obter soluções viáveis para os três túneis de calcário considerando os limites ideais dos parâmetros cimenteiros FSC, MS e MA, comprovando a funcionalidade do modelo.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta fundamentação teórica apresenta os principais temas que embasam o estudo do problema da mistura de minérios na produção de cimento Portland. Inicialmente, abordam-se a evolução histórica, as aplicações e o processo de fabricação do cimento, bem como os módulos e fatores que influenciam sua composição química. Na sequência, discute-se o problema da mistura de minérios e a relevância de um processo eficaz de tomada de decisão. Para tanto, recorre-se à Pesquisa Operacional, área que possibilita a resolução de problemas complexos por meio da modelagem matemática. Por fim, são apresentados os conceitos de otimização, os métodos exatos e, com destaque, o método da enumeração completa.

3.1 Calcário

Segundo Machado *et al.* (2013), a palavra calcário deriva do termo em latim “*calcarius*” que significa “o que contém cal”.

O calcário é uma rocha de origem sedimentar formada predominantemente por carbonato de cálcio (CaCO_3). Os principais minerais na composição das rochas calcárias é a calcita (CaCO_3) e a dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ podendo estar acompanhado de óxidos de ferro, alumínio e silício, que são benéficos, e outros como o óxido de magnésio, sódio e potássio que são na maioria das vezes indesejáveis (PARAHYBA, 2008).

Na classificação das rochas calcárias, analisam-se as proporções de minerais de calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e outros componentes não carbonatados como a porcentagem de óxido de magnésio. (PARAHYBA, 2008; SAMPAIO E ALMEIDA, 2005).

Tabela 1 - Classificação das rochas carbonáticas

CLASSIFICAÇÃO	TEOR DE MgO (%)
Calcário Calcítico	< 5%
Calcário Magnesiano	5 – 12 %
Calcário Dolomítico	>12 %

Fonte: Adaptado de Thomas (2007).

O mercado consumidor de carbonato de cálcio é amplo e diversificado, com aplicações em vários segmentos da indústria, por exemplo (REICAL, 2026):

- . Ração animal - auxilia o animal fortalecendo os ossos e as cascas dos ovos;

- . Fertilizantes e corretivos de solo - utilizado para a calagem e correção da acidez do solo;
- . Siderurgia - utilizado na sinterização de minério de ferro, desempenhando um papel fundamental na formação de escória no processo de alto-forno;
- . Cimento - é a principal matéria-prima;
- . Outras, como fabricação de papel, plásticos, tintas, vidros, cerâmicas, aço e refino do açúcar à pasta de dentes.

3.2 Cimento Portland

3.2.1 História do Cimento Portland

A palavra cimento vem do latim *caementu*, que na Roma Antiga se referia a uma pedra natural não esquadrejada. Sua origem data de cerca de 4.500 anos, sendo utilizado desde as civilizações antigas (ABCP, 2002).

O avanço significativo no desenvolvimento do cimento ocorreu em 1756 com o engenheiro inglês John Smeaton, que produziu um material tão resistente quanto às pedras usadas nas construções, com uma mistura calcinada de calcário e argila. Em 1818, o engenheiro e pesquisador francês Vicat obteve resultados semelhantes ao misturar esses componentes, sendo reconhecido como o inventor do cimento artificial (ABCP, 2002).

No entanto, em 1824, o pedreiro Joseph Aspdin depois de queimar calcário e argila juntos, observou que aquele pó fino ao secar, adquiria alta resistência e não se dissolvia em água. Com isso, Aspdin patenteou a descoberta, denominando de Cimento *Portland*, em referência à Portlandstone, tipo de rocha arenosa bastante usada nas construções na ilha Britânica de *Portland*, Inglaterra (ABCP, 2002).

3.2.2 Aplicações

O cimento *Portland* é um dos materiais de construção mais consumidos no mundo, graças às suas propriedades únicas, como facilidade de manuseio e moldabilidade. Essas características garantem alta durabilidade e resistência a cargas e ao fogo em argamassas e concretos. Além disso, sua produção utiliza matérias-primas abundantes disponíveis na natureza, como argila, areia, gesso, entre outras. Versátil, o cimento é empregado em diversas aplicações, desde mobiliário urbano até grandes obras de infraestrutura, como barragens, estradas, edificações, pontes, tubos de concreto e telhados (ABCP, 2002).

No Quadro 1 estão destacadas as principais aplicações do cimento, considerando o setor aplicado. Nota-se que o setor que mais usufrui da aplicação do cimento é a construção civil, pela

diversidade de atividades que nela estão inseridas. Seguida pelo setor de infraestrutura, dando destaque para projetos de pavimentação, barragens, entre outros.

Quadro 1 - Principais setores e aplicações do Cimento Portland

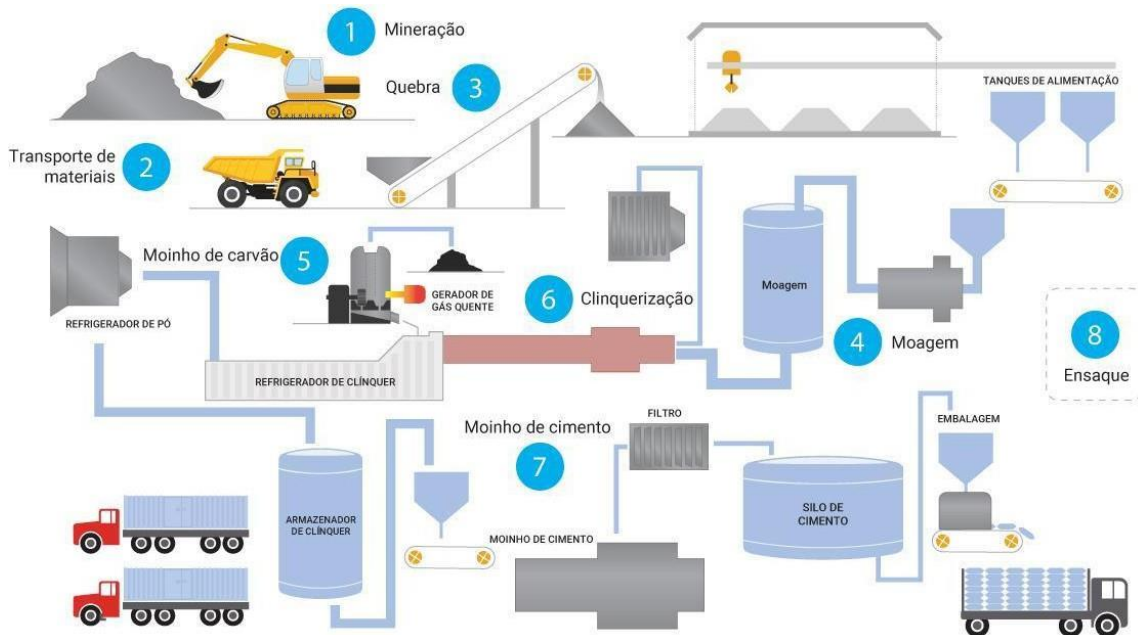
CATEGORIAS	APLICAÇÕES ESPECÍFICAS
Construção Civil	Concreto armado e protendido (pilares, lajes, vigas, fundações); Argamassas para assentamento e revestimento.
Infraestrutura	Pavimentação de rodovias, calçadas, ciclovias; Barragens, canais, obras de drenagem e saneamento.
Pré-moldados	Blocos e tijolos de concreto; Tubos, manilhas, postes, muros pré-moldados.
Indústria e Mineração	Bases de máquinas; Estruturas para túneis, poços e cimentações.
Arquitetura e Design	Concreto aparente (uso estético); Mobiliário urbano, pisos decorativos.
Meio Ambiente	Estruturas para contenção de erosão.

Fonte: Adaptado de AECWeb (2025).

3.2.3 *Processo de fabricação do cimento*

Na produção do cimento, várias etapas e operações unitárias são utilizadas para obtenção do produto final, como mostra a Figura 1. As etapas de fabricação são: extração da matéria-prima, britagem, pré-homogeneização, moagem de cru, clínquerização, moagem de cimento e expedição (LIMA, 2011). Pensando nos objetivos do trabalho, será dado enfoque a etapa de britagem, etapa crucial para a realização da mistura do material.

Figura 1 – Fluxograma do processo de fabricação do cimento



Fonte: Adaptado de Filtros Newtec (2022).

Uma etapa fundamental que antecede o processo de britagem é o planejamento de lavra, na qual são definidas as áreas que a serem exploradas. Para essa finalidade, utilizam-se modelos de blocos, que consistem em uma representação tridimensional da reserva mineral, construída a partir das diferentes litologias que compõem o corpo mineral, associadas às suas respectivas qualidades. Nesse contexto, a Tabela 2 apresenta a discretização dos materiais por categoria, bem como as quantidades e proporções consideradas no modelo (CURI, 2014).

Tabela 2 - Litologias do modelo de blocos com suas respectivas quantidades

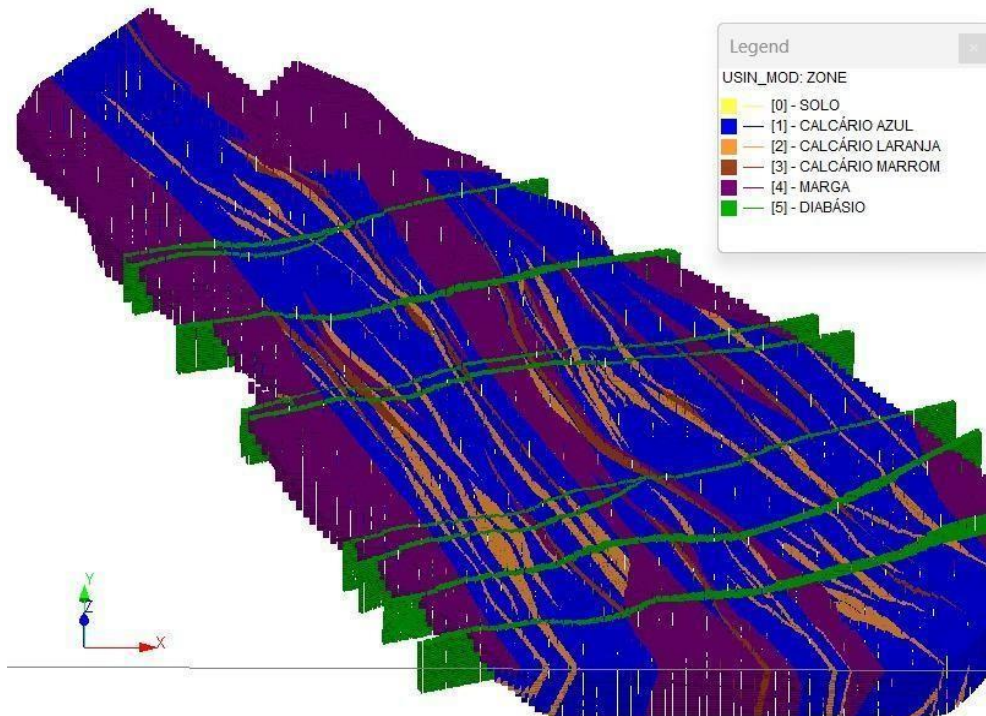
CATEGORIA	MASSA (Mi) t	PORCENTAGEM (%)
Calcário Azul	134 Mi	61,75
Calcário Laranja	28 Mi	12,9
Calcário Marrom	9 Mi	4,15
Estéril	44 Mi	20,28
TOTAL (t)	217 Mi	100

Fonte: Dados de uma empresa de calcário, 2026.

Os blocos apresentam dimensão de 15 x 15 metros, considerando que as bancadas a serem

lavradas possuem 15 metros de altura. Cada bloco tem definido sua qualidade, sendo necessário para o planejamento os parâmetros de qualidade FSC, MS e MA e as litologias, conforme a Figura 2.

Figura 2 – Modelo de blocos da reserva



Fonte: Datamine - Studio OP (2026).

3.2.3.1 Extração da matéria-prima e britagem

O processo de fabricação do cimento inicia-se com a exploração do calcário, matéria-prima base para a fabricação do cimento. Inicialmente, é realizado estudos geológicos para avaliar a qualidade e a quantidade de material presente na jazida, comumente lavrado de minas a céu aberto (ANDRADE, 2023).

A extração do calcário nas cavas ocorre por meio de detonação com explosivos. O calcário obtido possui uma granulometria muito elevada, o que o torna inviável de ser transportado diretamente para as moagens. Em vista disso, o calcário é conduzido até o britador primário (Figura 3), onde o material será fragmentado (ANDRADE, 2023).

Britagem é a etapa de fragmentação de minérios, que tem por objetivo reduzir o tamanho do material vindo da mina até uma granulometria adequada à etapa seguinte, o processamento mineral

(VIEIRA e CANGUSSU, 2020). Posterior a etapa de britagem, o material fragmentado é transportado para a pré-homogeneização. A qualidade do calcário e do processo de britagem são essenciais para garantir que o cimento final tenha as características desejadas e seja de alta qualidade (ANDRADE, 2023).

Figura 3 – Britador de martelos



Fonte: Arquivo Pessoal (2026).

Para a movimentação do material desmontado, faz-se necessário o uso de equipamentos de carregamento, como carregadeiras e escavadeiras, responsáveis por carregar o material nos caminhões fora de estrada, que realizam o transporte do material da bancada até o britador (Figura 04). É imprescindível o controle da alimentação da britagem por caminhão, uma vez que a matéria-prima é proveniente de duas frentes de lavra distintas, de modo a atender às especificações de mistura previamente definidas na etapa de planejamento. Dessa forma, garante-se a correta execução do processo de mistura (CHARACTERIZATION, 2025).

Figura 4 - Carregamento e transporte do calcário da bancada até o britador



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

3.2.4 Módulos e Fatores Cimenteiros

A formulação da mistura ideal das matérias-primas para a produção do cimento exige um controle rigoroso dos teores químicos. O uso da média ponderada dos teores das diferentes frentes de lavra pode gerar imprecisões, pois desconsidera restrições de proporção entre óxidos e a não linearidade das reações envolvidas no processo de clínquerização. Essa simplificação compromete o atendimento às especificações técnicas exigidas, afetando diretamente a qualidade do clínquer e, por consequência, do cimento (COSTA, 2023).

Diante disso, métodos mais precisos tornam-se necessários para garantir formulações adequadas às exigências industriais. Embora a Programação Linear seja comum em problemas de otimização, sua aplicação neste caso é limitada, dado o caráter discreto da mistura e a multiplicidade de combinações possíveis dentro de um espaço relativamente pequeno, o que inviabiliza a linearidade e continuidade requeridas (LI *et al.*, 2010).

A enumeração completa, por sua vez, avalia todas as combinações possíveis dentro do espaço de busca definido, garantindo a escolha da solução que atende a todas as restrições químicas e operacionais. Apesar do custo computacional exigido no processamento de múltiplas variáveis, sua aplicação é eficaz quando o número de variáveis é finito e controlado, como na mistura de minérios de calcário (BERTULUCCI, 2017).

Com isso, para assegurar a qualidade do clínquer e, conseqüentemente, do cimento produzido, é imprescindível controlar rigorosamente a composição e os módulos químicos do calcário. As relações entre os teores de óxidos de cálcio, sílica, ferro e alumínio têm um impacto significativo na

queima desses elementos. Para controlar essas relações, são utilizados os módulos de controle da mistura, sendo os mais comuns o Fator de Saturação de Cal (FSC), o Módulo de Sílica (MS) e o Módulo de Alumina (MA) (DINIZ, 2019). A Tabela 3 mostra os valores conhecidos pela literatura como ideais para o clínquer.

Tabela 3 – Valores ideais para controle do clínquer

PARÂMETROS	FAIXA (%)
FSC	90 - 100
MS	2.3 – 3.7
MA	1.2 – 1.6

Fonte: Kihara e Marciano (1995).

O Fator de Saturação de Cal (FSC) é calculado a partir da razão entre a quantidade (%) de óxido de cálcio presente na farinha e no clínquer e os demais compostos que reagem (conforme a equação 1). Os valores considerados ótimos estão entre 90% e 100%. Um FSC desregulado pode causar dificuldades na queima, maior consumo de combustível e um alto teor de cal não reagido. Fórmula de Lea e Parker ou Padrão de Cal II (ABCP, 1984).

$$\text{FSC (\%)} = \frac{100 * \text{CaO}}{(2,8 * \text{SiO}_2) + (1,18 * \text{Al}_2\text{O}_3) + (0,65 * \text{Fe}_2\text{O}_3)} \quad (1)$$

O Módulo de Sílica (MS) é calculado a partir da razão entre a quantidade (%) de óxido de silício e materiais fundentes, que são os óxidos de ferro e alumínio (conforme a equação 2). Na produção de cimento Portland, é recomendado que o MS esteja dentro de uma faixa entre 2,3 a 2,7 (ABCP, 1984). Um alto teor de MS pode dificultar a queima e desgastar o refratário do forno, enquanto um MS muito baixo pode favorecer o aumento da fase líquida e a formação de colagens.

$$\text{MS (\%)} = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (2)$$

O Módulo de Alumina (MA) é calculado a partir da razão entre a quantidade (%) de óxido de alumínio e óxido de ferro (conforme a equação 3). No Brasil, é recomendado que o MA varie entre 1,2 a 1,6 (ABCP, 1984). Um baixo teor de MA pode diminuir a viscosidade da fase líquida e melhorar a granulação do clínquer.

$$MA (\%) = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (3)$$

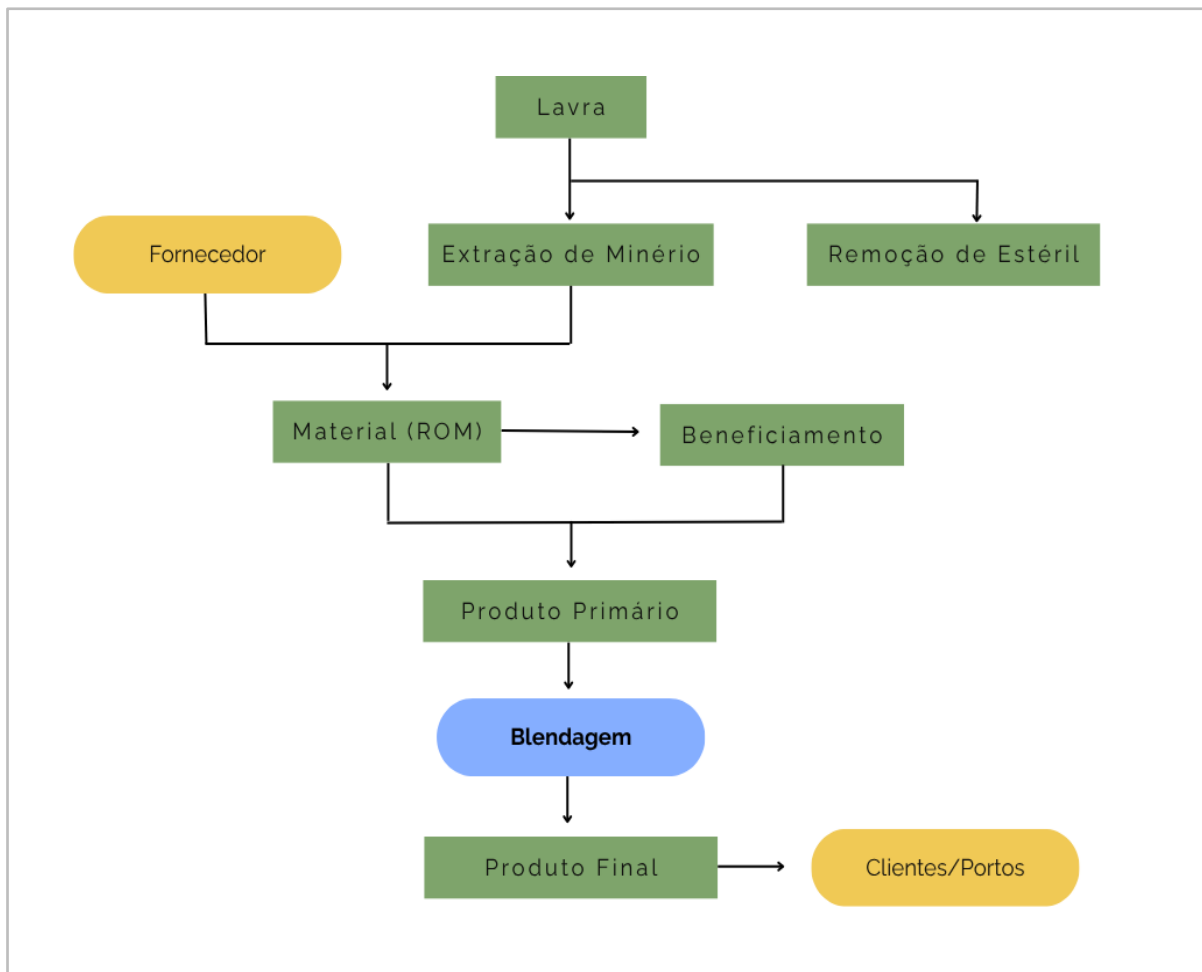
3.3 Processos produtivos de uma mineradora

Os processos produtivos de uma mineradora ocorrem conforme um planejamento de curto a longo prazo, de modo a definir e controlar a movimentação da produção de minério ao longo do sistema produtivo da mineração. As fases desde a extração até a venda são: lavra, beneficiamento, estocagem e transporte (TOFFOLO, 2009).

A primeira etapa, fase de lavra, consiste na exploração do minério na forma bruta (ROM – *Run of Mine*), por meio de equipamentos de carregamento alocados a frentes que possuam minério que atenda às metas de qualidade pré-estabelecidas. Concomitantemente, ocorre o processo de remoção de estéril, atividade responsável pela retirada de materiais de baixa qualidade os quais, respectivamente, não possuem nenhum valor econômico para o processo (TOFFOLO, 2009).

Em seguida, tem-se a etapa do beneficiamento. Segundo Toffolo (2009), esta realiza o processamento do minério de modo a modificar sua granulometria e aumentar a concentração do material a fim de aproximar a qualidade dos produtos às demandas dos clientes. O beneficiamento torna-se desnecessário quando o minério já possui teores adequados às exigências do cliente final, o que não ocorre sempre. Ao final desse processo, são gerados os produtos primários, os quais posteriormente são utilizados na formação dos produtos finais. A partir da finalização dos produtos primários, é realizada a separação dos minérios em diferentes pilhas, e posteriormente, inicia-se a formação dos produtos finais por meio da mistura de minérios. Por fim, o processo de transporte trata da movimentação dos produtos primários até a formação dos produtos finais que serão vendidos e transportados até os clientes (MILAGRES, 2019). Todo o processo descrito está ilustrado no fluxograma da Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma do processo produtivo de uma mineradora



Fonte: Adaptado de Toffolo (2009).

3.3.1 Planejamento de curto prazo

O planejamento de curto prazo refere-se aos aspectos operacionais da lavra da mina, como a determinação do ritmo de lavra nas diversas frentes em atividade e a alocação de equipamentos de carga e transporte (PINTO *et al.*, 2001). Ainda conforme Campos (2017), o planejamento de curto prazo foca em determinar áreas de lavra e desenvolvimento no curto prazo, com a finalidade de atingir as metas estipuladas a médio prazo com relação estéril/minério e produção. Pode ter prazo de dias até 1 ano.

No planejamento de curto prazo tem-se o compromisso de elaborar os planos de lavra, de modo a facilitar a compreensão das operações da mina, executando planos anuais, trimestrais, mensais e diários, programação das pilhas de ROM objetivando atingir metas de qualidade requeridas pela usina de beneficiamento (CHIMUCO, 2010).

Além disso, realiza-se o sequenciamento da disposição de estéril no dia a dia, controle de pilhas de ROM e de produtos, controle da mistura de minério para atender aos requisitos da usina,

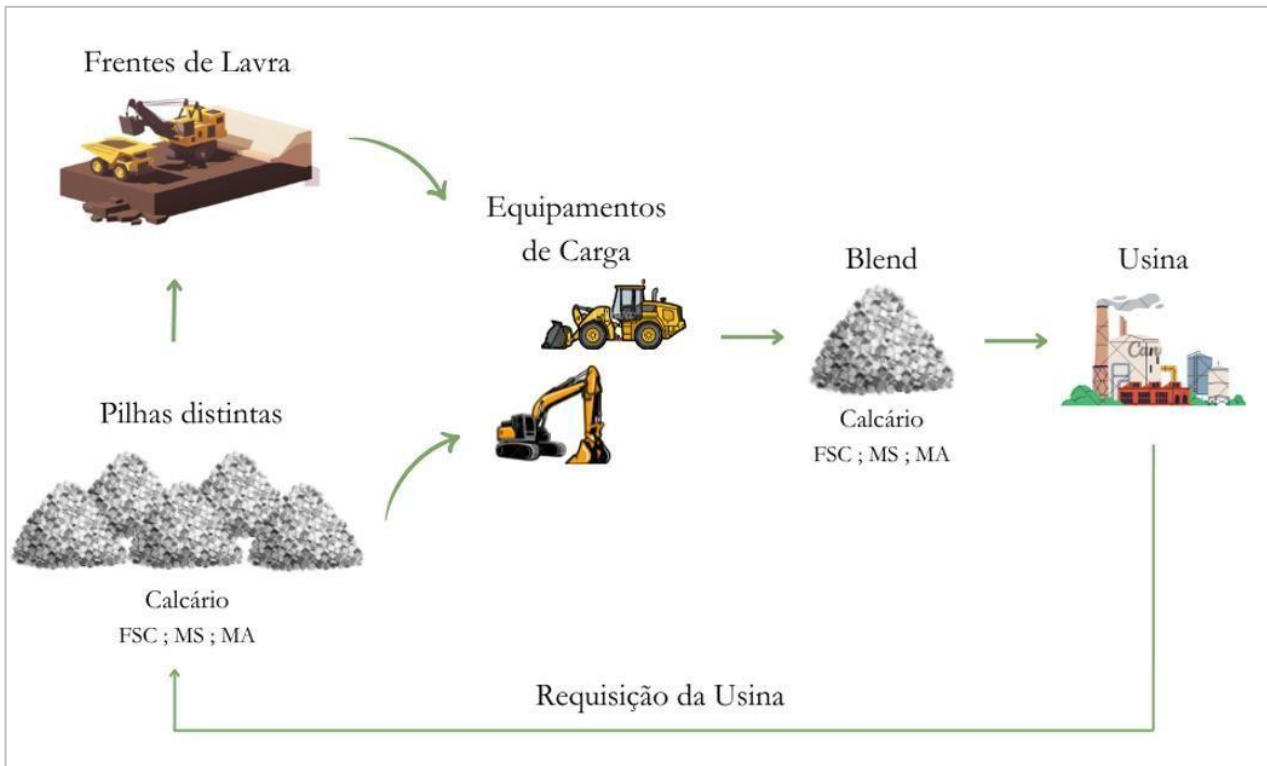
suporte à programação de embarques, atualização topográfica das minas, estudos de acessos temporários, estudos estatísticos da qualidade da produção, amostragem de pré-lavra, quantificação de estoques no final de cada mês, atualização do banco de dados, dentre outras atividades (CHIMUCO, 2010).

3.4 Problema da Mistura de Minérios

Em minerações, é comum a ocorrência de minérios com características físico-químicas distintas, como por exemplo: o teor de contaminantes, a concentração do elemento de interesse e a distribuição granulométrica, entre outras variáveis. Dessa forma, o processo da mistura de minério de diferentes frentes de lavra requer a definição criteriosa e o cumprimento rigoroso das proporções estabelecidas, a fim de garantir o atendimento às metas de quantidade e qualidade estipuladas nos planos específicos de produção. O não cumprimento dessas restrições pode acarretar impactos diretos na operação da usina, comprometendo tanto a qualidade quanto o volume do produto final (ALVES, 2007).

Dentro deste contexto, o problema da mistura de minérios, também conhecido como mistura, refere-se à determinação das proporções ideais de diferentes quantidades, provenientes das frentes de lavra ou pilhas de estocagem, a fim de compor um produto final que atenda simultaneamente às exigências de qualidade e produção estabelecidas pelo cliente. Cada material apresenta características específicas, como custo de extração, teor do elemento químico de interesse e distribuição granulométrica, o que torna o processo de mistura uma tarefa complexa. Devido à elevada variabilidade intrínseca dos minérios disponíveis, às metas de qualidade e produção tornam-se, em muitos casos, inviáveis. Em função disso, são definidas faixas de tolerância para os parâmetros críticos de controle, permitindo maior flexibilidade operacional e viabilizando soluções que otimizem o desempenho técnico e econômico do processo (GERSHON, 1982). A Figura 6, apresenta um esquema no qual destaca o fluxo de operações para a realização da mistura de minérios.

Figura 6 - Interface entre frentes de lavra, pilhas e usina



Fonte: Adaptado de Coutinho (2022).

Diante da complexidade envolvida no problema da mistura de minérios, especialmente no que se refere ao atendimento das especificações químicas exigidas pelo processo industrial, torna-se imprescindível a adoção de um modelo de tomada de decisão a fim de definir a combinação viável do problema (SILVA; MARTINS, 2020).

3.4.1 Processo de tomada de decisão

Segundo Lachtermacher (2004), a tomada de decisão pode ser compreendida como o processo de identificar um problema ou uma oportunidade e, a partir disso, optar por uma linha de ação apropriada para resolvê-lo. Nesse contexto, um problema é caracterizado por uma discrepância entre a situação atual e o estado desejado, enquanto uma oportunidade representa as possibilidades oferecidas pelo ambiente que permitem superar metas e alcançar objetivos previamente estabelecidos.

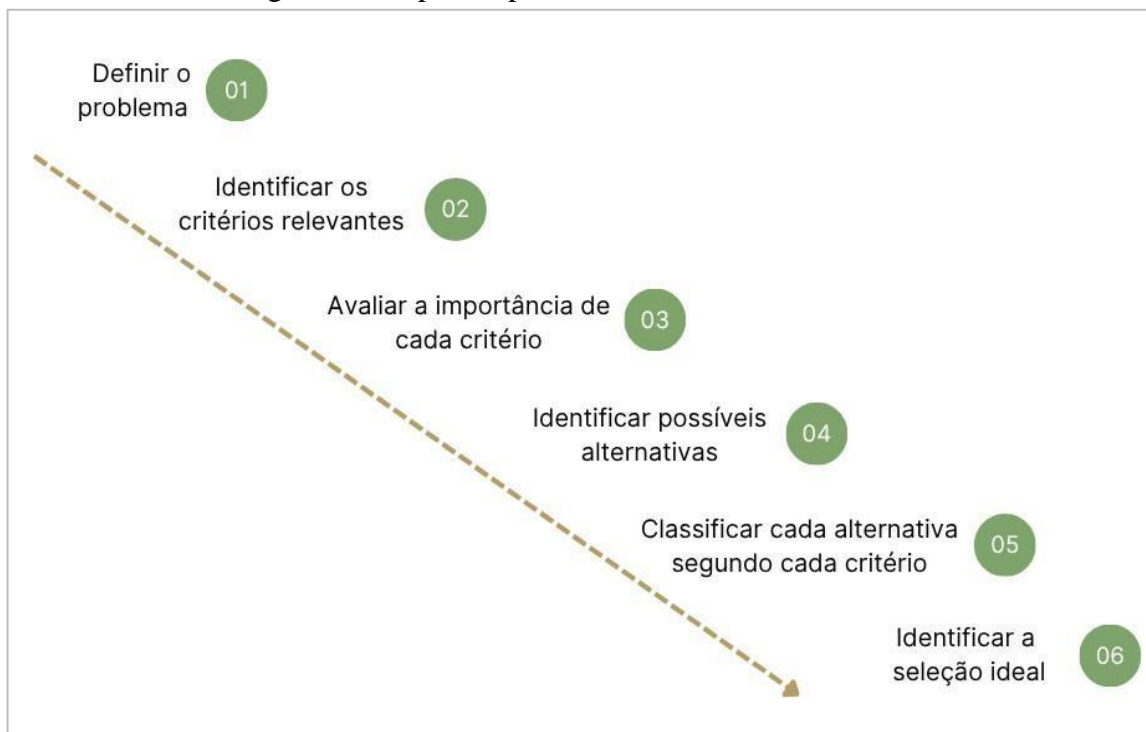
Na literatura é possível encontrar diversas definições para o conceito de tomada de decisão. De acordo com Certo (2005), a decisão pode ser definida como a escolha entre duas ou mais alternativas disponíveis, sendo que o processo de tomada de decisão consiste na análise criteriosa dessas opções com o objetivo de selecionar aquela que se apresenta como a mais eficiente. Para Chiavenato (1997), esse processo consiste na avaliação sistemática de múltiplas alternativas de

curso de ação, visando à identificação da opção mais apropriada que o gestor deve adotar.

A tomada de decisão está intrinsecamente ligada a todas as etapas do planejamento organizacional, abrangendo diversos elementos, tais como recursos disponíveis, equipes, metas estabelecidas e os resultados almejados. Sua dinâmica tem início com a identificação das demandas, informações acessíveis, fluxo de comunicação e possíveis soluções. A expectativa é que esses componentes, organizados de forma coerente e racional, contribuam para a escolha da alternativa mais eficaz (MORITZ & PEREIRA, 2006).

O processo de tomada de decisão, conforme descrito na literatura, apresenta grande semelhança com o processo de modelagem, o que justifica a adoção da Pesquisa Operacional por muitos gestores como uma ferramenta de apoio na estruturação e na escolha de alternativas decisórias mais eficazes. Conforme Bazerman (2015), o processo de tomada de decisão, em sua maioria, engloba os passos demonstrados na Figura 7.

Figura 7 - Etapas do processo de tomada de decisão



Fonte: Adaptado de Bazerman (2015).

3.5 Pesquisa Operacional (PO)

A Pesquisa Operacional é uma ciência multidisciplinar que utiliza de análises qualitativas, conceitos quantitativos e métodos matemáticos que vem auxiliando as empresas organizacionais nas suas tomadas de decisão, visto que sua ampla aplicabilidade facilita a identificação dos objetivos, das variáveis de decisão e das limitações existentes. Além disso, este método científico

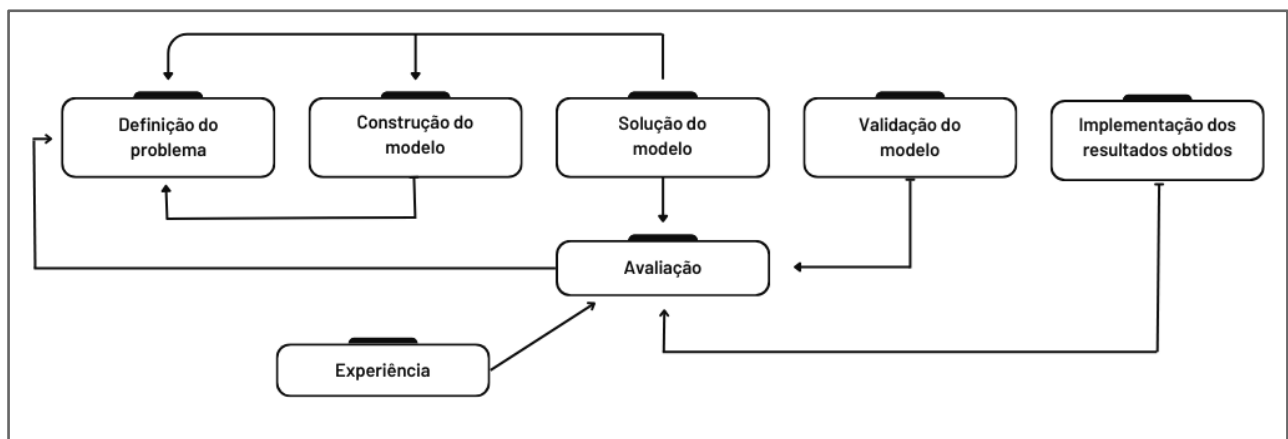
tem por finalidade representar problemas reais e encontrar uma solução ótima para a situação, o que permite ao gestor analisar, testar e avaliar uma decisão antes de ser implantada (MILAGRES, 2019).

Na primeira metade do século XX, a PO surgiu através de esforços de diversos cientistas de diferentes áreas distintas, que se empenharam em resolver problemas militares. Desde então, a pesquisa operacional tem se desenvolvido ao longo dos anos, tornando-se uma ferramenta valiosa na tomada de decisões em diversas áreas, tais como a engenharia, a administração e a economia (CARVALHO, 2003).

O êxito da Pesquisa Operacional (PO) no contexto militar estimulou a comunidade científica a aprofundar seus estudos e a desenvolver novas metodologias, promovendo a expansão dessa abordagem científica e possibilitando sua aplicação em diversos setores, como o comercial, o industrial e o governamental. Simultaneamente, a revolução computacional, ao aperfeiçoar os computadores, impulsionou o desenvolvimento da PO, pois as novas máquinas são capazes de resolver grandes volumes de cálculos matemáticos, ultrapassando a capacidade humana (HILLIER & LIEBARMAN, 2013).

A modelagem de problemas de Pesquisa Operacional inicia com a coleta de dados para formular com precisão o problema e construir um modelo matemático representativo do cenário estudado. Após encontrar uma solução matemática, testes são realizados para validar o modelo. Posteriormente, os resultados são implantados e avaliados continuamente para garantir sua adequação à realidade, como pode ser visto na Figura 8 (SHAMBLIN, 1989).

Figura 8 - Fluxograma do Processo de Modelagem



Fonte: Adaptado de Lachtermacher, (2004).

Portanto, é notório que a PO é uma ferramenta essencial para uma maior segurança nas tomadas de decisão, sendo amplamente utilizada no meio empresarial. Seu valor está em utilizar modelos exatos, que fornecem soluções ótimas, e modelos probabilísticos, que simulam a realidade

com alta precisão, com uma margem muito pequena de erro (CARVALHO, 2003).

3.5.1 Pesquisa Operacional aplicada à mineração

A busca por decisões mais precisas e eficazes levou a indústria da mineração a utilizar técnicas de Pesquisa Operacional. Ainda de forma discreta, a mineração tem feito uso crescente da Pesquisa Operacional para auxiliar com suas atividades complexas a fim de reduzir riscos, economizar recursos e otimizar os processos. Com isso, tornou-se possível simular o planejamento, o controle da produção, além de aplicar soluções viáveis à realidade do setor. Esses avanços ajudam a reduzir o tempo de tomada de decisão e diminuem os prejuízos causados por decisões equivocadas. A técnica mais usada nos problemas de planejamento da mineração é a programação linear, especialmente nas minas a céu aberto, cujas operações apresentam alto grau de complexidade (MUTMANSKY, 1979).

De acordo com Barbosa e Mapa (2017), as principais aplicações da PO na mineração estão na mistura de minérios e no planejamento operacional da lavra. A mistura de minérios consiste na combinação de diferentes materiais, respeitando proporções e concentrações ideais. Exemplos do uso da Pesquisa Operacional nesse tipo de problema podem ser encontrados nos trabalhos intitulados: Otimização da mistura de carvões na produção de coque metalúrgico (SILVA, 2011), Otimização da mistura de calcário da Votorantim cimentos em Xambioá-to, (NETO, 2013) e um modelo de programação matemática para otimizar a composição de lotes de minério de ferro da Mina Cauê da CVRD (MORAES *et al.* 2006).

Por outro lado, a PO utilizada para o planejamento operacional de lavra envolve a alocação dos equipamentos de carga nas diferentes frentes de extração de ROM (Run of Mine - minério bruto lavrado) e na separação entre minerais de interesse econômico e estéreis. O objetivo é direcionar esse material às centrais de beneficiamento, garantindo a qualidade do produto final e, ao mesmo tempo, reduzindo a quantidade total de equipamentos necessários.

Na pesquisa operacional, os modelos matemáticos são geralmente classificados em dois grupos: modelos de simulação e modelos de otimização (PINTO, 2022). O modelo de simulação é uma técnica da pesquisa operacional que vem ganhando cada vez mais destaque na tomada de decisões em diversos setores, permitindo testar e avaliar diferentes cenários em ambientes controlados (CRUZ, 2023). Segundo Banks *et al.* (2005) a simulação pode ser aplicada em diversas áreas, como na indústria, na logística e no planejamento de operações. Estes modelos fornecem uma representação do mundo real com o propósito de viabilizar a construção e avaliação de diferentes alternativas de decisão antes de sua implementação prática. Dessa forma, a simulação promove maior flexibilidade e oferece um grau de liberdade na análise, o que permite a escolha da estratégia mais adequada às

especificidades de cada situação (CARVALHO, 2003).

Um modelo de otimização é um esquema lógico que representa de forma organizada um determinado problema, buscando obter uma solução única e ideal. O objetivo principal do modelo de otimização é encontrar a solução ótima entre todas as possíveis soluções (LONGARAY, 2014).

Um modelo de otimização é constituído por uma estrutura básica composta por uma função objetivo e um conjunto de restrições. A função objetivo é a parte do modelo que reflete o objetivo a ser alcançado pela tomada de decisão, expressa tanto em termos de maximização, quanto em termos de minimização. As restrições são formadas pela relação matemática do que se pretende quantificar com o que as limita, representando as condições que devem ser respeitadas na tomada de decisão (LONGARAY, 2014).

3.5.2 Otimização

Segundo Harrel *et al.* (2000), a otimização consiste em um método que avalia diversas combinações de valores das variáveis controláveis, com o objetivo de encontrar aquela que produza o resultado mais desejado. Na maioria dos casos, esse processo de testar diferentes combinações torna-se complexo ou até inviável em sistemas reais.

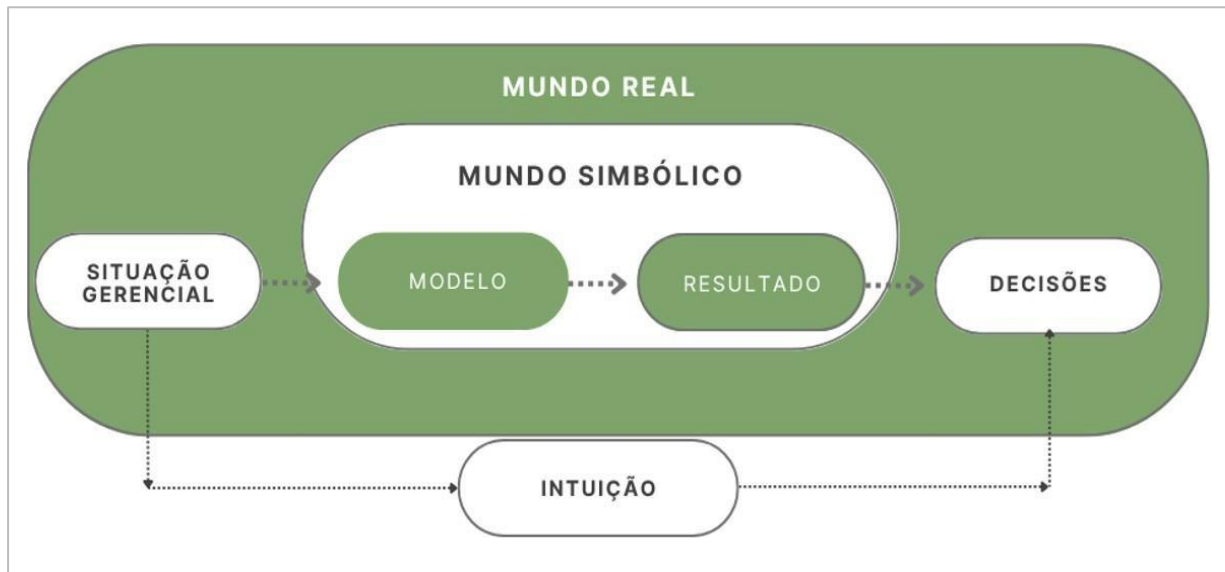
Conforme Moreira (2003),

O objetivo da otimização é encontrar um conjunto de variáveis de decisão que geram um valor ótimo para a função objetivo, valor máximo ou valor mínimo, dependendo do problema, satisfazendo um conjunto de restrições impostas pelo modelo (MOREIRA, 2003).

Em um empreendimento mineiro, otimizar é simplificar um processo para funcionar de forma mais rápida e eficiente, reduzindo o tempo das operações. Em termos simples, é maximizar ou minimizar uma determinada função, como lucro, eficiência, desempenho, custo, tempo, etc. Respeitando as restrições estabelecidas, a fim de obter uma solução ótima.

A Figura 9 ilustra que, diante de uma determinada situação gerencial ou problema a ser otimizado, a intuição pode contribuir na busca por soluções, porém nem sempre o resultado poderá ser o mais eficaz. No entanto, ao aplicar um método e analisar seus resultados, é possível tomar decisões de forma muito mais assertiva e eficaz em relação ao problema (LACHTERMACHER, 2004).

Figura 9 - Processo de tomada de decisão



Fonte: Adaptado de Lachtermacher (2004).

3.5.3 Métodos exatos

Segundo Taha (2011), métodos exatos são procedimentos algorítmicos que asseguram a obtenção da melhor solução possível de um problema, considerando todas as restrições e variáveis envolvidas. Eles diferem dos métodos heurísticos ou meta-heurísticos, que não garantem soluções ótimas, mas sim boas soluções em tempo reduzido. Esses métodos são fundamentais na Pesquisa Operacional e em áreas como a engenharia, economia, ciência da computação e logística.

Além disso, os algoritmos exatos constituem métodos fundamentados em técnicas matemáticas rigorosas, cuja finalidade é identificar a solução ótima de um problema de otimização ou demonstrar sua inexistência. Tais algoritmos, como enumeração completa, métodos de ramificação e delimitação (*branch and bound*) ou planos de corte (*cutting plans*), os quais exploram de forma estruturada a região viável do problema, eliminam soluções não ótimas. A principal vantagem dos algoritmos exatos reside na garantia de obtenção da melhor solução possível, além da capacidade de quantificar a distância entre soluções alternativas e o ótimo. Contudo, esses métodos apresentam limitações, como elevado custo computacional, alto consumo de memória e exigência de capacidade de armazenamento significativa (GOLDBARG, 2006).

3.5.4 Método de enumeração completa

O método da enumeração completa, também conhecido como força bruta, é uma técnica exata de resolução de problemas de otimização. Consiste em avaliar todas as soluções possíveis dentro do espaço viável do problema, a fim de identificar aquela que maximiza ou minimiza a

função objetivo. É um método que garante encontrar a solução viável, pois nenhuma possibilidade é ignorada (WINSTON, 2004). O método da enumeração completa busca examinar todas as soluções possíveis de um problema, verificando quais satisfazem as restrições e escolhendo a melhor entre elas de acordo com a função objetivo.

Algumas vantagens e desvantagens do método de enumeração completa:

- **Garantia de otimização:** Quando uma solução viável existe, o método de enumeração completa assegura sua identificação, uma vez que todas as possibilidades do espaço de busca são examinadas de forma exaustiva.
- **Facilidade de implementação:** Devido à sua estrutura lógica direta, trata-se de um dos algoritmos mais simples de ser concebido e implementado, não exigindo técnicas avançadas de programação ou modelagem.
- **Elevado custo computacional:** A principal limitação do método reside na sua ineficiência computacional, especialmente em problemas de grande escala. O tempo de processamento cresce exponencialmente com o aumento da complexidade do problema, o que pode torná-lo inviável para aplicações práticas em larga escala.

3.5.5 Planilhas Excel

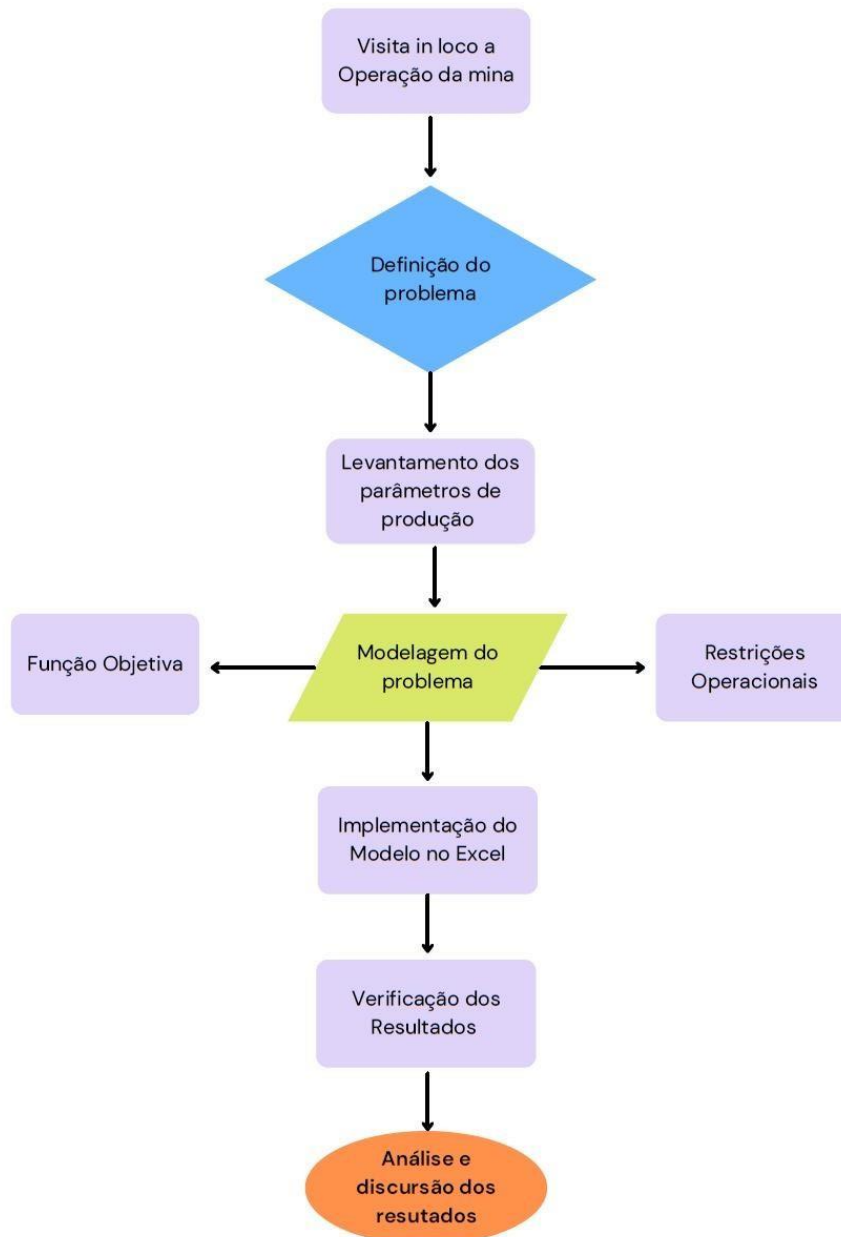
O Microsoft Excel é amplamente utilizado como ferramenta de apoio à otimização de modelos matemáticos devido à sua acessibilidade, facilidade de uso e recursos como fórmulas, funções e o Solver, que permitem resolver problemas de maximização e minimização com restrições. Sua interface intuitiva e a possibilidade de rápida visualização dos resultados por meio de tabelas e gráficos tornam o Excel uma opção prática para a aplicação de modelos matemáticos em diferentes áreas, especialmente em problemas de pequena e média complexidade (MICROSOFT, 2019).

Entre as principais vantagens destacam-se o baixo custo, a flexibilidade e a ampla disseminação do software. Contudo, o Excel apresenta limitações relacionadas à capacidade de processamento, precisão numérica e risco de erros humanos no preenchimento das fórmulas. Assim, embora seja uma ferramenta eficiente para análises menos complexas, sua utilização pode ser insuficiente para problemas de grande porte, nos quais softwares especializados se mostram mais adequados (MICROSOFT, 2019).

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo foi estruturada de forma sequencial, o método possui carácter quantitativo e qualitativo, uma vez que integra dados operacionais reais com análises matemáticas.

Figura 10 - Fluxograma da metodologia



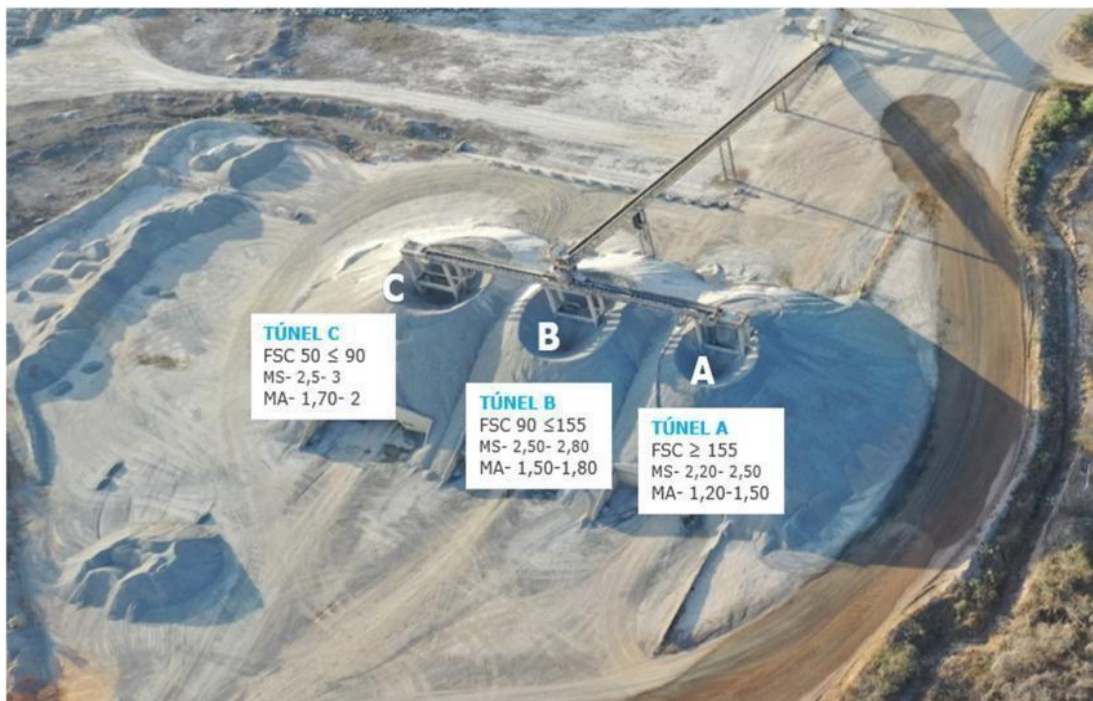
Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A primeira etapa correspondeu a uma visita *in loco* realizada em uma mina de calcário, para compreender o funcionamento das operações, sendo possível identificar a problemática voltada à mistura do minério na planta de britagem.

O material produzido nesta etapa é direcionado para os três túneis de calcário britado, que foram adotados pela empresa, motivada pela localização da mineração, situada a aproximadamente 28 km da planta de beneficiamento, exigindo o transporte do material por meio de caminhões rodoviários. Além disso, as cores dos túneis foram definidas para diferenciar a qualidade dos materiais.

Esta implementação objetivou um maior controle da qualidade do material destinado a fábrica, assegurando o atendimento aos limites estabelecidos para os parâmetros cimenteiros, a saber: FSC entre 120 e 140, MS entre 2,2 e 2,5 e MA entre 1,15 e 1,75. Dessa forma, torna-se necessária a existência dos túneis com qualidades distintas, de modo a garantir o cumprimento adequado das especificações da fábrica.

Figura 11 - Túneis de calcário britado



Fonte: Relatório Anual de Lavra (2020).

4.1 Restrições

Em seguida, foram coletados os parâmetros operacionais da mina em estudo, sendo estes: a capacidade dos equipamentos, a produção de calcário para cada túnel, bem como os parâmetros de qualidade dos túneis e a produção diária da fábrica, nos quais foram definidas como sendo as restrições aplicadas no modelo de otimização baseado no método da enumeração completa.

A tabela 4 destaca a produção destinada para a fábrica composta por 4015 toneladas de calcário britado, provenientes de três túneis distintos.

O Túnel B (Calcário Laranja) é responsável por 70% da massa total, equivalente a 2805 toneladas, enquanto os Túneis A (Calcário Azul) e C (Calcário Marrom) contribuem com 605 toneladas cada, correspondendo a 15% da material. Essa distribuição evidencia a predominância do Túnel B na composição da matéria-prima para fabricação do cimento.

Tabela 4 – Quantidade de material transportado de cada túnel por dia

TÚNEIS	MASSA (t)	PORCENTAGEM
Calcário Azul (Túnel A)	605	15%
Calcário Laranja (Túnel B)	2805	70%
Calcário Marrom (Túnel C)	605	15%
Destinado a fábrica:	4015	100%

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Além disso, a Tabela 5 apresenta os equipamentos de carga e transporte utilizados para alimentação da britagem, consistindo em caminhões fora de estrada com capacidade de 55 toneladas e carregadeiras com capacidade de 12 toneladas.

Tabela 5 – Equipamentos de carga e transporte

EQUIPAMENTOS	DISPONIBILIDADE	CAPACIDADE (t)
Carregadeiras	3	12
Caminhões fora de estrada	4	55

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Dessa forma, a determinação da quantidade de viagens necessárias para o transporte do material da bancada até a britagem, é obtida pela razão entre a massa produzida de cada túnel e a capacidade nominal dos caminhões utilizados. Esse procedimento permite calcular o número de caminhões que devem ser direcionadas ao britador, assegurando a composição da produção diária proveniente de cada túnel, de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 – Quantidade de material transportado de cada túnel por dia

TÚNEIS	PRODUÇÃO DIÁRIA DA FÁBRICA (t)	CAPACIDADE DO CAMINHÃO (t)	CICLOS DE TRANSPORTE
Calcário Azul (A)	605	55	11
Calcário Laranja (B)	2.805	55	51
Calcário Marrom (C)	605	55	11

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

As variáveis de controle utilizadas no modelo foram Fator de Saturação da Cal (FSC), Módulo de Sílica (MS) e Módulo de Alumínio (MA), calculados a partir dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e CaO . A Tabela 7 exibe os parâmetros de limite máximo e mínimo dos parâmetros estimados para cada túnel de material britado. Esses parâmetros devem ser rigorosamente seguidos na programação dos Blends de minério. Sendo assim, é de extrema importância que os teores permaneçam dentro desses parâmetros, a fim de garantir a produção esperada e a continuidade operacional da usina.

Tabela 7 – Limites máximos e mínimos da qualidade do calcário

CATEGORIAS	FSC (%)	MS (%)	MA (%)
Calcário Azul (A)	≥ 155	2.20 – 2.50	1.20 – 1.50
Calcário Laranja (B)	$90 \leq 155$	2.5 – 2.8	1.50 – 1.70
Calcário Marrom (C)	$50 \leq 90$	2.8 – 3.0	1.7 – 2.0
Estéril	< 50	-	-

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

O modelo baseado no método da enumeração completa, objetiva avaliar todas as soluções possíveis dentro do espaço viável do problema. Como forma de auxiliar na composição das combinações possíveis para as pilhas, utilizou-se o *Visual Basic for Applications* (VBA) que consiste em uma linguagem de programação integrada ao Excel que permite a automação de tarefas e a criação de macros. Sua utilização possibilita a geração sistemática de combinações, cálculos e relatórios, garantindo maior eficiência e precisão no tratamento dos dados (Microsoft Learn, 2026).

As Figuras 11 e 12 apresentam os códigos gerados para obtenção das combinações com base na quantidade de ciclos de transporte para cada túnel em específico.

Figura 12 – Código para gerar combinações para 4 pilhas, que somadas resulte em 11 ciclos de transporte

```

Sub Gerar_Combinacoes_Soma_11()

    Dim i As Integer, j As Integer, k As Integer, l As Integer
    Dim linha As Long

    linha = 1

    For i = 0 To 11
        For j = 0 To 11
            For k = 0 To 11
                l = 11 - i - j - k

                If l >= 0 And l <= 60 Then
                    Cells(linha, 1).Value = i
                    Cells(linha, 2).Value = j
                    Cells(linha, 3).Value = k
                    Cells(linha, 4).Value = l
                    linha = linha + 1
                End If
            Next k
        Next j
    Next i

    MsgBox "Processo concluído! Total de linhas: " & linha - 1

End Sub

```

Fonte: Microsoft Visual Basic For Applications (2026).

Figura 13 – Código para gerar combinações para 4 pilhas, que somadas resulte em 51 ciclos de transporte

```

Sub Gerar_Combinacoes_Soma_51()

    Dim i As Integer, j As Integer, k As Integer, l As Integer
    Dim linha As Long

    linha = 1

    For i = 0 To 51
        For j = 0 To 51
            For k = 0 To 51
                l = 51 - i - j - k

                If l >= 0 And l <= 51 Then
                    Cells(linha, 1).Value = i
                    Cells(linha, 2).Value = j
                    Cells(linha, 3).Value = k
                    Cells(linha, 4).Value = l
                    linha = linha + 1
                End If
            Next k
        Next j
    Next i

    MsgBox "Processo concluído! Total de linhas: " & linha - 1

End Sub

```

Fonte: Microsoft Visual Basic For Applications (2026).

As pilhas consideradas para a mistura dos minérios em questão no trabalho são

provenientes das bancadas desmontadas na mina. Cada pilha representa o material desmontado dentro da zona de influência de um furo carregado com explosivos. Conforme estabelecido na Equação 4, a massa de calcário associada a cada pilha foi determinada pela multiplicação dos parâmetros geométricos e físicos envolvidos, a saber: afastamento, espaçamento, altura da bancada e densidade do material. Com base nos valores adotados pela empresa, afastamento de 5,0 m, espaçamento de 7,5 m, altura da bancada de 15 m e densidade do minério de 2,65 t/m³ obteve-se uma massa aproximada de 1.490 toneladas por pilha. Sendo essa a massa disponível para cada pilha.

$$\text{Massa da pilha (t)} = A \times E \times H_b \times \text{densidade do calcário (t/m}^3\text{)} \quad (4)$$

Onde:

A – Afastamento (m);

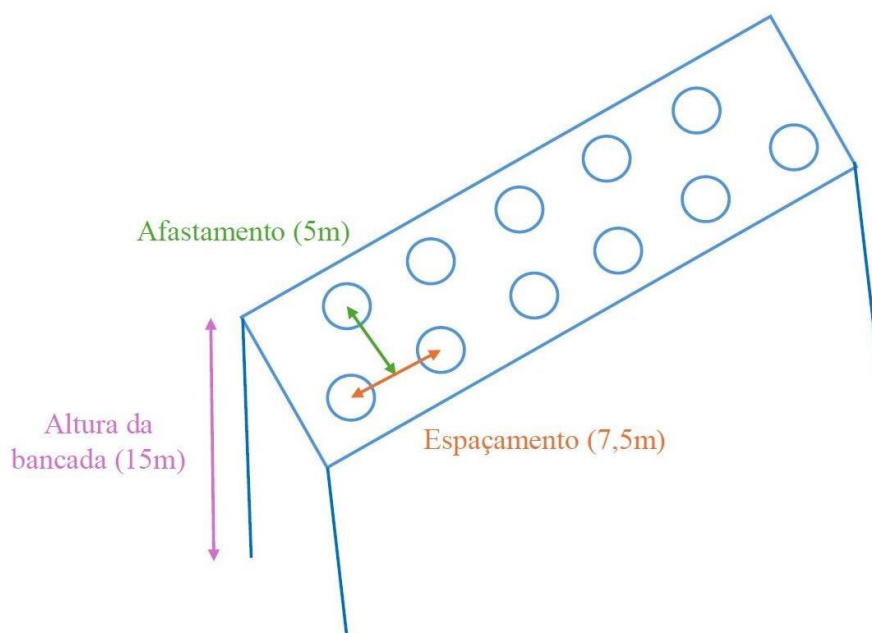
E – Espaçamento (m);

H_b – Altura da bancada (m);

Densidade do calcário (t/m³).

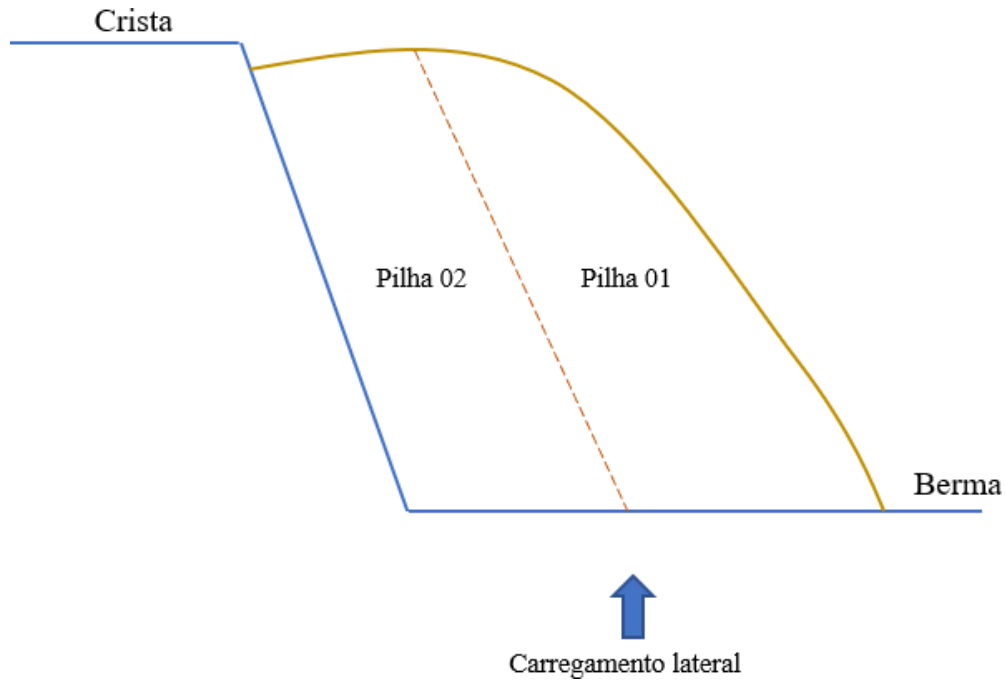
As Figuras 13 e 14 ilustram os parâmetros usados para o cálculo da massa da pilha em toneladas, bem como a disposição das pilhas na bancada de operação, respectivamente. Uma observação com relação ao carregamento do material, é que o mesmo ocorre lateralmente, permitindo no máximo o consumo de 2 pilhas por vez.

Figura 14 - Parâmetros para cálculo da massa da pilha



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Figura 15 – Disposição das pilhas nas bancadas



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Nesse sentido, na Tabela 8 é possível observar a composição química das pilhas com base nos teores de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e CaO , nos quais serviram como dados de entrada do modelo.

Tabela 8 - Teores das pilhas

DADOS DE ENTRADA				
PILHAS	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)
Pilha 1	6,97	1,72	1,11	47,00
Pilha 2	7,24	1,69	1,76	47,60
Pilha 3	13,54	3,39	1,25	41,41
Pilha 4	5,20	1,43	1,42	36,00

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Para a realização da mistura por óxidos foram consideradas as seguintes equações:

$$\text{Blendagem } \text{SiO}_2 = \frac{((\text{CT Pilha01} * \text{SiO}_2 \text{ Pilha01}) + (\text{CT Pilha02} * \text{SiO}_2 \text{ Pilha02}) + (\text{CT Pilha03} * \text{SiO}_2 \text{ Pilha03}) + (\text{CT Pilha04} * \text{SiO}_2 \text{ Pilha04}))}{\text{Ciclo de transporte}} \quad (5)$$

$$\text{Blendagem } \text{Al}_2\text{O}_3 = \frac{((\text{CT Pilha01} * \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ Pilha01}) + (\text{CT Pilha02} * \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ Pilha02}) + (\text{CT Pilha03} * \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ Pilha03}) + (\text{CT Pilha04} * \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ Pilha04}))}{\text{Ciclo de transporte}} \quad (6)$$

$$\text{Blendagem Fe}_2\text{O}_3 = \frac{((\text{CT Pilha01} * \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ Pilha01}) + (\text{CT Pilha02} * \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ Pilha02}) + (\text{CT Pilha03} * \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ Pilha03}) + (\text{CT Pilha04} * \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ Pilha04}))}{\text{Ciclo de transporte}} \quad (7)$$

$$\text{Blendagem CaO} = \frac{((\text{CT Pilha01} * \text{CaO Pilha01}) + (\text{CT Pilha02} * \text{CaO Pilha02}) + (\text{CT Pilha03} * \text{CaO Pilha03}) + (\text{CT Pilha04} * \text{CaO Pilha04}))}{\text{Ciclo de transporte}} \quad (8)$$

Para ilustrar a aplicabilidade da metodologia e a funcionalidade do modelo, foram criados três cenários I, II e III, os dados foram organizados e testados com auxílio de planilhas Excel, versão da Microsoft Excel 2021. Cada cenário considera o limite máximo e mínimo do FSC, MS e MA, denominados calcário azul, calcário laranja e calcário marrom (Figura 10). Sendo assim, as restrições de não negatividade foram aplicadas em todos os cenários a fim de evitar a criação de massas negativas, visto que não seria coerente. Portanto, essas variáveis devem assumir valores maiores ou iguais a zero.

Para o cenário I, o objetivo é enquadrar os parâmetros cimenteiros FSC, MS e MA de forma a atender os limites estabelecidos para o calcário azul (Túnel A), conforme apresentado na Tabela 08. Além disso, a quantidade de vezes que o caminhão será direcionado ao britador seja igual a 11, totalizando uma produção de 605 toneladas, ocorrendo efetivamente a mistura no túnel.

Tabela 9 – Limite máximo e mínimo para calcário azul.

CALCÁRIO AZUL (A)			
LIMITES	FSC (%)	MS (%)	MA (%)
Máximo	200	2,50	1,50
Mínimo	155	2,20	1,20

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

No cenário II, o objetivo é adequar os parâmetros cimenteiros FSC, MS e MA de forma a atender os limites estabelecidos para o calcário laranja (Túnel B), como visto na Tabela 09. Também, objetiva-se ter a produção diária do túnel atingida, com base a quantidade de vezes que o caminhão será direcionado ao britador, sendo igual a 51 viagens.

Tabela 10 – Limite máximo e mínimo para o calcário laranja

CALCÁRIO LARANJA (B)			
LIMITES	FSC (%)	MS (%)	MA (%)
Máximo	155	2,70	1,80
Mínimo	120	2,50	1,20

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

No cenário III, o objetivo é enquadrar os parâmetros cimenteiros FSC, MS e MA de forma a atender os limites estabelecidos para o calcário marrom (Túnel C), conforme apresentado na Tabela 11. Além disso, a quantidade de vezes que o caminhão será direcionado ao britador seja igual a 11, totalizando uma produção de 605 toneladas.

Tabela 11 – Limite máximo e mínimo para calcário marrom

CALCÁRIO MARROM - C			
LIMITES	FSC (%)	MS (%)	MA (%)
Máximo	120	3,0	2,21
Mínimo	50	2,5	1,8

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

4.2 Verificação dos Resultados

Diante disso, para que as soluções sejam validadas, foi adotada para cada parâmetro cimenteiro uma verificação numérica, cada solução candidata precisa ser avaliada quanto ao atendimento aos limites estabelecidos para os parâmetros cimenteiros: FSC, MS e MA. Na etapa de verificação individual para cada parâmetro, é realizada uma checagem numérica. Se o valor do parâmetro estiver dentro do intervalo permitido, a verificação retorna o número 1 (um). Caso contrário, retorna 0 (zero). Após avaliar os três parâmetros, soma-se os resultados das verificações; para que a solução seja considerada válida, é necessário que a soma seja igual a 3 (três). Ou seja, todos os três parâmetros cimenteiros atendem aos limites estabelecidos simultaneamente.

Buscando indicar a melhor solução dentre as soluções viáveis obtidas, calculou-se o desvio padrão individual dos parâmetros analisados e, posteriormente, somou-se esses valores para obter um indicador global de dispersão. Quanto menor esse valor total, menor é a variação dos parâmetros em relação à média, o que indica maior estabilidade e uniformidade da solução.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão analisados e discutidos os resultados encontrados para cada cenário mencionado na metodologia.

Através da utilização do VBA foram obtidas 364 combinações possíveis que atendem a quantidade de ciclos de transporte para se carregar e transportar o material requisitado para a produção diária dos Túneis para o Túnel A e C, já para o Túnel B, foram geradas 24.804 combinações possíveis. De acordo com a Tabela 12 e 13, as combinações criadas ditam a quantidade de caminhões oriundos de cada pilha (CT – Ciclo de transporte), ou seja, a quantidade de minério desmontado que deverá ser transportado para o britador. Nesse sentido, foi possível obter as massas transportadas do material para composição da mistura no túnel A, B e C, tendo em vista a capacidade nominal dos caminhões de 55 toneladas. Logo, as produções diárias dos túneis A e C foram respeitadas, totalizando 605 toneladas de calcário britado para os Túneis A e C e 2.805 toneladas de calcário para o Túnel B.

Tabela 12 – Total de combinações geradas para 4 pilhas para os túneis A e C e suas respectivas massas

Solução	CT_Pilha01	CT_Pilha02	CT_Pilha03	CT_Pilha04	Total de Ciclos	Massa 01	Massa 02	Massa 03	Massa 04	Total TúnelA
1	0	0	0	11	11	0	0	0	605	605
2	0	0	1	10	11	0	0	55	550	605
3	0	0	2	9	11	0	0	110	495	605
4	4	4	2	1	11	220	220	110	55	605
5	0	0	4	7	11	0	0	220	385	605
6	0	0	5	6	11	0	0	275	330	605
7	0	0	6	5	11	0	0	330	275	605
8	0	0	7	4	11	0	0	385	220	605
9	0	0	8	3	11	0	0	440	165	605
10	0	0	9	2	11	0	0	495	110	605

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Tabela 13 – Total de combinações geradas para 4 pilhas para os túneis B e suas respectivas massas

Solução	CT_Pilha01	CT_Pilha02	CT_Pilha03	CT_Pilha04	Total de Ciclos	Massa 01	Massa 02	Massa 03	Massa 04	Total TúnelB
1	0	0	0	51	51	0	0	0	2805	2805
2	0	0	1	50	51	0	0	55	2750	2805
3	0	0	2	49	51	0	0	110	2695	2805
4	0	0	3	48	51	0	0	165	2640	2805
5	0	0	4	47	51	0	0	220	2585	2805
6	0	0	5	46	51	0	0	275	2530	2805
7	0	0	6	45	51	0	0	330	2475	2805
8	0	0	7	44	51	0	0	385	2420	2805
9	0	0	8	43	51	0	0	440	2365	2805
10	0	0	9	42	51	0	0	495	2310	2805

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

De acordo com os teores de cada pilha disponível para mistura (Tabela 9), o modelo de otimização realizou a ponderação dos óxidos com base na quantidade de ciclos em cada pilha, resultando no cálculo para todas as soluções. Ademais, com a obtenção da mistura considerando os óxidos do calcário, foram calculados os parâmetros cimenteiros (FSC, MS e MA) de acordo com as equações (1), (2) e (3) definidas no item 3.6.5 deste trabalho. Os resultados das misturas de óxidos e dos parâmetros cimenteiros são observados nas Tabelas 14, 15 e 16.

Tabela 14 – Resultados das blendagens por óxidos e cálculo dos parâmetros do túnel A

Mistura - Óxidos				Mistura - Parâmetros		
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	FSC (%)	MS (%)	MA (%)
5,20	1,43	1,42	36,00	215,55	1,82	1,01
5,96	1,61	1,40	36,49	191,82	1,98	1,14
6,72	1,79	1,39	36,98	173,26	2,12	1,29
8,10	1,99	1,40	45,20	177,53	2,39	1,42
8,23	2,14	1,36	37,97	146,08	2,35	1,58
8,99	2,32	1,34	38,46	135,83	2,45	1,73
9,75	2,50	1,33	38,95	127,14	2,55	1,88
10,51	2,68	1,31	39,44	119,67	2,63	2,04
11,27	2,86	1,30	39,93	113,19	2,71	2,20
12,02	3,03	1,28	40,43	107,51	2,79	2,37
8,29	2,01	1,43	46,25	177,78	2,41	1,40
8,79	2,21	1,45	41,13	148,69	2,40	1,53
9,55	2,39	1,44	41,62	138,81	2,49	1,67

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Tabela 15 - Resultados das misturas por óxidos e cálculo dos parâmetros do túnel B

Mistura - Óxidos				Mistura - Parâmetros		
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	FSC (%)	MS (%)	MA (%)
9,41	2,41	1,36	39,33	132,95	2,50	1,77
9,45	2,41	1,36	39,56	133,18	2,50	1,77
9,49	2,42	1,37	39,79	133,41	2,51	1,76
9,65	2,45	1,37	39,90	131,55	2,53	1,80
9,53	2,42	1,38	40,02	133,63	2,51	1,76
9,69	2,46	1,37	40,12	131,78	2,53	1,79
9,57	2,43	1,38	40,24	133,85	2,51	1,75
9,73	2,46	1,38	40,35	132,01	2,53	1,79
9,61	2,43	1,39	40,47	134,07	2,51	1,75
9,77	2,47	1,39	40,58	132,23	2,53	1,78
9,65	2,44	1,40	40,70	134,29	2,52	1,74
9,81	2,48	1,39	40,81	132,45	2,54	1,78

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Tabela 16 - Resultados das misturas por óxidos e cálculo dos parâmetros do túnel C

Mistura - Óxidos				Mistura - Parâmetros		
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	FSC (%)	MS (%)	MA (%)
5,20	1,43	1,42	36,00	215,55	1,82	1,01
5,96	1,61	1,40	36,49	191,82	1,98	1,14
6,72	1,79	1,39	36,98	173,26	2,12	1,29
7,47	1,96	1,37	37,48	158,33	2,24	1,43
8,23	2,14	1,36	37,97	146,08	2,35	1,58
8,99	2,32	1,34	38,46	135,83	2,45	1,73
9,75	2,50	1,33	38,95	127,14	2,55	1,88
10,51	2,68	1,31	39,44	119,67	2,63	2,04
11,27	2,86	1,30	39,93	113,19	2,71	2,20
12,02	3,03	1,28	40,43	107,51	2,79	2,37
12,78	3,21	1,27	40,92	102,49	2,85	2,54
13,54	3,39	1,25	41,41	98,02	2,92	2,71
5,39	1,45	1,45	37,05	214,70	1,85	1,00
6,14	1,63	1,44	37,55	191,75	2,00	1,14

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Para os Cenários I e III, dentre as 364 combinações possíveis para cada cenário, 83 e 6 soluções foram consideradas viáveis para os túneis A e C, respectivamente. Para o cenário II, foram criadas 24.804 combinações, dentre estas 1.543 foram consideradas viáveis. Essa verificação foi realizada a partir da análise dos parâmetros cimenteiros calculados. Nas Tabelas 20, 21 e 22 ilustradas para cada cenário, observa-se que, de acordo com a verificação, os parâmetros FSC, MS e MA atendem aos intervalos estabelecidos, garantindo a qualidade do material. Ademais, nota-se que a quantidade de ciclos foi atendida, de acordo com cada pilha, atingindo a produção diária de material britado requerida para cada cenário.

Além disso, o desvio padrão foi utilizado como uma medida estatística para avaliar a variabilidade dos parâmetros de cada solução de mistura em relação aos valores médios estabelecidos para os intervalos permitidos, indicados pelas Tabelas 17, 18 e 19. Assim, o desvio padrão funcionou como um critério adicional para diferenciar as soluções viáveis, permitindo identificar aquelas que se mantêm mais próximas do comportamento ideal, como mostrado nas Tabelas 20, 21 e 22.

Tabela 17 - Média dos limites de qualidade: Cenário I

	Faixa de Valores		
	FSC(%)	MS(%)	MA(%)
Máximo	200	2,50	1,50
Mínimo	155	2,20	1,20
Média	177,5	2,35	1,35

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Tabela 18 - Média dos limites de qualidade: Cenário II

	Faixa de Valores		
	FSC(%)	MS(%)	MA(%)
Máximo	155	2,70	1,80
Mínimo	120	2,50	1,20
Média	137,5	2,60	1,50

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Tabela 19 - Média dos limites de qualidade: Cenário III

	Faixa de Valores		
	FSC(%)	MS(%)	MA(%)
Máximo	120	3	2,21
Mínimo	50	2,5	1,80
Média	85	2,75	2,01

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Tabela 20 - Verificação da melhor solução viável pelo desvio padrão do cenário I

Solução	CT_Pilha01	CT_Pilha02	CT_Pilha03	CT_Pilha04	Total de Ciclos	Massa 01	Massa 02	Massa 03	Massa 04	Total_TúnelA	Mistura - Parâmetros			VERIFICAÇÃO				DESVIO PADRÃO			
											FSC (%)	MS (%)	MA (%)	FSC (%)	MS (%)	MA (%)	Soma	DP - FSC	DP - MS	DP - MA	SOMA DPS
4	4	4	2	1	11	220	220	110	55	605	177,53	2,39	1,42	1	1	1	3	0,00	0,00	0,00	0,01
16	3	6	2	0	11	165	330	110	0	605	177,41	2,38	1,35	1	1	1	3	0,01	0,00	0,00	0,01
27	4	3	2	2	11	220	165	110	110	605	177,27	2,38	1,43	1	1	1	3	0,05	0,00	0,01	0,06
37	4	5	2	0	11	220	275	110	0	605	177,78	2,41	1,40	1	1	1	3	0,08	0,00	0,00	0,09
46	3	5	2	1	11	165	275	110	55	605	177,15	2,36	1,36	1	1	1	3	0,12	0,00	0,00	0,12
53	5	3	2	1	11	275	165	110	55	605	177,92	2,43	1,48	1	1	1	3	0,17	0,01	0,02	0,20
54	2	7	2	0	11	110	385	110	0	605	177,03	2,35	1,29	1	1	1	3	0,22	0,00	0,00	0,22
60	4	2	2	3	11	220	110	110	165	605	176,99	2,36	1,45	1	1	1	3	0,26	0,00	0,01	0,27
61	3	4	2	2	11	165	220	110	110	605	176,88	2,34	1,37	1	1	1	3	0,39	0,00	0,00	0,39
66	5	4	2	0	11	275	220	110	0	605	178,16	2,44	1,47	1	1	1	3	0,43	0,01	0,01	0,46
67	2	6	2	1	11	110	330	110	55	605	176,77	2,33	1,30	1	1	1	3	0,54	0,00	0,00	0,54
71	4	1	2	4	11	220	55	110	220	605	176,71	2,34	1,47	1	1	1	3	0,63	0,00	0,01	0,64
72	1	8	2	0	11	55	440	110	0	605	176,66	2,32	1,24	1	1	1	3	0,70	0,00	0,01	0,71
82	3	3	2	3	11	165	165	110	165	605	176,60	2,33	1,39	1	1	1	3	0,82	0,00	0,00	0,82
93	2	5	2	2	11	110	275	110	110	605	176,49	2,31	1,32	1	1	1	3	1,02	0,00	0,00	1,02
102	4	0	2	5	11	220	0	110	275	605	176,41	2,32	1,48	1	1	1	3	1,19	0,00	0,02	1,21
103	1	7	2	1	11	55	385	110	55	605	176,39	2,30	1,25	1	1	1	3	1,23	0,00	0,01	1,24
111	3	2	2	4	11	165	110	110	220	605	176,30	2,31	1,40	1	1	1	3	1,44	0,00	0,00	1,44
112	2	4	2	3	11	110	220	110	165	605	176,20	2,29	1,33	1	1	1	3	1,69	0,00	0,00	1,69
119	1	6	2	2	11	55	330	110	110	605	176,11	2,28	1,26	1	1	1	3	1,94	0,00	0,01	1,95
71	0	8	2	1	11	0	440	110	55	605	176,02	2,27	1,21	1	1	1	3	2,20	0,01	0,02	2,23
126	3	1	2	5	11	165	55	110	275	605	175,99	2,29	1,41	1	1	1	3	2,27	0,00	0,00	2,28
127	2	3	2	4	11	110	165	110	220	605	175,90	2,28	1,34	1	1	1	3	2,57	0,01	0,00	2,57
126	1	5	2	3	11	55	275	110	165	605	175,81	2,26	1,27	1	1	1	3	2,86	0,01	0,01	2,87
66	0	7	2	2	11	0	385	110	110	605	175,72	2,25	1,22	1	1	1	3	3,15	0,01	0,02	3,18
70	3	0	2	6	11	165	0	110	330	605	175,67	2,27	1,43	1	1	1	3	3,36	0,01	0,01	3,37
71	2	2	2	5	11	110	110	110	275	605	175,58	2,26	1,35	1	1	1	3	3,68	0,01	0,00	3,69
119	1	4	2	4	11	55	220	110	220	605	175,50	2,25	1,28	1	1	1	3	4,01	0,01	0,00	4,02
60	0	6	2	3	11	0	330	110	165	605	175,42	2,24	1,22	1	1	1	3	4,33	0,01	0,02	4,36
70	2	1	2	6	11	110	55	110	330	605	175,25	2,24	1,37	1	1	1	3	5,07	0,01	0,00	5,09
111	1	3	2	5	11	55	165	110	275	605	175,17	2,23	1,30	1	1	1	3	5,42	0,02	0,00	5,44
53	0	5	2	4	11	0	275	110	220	605	175,10	2,22	1,23	1	1	1	3	5,76	0,02	0,01	5,79
60	2	0	2	7	11	110	0	110	385	605	174,90	2,22	1,38	1	1	1	3	6,77	0,02	0,00	6,79
102	1	2	2	6	11	55	110	110	330	605	174,83	2,21	1,31	1	1	1	3	7,13	0,02	0,00	7,15
108	3	5	3	0	11	165	275	165	0	605	164,15	2,46	1,50	1	1	1	3	178,22	0,01	0,02	178,26
109	2	6	3	0	11	110	330	165	0	605	163,84	2,43	1,44	1	1	1	3	186,55	0,01	0,01	186,56
114	1	7	3	0	11	55	385	165	0	605	163,54	2,40	1,38	1	1	1	3	195,01	0,00	0,00	195,01
115	2	5	3	1	11	110	275	165	55	605	163,33	2,42	1,45	1	1	1	3	200,92	0,00	0,01	200,94
72	0	8	3	0	11	0	440	165	0	605	163,23	2,37	1,33	1	1	1	3	203,61	0,00	0,00	203,61
73	1	6	3	1	11	55	330	165	55	605	163,01	2,39	1,39	1	1	1	3	209,83	0,00	0,00	209,84
76	2	4	3	2	11	110	220	165	110	605	162,79	2,40	1,47	1	1	1	3	216,46	0,00	0,01	216,48
67	0	7	3	1	11	0	385	165	55	605	162,71	2,36	1,34	1	1	1	3	218,88	0,00	0,00	218,88

127	1	5	3	2	11	55	275	165	110	605	162,47	2,37	1,41	1	1	1	3	225,85	0,00	0,00	225,85
135	3	7	1	0	11	165	385	55	0	605	192,58	2,28	1,21	1	1	1	3	227,55	0,00	0,02	227,57
141	3	6	1	1	11	165	330	55	55	605	192,66	2,27	1,21	1	1	1	3	229,92	0,01	0,02	229,95
142	3	5	1	2	11	165	275	55	110	605	192,75	2,25	1,22	1	1	1	3	232,43	0,01	0,02	232,45
147	2	3	3	3	11	110	165	165	165	605	162,23	2,39	1,48	1	1	1	3	233,28	0,00	0,02	233,30
148	3	4	1	3	11	165	220	55	165	605	192,83	2,23	1,23	1	1	1	3	235,07	0,02	0,01	235,09
61	0	6	3	2	11	0	330	165	110	605	162,16	2,34	1,35	1	1	1	3	235,37	0,00	0,00	235,37
62	3	3	1	4	11	165	165	55	220	605	192,92	2,21	1,24	1	1	1	3	237,86	0,02	0,01	237,89
63	4	6	1	0	11	220	330	55	0	605	193,04	2,31	1,26	1	1	1	3	241,53	0,00	0,01	241,54
120	1	4	3	3	11	55	220	165	165	605	161,91	2,36	1,42	1	1	1	3	243,17	0,00	0,00	243,17
121	4	5	1	1	11	220	275	55	55	605	193,13	2,30	1,27	1	1	1	3	244,32	0,00	0,01	244,33
123	4	4	1	2	11	220	220	55	110	605	193,22	2,28	1,28	1	1	1	3	247,26	0,01	0,01	247,27
127	4	3	1	3	11	220	165	55	165	605	193,32	2,26	1,29	1	1	1	3	250,37	0,01	0,00	250,38
134	2	2	3	4	11	110	110	165	220	605	161,64	2,37	1,50	1	1	1	3	251,49	0,00	0,02	251,51
54	0	5	3	3	11	0	275	165	165	605	161,59	2,33	1,36	1	1	1	3	253,20	0,00	0,00	253,20
60	4	2	1	4	11	220	110	55	220	605	193,43	2,24	1,30	1	1	1	3	253,65	0,01	0,00	253,67
61	5	5	1	0	11	275	275	55	0	605	193,50	2,35	1,31	1	1	1	3	256,03	0,00	0,00	256,03
66	4	1	1	5	11	220	55	55	275	605	193,54	2,22	1,31	1	1	1	3	257,13	0,02	0,00	257,15
67	5	4	1	1	11	275	220	55	55	605	193,60	2,33	1,32	1	1	1	3	259,26	0,00	0,00	259,26
112	1	3	3	4	11	55	165	165	220	605	161,32	2,34	1,43	1	1	1	3	261,92	0,00	0,01	261,93
113	5	3	1	2	11	275	165	55	110	605	193,71	2,31	1,34	1	1	1	3	262,67	0,00	0,00	262,67
116	5	2	1	3	11	275	110	55	165	605	193,82	2,29	1,35	1	1	1	3	266,28	0,00	0,00	266,28
117	5	1	1	4	11	275	55	55	220	605	193,93	2,27	1,36	1	1	1	3	270,09	0,01	0,00	270,10
119	6	4	1	0	11	330	220	55	0	605	193,96	2,38	1,37	1	1	1	3	271,06	0,00	0,00	271,06
46	0	4	3	4	11	0	220	165	220	605	160,99	2,31	1,38	1	1	1	3	272,49	0,00	0,00	272,49
53	5	0	1	5	11	275	0	55	275	605	194,06	2,25	1,38	1	1	1	3	274,13	0,01	0,00	274,15
59	6	3	1	1	11	330	165	55	55	605	194,08	2,36	1,38	1	1	1	3	274,76	0,00	0,00	274,76
64	6	2	1	2	11	330	110	55	110	605	194,19	2,34	1,40	1	1	1	3	278,67	0,00	0,00	278,67
103	1	2	3	5	11	55	110	165	275	605	160,70	2,32	1,45	1	1	1	3	282,24	0,00	0,01	282,25
106	6	1	1	3	11	330	55	55	165	605	194,32	2,33	1,41	1	1	1	3	282,80	0,00	0,00	282,81
107	7	3	1	0	11	385	165	55	0	605	194,43	2,42	1,43	1	1	1	3	286,63	0,00	0,01	286,64
109	6	0	1	4	11	330	0	55	220	605	194,45	2,31	1,43	1	1	1	3	287,18	0,00	0,01	287,19
112	7	2	1	1	11	385	110	55	55	605	194,55	2,40	1,45	1	1	1	3	290,83	0,00	0,01	290,84
37	0	3	3	5	11	0	165	165	275	605	160,37	2,29	1,39	1	1	1	3	293,37	0,00	0,00	293,38
42	7	1	1	2	11	385	55	55	110	605	194,68	2,38	1,47	1	1	1	3	295,27	0,00	0,01	295,28
46	7	0	1	3	11	385	0	55	165	605	194,82	2,36	1,48	1	1	1	3	299,96	0,00	0,02	299,98
93	1	1	3	6	11	55	55	165	330	605	160,06	2,31	1,46	1	1	1	3	304,28	0,00	0,01	304,30
27	0	2	3	6	11	0	110	165	330	605	159,72	2,28	1,40	1	1	1	3	316,03	0,01	0,00	316,04
82	1	0	3	7	11	55	0	165	385	605	159,38	2,29	1,48	1	1	1	3	328,24	0,00	0,02	328,26
16	0	1	3	7	11	0	55	165	385	605	159,04	2,26	1,42	1	1	1	3	340,62	0,01	0,00	340,64
4	0	0	3	8	11	0	0	165	440	605	158,33	2,24	1,43	1	1	1	3	367,37	0,01	0,01	367,38

Tabela 21 - Verificação da melhor solução viável pelo desvio padrão do cenário II

Solução	CT_Pilha01	CT_Pilha02	CT_Pilha03	CT_Pilha04	Total de Ciclos	Massa 01	Massa 02	Massa 03	Massa 04	Total_TúnelB	Mistura - Parâmetros			VERIFICAÇÃO				DESVIO PADRÃO			
											FSC (%)	MS (%)	MA (%)	FSC (%)	MS (%)	MA (%)	Soma	DP - FSC	DP -MS	DP - MA	SOMA DPS
662	0	25	25	1	51	0	1375	1375	55	2805	137,57	2,56	1,68	1	1	1	3	0,01	0,00	0,03	0,04
700	0	15	24	12	51	0	825	1320	660	2805	137,45	2,51	1,69	1	1	1	3	0,00	0,01	0,03	0,05
737	1	23	25	2	51	55	1265	1375	110	2805	137,42	2,56	1,69	1	1	1	3	0,01	0,00	0,04	0,05
773	2	22	25	2	51	110	1210	1375	110	2805	137,46	2,57	1,71	1	1	1	3	0,00	0,00	0,04	0,05
969	1	14	24	12	51	55	770	1320	660	2805	137,49	2,52	1,70	1	1	1	3	0,00	0,01	0,04	0,05
998	0	24	25	2	51	0	1320	1375	110	2805	137,38	2,56	1,68	1	1	1	3	0,01	0,00	0,03	0,05
1026	1	24	25	1	51	55	1320	1375	55	2805	137,61	2,56	1,69	1	1	1	3	0,01	0,00	0,04	0,05
1053	3	21	25	2	51	165	1155	1375	110	2805	137,51	2,58	1,72	1	1	1	3	0,00	0,00	0,05	0,05
1988	2	13	24	12	51	110	715	1320	660	2805	137,54	2,53	1,72	1	1	1	3	0,00	0,01	0,05	0,05
2026	4	20	25	2	51	220	1100	1375	110	2805	137,55	2,58	1,74	1	1	1	3	0,00	0,00	0,06	0,06
2063	0	16	24	11	51	0	880	1320	605	2805	137,65	2,52	1,68	1	1	1	3	0,02	0,01	0,03	0,06
2099	3	12	24	12	51	165	660	1320	660	2805	137,58	2,53	1,73	1	1	1	3	0,01	0,00	0,05	0,07
2295	2	23	25	1	51	110	1265	1375	55	2805	137,66	2,57	1,70	1	1	1	3	0,02	0,00	0,04	0,07
2324	5	19	25	2	51	275	1045	1375	110	2805	137,59	2,59	1,76	1	1	1	3	0,01	0,00	0,07	0,07
2352	4	10	24	13	51	220	550	1320	715	2805	137,42	2,54	1,76	1	1	1	3	0,01	0,00	0,07	0,08
2379	3	11	24	13	51	165	605	1320	715	2805	137,38	2,53	1,74	1	1	1	3	0,02	0,00	0,06	0,08
3224	5	9	24	13	51	275	495	1320	715	2805	137,47	2,54	1,77	1	1	1	3	0,00	0,00	0,07	0,08
3263	5	18	25	3	51	275	990	1375	165	2805	137,40	2,59	1,76	1	1	1	3	0,01	0,00	0,07	0,08
3301	6	17	25	3	51	330	935	1375	165	2805	137,44	2,59	1,78	1	1	1	3	0,00	0,00	0,08	0,08
3338	4	19	25	3	51	220	1045	1375	165	2805	137,35	2,58	1,74	1	1	1	3	0,02	0,00	0,06	0,08
3570	4	11	24	12	51	220	605	1320	660	2805	137,63	2,54	1,75	1	1	1	3	0,02	0,00	0,06	0,08
3599	1	15	24	11	51	55	825	1320	605	2805	137,70	2,52	1,70	1	1	1	3	0,04	0,01	0,04	0,08
3627	2	12	24	13	51	110	660	1320	715	2805	137,33	2,52	1,72	1	1	1	3	0,03	0,01	0,05	0,08
3654	6	8	24	13	51	330	440	1320	715	2805	137,51	2,55	1,79	1	1	1	3	0,00	0,00	0,08	0,09
4449	7	16	25	3	51	385	880	1375	165	2805	137,48	2,60	1,79	1	1	1	3	0,00	0,00	0,09	0,09
4488	3	22	25	1	51	165	1210	1375	55	2805	137,70	2,58	1,72	1	1	1	3	0,04	0,00	0,05	0,09
4526	3	20	25	3	51	165	1100	1375	165	2805	137,31	2,57	1,73	1	1	1	3	0,04	0,00	0,05	0,09
4563	6	18	25	2	51	330	990	1375	110	2805	137,63	2,60	1,77	1	1	1	3	0,02	0,00	0,07	0,09
4765	1	13	24	13	51	55	715	1320	715	2805	137,29	2,52	1,71	1	1	1	3	0,05	0,01	0,04	0,09
4795	0	26	25	0	51	0	1430	1375	0	2805	137,76	2,56	1,67	1	1	1	3	0,07	0,00	0,03	0,10
4824	2	21	25	3	51	110	1155	1375	165	2805	137,27	2,57	1,71	1	1	1	3	0,05	0,00	0,05	0,10
4852	5	10	24	12	51	275	550	1320	660	2805	137,67	2,55	1,77	1	1	1	3	0,03	0,00	0,07	0,10
4879	2	14	24	11	51	110	770	1320	605	2805	137,74	2,53	1,71	1	1	1	3	0,06	0,00	0,05	0,11
5625	0	14	24	13	51	0	770	1320	715	2805	137,24	2,51	1,69	1	1	1	3	0,07	0,01	0,04	0,11
5664	4	21	25	1	51	220	1155	1375	55	2805	137,74	2,58	1,74	1	1	1	3	0,06	0,00	0,06	0,11
5702	7	17	25	2	51	385	935	1375	110	2805	137,68	2,60	1,79	1	1	1	3	0,03	0,00	0,08	0,11
5739	1	22	25	3	51	55	1210	1375	165	2805	137,23	2,56	1,70	1	1	1	3	0,08	0,00	0,04	0,12
5941	6	7	24	14	51	330	385	1320	770	2805	137,31	2,55	1,79	1	1	1	3	0,04	0,00	0,09	0,13
5971	1	25	25	0	51	55	1375	1375	0	2805	137,81	2,57	1,69	1	1	1	3	0,09	0,00	0,03	0,13
6000	6	9	24	12	51	330	495	1320	660	2805	137,72	2,55	1,78	1	1	1	3	0,05	0,00	0,08	0,13
6028	7	15	25	4	51	385	825	1375	220	2805	137,29	2,60	1,80	1	1	1	3	0,05	0,00	0,09	0,14

6451	0	23	25	3	51	0	1265	1375	165	2805	137,18	2,55	1,68	1	1	1	3	0,10	0,00	0,03	0,14
6753	5	8	24	14	51	275	440	1320	770	2805	137,26	2,54	1,78	1	1	1	3	0,06	0,00	0,08	0,14
6792	3	13	24	11	51	165	715	1320	605	2805	137,78	2,54	1,73	1	1	1	3	0,08	0,00	0,05	0,14
6830	5	20	25	1	51	275	1100	1375	55	2805	137,78	2,59	1,75	1	1	1	3	0,08	0,00	0,06	0,14
7069	6	16	25	4	51	330	880	1375	220	2805	137,24	2,59	1,78	1	1	1	3	0,07	0,00	0,08	0,15
7099	4	9	24	14	51	220	495	1320	770	2805	137,22	2,53	1,76	1	1	1	3	0,08	0,00	0,07	0,15
7128	5	1	23	22	51	275	55	1265	1210	2805	137,76	2,50	1,78	1	1	1	3	0,07	0,01	0,08	0,16
7156	5	17	25	4	51	275	935	1375	220	2805	137,20	2,58	1,77	1	1	1	3	0,09	0,00	0,07	0,16
7532	2	24	25	0	51	110	1320	1375	0	2805	137,85	2,57	1,70	1	1	1	3	0,12	0,00	0,04	0,16
7834	0	17	24	10	51	0	935	1320	550	2805	137,85	2,52	1,68	1	1	1	3	0,12	0,01	0,03	0,16
7873	4	12	24	11	51	220	660	1320	605	2805	137,83	2,54	1,75	1	1	1	3	0,11	0,00	0,06	0,17
7911	3	10	24	14	51	165	550	1320	770	2805	137,17	2,53	1,74	1	1	1	3	0,11	0,01	0,06	0,17
8150	6	19	25	1	51	330	1045	1375	55	2805	137,83	2,60	1,77	1	1	1	3	0,11	0,00	0,07	0,18
8180	4	18	25	4	51	220	990	1375	220	2805	137,16	2,58	1,75	1	1	1	3	0,12	0,00	0,06	0,18
8209	6	0	23	22	51	330	0	1265	1210	2805	137,81	2,51	1,80	1	1	1	3	0,09	0,01	0,09	0,19
8237	2	11	24	14	51	110	605	1320	770	2805	137,13	2,52	1,73	1	1	1	3	0,14	0,01	0,05	0,20
9185	3	23	25	0	51	165	1265	1375	0	2805	137,89	2,58	1,72	1	1	1	3	0,15	0,00	0,05	0,20
9215	1	16	24	10	51	55	880	1320	550	2805	137,90	2,53	1,69	1	1	1	3	0,16	0,01	0,04	0,20
9244	3	19	25	4	51	165	1045	1375	220	2805	137,11	2,57	1,73	1	1	1	3	0,15	0,00	0,05	0,20

SOLUÇÕES VIÁVEIS 1543

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Tabela 22 - Verificação da melhor solução viável pelo desvio padrão do cenário III

Solução	CT_Pilha01	CT_Pilha02	CT_Pilha03	CT_Pilha04	Total de Ciclos	Massa 01	Massa 02	Massa 03	Massa 04	Total_TúnelC	Mistura - Parâmetros			VERIFICAÇÃO				DESVIO PADRÃO			
											FSC (%)	MS (%)	MA (%)	FSC (%)	MS (%)	MA (%)	Soma	DP - FSC	DP -MS	DP - MA	SOMA DPS
9	0	0	8	3	11	0	0	440	165	605	113,19	2,71	2,20	1	1	1	3	794,71	0,00	0,04	794,75
21	0	1	8	2	11	0	55	440	110	605	114,37	2,72	2,17	1	1	1	3	862,78	0,00	0,03	862,81
32	0	2	8	1	11	0	110	440	55	605	115,52	2,73	2,14	1	1	1	3	931,43	0,00	0,02	931,45
42	0	3	8	0	11	0	165	440	0	605	116,63	2,74	2,11	1	1	1	3	1000,52	0,00	0,01	1000,53
108	1	2	8	0	11	55	110	440	0	605	116,75	2,77	2,20	1	1	1	3	1008,29	0,00	0,04	1008,33
8	0	0	7	4	11	0	0	385	220	605	119,67	2,63	2,04	1	1	1	3	1202,31	0,01	0,00	1202,33

SOLUÇÕES VIÁVEIS 6

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

A escolha da mistura ideal deve considerar qual objetivo se deseja alcançar: preservar o material disponível na bancada direcionando o ROM para diferentes pilhas, priorizando o controle da qualidade, ou manter o equipamento de carregamento o máximo possível do turno de trabalho em um número mínimo de pilhas, o que reduz deslocamentos e evita perdas de tempo na movimentação do mesmo para pontos de carregamento diversos.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que os três cenários estudados apresentaram êxito quanto à extração e à composição das misturas, as misturas realizadas atenderam aos limites mínimos e máximos estabelecidos para os parâmetros de controle de qualidade, demonstrando a eficácia da metodologia adotada. Porém, houve uma limitação com relação a quantidade de material disponível nas pilhas, a massa de 1.490 toneladas é insuficiente para atender aos três cenários, visto que ocorre sua exaustão ainda no segundo cenário, conforme observado na Tabela 23.

Tabela 23 - Mistura obtida versus teores médios dos cenários

	Solução	Misturas - Parâmetros			Teores médios		
		FSC (%)	MS (%)	MA (%)	FSC (%)	MS (%)	MA (%)
Cenário I	4	177,53	2,39	1,42	177,5	2,5	1,5
Cenário II	662	137,57	2,56	1,68	137,5	2,60	1,50
Cenário III	9	113,19	2,71	2,2	85	2,75	2,00

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo aplicar o método da Enumeração Completa como ferramenta de otimização da mistura de calcário destinado à produção de cimento Portland, utilizando dados operacionais e parâmetros reais de uma mina de calcário. A metodologia adotada integrou informações referentes à capacidade dos equipamentos e critérios de controle de qualidade, representados pelos parâmetros FSC, MS e MA, possibilitando a construção de um modelo de apoio à tomada de decisão no planejamento de curto prazo.

A aplicação do modelo permitiu a simulação de três cenários distintos, correspondentes às diferentes classes de calcário (azul, laranja e marrom), evidenciando a flexibilidade da abordagem proposta. Os resultados demonstraram que o modelo foi capaz de gerar soluções viáveis para os cenários I, II e III, atendendo aos limites de qualidade estabelecidos e comprovando sua eficácia na definição das proporções ideais de mistura entre as pilhas disponíveis.

No cenário I, a solução que melhor atendeu aos limites dos parâmetros cimenteiros definidos para o Túnel A (Calcário Azul) foi a solução 4, que apresentou desvio padrão total igual a 0,01. Já no cenário II, a solução que melhor atendeu aos limites dos parâmetros cimenteiros definidos para o Túnel B (Calcário Laranja) foi a solução 662, que apresentou desvio padrão total igual a 0,04. E no cenário III, a solução que melhor atendeu aos limites dos parâmetros cimenteiros definidos para o Túnel C (Calcário Marrom) foi a solução 9, que apresentou desvio padrão total igual a 794,75. E em ambos os cenários, a quantidade de ciclos foi atendida, satisfazendo a produção diária de cada túnel.

Estes resultados destacaram-se entre as demais soluções viáveis justamente por possuir o menor valor de desvio padrão, indicando que seus parâmetros apresentam menor dispersão em relação às médias dos intervalos estabelecidos. Porém, para o cenário III, o desvio padrão mostrou-se elevado devido a qualidade das pilhas disponíveis possuírem teores altos, distanciando à mistura da média dos parâmetros. Com isso, entende-se que o método de enumeração completa leva as interações a exaustão, criando diversas possibilidades.

Foi perceptível nos cenários estudados o número expressivo de soluções viáveis geradas para o Túnel B, essa afirmação é justificada pela qualidade favorável da reserva disposta para realizar as misturas para o túnel. Tendo em vista que, é o material com maior predominância na composição da matéria-prima para fabricação do cimento.

Além disso, o software Excel mostrou-se prático e eficiente quanto a geração dos resultados, pois possibilitou executar todas as restrições impostas ao modelo, além de conseguir atender todas as combinações destinadas para cenário.

Dessa forma, o estudo demonstrou que o uso da Pesquisa Operacional, por meio do método da Enumeração Completa, contribui significativamente para a otimização da mistura de minério, promovendo decisões mais técnicas, consistentes e alinhadas às exigências do processo industrial. Além disso, a implementação do modelo em planilha eletrônica mostrou-se prática e acessível no planejamento a curto prazo, facilitando sua aplicação no ambiente operacional da mina.

Como perspectiva de continuidade, propõe-se o desenvolvimento de um aplicativo capaz de automatizar o processo de mistura de minérios por meio da técnica de enumeração completa, explorando diferentes cenários e variáveis operacionais. Essa solução tecnológica visa reduzir significativamente o tempo despendido no procedimento, aumentando a eficiência e a precisão das análises realizadas.

REFERÊNCIAS

- ALVES, José Maria do Carmo Bento. **Um sistema para o planejamento de produção e vendas de uma empresa mineradora**. 2007. (Doutorado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2664>. Acesso em: 25 mai de 2025.
- ANDRADE, J. A. G. **Determinação da influência de dois fatores na resistência do cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI)**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/27866>. Acesso em: 10 jul. 2025
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Guia básico da utilização do cimento Portland**. 7. ed. São Paulo, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6474: **Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 1984.
- BANKS, J., Carson, J. S., Nelson, B. L. & Nicol, D. M. (2005). *Discrete-Event System Simulation* (4^a ed.). Prentice-Hall.
- BARBOSA, Luciano Wallace Gonçalves.; MAPA, Sílvia Maria Santana. **Aplicações da pesquisa operacional no setor de mineração: estudo bibliométrico no período de 2006 a 2016**. Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção, v. 5, n. 8, p. 166–186, 2017. Disponível em: <https://www.studocu.com/pt-br/document/centro-universitario-de-belo-horizonte/pesquisa-operacional-aplicada/barbosa-l-w-g-e-mapa-s-m-s-2017-aplicacoes-pesquisa-operacional-em-mineracao/32756209>. Acesso em: 20 abr. 2025
- BAZERMAN, Max Hal. **Processo decisório: para cursos de administração e economia**. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2015. v. 8.
- BERTULUCCI, Michael Ferreira. **Modelagem matemática para otimização do planejamento e programação da produção em uma fundição de pequeno porte**. 2017. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba.
- CAMPOS, F. C. **Metodologia para otimização do sequenciamento de lavra de curto prazo considerando a heterogeneidade do minério de ferro**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.
- CARVALHO, Leonardo Jabour Lott. **Otimização de mistura de minérios para a composição de carga na produção de ferro ligas: O caso da Companhia Paulista de Ferro Ligas**. 2003. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003. Disponível em: http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/Orientacoes/Monografia_LeonardoJabour.pdf. Acesso em: 16 abr. 2025.
- CHARACTERIZATION of Blends for Effective Management in Mining Operations. *Minerals*, Basel: MDPI, v. 15, n. 9, art. 891, 2025.
- CBFA. **Qual a relevância da indústria cimenteira?** CBFA, 2024. Disponível em: <https://www.cbfa.com.br/qual-a-relevancia-da-industria-cimenteira-2/>. Acesso em: 14 jul. 2025.

CERTO, Samuel C. **Tomada de decisões**. Administração moderna, v. 9, p. 123–145. São Paulo: Pearson, 2005.

COSTA, J. C.; ALMEIDA, R. B.; NASCIMENTO, T. S. Thermodynamic modelling of cements clinkering process as a tool for optimising the proportioning of raw meals containing alternative materials. *Cerâmica*, São Paulo, v. 69, n. 401, p. 53-63, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/8bWkNsws4SrRkhCDZbDvhXS>. Acesso em: 24 jul. 2025.

CHIAVENATO, Idalberto. **Introdução à teoria geral da administração**. São Paulo: Makron Books, 1997.

CHIMUCO, João Paulino Júnior. **Metodologia de Planejamento de Mina para retomada das Operações de Lavra das jazidas de Kassinga Norte – Angola**. Ouro Preto 2010.

CRUZ, Angélica de Fátima. **Modelo de programação matemática para a otimização de blend de minério**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) – CEFET MG, Araxá, 2023. Disponível em: https://www.eng-minas.araxa.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/170/2024/07/TCC_Ang%C3%A9lica_de_F%C3%A1tima_Cruz_Final.pdf Acesso em: 02 mai. 2025.

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

DINIZ, Degmar Peixoto. **Influência da cristalinidade e finura da sílica na estrutura da alita**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/19280/1/DegmarPeixotoDiniz_Dissert.pdf. Acesso em: 16 mai. 2025

FARENZENA, Hélio. **Fabricação do cimento Portland: Aspectos Gerais**, Edição Cimentec, 1995.

GERSHON, M. **A linear programming approach to mine scheduling optimization**. In: APPLICATION OF COMPUTERS AND OPERATIONS RESEARCH IN THE MINERAL INDUSTRY, 17., 1982, New York. Proceedings. p. 483–493.

GOLDBARG, Elizabeth F.; GOLDBARG, Marco C. **Otimização Combinatória: Modelos e algoritmos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. **Introductory mining engineering**. 2. ed. New York: Wiley, 2002.

HARREL, Charles. R.; GHOSH, Biman K.; BOWDEN, Royce. **Simulation Using ProModel**. McGraw-Hill, 2000.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J. **Introdução à pesquisa operacional**. McGraw Hill Brasil, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Relatório Anual de atividades: junho de 2023 a junho de 2024**. IBRAM, 2024.

LACHTERMACHER, Gerson. **Pesquisa operacional na tomada de decisões: modelagem em Excel**. Elsevier, 2004.

LIMA, André Barbosa de. **O processo produtivo do cimento Portland**. 2011. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

LI, X.; YU, C.; YUAN, H. **Modeling and optimization of cement raw materials blending process based on quality indices**. *Mathematical Problems in Engineering*, New York, v. 2010, p. 1–14, 2010. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2010/392197/>. Acesso em: 24 jul. 2025.

LONGARAY, André Andrade. **Pesquisa operacional**. 2. ed. rev. e atual. Santa Maria: UFSM, CT, 2014.

MACHADO, F. B. et al. **Atlas de Rochas**. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/museudpm/rochas/sedimentares/calcarios.html>. Acesso em: 08 abr. 2025

MICROSOFT CORPORATION. **Microsoft Excel**. Versão 365. Redmond: Microsoft.

MILAGRES, Joyce Martins. **Novo paradigma para o problema de mistura de minérios**. 2019. 50 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2019. Disponível em: https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/1953/1/MONOGRRAFIA_NovoParadigmaProblem a.pdf. Acesso em: 25 mai. 2025.

MORAES, Edilaila Fernandes et al. **Um modelo de programação matemática para otimizar a composição de lotes de minério de ferro da mina caud da cvrd**. *Rem: Revista Escola de Minas, SciELO Brasil*, v. 59, n. 3, p. 299–306, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/zp6RJTStJ8B5tWTPMHW7N7N/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 12 mai. 2025.

MOREIRA, Frederico. Rafael. **Programação Linear Aplicada a Problemas da Área de Saúde**. In: CENTRO DE PESQUISA CLÍNICA DO HOSPITAL ISRAELITA ALBERT EINSTEIN - ESTATÍSTICA DO CENTRO DE PESQUISA CLÍNICA DO INSTITUTO DE ENSINO E PESQUISA, 2003, São Paulo. Anais. São Paulo, 2003. Disponível em: <https://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/6252/material/Aplica%C3%A7%C3%A3oPLnaSa%C3%BAde.pdf>. Acesso em: 04 mai. 2025.

MORITZ, G. O.; PEREIRA, M. F. **Processo decisório**. SEAD/UFSC, 2006. v. 12.

MUTMANSKY, J. M. **Computing and operations research techniques for production scheduling**. In: COMPUTER METHODS FOR THE 80'S IN THE MINERAL INDUSTRY, 1979, New York. p. 615–625.

NETO, Hyrcck Rafael da Silva. **Otimização da blendagem de calcário da Votorantim Cimentos em Xambioá-TO**. 2013. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) – Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, 2013.

PARAHYBA, R. E. **Calcário Agrícola**. Departamento Nacional de Produção Mineral, 2008.

PESSOA, L. P.; ALVES, J. M. C. B. **Sistema de otimização do balanço de massas para alimentação de alto-fornos: um estudo de caso**. *Revista Produção e Engenharia*, v. 4, n. 1, p. 355–364, 2016.

PINTO, L.R. **Curso de Pesquisa Operacional Aplicada à Mineração**. DEMIN-UFOP, Setembro, 2022.

PINTO L. R. e MERSCHMANN, L.H.C. **Planejamento Operacional da Lavra de Mina usando Modelos Matemáticos**. Esc. Minas vol.54 no.3 Ouro Preto July/Sept. 2001.

REICAL. **Os usos versáteis do calcário: um guia abrangente para aplicações em diversos setores**. Grupo Reical, [s.d.]. Disponível em: <<https://gruporeical.com.br/blog/os-usos-versateis-do-calcario-um-guia-abrangente-para-aplicacoes-em-diversos-setores/>>. Acesso em: 10 fev. 2026.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Calcário e dolomito**. In: ROCHAS & MINERAIS INDUSTRIAIS: usos e especificação. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. Parte II. Cap. 15. p. 327-350.

SHAMBLIN, J. E.; STEVENS JR., G. T. **Pesquisa Operacional: Uma abordagem básica**. São Paulo: Editora Atlas, 1989.

SILVA, Guilherme Liziero Ruggio da. **Otimização da mistura de carvões na produção de coque metalúrgico**. 2011. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2548>. Acesso em: 24 jun. 2025.

SILVA, R. T.; MARTINS, A. L. **Gestão e tomada de decisão em processos organizacionais**. São Paulo: Editora Gestão & Negócios, 2020.

TAHA, H. A. **Pesquisa operacional: uma introdução**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

TOFFOLO, Túlio Ângelo Machado. **Otimização do fluxo de produtos de uma empresa mineradora**. 2009. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/SLSS-7WMGW5/1/tulioangelomachadotoffolo.pdf>. Acesso em: 12 mai. 2025.

VIEIRA, I. M. S.; CANGUSSU, V. M. **Processo de comunicação na mineração**. LATRAM, 16 nov. 2020. Disponível em: <https://latram.ufop.br/2020/11/16/processo-de-cominuicao-na-mineracao/>. Acesso em: 23 jul. 2025.

WILLS, B. A.; FINCH, J. **Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery**. 8. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016.

WINSTON, Wayne L. **Pesquisa operacional: aplicações e algoritmos**. 4. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2004.