

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

**DAYRAN VAZZI GERALDO
RUAN FERNANDEZ**

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DA VENTILAÇÃO SUBTERRÂNEA EM MINAS EM
EXPANSÃO, PROMOVENDO EFICIÊNCIA E REDUÇÃO DE CUSTOS**

POÇOS DE CALDAS/MG

2026

**DAYRAN VAZZI GERALDO
RUAN FERNANDEZ**

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DA VENTILAÇÃO SUBTERRÂNEA EM MINAS EM
EXPANSÃO, PROMOVENDO EFICIÊNCIA E REDUÇÃO DE CUSTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado(a) como parte dos requisitos
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Minas pela Universidade
Federal de Alfenas.

Orientador: Prof. Me.Vilson Carlesso dos Reis

POÇOS DE CALDAS/MG

2026

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas Biblioteca
Campus Poços de Caldas

Geraldo, Dayran Vazzi.

Análise e Otimização da Ventilação Subterrânea em Minas em Expansão,
Promovendo Eficiência e Redução de Custos / Dayran Vazzi Geraldo, Ruan
Fernandez. - Poços de Caldas, MG, 2026.

62 f. : il. -

Orientador(a): Vilson Carlesso dos Reis.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) -
Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2026.

Bibliografia.

1. Ventilação subterrânea. 2. Mineração subterrânea. 3. Ventsim. 4.
Raise. 5. Otimização operacional. I. Fernandez, Ruan. II. Reis, Vilson Carlesso
dos, orient. III. Título.

Ficha gerada automaticamente com dados fornecidos pelo autor.

**DAYRAN VAZZI GERALDO
RUAN FERNANDEZ**

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DA VENTILAÇÃO SUBTERRÂNEA EM MINAS EM
EXPANSÃO, PROMOVENDO EFICIÊNCIA E REDUÇÃO DE CUSTOS**

O(A) Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação do(a) Trabalho de Conclusão de Curso apresentado(a) como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas pela Universidade Federal de Alfenas.

Aprovada em: 19 de junho de 2026

Prof. Me. Vilson Carlesso dos Reis
Universidade Federal de Alfenas



Documento assinado digitalmente
VILSON CARLESSO DOS REIS
Data: 24/06/2026 12:02:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Infraestrutura/Ventilação Deyvid Erverson Oliveira Silva Assinatura:

Prof. Dr. Jose Margarida da Silva
Universidade Federal de Ouro Preto

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, os mais profundos agradecimentos ao Professor Vilson Carlesso dos Reis, não apenas pelo apoio incansável durante as madrugadas, mas por sua orientação constante ao longo de toda a pesquisa, marcada pela atenção, carinho e paciência demonstrados durante todo o período de elaboração.

Agradecimento ao Engenheiro Deyvid Erverson por aceitar participar da banca de avaliação e cujas contribuições foram fundamentais para concretização deste trabalho.

Agradecimento ao Professor Dr José Margarida da Silva por aceitar participar da banca como professor convidado.

E por último, mas não menos importante, agradecimento a nossas famílias pelas horas dedicadas a nos apoiar e incentivar, mesmo quando o futuro parecia incerto e o caminho nebuloso, suas preces e esperanças atuaram como uma luz durante momentos de dúvidas, que por muitas vezes, nos motivaram a continuar, superar nossos desafios e realizar nossos sonhos.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise técnica e econômica voltada à otimização do sistema de ventilação de uma mina subterrânea de minério de ouro, visando reduzir os custos operacionais (OPEX) e os investimentos de capital (CAPEX), sem comprometer a segurança dos trabalhadores. A motivação central deste estudo foi buscar maneiras de ampliar o sistema de ventilação existente, minimizando modificações estruturais na mina. Diante desse desafio, foi proposto um estudo de caso comparativo que avaliou três alternativas estruturais de modificação: a execução de um *raise* via jumbo, a abertura de uma nova rampa de desenvolvimento e a implantação de uma galeria retilínea. A metodologia baseou-se na simulação computacional do fluxo de ar, utilizando o *software Ventsim* para modelar o comportamento ventilatório da mina sob diferentes cenários de intervenção. O estudo dimensionou a vazão necessária considerando os critérios normativos da NR-22 (2026). A simulação permitiu comparar a eficiência de cada alternativa de desenvolvimento frente às restrições geológicas e de infraestrutura existentes na mina, quantificando o custo de implantação, a extensão necessária das escavações e a capacidade de fornecimento de vazão de ar para as frentes de lavra. Os resultados obtidos demonstraram que, embora a galeria retilínea ofereça o maior desempenho ventilatório por proporcionar um fluxo menos restrito, o seu alto custo de execução e a elevada necessidade de escavação tornaram-na menos atrativa. A rampa, por sua vez, apresentou-se como uma alternativa intermediária, integrando ventilação e acesso logístico, mas ainda com custo superior aos métodos pontuais. A alternativa baseada na execução de *raise* (passagem) destacou-se como a solução mais vantajosa economicamente, apresentando menor custo de implantação e maior rapidez de execução quando comparada às demais alternativas analisadas. Conclui-se que a alternativa baseada na execução de *raise* por jumbo apresentou o melhor custo-benefício para a expansão da capacidade ventilatória da mina, direcionando vazão mínima suficiente para as frentes de trabalho. No entanto, é importante ressaltar que a implementação deste método, por ser pontual, exige ajustes complementares no projeto para garantir que a vazão total do circuito atinja os parâmetros mínimos da norma em todos os níveis. Com o apoio da simulação computacional, foi possível comprovar que, ao realizar modificações estruturais estratégicas e alinhadas ao planejamento técnico, a empresa poderá atingir a conformidade total com a NR-22, garantindo um ambiente de trabalho seguro e

produtivo com o menor impacto possível no capital disponível para o empreendimento.

Palavras-chave: ventilação subterrânea; mineração subterrânea; Ventsim; raise; otimização operacional.

ABSTRACT

This study presents a technical and economic analysis focused on optimizing the underground ventilation system of an underground gold mine, aiming to reduce operating costs (OPEX) and capital expenditures (CAPEX) without compromising worker safety. The main motivation of this study was to identify ways to expand the existing ventilation system while minimizing structural modifications to the mine. Faced with this challenge, a comparative case study was proposed to evaluate three structural modification alternatives: the construction of a raise using a jumbo drill, the opening of a new development ramp, and the implementation of a linear drift. The methodology was based on computational fluid-flow simulation using Ventsim software to model the ventilation behavior of the mine under different intervention scenarios. The study sized the required airflow according to the normative criteria of NR-22 (2026). The simulation made it possible to compare the efficiency of each opening method in relation to the geological and infrastructure constraints already present in the mine, quantifying the unit cost per meter of development and the air delivery capacity to each working face. The results showed that, although the linear drift offers the best ventilation performance because it provides a less restricted airflow path, its high construction cost and the large amount of excavation required made it less attractive. The ramp, in turn, proved to be an intermediate alternative, combining ventilation and logistical access, but still at a higher cost than point-based methods. The raise method stood out as the most economically advantageous solution, presenting the lowest cost per meter of advance and the fastest implementation time. It is concluded that the raise drilled with a jumbo was the best cost-benefit alternative for expanding the mine's ventilation capacity, ensuring sufficient minimum airflow to the working faces. However, it is important to emphasize that implementing this method, since it is a point solution, requires complementary design adjustments to ensure that the total circuit airflow meets the minimum regulatory requirements at all levels. With the support of computational simulation, it was possible to demonstrate that, by carrying out strategic structural modifications aligned with technical planning, the company can achieve full compliance with NR-22, ensuring a safe and productive working environment with the least possible impact on the capital available for the project.

Keywords: underground ventilation; underground mining; Ventsim; raise; operational optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Simulação de distribuição da pressão ao longo do cruzamento de ventilação em 60° e perda ao longo da seção.....	18
Figura 2: Simulação de distribuição da pressão ao longo do cruzamento de ventilação em 90°.....	18
Figura 3: Equipamento empregado para determinar o IBUTG.	26
Figura 4: Fluxograma das etapas metodológicas desenvolvidas.....	30
Figura 5: <i>Layout</i> da mina no <i>software</i> Ventsim.....	33
Figura 6: Diagrama de ventilação de exaustão.....	34
Figura 7: Curva de pressão do ventilador <i>Exaustor Booster</i>	34
Figura 8: Geometria da galeria da via principal.	35
Figura 9: Geometria da galeria da via secundária.....	36
Figura 10: Geometria da galeria do ventilador.....	36
Figura 11: Geometria da galeria do <i>shaft</i>	37
Figura 12: Explosivo ANFO.....	40
Figura 13: Local proposto para desenvolvimento.....	46
Figura 14: <i>Design</i> de raise proposto para ventilação.....	47
Figura 15: Comprimento da primeira seção do <i>raise</i> proposto.	48
Figura 16: Comprimento da segunda seção do <i>raise</i> proposto.	48
Figura 17: Seção do desenvolvimento em rampa proposto.	50
Figura 18: Comprimento da seção do desenvolvimento em rampa proposto.	50
Figura 19: Seção do desenvolvimento galeria proposto.	52
Figura 20: Comprimento da seção do desenvolvimento galeria proposto.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Anexo IV da NR-22 - Cálculos para Determinação da Vazão de Ar Fresco...	22
Tabela 2: Quadro do Limite de exposição ocupacional ao calor	24
Tabela 3: Produção da empresa em toneladas.....	41
Tabela 4: Potência (CV) dos equipamentos da operação.	42
Tabela 5: Comparação quantitativa e qualitativa entre os métodos.....	53

LISTA DE NOTAÇÕES, ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANFO	<i>Ammonium Nitrate Fuel Oil</i>
CAJ	Custo do Avanço por Jumbo
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CDR	Custo do Desenvolvimento por Rampa
CRJ	Custo de Raise por Jumbo
CV	Cavalo Vapor
CDGL	Custo do Desenvolvimento por Galeria Retilínea
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
FUNDACENTRO	Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e
Medicina do Trabalho	
IBUTG	Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
M	Taxa Metabólica Média
NR	Norma Regulamentadora
NRM	Normas Reguladoras de Mineração
NHO	Normas de Higiene Ocupacional
S1	Extensão da primeira seção
S2	Extensão da segunda seção
S3	Extensão da seção da rampa
S4	Extensão da seção da galeria
tbn	Temperatura de Bulbo Úmido Natural
tbs	Temperatura de Bulbo Seco
tg	Temperatura de Globo Negro
UNIFAL	Universidade Federal de Alfenas
WBGT	<i>Wet Bulb Globe Temperature</i>

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	11
1. INTRODUÇÃO	13
1.1. OBJETIVO GERAL	15
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. REVISÃO DE LITERATURA / DESENVOLVIMENTO.....	15
2.1. ASPECTOS NORMATIVOS DA NR-22 E DA NRM-6 NA MINERAÇÃO. 16	
2.1.1. NR-22 E IMPLICAÇÕES PARA O PROJETO DE VENTILAÇÃO.....	16
2.1.2. IMPACTOS NA VENTILAÇÃO EM MINAS EM EXPANSÃO	17
2.1.3. PRINCIPAIS FATORES QUE ELEVAM A RESISTÊNCIA DO AR	19
2.1.4. VENTILAÇÃO AUXILIAR COMO ALTERNATIVA DE MENOR CUSTO IMEDIATO	20
2.1.5. VAZÃO POR PESSOAS, EQUIPAMENTOS E DETONAÇÃO	21
2.1.6. CONFORTO TÉRMICO, UMIDADE, GASES E RECIRCULAÇÃO	23
2.2.1. CUSTOS DE DESENVOLVIMENTO DE MINA: RAISE CONVENCIONAL E <i>RAISE BORING</i>	27
2.2.2. COMPARAÇÃO ENTRE DESENVOLVIMENTO OU USO DE <i>RAISE</i> - CRITÉRIOS PARA A DISCUSSÃO DE CUSTOS (OBJETIVO).....	28
2.2.3. <i>SOFTWARE</i> DE VENTILAÇÃO SUBTERRÂNEA 3D	28
3. METODOLOGIA.....	29
4. ESTUDO DE CASO	32
4.1. VENTSIM E MODELO DA MINA.....	32
4.2. VENTILADORES	34
4.3. GEOMETRIA DAS GALERIAS SUBTERRÂNEAS.....	35
4.4. VARIÁVEIS PARA CÁLCULOS DA NORMA REGULAMENTADORA	37
4.4.2. QUANTIDADE DE PESSOAS	38
4.4.3. TEMPERATURA	38
4.4.4. EXPLOSIVOS.....	39
4.4.5. PRODUÇÃO (EM TONELADAS DESMONTADAS POR MÊS).....	41
5. RESULTADO E DISCUSSÃO	42
5.1. CONDIÇÕES MÍNIMAS PARA OPERAÇÃO SEGURA.....	42
5.1.1. VAZÃO DE AR.....	42
5.1.1.1. PRIMEIRO MÉTODO.....	42
5.1.1.2. SEGUNDO MÉTODO	43
5.1.1.3. TERCEIRO MÉTODO.....	44
5.1.1.4. LIMITE MÍNIMO	44
5.1.2. TEMPERATURA	45
5.2. ESTUDO COMPARATIVO DE ALTERNATIVAS DE DESENVOLVIMENTO 45	
5.2.1. CENÁRIO 1 - DESENVOLVIMENTO POR RAISE.....	46
5.2.2. CENÁRIO 2 - DESENVOLVIMENTO COM RAMPA.....	49
5.2.3. CENÁRIO 3 - DESENVOLVIMENTO COM GALERIA RETILÍNEA.....	51

5.3. COMPILAÇÃO DOS RESULTADOS	53
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
7. TRABALHOS FUTUROS	56
REFERÊNCIAS	58

1. INTRODUÇÃO

A mineração desempenha um papel fundamental no desenvolvimento da sociedade, fornecendo a base para a evolução tecnológica desde os primórdios da civilização até os dias atuais. Com o avanço tecnológico, a demanda por minerais tornou-se cada vez maior, exigindo métodos de extração capazes de atender à necessidade de produção em larga escala. Nesse contexto, no Brasil, a lavra a céu aberto destaca-se como o método mais utilizado atualmente, principalmente devido à sua elevada produtividade, maior capacidade de movimentação de material e menor custo operacional quando comparada, em muitos casos, à mineração subterrânea.

Além disso, esse método permite maior flexibilidade operacional, uma vez que os acessos ao corpo mineralizado podem ser dimensionados com maiores larguras, possibilitando a operação de equipamentos de grande porte, como caminhões fora de estrada capazes de transportar mais de 100 toneladas de minério em um único ciclo (FERREIRA, 2013). Outro aspecto relevante é a possibilidade de desenvolvimento de múltiplos acessos às frentes de lavra, reduzindo a dependência de uma única via operacional e favorecendo a mobilidade dos equipamentos e a continuidade das operações.

Entretanto, de acordo com Curi (2021), observa-se a exaustão progressiva das jazidas com alto teor aflorantes ou próximas à superfície. Nesse contexto, há uma tendência de substituição gradual das operações de lavras a céu aberto para subterrâneas por fatores econômicos, geológicos e de morfologia das jazidas. Além disso, a crescente competição pelo uso da terra, especialmente em regiões mais povoadas e desenvolvidas, pode tornar a lavra subterrânea a única alternativa tecnicamente e ambientalmente viável. Diante desse cenário, novas metodologias e tecnologias vêm sendo desenvolvidas para possibilitar a exploração de jazidas em maiores profundidades. Como consequência, o número de minas subterrâneas tem crescido no Brasil e no mundo (CURI, 2021; GHORBANI *et al.*, 2023; LOPES, 2012).

Em minerações subterrâneas, a construção dos acessos ao corpo mineral requer um planejamento rigoroso, uma vez que os investimentos iniciais normalmente são elevados. Nas primeiras etapas da vida útil da mina, grande parte dos recursos é direcionada ao desenvolvimento de acessos principais, como rampas e poços verticais (*shafts*), necessários para atingir o minério em profundidade. Além

disso, à medida que a mina avança em profundidade e extensão, a ampliação da infraestrutura subterrânea torna-se cada vez mais complexa, exigindo maior controle operacional, logístico e das condições de ventilação da mina.

Nesse sentido, em minas subterrâneas com maior quantidade de desenvolvimento, frequentemente é necessário percorrer centenas de metros até as frentes de lavra. Nesse contexto, fatores como mobilidade de equipamentos, atividades do ciclo de lavra, suporte geotécnico e estabilidade do maciço rochoso tornam-se essenciais para o funcionamento seguro da operação. Paralelamente às atividades primárias do ciclo de lavra, como perfuração, carregamento, desmonte e abatimento de choco, existem sistemas auxiliares fundamentais para a continuidade operacional, destacando-se o bombeamento de água, o fornecimento de energia elétrica e, principalmente, o sistema de ventilação, tema central deste trabalho.

Comparada à lavra a céu aberto, a mineração subterrânea apresenta custos operacionais significativamente mais elevados, principalmente devido às limitações de acesso ao minério, à menor capacidade de produção e à necessidade de manutenção contínua das estruturas subterrâneas. Além de que fatores relacionados à estabilidade do maciço rochoso, à qualidade do ar e às condições térmicas tornam indispensável o controle das condições de trabalho no ambiente subterrâneo, tornando a ventilação um dos principais elementos para a segurança e continuidade operacional da mina.

Nesse contexto, a ampliação do sistema de ventilação em minas subterrâneas representa um desafio técnico e econômico, especialmente em operações já desenvolvidas, em que a criação de novos acessos pode demandar elevados investimentos e causar impactos na infraestrutura existente. Dessa forma, torna-se necessário buscar alternativas construtivas capazes de melhorar o fluxo de ar aproveitando, ao máximo, as estruturas já implantadas na mina.

Diante desse cenário, torna-se necessária a realização de estudos comparativos que avaliem técnica e economicamente diferentes alternativas de modificação estrutural aplicadas à ventilação subterrânea, considerando fatores como custo de desenvolvimento, impacto na infraestrutura existente, disponibilidade operacional e atendimento às exigências da Norma Regulamentadora (NR-22).

Assim, este trabalho tem como objetivo analisar diferentes cenários de intervenção na estrutura de uma mina subterrânea em expansão, visando à otimização do sistema de ventilação por meio de simulações computacionais

realizadas por meio do *software* Ventsim. Busca-se avaliar alternativas operacionais e estruturais capazes de melhorar a distribuição do fluxo de ar utilizando, prioritariamente, a infraestrutura já existente na mina, considerando aspectos relacionados à segurança operacional, às condições ambientais e aos custos de implantação.

1.1. OBJETIVO GERAL

Analisar diferentes cenários de intervenção na estrutura de uma mina subterrânea em expansão, visando à otimização do sistema de ventilação por meio de simulações computacionais realizadas por meio do *software* Ventsim.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o atendimento do sistema de ventilação atual às exigências das normas aplicáveis à mineração subterrânea;
- Analisar alternativas operacionais e estruturais para melhoria da ventilação subterrânea utilizando a infraestrutura existente;
- Simular diferentes cenários de distribuição e redirecionamento do fluxo de ar na mina;
- Verificar os impactos das alterações propostas em aspectos relacionados à segurança operacional, conforto térmico e custos de implantação;
- Comparar técnica e economicamente as alternativas avaliadas.

2. REVISÃO DE LITERATURA / DESENVOLVIMENTO

A ventilação em minas subterrâneas é um dos pilares fundamentais para a segurança e eficiência operacional. À medida que ocorre a expansão da mina, novos desafios são impostos ao sistema de ventilação, como o aumento das distâncias, a elevação das perdas de carga e a maior complexidade na distribuição do fluxo de ar, problemas esses que exigem soluções que conciliam desempenho técnico, viabilidade econômica e segurança dos trabalhadores. Nesse contexto, torna-se essencial avaliar alternativas de adaptação da rede existente.

Do ponto de vista normativo, a NR-22 (2026) estabelece requisitos mínimos de ventilação para minas subterrâneas, como renovação do ar, diluição de contaminantes, controle de temperatura e monitoramento operacional, cabendo aos

engenheiros definirem a solução mais adequada a cada situação.

Este referencial bibliográfico organiza os fundamentos normativos, técnicos e econômicos para um projeto sobre ventilação em mina subterrânea em expansão, com ênfase em como manter vazão, qualidade do ar, segurança e conforto térmico nas frentes de lavra utilizando prioritariamente o desenvolvimento já existente, sem necessidade imediata de ampliação do sistema principal por *raise borer*. O referencial bibliográfico será dividido em duas partes:

1. Exigências da NR-22 para ventilação em atividades de subsolo, comportamento aerodinâmico da ventilação à medida que a mina desenvolve (se aprofunda e se alonga);
2. Critérios comparativos entre soluções baseadas em desenvolvimento e soluções com *raises* dedicados.

2.1. ASPECTOS NORMATIVOS DA NR-22 E DA NRM-6 NA MINERAÇÃO

2.1.1. NR-22 E IMPLICAÇÕES PARA O PROJETO DE VENTILAÇÃO

A NR-22 estabelece que as atividades em subsolo devem dispor de ventilação mecânica capaz de garantir suprimento de oxigênio, renovação contínua do ar contaminado por ar limpo, diluição eficaz de gases e poeiras, além de temperatura e umidade adequadas ao trabalho humano. A norma também exige operação e manutenção regular e contínua do sistema (BRASIL, 2026a; DNPM, 2015). Para cada mina devem existir projetos de ventilação com fluxograma atualizado, o que torna indispensável que qualquer solução baseada apenas em desenvolvimento seja formalizada em rede, rota de fluxo, pontos de medição e plano de contingência (BRASIL, 2026a).

A norma entra em detalhes sobre frentes em avanço, determinando que galerias de desenvolvimento superior a dez metros de avanço e obras subterrâneas sejam ventiladas por sistema de ventilação auxiliar, com o ventilador instalado e operado segundo critérios que impeçam a recirculação de ar (BRASIL, 2026a). Esse aspecto fundamenta estudos voltados à otimização de frentes distantes do circuito principal. A literatura e a própria NR-22 permitem investigar otimização por ventilação principal e auxiliar, reposicionamento de dutos, controle de vazamentos e melhoria da eficiência aerodinâmica do desenvolvimento já implantado, permitindo avaliar soluções operacionais antes da proposição de obras de maior custo no

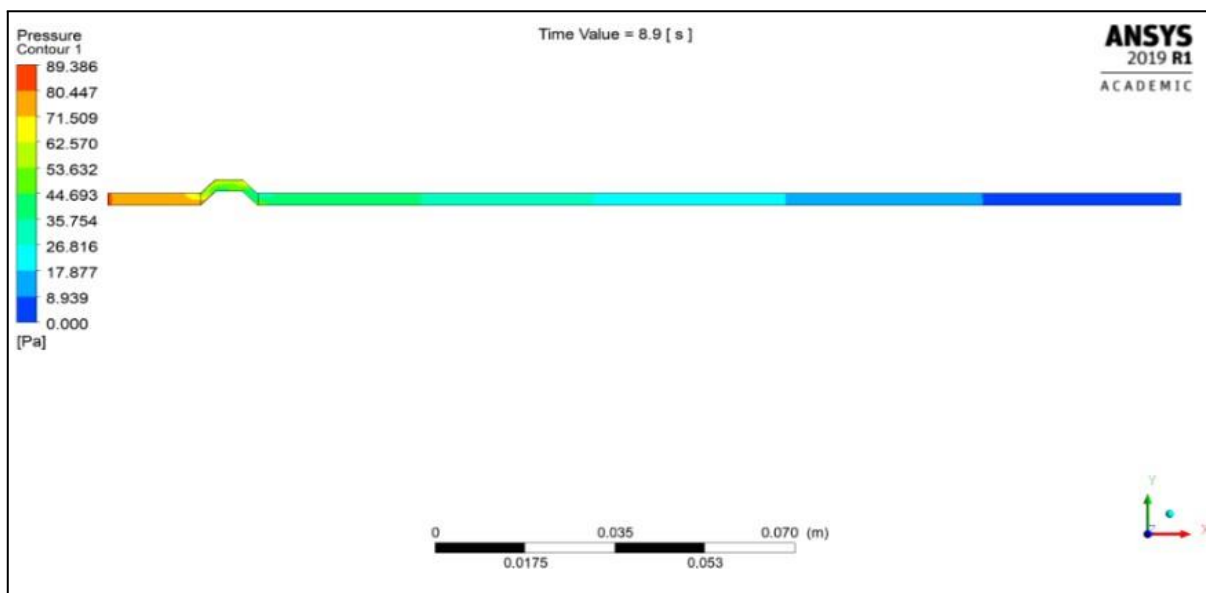
sistema principal (DE VILLIERS *et al.*, 2019).

Outro aspecto central para operação e segurança de minas subterrâneas é o monitoramento dos parâmetros de ventilação. A NR-22 prevê medições, parâmetros operacionais e limites de controle de velocidade, vazão, temperatura e outros parâmetros de controle, fornecendo uma base para estruturar uma metodologia de campo com campanhas de medição e comparação entre cenários reais e otimizados (BRASIL, 2026a; DNPM, 2015). Com base nesses parâmetros, esses fatores justificam a construção de indicadores como vazão efetiva na frente de trabalho, perda de carga por trecho, vazamento em dutos, velocidade em galerias de retorno e margem de conformidade com as exigências legais em condições normais de operação e pós-detonação de explosivos (BRASIL, 2026b).

2.1.2. IMPACTOS NA VENTILAÇÃO EM MINAS EM EXPANSÃO

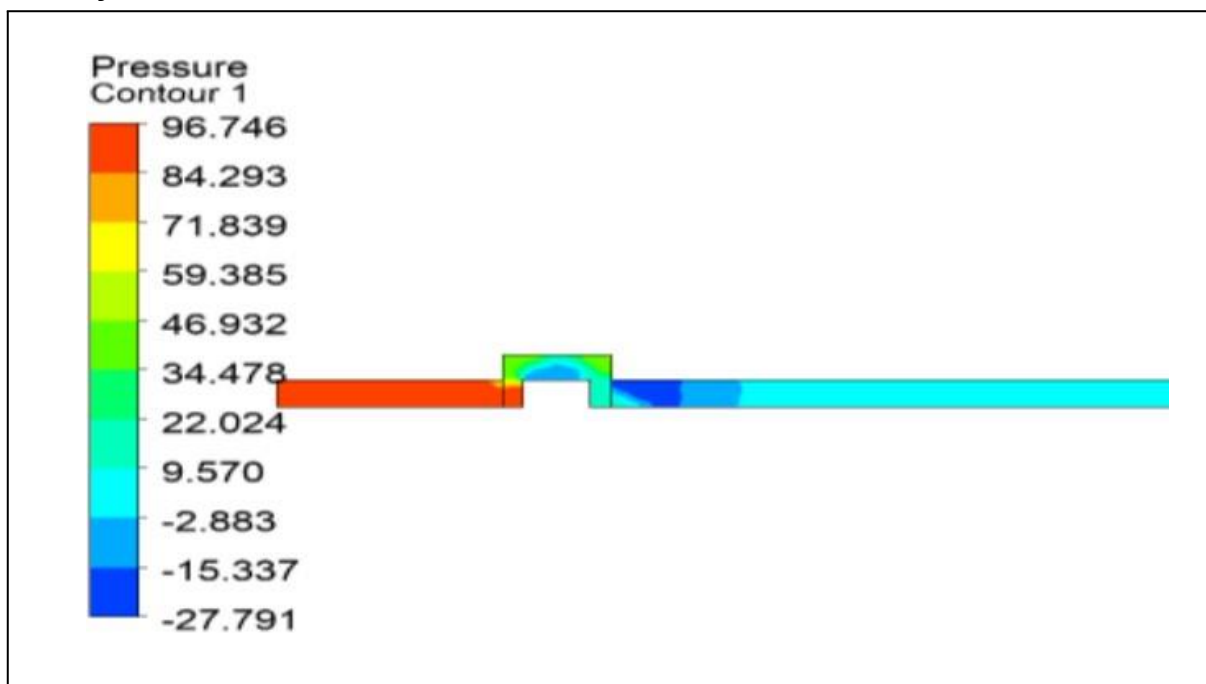
À medida que a lavra subterrânea avança, aumenta a distância entre as frentes de produção e o circuito principal de ventilação, resultando na ampliação dos percursos do ar e, por consequência, da perda de carga total. Sob a perspectiva da ventilação subterrânea, o aumento de resistência não decorre apenas do maior comprimento, mas também da crescente complexidade geométrica do *layout* da mina, ou seja, tornam-se mais frequentes interseções, curvas, derivações, conexões com frentes cegas ou fechadas, mudanças de seção e obstruções, fatores que intensificam as perdas distribuídas e localizadas, conforme ilustrado nas Figuras 1 e 2. As Figuras demonstram a perda de pressão ao longo de galerias extensas e em curvas de 60° e 90°. A análise demonstra que curvas de 90° promovem perdas localizadas de pressão significativamente superiores às de curvas de 60°, devido ao choque do fluxo contra as paredes da tubulação ou galeria, aumentando a turbulência e a dissipação de energia do sistema (SAMANTA, 2010); (SELWANA; KUNENE; TARTIBU, 2020).

Figura 1: Simulação de distribuição da pressão ao longo do cruzamento de ventilação em 60° e perda ao longo da seção.



Fonte: (SELWANA; KUNENE; TARTIBU, 2020).

Figura 2: Simulação de distribuição da pressão ao longo do cruzamento de ventilação em 90°.



Fonte: (SELWANA; KUNENE; TARTIBU, 2020).

Um estudo aplicado em minas com método de abatimento por painel mostrou que a configuração de uma via aérea pode exigir modelo específico de resistência quando há interação com aberturas laterais e escape do ar, evidenciando que

geometrias não lineares ou conectadas se comportam de modo diferente das galerias retilíneas típicas. Embora o contexto de abatimento por painéis não seja idêntico ao de uma frente de desenvolvimento convencional, o estudo demonstra que a simples soma de comprimentos não descreve adequadamente o comportamento da ventilação quando há perdas laterais, recirculação de ar e conexão com escavações adjacentes (AJAYI *et al.*, 2019). Portanto, torna-se necessário identificar onde a resistência adicional está sendo criada e onde o ar está sendo perdido. Em muitos casos, a recuperação de vazão passa mais por racionalização da rede existente do que por abertura imediata de um novo circuito vertical (FILHO, 2021).

2.1.3. PRINCIPAIS FATORES QUE ELEVAM A RESISTÊNCIA DO AR

A bibliografia sobre resistência aerodinâmica em poços e vias de ar demonstra que elementos estruturais e saliências aumentam significativamente a perda de carga, enquanto seu arredondamento e racionalização reduzem a resistência ao escoamento. Esse comportamento também pode ser observado em galerias subterrâneas, quanto maior a interferência geométrica no fluxo, maior a tendência de formação de separação, vórtices e dissipação de energia, reduzindo a vazão efetiva entregue à frente de trabalho. Os fatores que mais prejudicam a ventilação podem ser organizados em dois grupos. O primeiro reúne as perdas por atrito ao longo das galerias e dutos, fortemente influenciadas por comprimento, perímetro molhado, rugosidade, presença de suporte, irregularidades de perfil e condição superficial das paredes. O segundo grupo reúne as chamadas perdas por choque ou perdas localizadas, associadas a mudanças bruscas de direção ou área, bifurcações, junções, curvas fechadas, entradas e saídas abruptas, portas mal posicionadas, obstruções e equipamentos instalados na seção de passagem (CRUZ, 2022).

Estudos sobre perdas de choque em cruzamentos e mudanças bruscas de direção indicam que o aumento do ângulo, como curvas em 90°, merecem atenção especial pois agravam a perda de energia e que geometrias mais suaves tendem a reduzir essas perdas. A análise do impacto de geometrias com ângulos fechados abre a possibilidade de implementação de medidas de baixo custo relacionadas ao desenvolvimento, como preferência por galerias mais lineares, alargamentos

localizados, nichos para acomodação de equipamentos, retirada de obstruções, melhor alinhamento de dutos e racionalização de junções em vez de depender de desenvolvimento de infraestrutura nova. Complementarmente às curvas, mudanças de seção e estrangulamentos possuem papel relevante na resistência do ar. Sempre que o ar sofre contração ou expansão brusca, parte da energia de pressão é dissipada em turbulência (SELWANA; KUNENE; TARTIBU, 2020). Esse mecanismo é particularmente crítico em cruzamentos, cruzamento de ar (air crossings), passagens parcialmente bloqueadas e pontos com equipamentos estacionados. Desta maneira, um estudo completo deve tratar a resistência total não apenas como função do comprimento, mas como resultado combinado de rugosidade das paredes da mina, geometria, do uso operacional e da qualidade de manutenção da rede ventilação.

Cabe destacar que parte dessas interferências geométricas não pode ser completamente eliminada, uma vez que está associada a condições operacionais, ao tipo de minério e às condições geotécnicas do maciço rochoso, que influenciam diretamente o dimensionamento, a orientação e a estabilidade das escavações. Dessa forma, o desafio não consiste apenas em remover essas discontinuidades, mas em controlá-las e mitigá-las de forma eficiente dentro do sistema de ventilação.

2.1.4. VENTILAÇÃO AUXILIAR COMO ALTERNATIVA DE MENOR CUSTO IMEDIATO

Estudos sobre práticas de ventiladores auxiliares em minas subterrâneas mostram que o desempenho local depende da interação entre ventilador, vazamento em dutos, distância até a frente de lavra, condição de sucção/insuflação e integração com a rede principal (DANG, 2023). A simples instalação de ventilador auxiliar não garante atendimento adequado se houver vazamento excessivo, duto subdimensionado, grandes extensões de galeria sem reforço da ventilação ou má posição relativa do duto em relação à frente (DANG, 2023). O ganho de vazão efetiva resulta da combinação entre seleção adequada de ventiladores principais e auxiliares, controle das perdas de fluxo no duto, comprimento máximo economicamente aceitável e arranjo operacional que minimize recirculação de ar contaminado e “curto-circuito” entre diferentes fluxos de ar (DANG, 2023).

Do ponto de vista econômico, essa abordagem é coerente e tecnicamente mais viável. Ao utilizar a infraestrutura de desenvolvimento já existente, a mina pode

priorizar medidas como extensão planejada de dutos, reforço de vedação, instalação de ventiladores auxiliares de reforço (boosters) em pontos estratégicos, revisão de portas e tapumes, segregação mais eficiente entre ar fresco e ar viciado e correção de estrangulamentos locais, postergando investimentos de capital intensivo no sistema principal (LEE, 2017).

2.1.5. VAZÃO POR PESSOAS, EQUIPAMENTOS E DETONAÇÃO

A NR-22 fundamenta a exigência de que a ventilação deve garantir ar suficiente para trabalhadores, promover diluição eficaz dos contaminantes presentes no ar e prover condições térmicas adequadas para a saúde e segurança dos trabalhadores. Essa verificação é normalmente realizada por meio de cálculos de demanda de ventilação que levam em consideração o número de pessoas trabalhando dentro da mina, a potência e emissão dos equipamentos em operação, gases de detonação dos explosivos nas frentes de trabalho e conforto térmico eficiente nas partes mais distantes e profundas da mina (BRASIL, 2026a).

Ainda que o documento normativo seja regulatório, a bibliografia técnica de ventilação mostra que o atendimento seguro depende da condição mais crítica do ciclo operacional, não da média operacional do turno. Em minas mecanizadas, por exemplo, a carga térmica e os gases de combustão dos equipamentos podem alterar a vazão mínima em certos trechos, enquanto a vazão após desmontes exige uma estratégia temporária específica de ventilação auxiliar e restrição de reentrada de equipamentos e trabalhadores (GANCEV; TRIBESS, 2006).

De acordo com a Tabela 1, disponível no Anexo IV da NR-22, devem ser utilizadas as fórmulas abaixo para calcular a vazão de ar fresco em função do número de pessoas, consumo de explosivos e da tonelagem mensal detonada. O parâmetro adotado deve corresponder ao maior resultado obtido entre todos os cálculos (BRASIL, 2026a).

Tabela 1: Anexo IV da NR-22 - Cálculos para Determinação da Vazão de Ar Fresco.

ANEXO IV da NR-22		
Quadro I: Determinação da Vazão de Ar Fresco (Completo)		
Método	Fórmula	Variáveis e Definições Completas
a) Cálculo da vazão de ar fresco em função do número máximo de pessoas e máquinas com motores a combustão a óleo diesel	$QT = (Q1 \times n1) + (Q2 \times n2)$	QT = vazão total de ar fresco em m³/min
		Q1 = quantidade de ar por pessoa em m³/min (em minas de carvão = 6,0 m³/min; em outras minas = 2,0 m³/min)
		n1 = número de pessoas no turno de trabalho
		Q2 = 2,65 m³/min/cv (cavalo vapor) dos motores a óleo diesel
		n2 = número total de cavalo-vapor dos motores a óleo diesel em operação
b) Cálculo da vazão de ar fresco em função do consumo de explosivos	$QT = 0,5 \times A \times V / t$	QT = vazão total de ar fresco em m³/min
		A = quantidade total em quilogramas de explosivos empregados por desmonte
		V = volume gasoso gerado por quilo de explosivo em m³/kg
		t = tempo de aeração (reentrada) da frente em minutos
c) Cálculo da vazão de ar fresco em função da tonelagem mensal desmontada	$QT = q \times T$	QT = vazão total de ar fresco em m³/min
		q = vazão de ar em m³/min para 1.000 toneladas desmontadas por mês (mínimo de 190 m³/min/1.000 toneladas/mês)
		T = produção em toneladas desmontadas por mês

Fonte: (BRASIL, 2026a).

O referencial bibliográfico deve seguir a metodologia comparativa entre cenários de vazão de ar previstos pela NR-22. O modelo adequado, portanto, seria calcular separadamente a vazão requerida, considerando a ocupação da frente de trabalho por trabalhadores, a frota e equipamentos operando simultaneamente e a diluição do ar contaminado após o desmonte, adotando como limite mínimo o maior valor entre eles, sendo posteriormente comparado à vazão efetivamente entregue, considerando as perdas de ventilação associadas a cada cenário analisado (BRASIL, 2026a).

É importante que essa definição não se restrinja apenas ao atendimento de critérios normativos, sendo essencial que o profissional responsável considere as condições operacionais mais desfavoráveis e as características das atividades desempenhadas. Dessa forma, o dimensionamento reflete não apenas a conformidade com as normas, mas também uma abordagem de engenharia voltada à segurança, ao conforto e à eficiência das operações.

2.1.6. CONFORTO TÉRMICO, UMIDADE, GASES E RECIRCULAÇÃO

A expansão da mina afeta não apenas a quantidade de ar disponível, mas também sua qualidade térmica e química. A NR-22 exige parâmetros adequados de temperatura, umidade e controle de gases, o que torna insuficiente avaliar somente velocidade ou vazão em termos absolutos. À medida que a frente se afasta do circuito principal, o aumento do tempo de percurso, o calor gerado pelos equipamentos diesel, o gradiente geotérmico, o uso de explosivos e possíveis recirculações elevam a probabilidade de ambientes desconfortáveis e com capacidade insuficiente de diluição de contaminantes (VIEIRA; COSTA, 2026).

A NR-22 exige que o sistema de ventilação de minas subterrâneas garanta temperatura e umidade adequadas ao trabalho humano. Complementarmente, a NR-15 especifica que atividades realizadas em ambientes fechados ou em casos em que o Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo (IBUTG) medido ultrapassar os limites de exposição ocupacional estabelecidos serão considerados insalubres, com base no valor de IBUTG apresentado na Tabela 2 e determinado a partir da Taxa Metabólica Média (M) das atividades realizadas pelo trabalhador (BRASIL, 2025). Esse é um limite horário e, portanto, deve ser respeitado em qualquer período de 60 minutos corridos ao longo da jornada de trabalho (FUNDACENTRO, 2025).

Tabela 2: Quadro do Limite de exposição ocupacional ao calor.

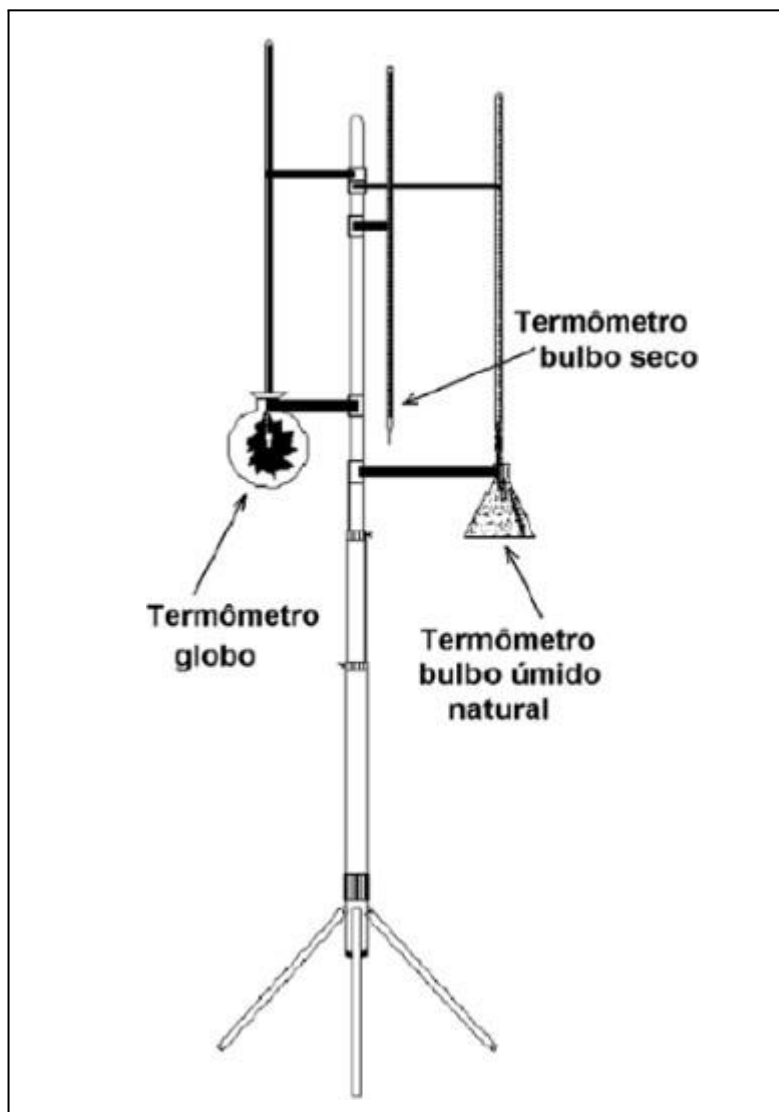
M [W]	IBUTGmáx [°C]	M [W]	IBUTGmáx [°C]	M [W]	IBUTGmáx [°C]
100	33,7	186	30,6	346	27,5
102	33,6	189	30,5	353	27,4
104	33,5	193	30,4	360	27,3
106	33,4	197	30,3	367	27,2
108	33,3	201	30,2	374	27,1
110	33,2	205	30,1	382	27,0
112	33,1	209	30,0	390	26,9
115	33,0	214	29,9	398	26,8
117	32,9	218	29,8	406	26,7
119	32,8	222	29,7	414	26,6
122	32,7	227	29,6	422	26,5
124	32,6	231	29,5	431	26,4
127	32,5	236	29,4	440	26,3
129	32,4	241	29,3	448	26,2
132	32,3	246	29,2	458	26,1
135	32,2	251	29,1	467	26,0
137	32,1	256	29,0	476	25,9
140	32,0	261	28,9	486	25,8
143	31,9	266	28,8	496	25,7
146	31,8	272	28,7	506	25,6
149	31,7	277	28,6	516	25,5
152	31,6	283	28,5	526	25,4
155	31,5	289	28,4	537	25,3
158	31,4	294	28,3	548	25,2
161	31,3	300	28,2	559	25,1
165	31,2	306	28,1	570	25,0

M [W]	IBUTGmáx [°C]	M [W]	IBUTGmáx [°C]	M [W]	IBUTGmáx [°C]
168	31,1	313	28,0	582	24,9
171	31,0	319	27,9	594	24,8
175	30,9	325	27,8	606	24,7
178	30,8	332	27,7		
182	30,7	339	27,6		

Fonte: (BRASIL, 2025).

Para efeitos de cálculo, utiliza-se o IBUTG, um método de avaliação quantitativa do calor, baseado na metodologia e procedimentos descritos na Norma de Higiene Ocupacional 6 (NHO-6) da FUNDACENTRO, adaptado da norma internacional ISO 7243:2017 - *"Ergonomics of the thermal environment - Assessment of heat stress using the WBGT index"*. A avaliação da exposição ao calor é feita por meio da análise da exposição de cada trabalhador, abrangendo todo o ciclo de exposição (BRASIL, 2025). Esta avaliação é realizada com o uso do equipamento apresentado na Figura 3.

Figura 3: Equipamento empregado para determinar o IBUTG.



Fonte: (SOARES, 2013).

Em relação à umidade, o Anexo 10 da NR-15 determina que atividades executadas em locais alagados ou encharcados, com umidade excessiva, capazes de produzir danos à saúde dos trabalhadores, serão consideradas insalubres em decorrência de laudo de inspeção realizado no local de trabalho (BRASIL, 2025). Destaca-se que esta norma não define um limite numérico para umidade relativa. A umidade segue, portanto, uma análise qualitativa das condições locais de trabalho.

A recirculação é especialmente crítica em redes complexas e em frentes mal isoladas do retorno. Estudos de modelagem de resistência e de ventilação local mostram que conexões laterais, perdas para cavidades, arranjos inadequados de dutos e interação deficiente com a ventilação principal podem alterar o padrão de

fluxo e reduzir a eficiência do ar novo exatamente nos pontos críticos. Isso reforça a importância de mapear portas, tapumes, travessias e conexões entre galerias para identificar caminhos preferenciais que estejam desviando vazão da frente ativa (CANDIA, 2020; KOHMANN; AYRES DA SILVA, 2022).

2.2.1. CUSTOS DE DESENVOLVIMENTO DE MINA: *RAISE* CONVENCIONAL E *RAISE BORING*

A comparação entre solução baseada em desenvolvimento e abertura por *raise borer* não deve ser tratada de forma absoluta, porém, deve ser condicionada ao contexto geotécnico, ao comprimento, ao diâmetro requerido e ao estágio do empreendimento. O uso de *raise borer* pode apresentar maior rapidez, segurança e viabilidade econômica, especialmente quando há acesso existente e o maciço permite escavação de grande diâmetro sem suporte simultâneo (MOURA, 2024).

Para poços longos e de grande diâmetro, a literatura destaca que condições geotécnicas desfavoráveis podem inviabilizar ou elevar significativamente os custos da escavação por *raise borer* em função do aumento do risco de instabilidade, da necessidade de adoção de diâmetros mais conservadores, da possibilidade de atrasos operacionais, do eventual abandono do eixo e da limitação na execução de suporte concorrente em certos casos. Portanto, não é tecnicamente adequado afirmar, de forma generalizada, que *raise borer* é sempre mais caro ou sempre mais barato que desenvolvimento. A literatura indica que a atratividade econômica do *raise borer* está fortemente condicionada às características do maciço rochoso, do comprimento, do diâmetro do eixo e do risco de falha (COSTA, 2015; DE SOUZA, 2015; MOURA, 2024).

Buscando reduções de custo apenas com desenvolvimento, a comparação pode ser formulada com base na análise do curto prazo operacional, adaptando a ventilação com base no desenvolvimento existente tende a demandar menor capital imediato do que abrir um novo *raise* dedicado, porque utiliza infraestrutura já escavada e concentra investimentos em ventilação auxiliar, controle de perdas e pequenas adequações geométricas. Em contrapartida, caso o avanço da mina ultrapasse o limite econômico da solução, um novo *raise* ou poço de ventilação (*shaft*) de ventilação pode se tornar mais vantajoso, especialmente se a resistência acumulada e o custo energético necessário para manter a vazão aumentar (FILHO, 2021).

2.2.2. COMPARAÇÃO ENTRE DESENVOLVIMENTO OU USO DE *RAISE* - CRITÉRIOS PARA A DISCUSSÃO DE CUSTOS (OBJETIVO)

A discussão de custo deve distinguir custos de capital, operacionais e riscos associados. Soluções por desenvolvimento normalmente apresentam menor capital incremental inicial, pois dependem de otimização da rede existente, instalação de dutos, ventiladores auxiliares, tapumes, portas e eventuais melhorias geométricas localizadas. Já soluções por *raise borer* envolvem mobilização especializada, perfuração piloto, condições geotécnicas adequadas e exposição a riscos de execução que podem alterar significativamente o custo final. Entretanto, a ventilação por desenvolvimento pode elevar o custo operacional se o caminho do ar ficar longo, ineficiente e energeticamente desfavorável por perdas de carga elevadas. Estudos sobre eficiência energética de conjuntos de ventiladores mostram que perdas associadas a curvas, mudanças bruscas de seção e componentes mal resolvidos impactam diretamente a potência exigida e no custo de ventilação (SELWANA; KUNENE; TARTIBU, 2020).

Além dos aspectos econômicos, a utilização de desenvolvimentos já escavados deve ser analisada sob a função exercida no sistema de ventilação e suas implicações operacionais. Ao serem incorporados ao sistema como vias de ventilação, especialmente como caminhos de exaustão, esses acessos também podem desempenhar outras funções operacionais, como rotas de fuga, conforme requisitos de segurança. Dessa forma, a decisão entre aproveitar aberturas existentes ou executar *raises* específicos não deve se limitar à redução de custos, mas considerar também os impactos no planejamento da mina, na segurança das equipes e na flexibilidade operacional do sistema de ventilação (MOURA, 2024).

2.2.3. SOFTWARE DE VENTILAÇÃO SUBTERRÂNEA 3D

A utilização de *softwares* como o Ventsim se apresenta como uma alternativa aos métodos analíticos tradicionais ao fornecer resultados mais robustos e de forma mais rápida para o planejamento de minas. Enquanto métodos analíticos oferecem apenas estimativas de resistência, o Ventsim permite a modelagem detalhada de todos os elementos relevantes do sistema, verificando a capacidade do ventilador principal de atender à demanda real de fluxo de ar com maior precisão (CARDOSO, 2014; COSTA; SILVA, 2025; SANTOS; SILVA, 2025).

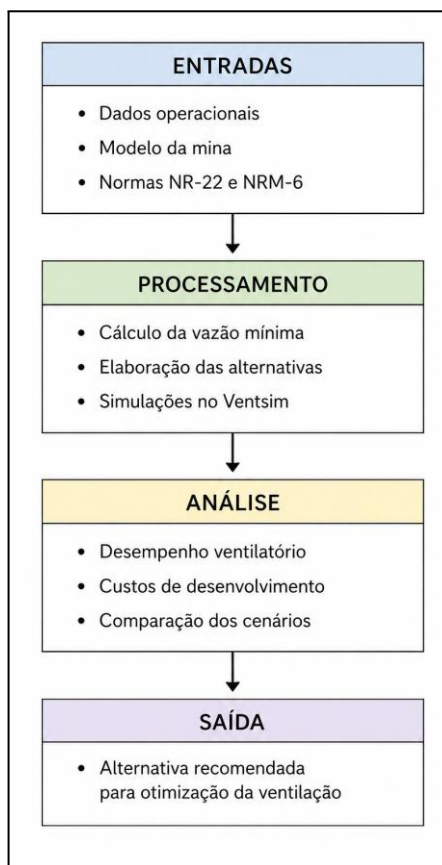
Uma das principais vantagens desta ferramenta é a facilidade em simular diversos cenários durante a vida útil da mina, permitindo a antecipação de problemas em cenários operacionais complexos. Essa capacidade de modelagem em 3D possibilita que engenheiros testem diferentes configurações de ventilação sem a necessidade de intervenções físicas, garantindo que as mudanças no *layout* planejado sejam otimizadas antes de serem implementadas no subsolo. Além da eficiência operacional, o *Ventsim* permite apoio à verificação, com base nas simulações, a conformidade das condições de subsuperfície com as normas de segurança e saúde ocupacional. Ao estimar as vazões nas galerias e frentes de lavra, a ferramenta possibilita avaliar a qualidade do ar e o conforto térmico que garantem a integridade dos trabalhadores durante a operação (*“VENTSIM”*, 2026).

3. METODOLOGIA

Este trabalho foi fundamentado em uma abordagem quantitativa e qualitativa, baseada em revisão da literatura técnica, análise de dados operacionais, simulações computacionais e estudo de caso aplicado a uma mina subterrânea de ouro. A metodologia integrou informações operacionais, exigências normativas e análises de engenharia, permitindo avaliar o comportamento da ventilação subterrânea frente ao avanço da lavra e propor alternativas tecnicamente viáveis para otimização do fluxo de ar e melhoria das condições operacionais da mina.

As etapas metodológicas desenvolvidas ao longo deste estudo são apresentadas de forma resumida no fluxograma da Figura 4.

Figura 4: Fluxograma das etapas metodológicas desenvolvidas.



Fonte: Autores (2026).

O modelo de ventilação utilizado neste estudo foi cedido pela equipe de engenharia de ventilação de uma mina subterrânea de ouro, servindo como base para todas as análises desenvolvidas ao longo do projeto.

Inicialmente, o modelo foi estudado, com o objetivo de compreender sua organização estrutural, sentidos e direções de avanço da lavra e a dinâmica e o comportamento do ar dentro das galerias da mina. Este modelo foi analisado no *software* de simulação e modelagem em 3D para sistemas de ventilação subterrânea *Ventsim*, representando a condição atual da mina, possibilitando a avaliação do comportamento da ventilação em decorrência do *layout* da mina. Para definir os limites mínimos para operacionalização da mina, foram consultadas a NR-22 e a Norma Regulamentadora da Mineração 6 (DNPM, 2015). Desse modo, foi possível comparar os dados da operação, as exigências legais e os resultados da simulação, buscando propor soluções tecnicamente e economicamente viáveis, resultando na otimização da ventilação.

A primeira etapa da metodologia consistiu na coleta, compilação e tratamento

dos dados que foram inseridos nos cálculos de vazão mínima de ar. Os dados essenciais para a compilação englobam umidade, temperatura, número de trabalhadores, frota de equipamentos utilizados no desenvolvimento e na lavra, quantidade de explosivos, avanço dos desenvolvimentos e teor de oxigênio.

Na segunda etapa foram elaboradas e simuladas três alternativas de modificação da infraestrutura da mina, voltadas à propor soluções que proporcionassem aumento da passagem de ar pelas frentes de lavra e remoção do ar contaminado no menor custo possível. As três soluções propostas foram a abertura de *raise* executado por jumbo, desenvolvimento por rampa e desenvolvimento por galeria retilínea, sempre levando em consideração a conexão entre a via principal e ar de adução e a via secundária, na qual se encontram as frentes de lavra com ar viciado. Para maximizar o fluxo de ar em cada cenário, foi empregado o uso de bloqueios de vias, evitando recirculação e forçando o ar até as áreas de interesse.

Na terceira etapa, foi realizado o cálculo da vazão mínima de ar com base nos três métodos de cálculo disponibilizados no anexo IV da NR-22, com os dados obtidos durante a primeira etapa da metodologia. Para cada método, foi calculado o valor da vazão e a vazão adotada para o modelo foi aquela em que a vazão resultante foi superior às vazões obtidas nos demais métodos de cálculo.

Na quarta etapa, foi realizada a avaliação técnica e econômica das três alternativas. Para o desenvolvimento do *raise*, foram estimados o custo por metro da proposta multiplicado pelo comprimento perfurado e o efeito esperado sobre a comunicação entre níveis. Para a alternativa desenvolvimento por rampa, foram avaliados o desenvolvimento horizontal e vertical equivalente, inclinação adotada, extensão total e custo por metro de avanço. Para a galeria retilínea, foram considerados a extensão total escavada, a seção necessária e a inclinação. Em todos os casos, foram comparados custo total estimado, distância de desenvolvimento, gradiente, inclinação, vantagens, desvantagens e vazão total de ar resultante após a modificação.

Por último, foram compilados os resultados dos métodos em uma tabela comparativa, descrevendo suas vantagens e desvantagens. A solução recomendada foi aquela que apresentou melhor equilíbrio entre a melhoria efetiva da circulação de ar, menor custo de implantação e maior aproveitamento da infraestrutura existente.

4. ESTUDO DE CASO

Este trabalho caracterizou-se como um estudo de caso aplicado a uma mina subterrânea de ouro que busca ampliar sua capacidade de ventilação em função do avanço das operações de lavra. A necessidade de expansão do sistema ventilatório surgiu da demanda por melhoria das condições de circulação de ar, garantindo o atendimento aos requisitos normativos e a manutenção de condições adequadas de segurança para os trabalhadores. Nesse contexto, buscou-se identificar soluções que proporcionem aumento da capacidade de ventilação com o menor custo de implantação e o menor impacto possível sobre a infraestrutura e a produção da mina.

Para isso, foram desenvolvidas e avaliadas três alternativas de modificação da infraestrutura subterrânea: a execução de *raise* por perfuração com jumbo e desmonte por explosivo, o desenvolvimento por rampa e o desenvolvimento por galeria retilíneo. As alternativas foram analisadas sob os aspectos técnicos e econômicos, permitindo comparar seus efeitos sobre a circulação de ar, os custos de implantação e a interação com a estrutura operacional existente.

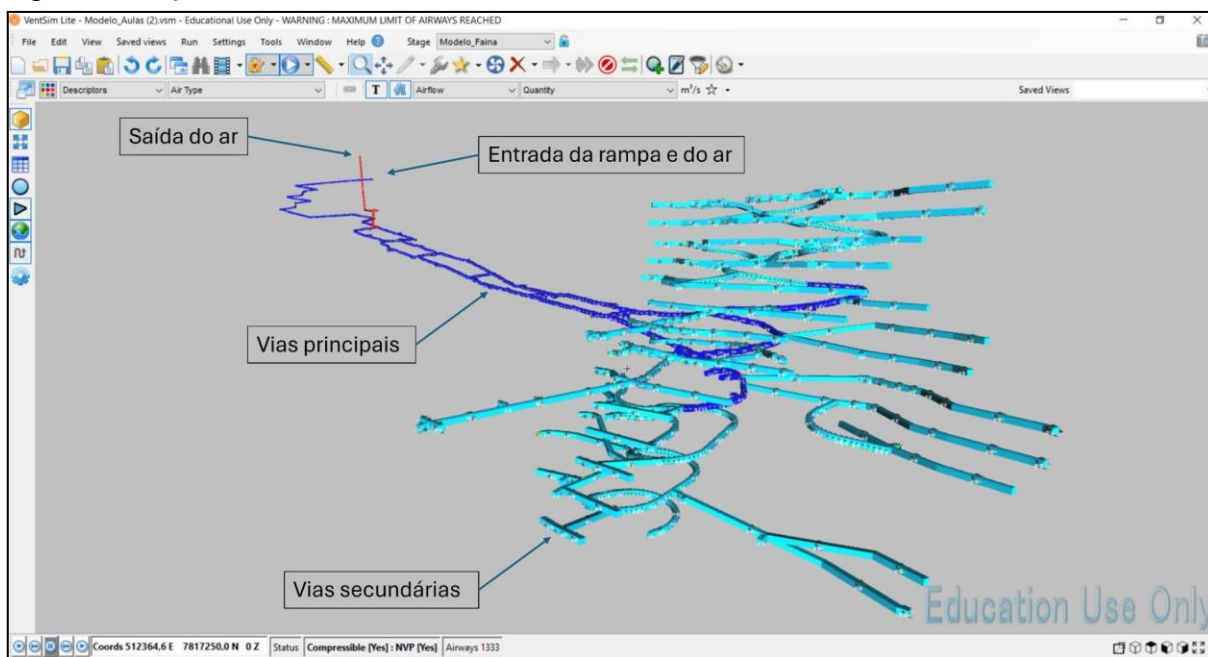
A análise foi realizada a partir de dados operacionais fornecidos pela empresa, incluindo o modelo de ventilação utilizado na operação. Com o auxílio do *software* Ventsim, foram simuladas as condições atuais da mina e os cenários propostos para cada alternativa de desenvolvimento. Dessa forma, o estudo não se limitou ao diagnóstico das condições ventilatórias existentes, mas buscou propor soluções tecnicamente fundamentadas e economicamente viáveis para a otimização do sistema de ventilação, considerando as exigências da NR-22, da NRM-6 e as particularidades operacionais da mina analisada.

4.1. VENTSIM E MODELO DA MINA

Após o envio dos dados, foi realizada uma etapa de treinamento e adaptação ao modelo, visando sua adequação às limitações operacionais do *software* utilizado. As análises e simulações foram conduzidas por meio do *Ventsim Lite*, ferramenta utilizada para fins educacionais de modelagem e simulação de sistemas de ventilação em mineração subterrânea. No entanto, essa versão do *software* possui restrições técnicas, destacando-se o limite máximo de 349 vias de ar (*airways*) por modelo, o que limitou a simulação da ventilação subterrânea da mina, visto que o modelo fornecido possuía mais de 1300 *airways*. O modelo original da mina pode

ser verificado na Figura 5, demonstrando os locais de entrada e saída do ar.

Figura 5: *Layout da mina no software Ventsim.*



Fonte: Autores (2026).

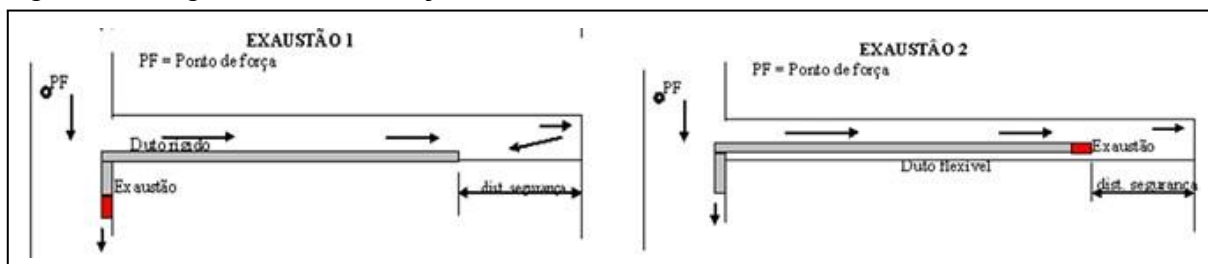
Diante desta limitação, tornou-se necessária a simplificação do modelo, que excedia o limite máximo de *airways* por simulação. Essa simplificação foi conduzida buscando preservar as características mais relevantes do sistema de ventilação da mina. Foram priorizadas as principais vias de ar e conexões consideradas essenciais para a representação adequada do fluxo de ar do modelo completo. Trechos julgados como menos importantes foram removidos, reduzindo a complexidade do modelo sem comprometer sua representatividade.

Concluída a etapa de modificação do modelo, foram realizadas simulações de ventilação para os cenários propostos, contemplando a alternativa com execução de *raise*, o desenvolvimento por rampa e o desenvolvimento por galeria retilínea. Em cada cenário foram avaliados o sentido e a direção do fluxo de ar, a distribuição da vazão, os pontos de perda de carga e o comportamento geral do sistema de ventilação. Os resultados obtidos permitiram comparar o desempenho ventilatório de cada alternativa e identificar suas contribuições para a melhoria das condições operacionais da mina.

4.2. VENTILADORES

Por meio da análise do modelo, o ventilador primário é responsável por remover o ar viciado no interior da mina para o exterior por meio de um poço de ventilação (*shaft*) por ventilação exaustora, resultando na entrada de ar fresco pela entrada da mina (acesso por rampa). A troca de ar ocorre devido a uma pressão negativa no seu interior em relação ao ar exterior conforme exemplificado na Figura 6 (CRUZ, 2022).

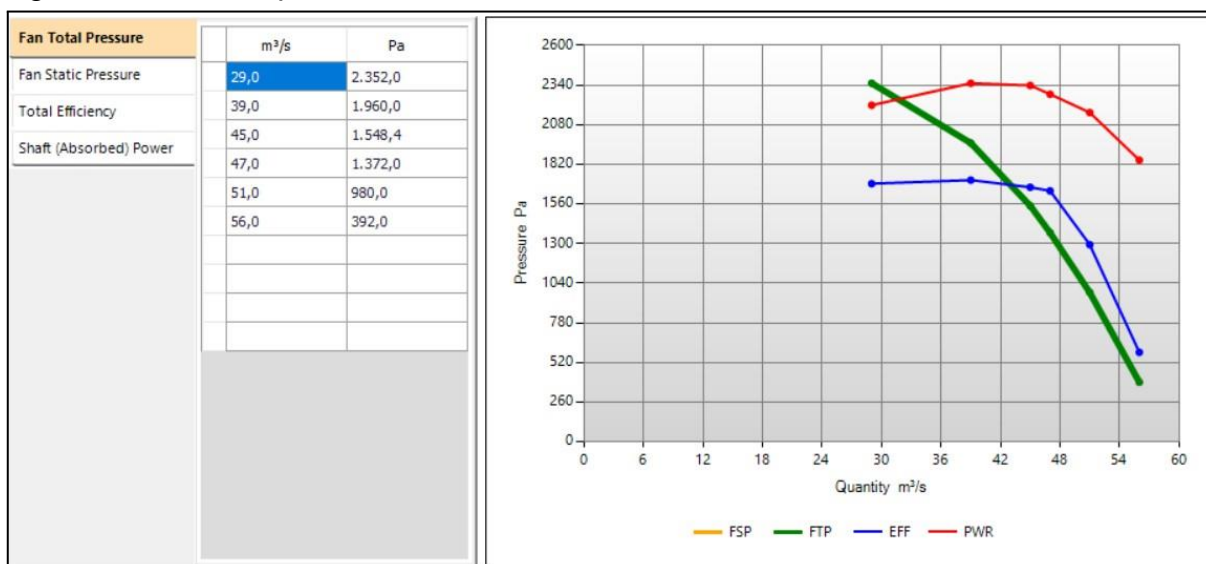
Figura 6: Diagrama de ventilação de exaustão.



Fonte: (CRUZ, 2022).

O ventilador presente na mina é denominado Exaustor *Booster*, com potência de 150 cavalo-vapor (CV). A Figura 7 apresenta as características do ventilador como curva de pressão, eficiência total e potência absorvida pelo *shaft*. Dentro da mina subterrânea, circula um total de 56,8 m³/s (3.408 m³/min) de ar, com ventilador de pá única, contendo 21% de O₂, com IBUTG de 24,2 °C, valores dentro dos limites estabelecidos pela norma regulamentadora.

Figura 7: Curva de pressão do ventilador Exaustor *Booster*.

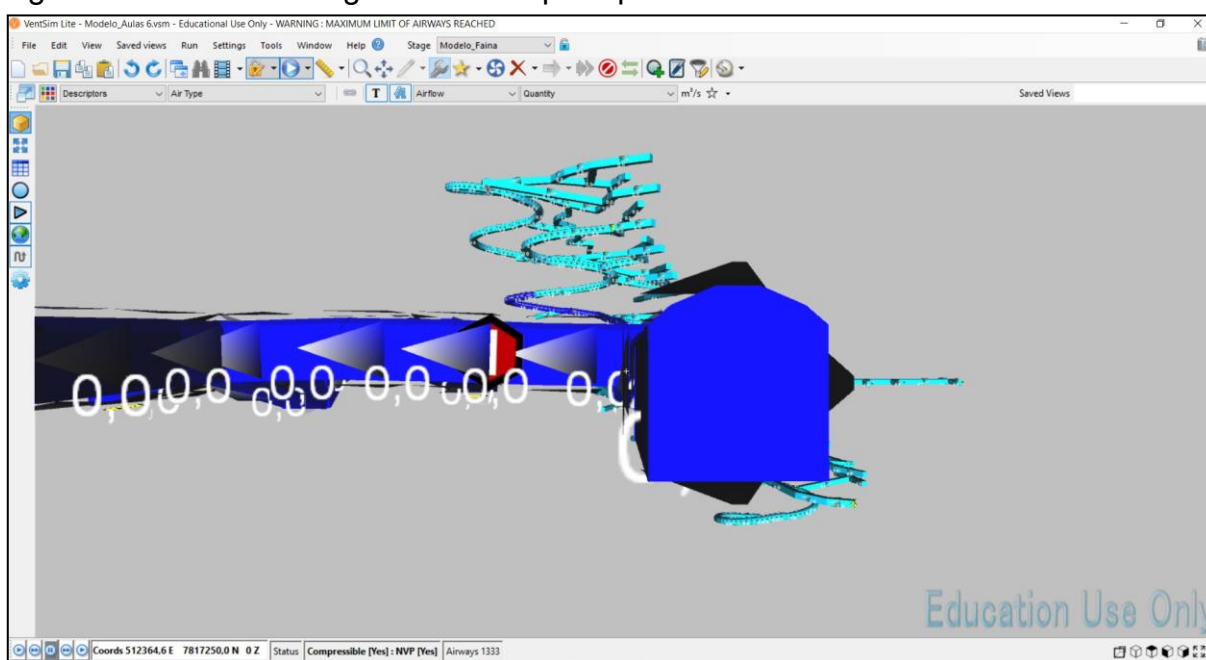


Fonte: Autores (2026)

4.3. GEOMETRIA DAS GALERIAS SUBTERRÂNEAS

As galerias subterrâneas definidas como vias principais, coloridas em azul escuro, possuem largura de 5 m e altura de 5,5 m com seção superior arqueada, resultando em uma área total de 25,8 m², conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8: Geometria da galeria da via principal.

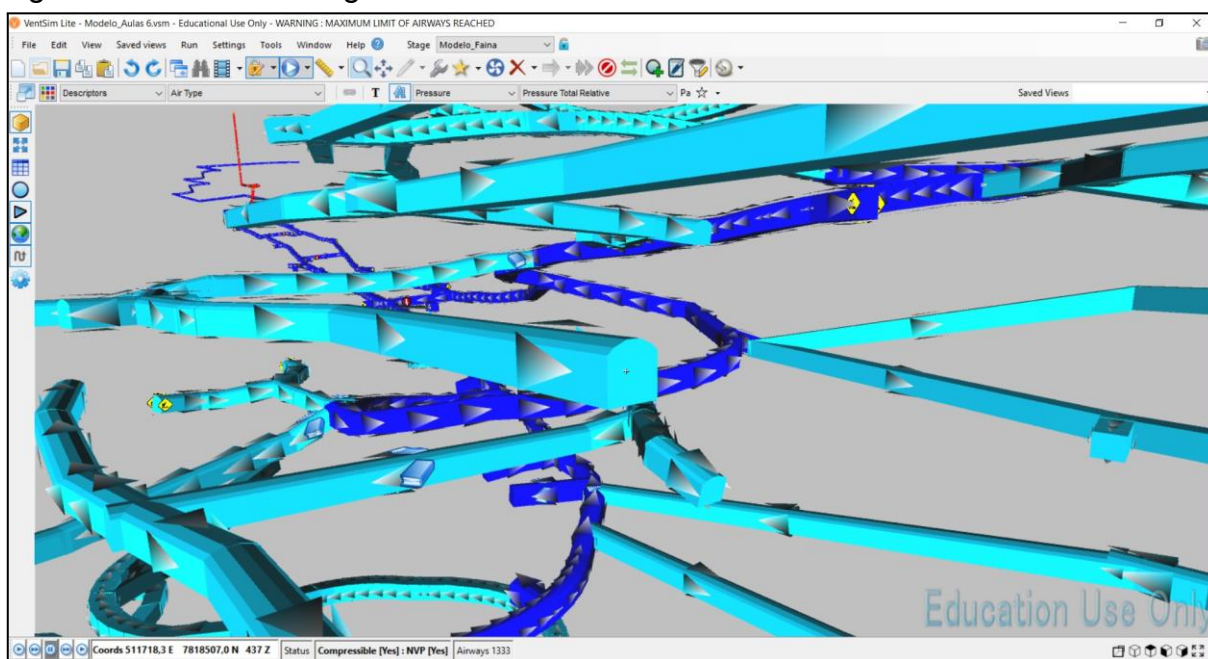


Fonte: Autores (2026)

As galerias mais profundas, denominadas vias secundárias, coloridas em azul

claro, correspondem às vias temporárias, focadas em avanço da lavra. Suas dimensões são 5 m de largura e 5 m de altura, com sua parte superior arqueada, possuem uma área total de 23,4 m², conforme ilustrado na Figura 9.

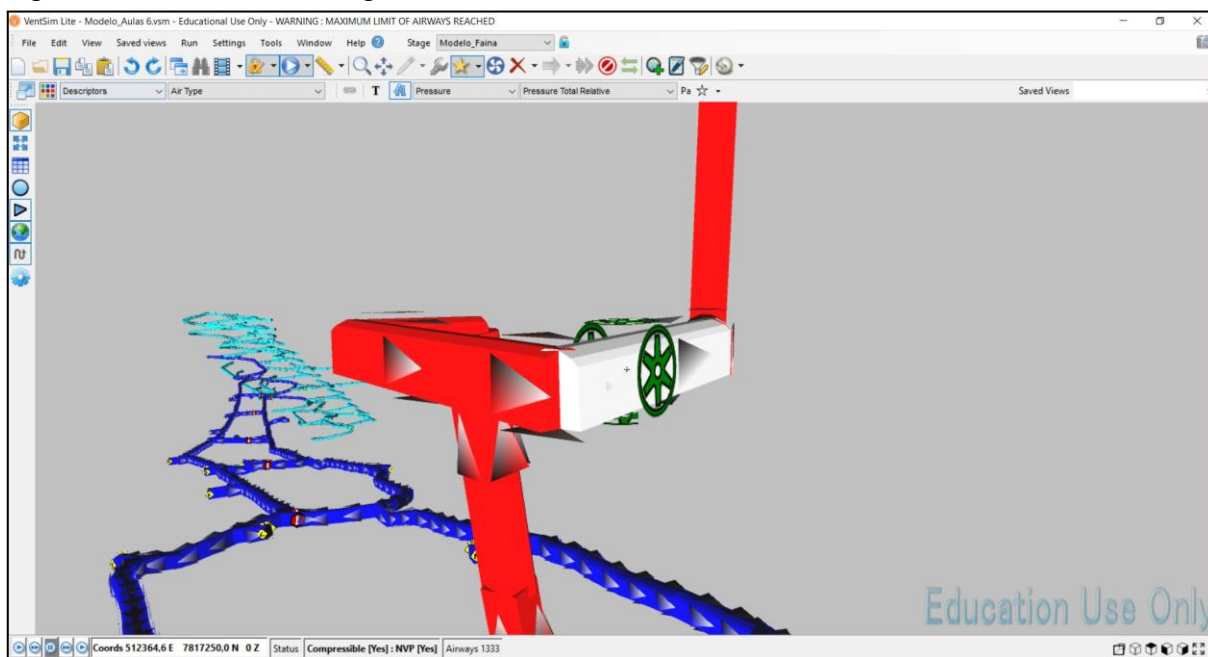
Figura 9: Geometria da galeria da via secundária.



Fonte: Autores (2026).

Como pode ser observado na Figura 10, a galeria na qual está instalado o ventilador principal possui dimensões de 4 m de largura e 5 m de altura, com parte superior da galeria arqueada, totalizando uma área de 18,8 m².

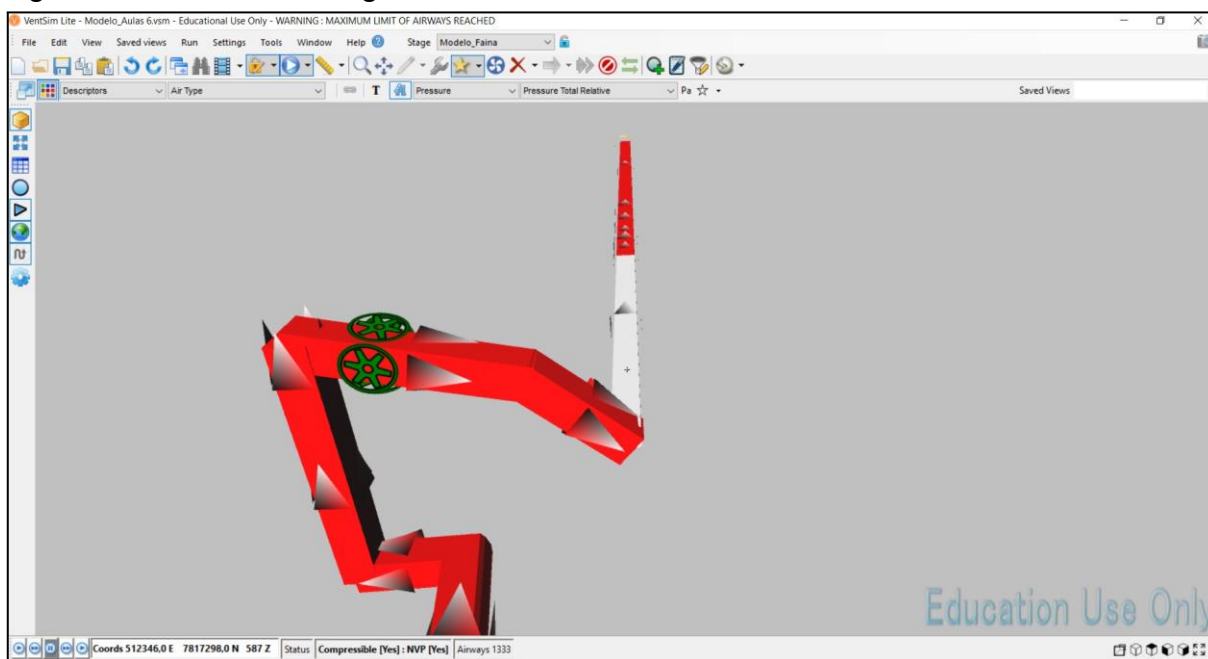
Figura 10: Geometria da galeria do ventilador.



Fonte: Autores (2026).

Por último, as dimensões da seção do *shaft* de exaustão de ar são 3,1 m de largura e 3,1 m de comprimento, com área total de 9,2 m², conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11: Geometria da galeria do *shaft*.



Fonte: Autores (2026).

Com essas características, torna-se possível compreender a necessidade do fluxo de ar requerido no interior da mina, bem como o controle de contaminantes e a segurança operacional. As galerias primárias garantem fluxo principal com grandes vazões com perda de carga mínima, enquanto as galerias secundárias distribuem o ar para as frentes de lavra.

4.4. VARIÁVEIS PARA CÁLCULOS DA VAZÃO PELA NORMA REGULAMENTADORA

A norma regulamentadora determina três métodos para o cálculo da vazão de ar. Esses cálculos auxiliam na determinação da vazão mínima de ar que precisa circular dentro da mina subterrânea, sendo adotado o maior valor obtido entre os métodos utilizados. Para calcular essas vazões, é necessário determinar a potência instalada (número total de cavalos-vapor) dos motores a óleo diesel em operação, a quantidade de pessoas no turno de trabalho, condições de exposição ocupacional ao calor, quantidade total de explosivos utilizados por desmonte, em quilogramas, quantidade de toneladas desmontadas por mês.

4.4.1. EQUIPAMENTOS EMPREGADOS NA OPERAÇÃO

A frota atual de equipamentos à disposição da empresa compreende carretas de perfuração (como fandrills e jumbos), caminhões rígidos, carrocerias e betoneiras, carregadeiras LHD, manipuladores telescópicos, escavadeiras, retroescavadeiras, motoniveladoras e sondas. Todos esses equipamentos emitem poluentes devido ao uso de combustíveis fósseis e, geralmente, quanto maior a potência exigida pelos motores desses equipamentos, maior será a emissão de gases.

Esse fator é essencial para dimensionar a vazão mínima de ar que deve circular dentro da mina, nas frentes de trabalho e bem como na concentração de oxigênio presente no ar. Para tal, é necessário mapear a quantidade de equipamentos e quais estão sendo empregados nas frentes de trabalho para posteriormente serem inseridos no cálculo disponibilizado pela NR-22.

4.4.2. QUANTIDADE DE PESSOAS

Outro fator essencial a ser considerado no planejamento de ventilação de

minas subterrâneas é a quantidade de trabalhadores por turno dentro da mina. Entre os itens que a norma exige que sejam cumpridos para segurança dos trabalhadores durante o turno no subsolo, está definido em locais onde houver circulação ou permanência de trabalhadores, a concentração de oxigênio no ar não deve ser inferior a 19% em volume; em minas, inclusive de carvão, e demais atividades subterrâneas, com utilização de máquinas e equipamentos a óleo diesel, a vazão de ar fresco será dimensionada de acordo com o disposto no Quadro I do Anexo IV desta NR, prevalecendo a vazão que for maior; a velocidade do ar no subsolo não deve ser inferior a 0,2 m/s nem superior à média de 8 m/s onde haja circulação de pessoas; e em outras minas, a quantidade do ar fresco nas frentes de trabalho deve ser de, no mínimo, 2,0 m³/min por pessoa (BRASIL, 2026a).

4.4.3. TEMPERATURA

Para determinar a temperatura de exposição ao calor dentro da mina devem ser considerados o gradiente geotérmico, o calor emitido pelos equipamentos e a vazão de ar no interior da mina. Para medir a temperatura à qual o trabalhador está sendo exposto, devem ser medidas a temperatura de bulbo úmido natural (tbn), temperatura de globo (tg) e temperatura de bulbo seco (tbs). A norma ressalta que a medição da temperatura de bulbo seco não é obrigatória quando não houver presença de carga solar direta, visto que não é utilizada no cálculo do IBUTG, porém pode ser útil em situações que demandem a adoção de medidas de controle (BRASIL, 2026b; FUNDACENTRO, 2025).

A equação empregada para obtenção do índice IBUTG, *Wet Bulb Globe Temperature* (WBGT) em inglês, é determinada a partir da escolha entre ambientes internos ou externos sem ou com a presença de carga solar, destacada na Equação 1.

$$IBUTG (WBGT) = 0,7.tbn + 0,3.tg \quad (1)$$

Em que, “tnw” é temperatura de bulbo úmido, em °C, que se caracteriza pela medição da capacidade evaporativa do ambiente e “tg” é a temperatura de globo negro, em °C, que mensura a carga de calor proveniente de radiação e convecção (SOARES, 2013).

4.4.4. EXPLOSIVOS

De acordo com a DNPM (2002), na NRM-16, em minas subterrâneas é permitido somente o uso de explosivos de segurança. A versão mais atualizada da NRM-6 (DNPM, 2015) não entra em detalhes sobre o que caracteriza um “explosivo de segurança”. Para obtenção dessa definição, consultou-se uma versão antiga da NR-16 para resposta. Explosivos de segurança correspondem a um explosivo de baixa sensibilidade que não detona por impacto, fricção ou calor, necessitando de dois estímulos sequenciais para detonação controlada: um detonador e um *booster* (reforçador) para detonação controlada. Entre os exemplos de explosivos utilizados seriam o ANFO, conforme apresentado na Figura 12 e as emulsões explosivas usadas em atividades de desmonte em minas.

Figura 12: Explosivo ANFO.



Fonte: ENAEX (2026).

Tipicamente em operações de desmonte de minas, utiliza-se predominantemente ANFO, obtido combinando nitrato de amônio com óleo diesel, complementado com a emulsão explosiva (THIENGO VIEIRA; D'AURIA BRAGA, 2023). O motivo de o explosivo ANFO ser amplamente empregado para desmontes está relacionado às suas diversas vantagens, como capacidade de ocupar inteiramente o volume do furo, grande insensibilidade a choques, à baixa produção de gases tóxicos e seu baixo preço, em torno de US\$ 1,5/kg. Em grandes operações, ANFO é bombeado diretamente para os furos por caminhões, em lavras a céu aberto, e por carregadores pneumáticos em operações subterrâneas (SILVA,

2021).

Por outro lado, emulsões são explosivos compostos por uma fase aquosa rica em oxidantes e por uma fase combustível, constituídos principalmente por nitrato de amônio, e são normalmente aplicados em furos maiores ou iguais a 3" ou, aproximadamente, 75 mm (SILVA, 2022).

Em locais com presença de água, prefere-se, no desenvolvimento, usar emulsão como explosivo, em modelo de mais energia; na lavra, utiliza-se de menor energia. Explosivos bombeáveis suportam variações térmicas maiores sem comprometer sua integridade. Com emulsão, bombeada ou encartuchada, a densidade do explosivo pode ser ajustada, a aplicação mantém desempenho mesmo em frentes com infiltrações de água, sensibilizada apenas no furo (SILVA, 2026).

De acordo com a ANEPAC (2023), as emulsões encartuchadas são explosivos que, devido à sua consistência, facilitam o carregamento das perfurações, mesmo em condições de variação de inclinação e níveis hidrostáticos. Elas se acomodam adequadamente no furo, apresentam excelente resistência à água, alto poder de ruptura e grande potência de detonação. Em contrapartida, emulsões bombeadas preenchem completamente o volume do furo, resultando em melhor distribuição e transmissão de energia para a rocha, eliminando espaços vazios que dissipam energia. A aplicação é realizada por meio de unidades móveis de bombeamento, como caminhões especiais (ANEPAC, 2023).

As operações de desmonte da mina objeto de estudo utilizam emulsão explosiva em suas operações de desmonte, consumindo 700 kg de explosivos por turno, produzindo 0,04 m³/kg de gases tóxicos. O tempo necessário para aeração da frente desmontada é de 60 minutos, garantindo que a qualidade do ar esteja apta para o retorno dos trabalhadores.

4.4.5. PRODUÇÃO (EM TONELADAS DESMONTADAS POR MÊS)

O terceiro método de determinação da vazão de ar fresco disponibilizado pela NR-22 baseia-se na quantidade de ar necessária para a diluição dos gases provenientes do desmonte para cada 1.000 toneladas produzidas mensalmente, sendo 190m³ o valor para cada 1.000 toneladas.

De acordo com os dados do plano de produção previsto para 2026, fornecidos pela empresa, prevê-se que, para a frente de desenvolvimento analisada

neste trabalho, sejam executados desmontes correspondentes a aproximadamente 1.400 toneladas de material ao longo do período avaliado. Os valores considerados estão apresentados na Tabela 3, distribuídos conforme a produção mensal prevista para essa frente específica. Dessa forma, os cálculos de ventilação desenvolvidos neste estudo foram realizados exclusivamente com base na demanda operacional dessa frente de desenvolvimento.

Tabela 3: Produção da empresa em toneladas por ano.

PRODUÇÃO DE ROCHA DESMONTADA (TONELADAS POR ANO)			
ANO	DESENVOLVIMENTO		MINÉRIO
	PRIMÁRIO	SECUNDÁRIO	TOTAL
2026	800	600	1400

Fonte: Autores (2026).

Considerando essas informações, é possível determinar a quantidade mínima de ar para cada mês. Como a infraestrutura da mina sofre modificações ao longo do tempo, os cálculos relacionados ao desmonte devem ser baseados na produção mensal prevista.

5. RESULTADO E DISCUSSÃO

5.1. CONDIÇÕES MÍNIMAS PARA OPERAÇÃO SEGURA

5.1.1. VAZÃO DE AR

Com todos os dados necessários para o cálculo da vazão de ar conforme a NR-22, foi possível aplicar os três métodos previstos na norma para determinar a vazão mínima necessária, os quais são descritos com maior detalhamento nas seções abaixo.

5.1.1.1. PRIMEIRO MÉTODO

O primeiro método, baseado no número de trabalhadores e equipamentos movidos a diesel, considerou apenas os equipamentos e trabalhadores previstos para a frente de desenvolvimento analisada neste estudo. Para essa condição, foi

adotado um total estimado de 80 trabalhadores atuando simultaneamente no turno de operação, aplicando-se o parâmetro de 2 m³/min por trabalhador, além da potência total da frota, de 1.220 CV (cavalo-vapor), dos motores a diesel em operação na respectiva frente. Os equipamentos utilizados durante o turno de operação foram detalhados na Tabela 4.

Para a elaboração dessa tabela, os valores foram determinados com base na potência total da frota, ponderando-se a quantidade de equipamentos e pelo índice de utilização de cada unidade em operação na frente de desenvolvimento analisada.

Tabela 4: Potência (CV) dos equipamentos da operação.

EQUIPAMENTO	QTD	TOTAL (CV)
JUMBO	1	5
CAMINHAO	5	837
CARREGADEIRA	2	170
PLATAFORMA	1	61
RETROESCAVADEIRA	1	30
MOTONIVELADORA	1	49
CAMINHONETE	2	67
TOTAL	13	1220

Fonte: Autores (2026).

A vazão total de ar requerida para a frente de desenvolvimento foi determinada conforme a Equação 2, considerando o número de trabalhadores simultâneos e a potência total dos equipamentos movidos a diesel em operação.

Equação 2:

$$QT = Q1 * n1 + Q2 * n2 \quad (2)$$

Em que:

(QT) = Vazão total de ar fresco em m³/min;

(Q1) = Quantidade de ar por pessoa em m³/min (em minas de carvão = 6,0 m³/min; em outras minas = 2,0 m³/min);

(n1) = Número de pessoas no turno de trabalho ;

(Q2) = 2,65 m³/min/cv (cavalo vapor) dos motores a óleo diesel;

(n2) = Número total de cavalo-vapor dos motores a óleo diesel em operação;

O cálculo resultou em uma vazão mínima de 56,55 m³/s (3.393 m³/min), correspondente à quantidade de ar fresco necessária para atender às exigências da NR-22 nas condições operacionais avaliadas. Esse valor foi adotado como referência para a análise da capacidade do sistema de ventilação e para a comparação dos cenários simulados.

5.1.1.2. SEGUNDO MÉTODO

O segundo método baseia-se na diluição dos gases provenientes da utilização de explosivos durante as atividades de desmonte na frente de desenvolvimento analisada. Para este estudo, foram considerados os dados utilizados dados disponibilizados pela equipe responsável pelas etapas de desmonte da empresa, que consideram uma massa total de 700 kg de explosivos por desmonte, um volume gasoso resultante de 0,04 m³/kg de explosivo e um tempo de aeração de 60 minutos, a fim de permitir condições adequadas de reentrada após o desmonte.

Equação 3:

$$QT = \frac{0,5 * A * V}{t} \quad (3)$$

Em que:

(QT) = Vazão total de ar fresco em m³/min;

(A) = Quantidade total em quilogramas de explosivos empregados por desmonte;

(V) = Volume gasoso gerado por quilo de explosivo em m³/kg;

(t) = Tempo de aeração (reentrada) da frente em minutos;

O cálculo resultou em uma vazão mínima de 0,0038 m³/s (0,2333 m³/min), valor considerado suficiente para garantir condições adequadas de diluição dos gases provenientes do desmonte e assegurar uma operação segura na frente de desenvolvimento analisada.

5.1.1.3. TERCEIRO MÉTODO

O terceiro método, relacionado à tonelagem mensal desmontada, na qual a produção em toneladas varia ao longo dos meses, torna necessário calcular a vazão mínima para cada mês e comparar os resultados com os dos demais métodos, considerando uma vazão de ar mínima de 190 m³/min (3,16 m³/s) a cada 1.000

toneladas/mês.

Equação 4:

$$QT = q * T \quad (4)$$

Em que:

(QT) = Vazão total de ar fresco em m³/min;

(q) = Vazão de ar em m³/min para 1.000 toneladas desmontadas por mês (mínimo de 190 m³/min/1.000 toneladas/mês);

(T) = Produção em toneladas desmontadas por mês;

O cálculo resultou em uma vazão mínima de 0,369 m³/s (22,17 m³/min), valor considerado suficiente para garantir condições adequadas provenientes do desmonte e garantir uma operação segura na frente de desenvolvimento analisada.

5.1.1.4. LIMITE MÍNIMO

Diante da apresentação dos três métodos para determinação da vazão mínima de ar, o primeiro método, baseado no número de trabalhadores e equipamentos movidos a diesel, é o que exige a maior vazão de ar e, portanto, deve ser adotado como critério mínimo para garantir conformidade com a norma, e a segurança da operação.

Como descrito anteriormente, o ventilador atualmente instalado na mina produz 56,8 m³/s (3.408 m³/min) de ar, sendo uma vazão superior aos 56,55 m³/s (3.393 m³/min) exigidos para atender ao limite mínimo de ventilação necessário para a produção de rocha desmontada.

5.1.2. TEMPERATURA

Para calcular a temperatura à qual os trabalhadores estão expostos, será utilizada a Equação 1. Os dados necessários para a determinação desse índice são a temperatura de bulbo úmido “tbn” e temperatura de globo negro “tg”. Essas duas variáveis podem ser obtidas no modelo fornecido pela empresa e analisado no *software Ventsim*. O valor, em °C, da temperatura do bulbo úmido é 23,0° C e a temperatura do globo é 27,0° C. Portanto, o IBUTG calculado para as condições analisadas foi de 24,2 °C, indicando o nível de exposição ao calor dos trabalhadores

no ambiente avaliado.

O limite de exposição ocupacional ao calor é estabelecido com base no IBUTG médio ponderado e na Taxa Metabólica Ponderada (M). Caso o trabalhador esteja exposto a uma única condição térmica, ao longo do período de 60 minutos, o IBUTG médio ponderado corresponderá ao próprio valor de IBUTG.

De acordo com a Tabela 2, o valor calculado de IBUTG, igual a 24,2 °C, não está tabelado, por ser inferior ao menor valor de IBUTG apresentado, definido como 24,7 °C para uma Taxa Metabólica Média de 606 W. Isso indica que a condição analisada se encontra dentro dos limites estabelecidos pela norma. Para fins de comparação, a atividade seria classificada como insalubre, caso o trabalhador realizasse atividades de maior esforço físico, como trabalho pesado com braços e pernas enquanto sentado ($M = 603$ W), trabalho pesado com todo o corpo ($M = 630$ W) ou subida de escadas transportando carga de 20 kg ($M = 648$ W). Portanto, considerando a exposição a um IBUTG de 24,2 °C, a atividade não se caracteriza como insalubre por exposição ao calor.

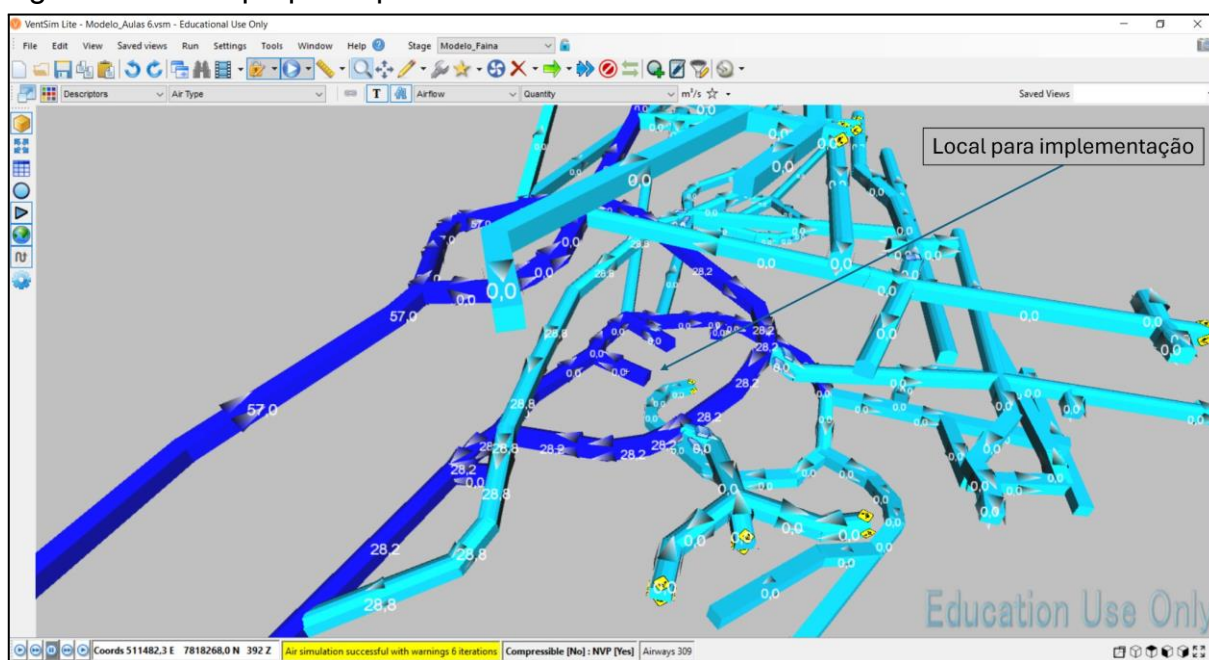
5.2. ESTUDO COMPARATIVO DE ALTERNATIVAS DE DESENVOLVIMENTO

O local sugerido para as propostas de desenvolvimento corresponde a uma galeria sem saída, localizada acima de uma rampa de uma via secundária, que dá acesso ao nível inferior da lavra, conforme a Figura 13.

A partir da seleção do local, foram apresentadas três opções de desenvolvimento, todas partindo da porção inferior da mina até a conexão com a via principal de exaustão do ar, permitindo que o ar chegasse à frente de lavra e fosse direcionado para a saída. Para cada opção, foram detalhados os principais parâmetros de análise, como custos estimados de desenvolvimento, distância escavada, inclinação das seções e capacidade de vazão de ar.

As sugestões elaboradas compreenderam o desenvolvimento de *raise*, desenvolvimento por rampa e desenvolvimento por galeria retilínea, permitindo que fosse realizada uma comparação técnica e econômica entre os métodos propostos para avanço da operação em conjunto com o sistema de ventilação.

Figura 13: Local proposto para desenvolvimento.



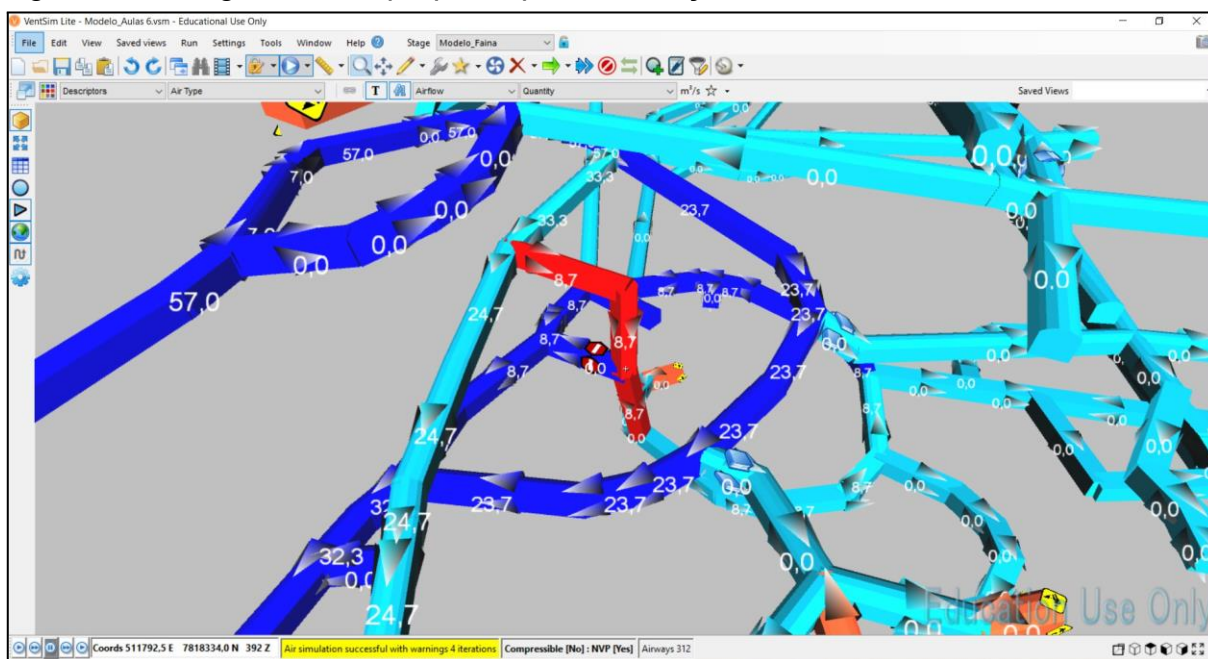
Fonte: Autores (2026).

5.2.1. CENÁRIO 1 - DESENVOLVIMENTO POR *RAISE*

Neste cenário, foram consideradas as informações fornecidas sobre as características do *raise* utilizado pela empresa em suas operações, sendo selecionado o local destacado na Figura 13 para modificação estrutural. O Jumbo, equipamento empregado para a abertura do *raise*, apresenta um custo de desenvolvimento de R\$ 16.000,00 por metro de avanço, de acordo com consulta realizada pela engenheira da empresa.

A solução proposta de ventilação de umas das frentes de lavra da parte inferior da mina está disponível na Figura 14, na qual as galerias estão dispostas na cor vermelha.

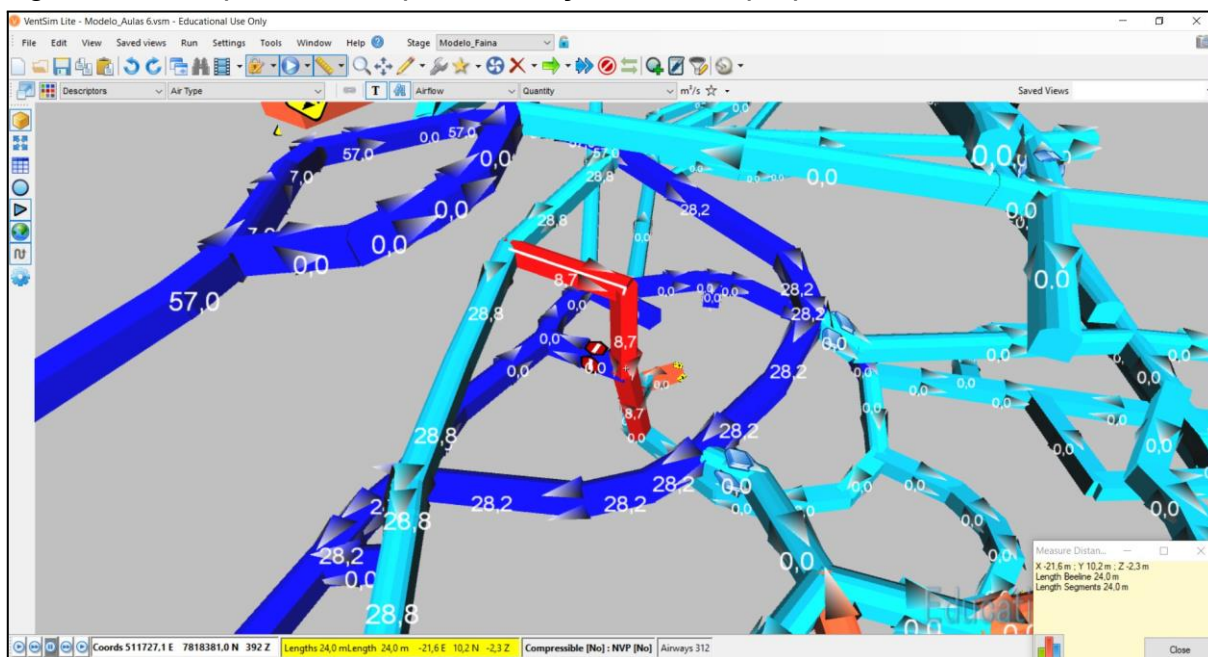
Figura 14: Design de *raise* proposto para ventilação.



Fonte: Autores (2026).

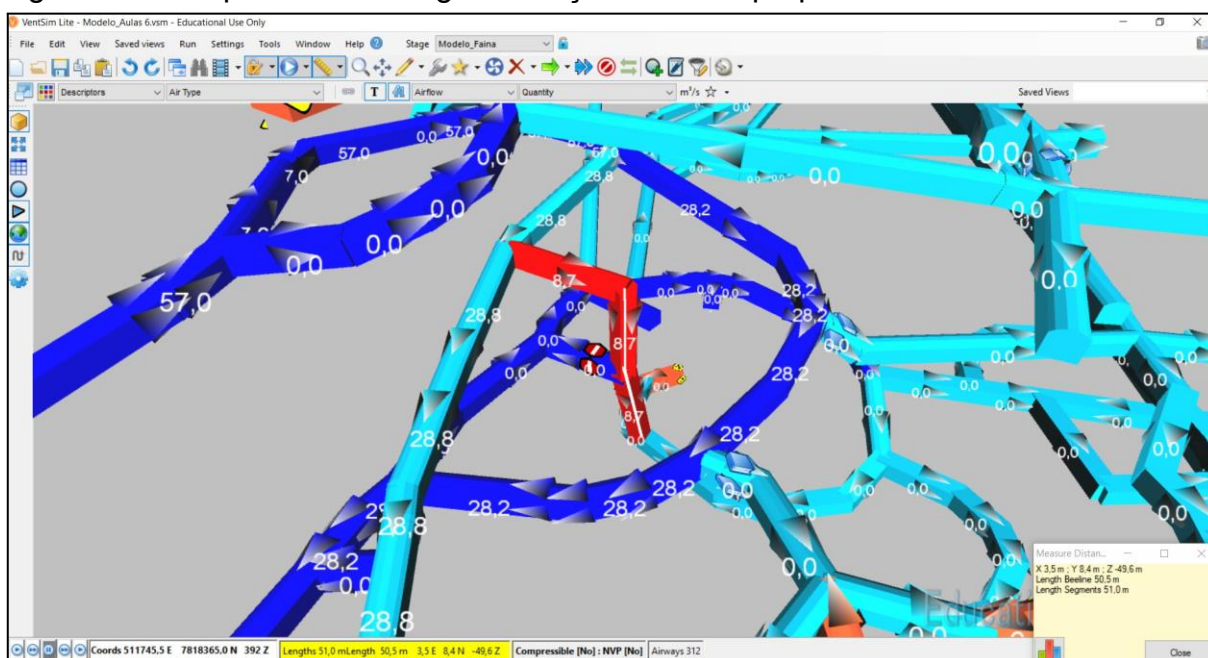
De acordo com essa solução proposta, seria necessário um desenvolvimento horizontal e depois duas seções de desenvolvimento vertical por *raise*, em conjunto com o bloqueio da galeria, evidenciado por um símbolo vermelho de bloqueio sobre a galeria, para maximizar a vazão de ar para a seção inferior. Para calcularmos o valor necessário para efetuar esse desenvolvimento, medimos o comprimento das seções e multiplicaremos pelo custo por metro de avanço.

Figura 15: Comprimento da primeira seção do *raise* proposto.



Fonte: Autores (2026).

Figura 16: Comprimento da segunda seção do *raise* proposto.



Fonte: Autores (2026).

As dimensões das seções que compõem esta alternativa são apresentadas nas Figuras 15 e 16. A primeira seção possui 24,0 m de comprimento e inclinação de 0°, enquanto a segunda seção possui 51,0 m de comprimento e inclinação de 90°. A simulação indicou uma vazão de ar de 8,7 m³/s (522 m³/min) para este

cenário. O custo das alternativas avaliadas foi estimado a partir da multiplicação do custo unitário de desenvolvimento por metro de avanço pela extensão total escavada, conforme a Equação 5. Com base nos parâmetros adotados, o custo total estimado para implantação desta alternativa está detalhado abaixo:

Equação 5:

$$CRJ(R\$) = CAJ * S1 + CAJ * S2 \quad (5)$$

Em que:

(CRJ) = Custo do *raise* por jumbo;

(CAJ) = Custo do avanço por jumbo em metros;

(S1) = Extensão da primeira seção em metros;

(S2) = Extensão da segunda seção em metros;

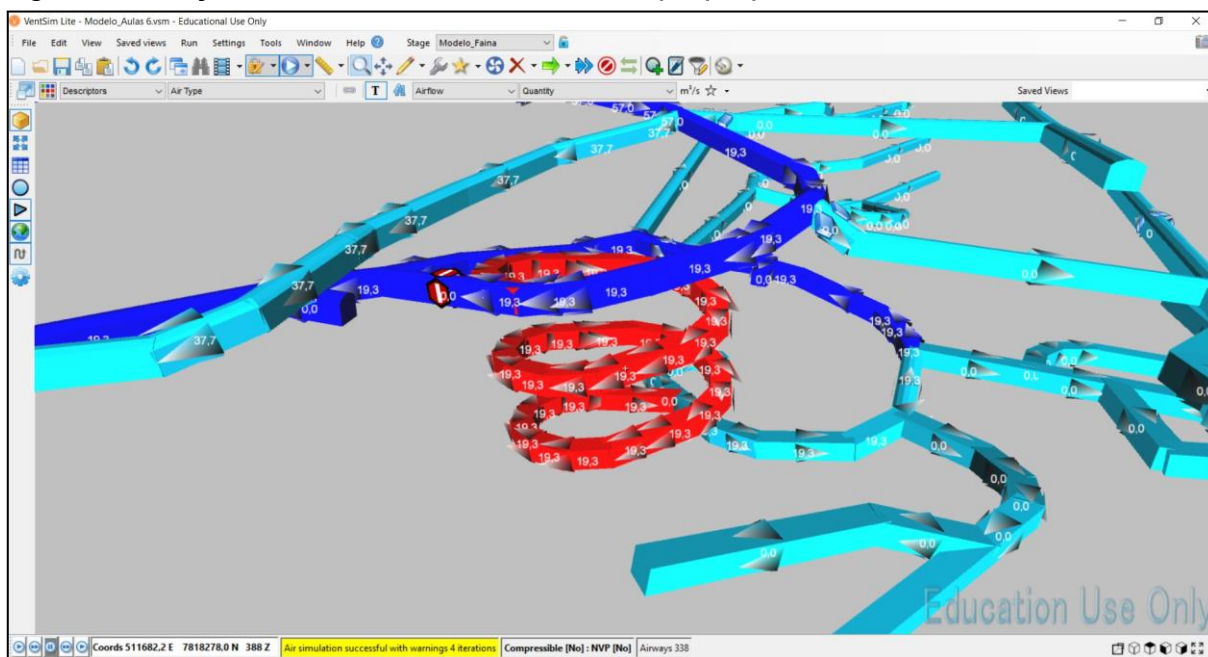
Com base nesses dados, o custo total para construção por esta alternativa seria de R\$1.200.000,00 para desenvolvimento. Esse cenário fornece 8,7 m³/s (522 m³/min) de ar, quantidade superior ao valor mínimo de 2,0 m³/min exigido pela NR-22 para as frentes em desenvolvimento.

5.2.2. CENÁRIO 2 - DESENVOLVIMENTO COM RAMPA

Neste cenário, novamente levamos em consideração as informações providenciadas sobre o desenvolvimento com jumbo que a empresa utiliza em suas operações.

A modificação estrutural proposta para este cenário está disponível na Figura 17, na qual as galerias estão dispostas na cor vermelha. Nesta proposta, seria necessário o desenvolvimento de uma rampa de acesso em conjunto com o bloqueio da galeria, novamente para maximizar o fluxo da vazão de ar para a seção inferior da mina.

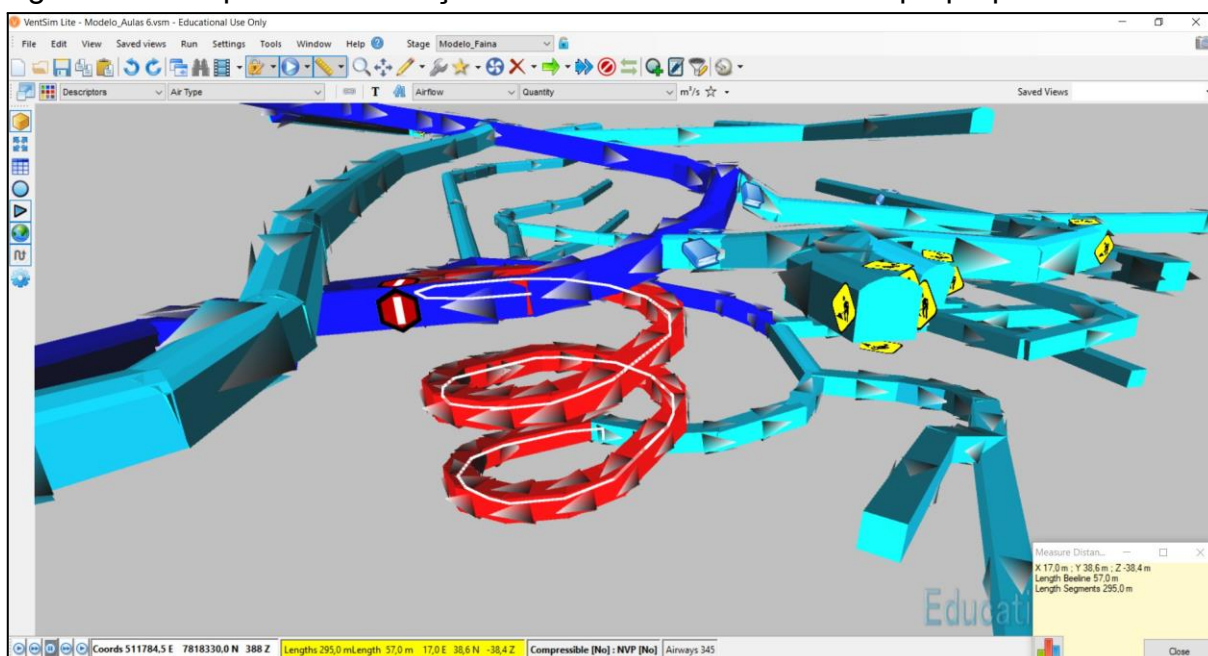
Figura 17: Seção do desenvolvimento em rampa proposto.



Fonte: Autores (2026).

Para definirmos o custo total para efetuar esse desenvolvimento, é necessário medir o comprimento total da rampa, respeitando o limite de inclinação máxima para rampa de serviço em minas subterrâneas. De acordo com Menezes (2010), a inclinação máxima para inclinações contínuas pode ser limitada entre 8 e 15%.

Figura 18: Comprimento da seção do desenvolvimento em rampa proposto.



Fonte: Autores (2026).

Na Figura 18 está disposta a medida completa da rampa, obedecendo um *grade* de 14%, contínuo por toda a extensão da rampa. O comprimento total deste cenário seria de 295 m. A vazão de ar resultante da simulação neste cenário é de 19,3 m³/s (1.158 m³/min). Com base nesses dados, conforme a Equação 6, o custo total para elaboração deste método seria:

Equação 6:

$$CDR(R\$) = CAJ * S3 \quad (6)$$

Em que:

(CDR) = Custo do desenvolvimento por rampa;

(CAJ) = Custo do avanço por jumbo em metros;

(S3) = Extensão da seção da rampa em metros;

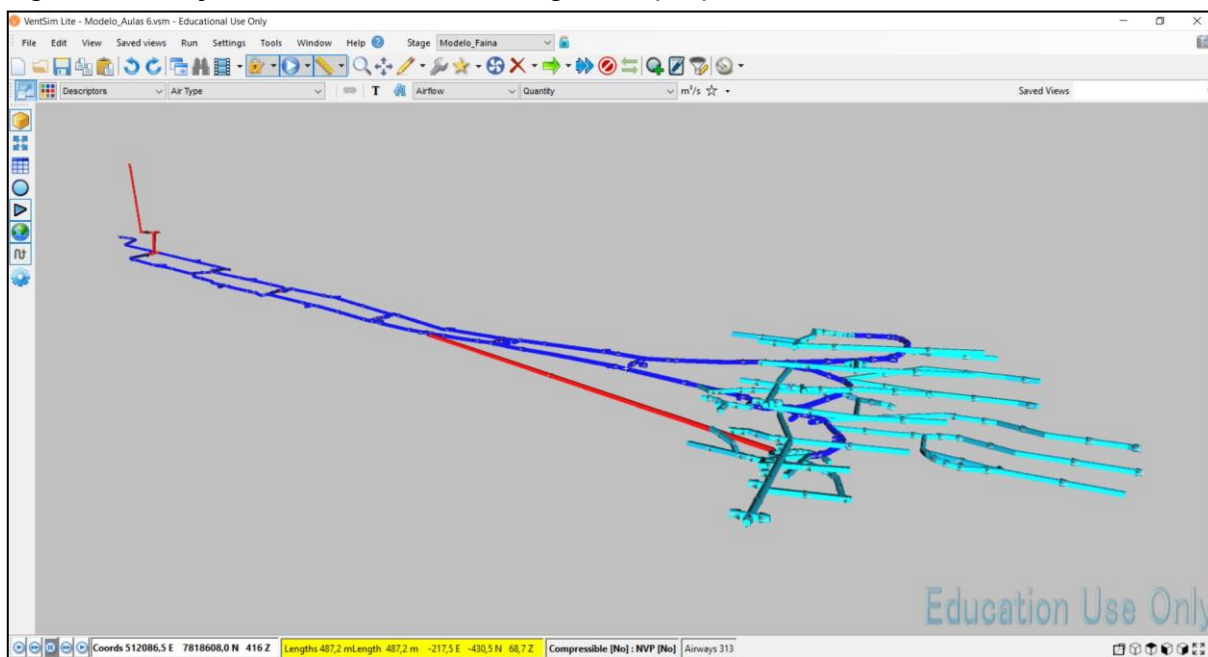
Com base nesses dados, o custo total projetado para a execução do desenvolvimento em rampa corresponderia a R\$4.720.000,00. Esse cenário fornece 19,3 m³/s (1.158 m³/min) de ar, quantidade superior ao valor mínimo de 2,0 m³/min exigido pela NR-22 para as frentes em desenvolvimento.

5.2.3. CENÁRIO 3 - DESENVOLVIMENTO COM GALERIA RETILÍNEA

Neste cenário, novamente levamos em consideração as informações providenciadas sobre o desenvolvimento com jumbo que a empresa utiliza em suas operações.

A modificação estrutural proposta para este cenário, disponível na Figura 19, na qual a galeria está disposta na cor vermelha. Nesta proposta, seria necessário o desenvolvimento de uma galeria retilínea de acesso, sem a necessidade de uso do bloqueio da galeria para maximizar o fluxo da vazão de ar para a seção inferior da mina.

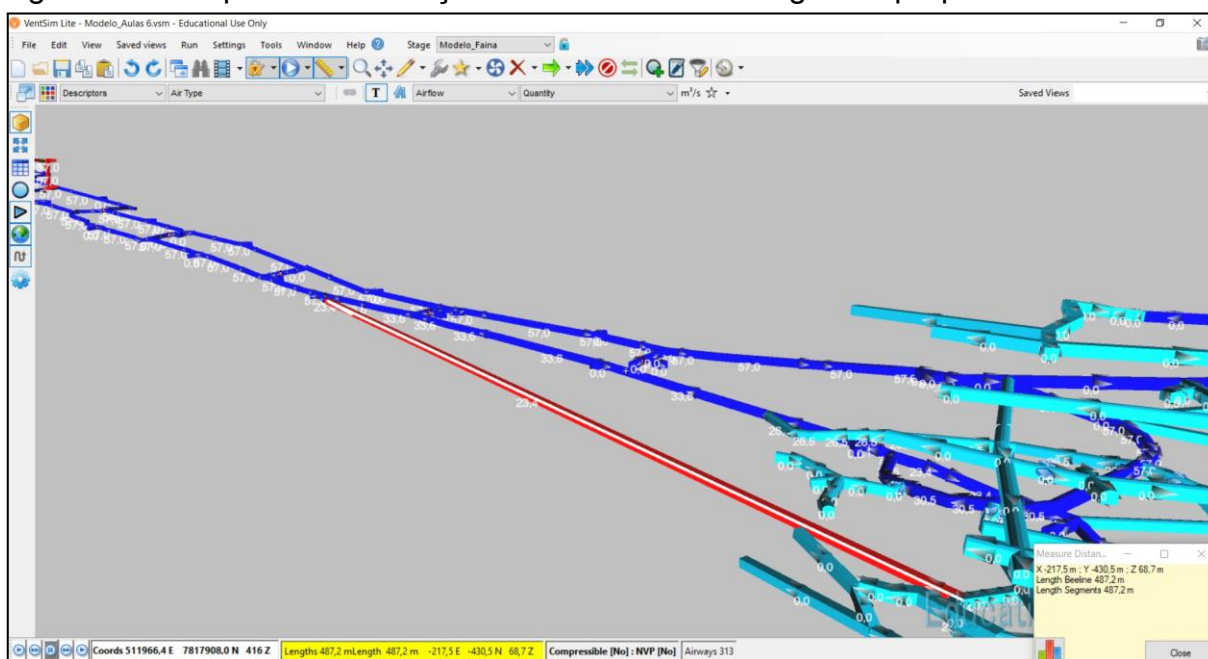
Figura 19: Seção do desenvolvimento galeria proposto.



Fonte: Autores (2026).

Para definirmos o custo total para efetuar esse desenvolvimento, é necessário medir o comprimento total da galeria, respeitando o limite de inclinação máximo para rampa de serviço em minas subterrâneas.

Figura 20: Comprimento da seção do desenvolvimento galeria proposto.



Fonte: Autores (2026).

Na Figura 20 está disposto a medida completa da galeria, obedecendo um *grade* de 14,2%, contínuo por toda a extensão da rampa. O comprimento total deste cenário seria de 487,2 m. A vazão de ar resultante da simulação neste cenário é de 23,4 m³/s (1.404 m³/min). Com base nesses dados, conforme a Equação 7, o custo total para elaboração deste método seria o seguinte:

Equação 7:

$$CDGL(R\$) = CAJ * S4 \quad (7)$$

Em que:

(CDGL) = Custo do desenvolvimento por galeria retilínea;

(CAJ) = Custo do avanço por jumbo em metros;

(S4) = Extensão da seção da galeria em metros;

Com base nesses dados, o custo total projetado para a execução do desenvolvimento em galeria retilínea corresponderia a R\$7.795.200,00. Esse cenário forneceria 23,4 m³/s (1.404 m³/min) de ar, quantidade superior ao valor mínimo de 2,0 m³/min exigido pela NR-22 para as frentes em desenvolvimento.

5.3. COMPILAÇÃO DOS RESULTADOS

A Tabela 5 compila as três alternativas de modificação estrutural sugeridas para a ventilação, considerando custo relativo, inclinação, desempenho de vazão e as principais vantagens e desvantagens.

Tabela 5: Comparação quantitativa e qualitativa entre os métodos.

Método	Extensão (m)	Custo (R\$)	Inclinação	Vazão de ar	Vantagens	Desvantagens
Raise por Jumbo	75 m	R\$1.200.000,00	Horizontal (0°) e Vertical (90°)	8,7 m ³ /s (522 m ³ /min)	Menor custo, menor interferência na infraestrutura existente, execução localizada, boa aplicação para adução ou exaustão	Menor área efetiva de passagem de ar, sem acesso operacional
Rampa	295 m	R\$ 4.720.000,00	14%	19,3 m ³ /s (1.158 m ³ /min)	Permite ventilação e acesso operacional, e maior	Exige maior extensão de escavação, maior custo e maior tempo de

					circulação, aproveita melhor a infraestrutura existente	implantação que o <i>raise</i>
Galeria retilínea	487,2 m	R\$ 7.795.200,00	14%	23,4 m³/s (1.404 m³/min)	Maior capacidade de passagem de ar, melhor desempenho ventilatório, maior flexibilidade futura	Maior custo, maior desenvolvimento por metro, maior prazo de implantação e maior intervenção estrutural dos métodos

Fonte: Autores (2026).

O desenvolvimento por *raise* por jumbo se destaca como a solução de menor custo, com menor necessidade de desenvolvimento horizontal, menor interferência na infraestrutura existente e, por ser amplamente empregado para abertura de galerias verticais, contribuindo também para redução de custos indiretos relacionados a mão de obra e tempo de paralisação. Entretanto, apresenta a menor vazão entre dentre todos os métodos em decorrência do baixo fluxo de ar redirecionado.

O desenvolvimento por rampa, diferente da solução com *raise*, permite que este acesso seja utilizado como possível acesso operacional e direcionamento do fluxo da ventilação, tornando-a atrativa para possíveis expansões da mina. Suas desvantagens seriam maior tempo para implementação, extensão de desenvolvimento e custo superior ao *raise*.

O desenvolvimento por galeria retilínea possui o menor custo-benefício dos três métodos, justamente por exigir maior metragem de escavação, maior tempo para elaboração, elevada modificação estrutural e ser o mais oneroso. Seu maior benefício seria o seu desempenho em relação à ventilação, disponibilizando o maior fluxo de ar de todos os métodos citados, entretanto seu desempenho na ventilação dificilmente justifica sua adoção, tornando essa alternativa menos atrativa.

De modo geral, a mais adequada seria desenvolvimento por *raise*, visto que oferece o melhor custo-benefício, praticidade operacional e o menor tempo para implementar a solução, apesar de ser o método com a menor vazão.

Relembrando que essas sugestões possuem como objetivo identificar soluções com menor custo de implantação, sem a necessidade de desenvolver novas infraestrutura principal, priorizando alternativas que aproveitem as estruturas já existentes na mina, buscando propor soluções viáveis sob o ponto de vista técnico

e operacional, possibilitando a redução de investimentos pelo aproveitamento dos acessos e obras atualmente implementadas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O planejamento do desenvolvimento em minas subterrâneas constitui uma atividade estratégica, uma vez que cada metro escavado influencia diretamente a produção, a logística operacional e a utilização dos recursos disponíveis. Nesse contexto, a ventilação deve ser considerada de forma integrada ao planejamento de curto, médio e longo prazo, pois seu desempenho está diretamente relacionado à segurança dos trabalhadores e à continuidade das operações.

Os resultados demonstraram que a vazão total atualmente fornecida pelo sistema atenderia aos requisitos mínimos da NR-22 para o cenário operacional estudado. Todavia, o avanço das operações de lavra tende a aumentar a resistência da rede de ventilação e a dificultar a distribuição eficiente do ar nas frentes mais distantes. Dessa forma, o estudo das alternativas propostas não teve como objetivo apenas corrigir uma eventual insuficiência de vazão global, mas principalmente identificar soluções capazes de otimizar a circulação do ar, melhorar a eficiência do sistema e reduzir a necessidade de investimentos futuros em infraestrutura de ventilação.

Todos os cenários de ventilação propostos por este trabalho cumpriram a exigência mínima de $2,0 \text{ m}^3/\text{min}$ por pessoa para as frentes de desenvolvimento por meio de redirecionamento do ar da via principal. No primeiro cenário, o desenvolvimento por *raise* permitiria o redirecionamento de $8,7 \text{ m}^3/\text{s}$ de ar, com custo aproximado de R\$1.200.000,00, configurando a alternativa de menor investimento inicial entre as opções avaliadas e foi também a alternativa que proporcionou a menor vazão de ar entre os cenários simulados, além de apresentar maior rapidez de implementação. O segundo cenário, caracterizado pelo desenvolvimento de uma rampa, apresentou custo estimado de R\$4.720.000,00, destacando-se por possibilitar simultaneamente a circulação de equipamentos e a melhoria das condições de ventilação e apresenta vazão de ar mediana, de $19,3 \text{ m}^3/\text{s}$, entre os três métodos. Por último, o terceiro cenário propõe o desenvolvimento de uma galeria retilínea extensa, apresentou o maior investimento estimado, estimado em R\$ 7.795.200,00, porém proporcionou o maior incremento na vazão de ar direcionada às frentes de trabalho, calculada em $23,4 \text{ m}^3/\text{s}$.

Os resultados obtidos demonstraram que é possível ampliar o alcance da ventilação e melhorar a distribuição do fluxo de ar na mina por meio de modificações pontuais na infraestrutura existente, reduzindo a necessidade de investimentos elevados e minimizando impactos sobre a produção. As simulações realizadas permitiram avaliar diferentes alternativas de desenvolvimento, comparando seus desempenhos ventilatórios e seus respectivos custos de implantação.

Entre as alternativas analisadas, a execução de um *raise* apresentou o melhor custo-benefício, proporcionando aumento da circulação de ar com menor extensão de desenvolvimento e menor investimento quando comparada às demais soluções estudadas. Entretanto, verificou-se que nenhuma das alternativas, de forma isolada, é capaz de solucionar integralmente todas as demandas ventilatórias da mina. A escolha da solução mais adequada depende das condições operacionais vigentes, do avanço da lavra, da disponibilidade de equipamentos e das necessidades futuras de desenvolvimento do empreendimento.

A análise também evidenciou que a ventilação, embora frequentemente classificada como uma atividade auxiliar, representa um dos elementos fundamentais para a operação segura de minas subterrâneas. O atendimento às exigências da NR-22 deve ser incorporado ao planejamento da mina desde as etapas iniciais de desenvolvimento, permitindo que as necessidades de ventilação sejam antecipadas e adequadamente dimensionadas.

Por fim, conclui-se que a alternativa baseada na execução de *raise* constituiu a solução mais eficiente sob a perspectiva técnico-econômica para o cenário estudado. As simulações realizadas no *software* Ventsim demonstraram que essa alternativa foi capaz de atender aos requisitos mínimos de ventilação das frentes analisadas, com menor custo de implantação em comparação às demais opções avaliadas. Ressalta-se, entretanto, que este estudo foi desenvolvido com base na configuração atual da mina disponibilizada pela empresa, não contemplando cenários futuros de avanço da lavra, os quais poderão demandar novas adequações no sistema de ventilação ao longo da vida útil do empreendimento.

7. TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade deste estudo, recomenda-se o desenvolvimento de pesquisas voltadas à redução da demanda de ventilação em minas subterrâneas, buscando soluções que minimizem a necessidade de ampliação contínua da infraestrutura ventilatória. Entre os temas de interesse destacam-se os seguintes:

- Avaliação da utilização de equipamentos elétricos ou híbridos em substituição aos equipamentos movidos a diesel, visando reduzir a emissão de gases e a demanda de ar fresco nas frentes de trabalho;
- Estudos sobre a influência da renovação tecnológica da frota subterrânea na redução da geração de calor e contaminantes atmosféricos;
- Aplicação de sistemas de ventilação sob demanda (*Ventilation on Demand – VoD*), permitindo direcionar o fluxo de ar apenas para áreas efetivamente ocupadas;
- Avaliação do uso de sensores e sistemas de monitoramento em tempo real para controle inteligente da ventilação subterrânea;
- Estudos sobre estratégias de redução do consumo energético dos sistemas de ventilação por meio da otimização operacional dos ventiladores principais e auxiliares;
- Desenvolvimento de metodologias integradas de planejamento de lavra e ventilação, buscando minimizar a necessidade de novos desenvolvimentos destinados exclusivamente à circulação de ar;
- Avaliação dos impactos da eletrificação das operações subterrâneas na redução das emissões de gases de efeito estufa e nos requisitos de ventilação da mina.

REFERÊNCIAS

AJAYI, Kayode M.; SHAHBAZI, Khosro; TUKKARAJA, Purushotham; KATZENSTEIN, Kurt; Prediction of Airway Resistance in Panel Cave Mines Using a Discrete and Continuum Model. Disponível em: <<https://stacks.cdc.gov>>. Acesso em: 9 abr. 2026.

ANEPAC. **Estudo dos custos operacionais do desmonte de rocha por explosivo tipo encartuchado e emulsão bombeada.** – Anepac. , 1 ago. 2023. Disponível em: <<https://anepac.org.br/estudo-dos-custos-operacionais-do-desmonte-de-rocha-por-e-xplosivo-tipo-encartuchado-e-emulsao-bombeada/>>. Acesso em: 9 jun. 2026

BRASIL. NR 15 - ATIVIDADES E OPERAÇÕES INSALUBRES. 2025.

BRASIL. NR 22 - Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração. 2026a.

BRASIL. NR-09 - AVALIAÇÃO E CONTROLE DAS EXPOSIÇÕES OCUPACIONAIS A AGENTES FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS. 2026b.

CANDIA, Renan Collantes. Aplicação da metodologia DMAIC à gestão de processo de ventilação de mina. ???. 2020.

CARDOSO, Rafael Roletto. Verificação do sistema de ventilação de uma mina subterrânea dividido em três estágios de mineração para uma mina de carvão baseado na Mina do Leão II (RS). 1 nov. 2014.

COSTA, Leandro De Vilhena. ANÁLISE DAS OPÇÕES DE VIAS DE PRODUÇÃO E ACESSO EM MINAS SUBTERRÂNEAS. Dissertação de Mestrado. UFOP. 2015.

COSTA, Leandro de Vilhena; SILVA, J. M. Tecnologia em ventilação em minas subterrâneas. In *The Mine*, n. 114, p. 26-27, 2025. Disponível em: <<https://www.inthemine.com.br/site/tecnologia-em-ventilacao-de-minas-subterraneas/>>. Acesso em: 10 jun. 2026.

CRUZ, Marcus Vinicius Macedo da. Dimensionamento do sistema de ventilação de uma mina subterrânea. ??? 2022.

CURI, Adilson. **Lavra de minas.** [S.l.]: Oficina de Textos, 2021.

DANG, Phuong Thao. Selecting Parameters to Design Auxiliary Ventilation in Underground Mine. **Inżynieria Mineralna**, v. 1, n. 2, 1 nov. 2023.

DE SOUZA, Euler. Improving the energy efficiency of mine fan assemblages. **Applied Thermal Engineering**, v. 90, p. 1092–1097, 5 nov. 2015.

DE VILLIERS, David J. *et al.* Evaluating the impact of auxiliary fan practices on localised subsurface ventilation. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 29, n. 6, p. 933–941, dez. 2019.

DNPM. NRM 6, Normas Reguladoras de Mineração-Ventilação. Ano 2015. Normas

Reguladoras de Mineração - Ventilação. Disponível em: <https://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/nrm_06.htm>. Acesso em: 3 jun. 2026.

FILHO, Silva; DA, Arildo de Oliveira. Tecnologias e práticas que diminuem o custo e aumentam a confiabilidade do sistema de ventilação. ??? 2021.

FUNDACENTRO. NHO 6. Norma de higiene ocupacional : avaliação da exposição ocupacional ao calor : procedimento técnico. Disponível em: <<https://fundacentro.primo.exlibrisgroup.com>>. Acesso em: 7 maio. 2026.

GANCEV, Boris Ferreira; TRIBESS, Arlindo. Avaliação de condições de qualidade do ar em mina subterrânea. ??? USP. 2006.

GHORBANI, Yousef; NWAILA, Glen T.; ZHANG, Steven E.; BOURDEAU, Julie E.; CÁNOVAS, Manuel; ARZUA, Javier; NIKADAT, Nooraddin. Moving towards deep underground mineral resources: Drivers, challenges and potential solutions. **Resources Policy**, v. 80, p. 103222, jan. 2023.

KOHMANN, Hugo Kamigashima; AYRES DA SILVA, A. L. M. Análise do sistema de ventilação de uma carbonífera brasileira. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 19, p. 1–8, 2022.

LEE, Dong-Kil. Evaluation of the optimum conditions for a local ventilation system in connection with the mine ventilation network. *In*: FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNDERGROUND MINING TECHNOLOGY. **Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology**. Australian Centre for Geomechanics (AGC), Perth, 2017. Disponível em: <https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1710_55_Lee/>. Acesso em: 9 abr. 2026

LOPES, Gustavo Fontes. TRANSIÇÃO DA MINA A CÉU ABERTO PARA SUBTERRÂNEA NO MORRO DA MINA. Dissertação de Mestrado. UFOP. 2012.

MENEZES, Diogo Da Silva. CONSTRUÇÃO DE ACESSOS E RAMPAS EM MINAS A CÉU ABERTO. ??? 2010.

MOURA, Larissa Cecillya Reis. Análise de Redução de Custos na Perfuração e Desmonte em Mina Subterrânea com a Utilização de Raise Borer na perfuração de slots. 1 jul. 2024.

SAMANTA, T. Purushotham, B. **Estimation of Shock Loss Factors At Shaft Bottom Junction Using Computational Fluid Dynamics and Scale Model Studies**. Disponível em: <<https://onemine.org/documents/estimation-of-shock-loss-factors-at-shaft-bottom-junction-using-computational-fluid-dynamics-and-scale-model-studies>>. Acesso em: 9 abr. 2026.

SANTOS, Rita de Cassia Pedrosa; SILVA, J. M. As tendências tecnológicas em ventilação de mina subterrânea. *In The Mine*, n. 114, p. 28-29, 2025.

SELWANA, Johannes; KUNENE, Thokozani Justin; TARTIBU, Lagouge Kwanda. A numerical analysis of airflow efficiency of a mine ventilation aircrossing. 2020.

SILVA, Géssica Fernandes Da. APLICAÇÃO DE EXPLOSIVOS BLENDADOS E AUMENTO DE MALHA NAS OPERAÇÕES DE PERFURAÇÃO E DESMONTE, VISANDO REDUÇÃO DE CUSTOS, EM MINAS DE FERRO. ??? 2022.

SILVA, J. M. Método realce em subníveis: lavra de mina subterrânea. DEMIN/EM/UFOP, 2026.

SILVA, VALDIR COSTA E. Desmonte de rochas. [S.l.]: Oficina de Textos, 2021.

SOARES, André Luiz. ANÁLISE DO ESTRESSE TÉRMICO PELAS NORMAS NR 15 (2011) E ISO 7243 (1989) EM UMA CENTRAL DE ESTERILIZAÇÃO DE INSTRUMENTOS ODONTOLÓGICOS. 2013.

THIENGO VIEIRA, Fabrício; D'AURIA BRAGA, Júlio. Characterization of explosive performance parameters: ANFO and explosive emulsion. **International Seven Journal of Multidisciplinary**, v. 1, n. 2, p. 135–148, 15 maio 2023.

Ventsim | 3D Mine Ventilation Design. ; 25 maio 2026. Disponível em: <<https://ventsim.com/>>. Acesso em: 25 maio. 2026

VIEIRA, Marcelo Martins de Sousa; COSTA, Leandro de Vilhena. Diagnóstico e revisão da estrutura de gerenciamento da ventilação de uma mina subterrânea. **REVISTA DELOS**, v. 19, n. 77, p. e8716–e8716, 19 fev. 2026.