



Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia de Minas



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

MARCUS VINÍCIUS MACEDO DA CRUZ

**DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO DE UMA MINA
SUBTERRÂNEA**

OURO PRETO

2022

MARCUS VINICIUS MACEDO DA CRUZ

Dimensionamento do sistema de ventilação de uma mina subterrânea

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Área de Concentração: Lavra de Minas /
Condicionamento das Minas

Orientador: Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz

OURO PRETO

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C957d Cruz, Marcus Vinicius Macedo da.
Dimensionamento do sistema de ventilação de uma mina
subterrânea. [manuscrito] / Marcus Vinicius Macedo da Cruz. - 2022.
59 f.

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

1. Minas e mineração. 2. Lavra subterrânea. 3. Segurança nas minas.
4. Minas - Ventilação. I. Ortiz, Carlos Enrique Arroyo. II. Universidade
Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.272

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Marcus Vinicius Macedo da Cruz

Dimensionamento do Sistema de Ventilação de uma Mina Subterrânea

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

Aprovada em 25 de julho de 2022

Membros da banca

Dr - Carlos Enrique Arroyo Ortiz - Orientador(a) Universidade Federal de Ouro Preto
Dr - Elton Destro - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr - José Margarida da Silva - Universidade Federal de Ouro Preto

Carlos Enrique Arroyo Ortiz, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 09/08/2022



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Enrique Arroyo Ortiz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/08/2022, às 10:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0377428** e o código CRC **DA5117F9**.

AGRADECIMENTOS

Dedico esse trabalho a minha família, em especial minha mãe, meus avós, e meus irmãos por todo o amor incondicional e apoio de sempre.

Ao Alessandro pelos conselhos e pelo acolhimento proporcionado.

A República Serigy por ser meu lar, por todos os momentos e pelo crescimento pessoal.

A Luiza pelo companheirismo mesmo nas horas mais difíceis, por todo o amor e pela confiança em que tudo daria certo.

Agradeço aos Professores do DEMIN por todas as contribuições durante minha graduação.

A UFOP pelo ensino de extrema qualificação.

Ao Welton pelas contribuições profissionais e técnicas acerca da ventilação de mina.

RESUMO

O empreendimento minerário tem se tornado cada vez mais produtivo, competitivo tecnológico, trazendo à realidade e tornando possíveis grandes e mais complexas operações. Juntamente a este fator, faz-se necessário um modelamento eficaz para garantir boas condições de trabalho aos que operam neste sistema. O sistema de ventilação de uma mina subterrânea é uma das ferramentas essenciais à operação em subsolo, e que tem por objetivo auxiliar e dar suporte à extração segura do minério. Nesse contexto, normas reguladoras regem condições mínimas de trabalho na realização de operações em subsolo, as quais devem caminhar junto a uma operação que visa cada vez mais lucro ao seu empreendimento. O presente trabalho tem como objetivo realizar um dimensionamento do sistema de ventilação de uma mina subterrânea, obedecendo às normas reguladoras no Brasil a fim de garantir uma operação salubre no ambiente de trabalho. O sistema de ventilação de uma mina diz respeito da condição do ambiente em relação à sua temperatura, quantidade de ar, nível de gases tóxicos presentes e até mesmo à visibilidade operacional. Para garantir um dimensionamento de vazão de ar ideal de uma mina subterrânea, deve ser levado em consideração desde a quantidade de trabalhadores no ambiente, número de equipamentos simultâneos na operação, quantidade de explosivos empregados, até mesmo a quantidade de produção do empreendimento. Após o estudo, é possível perceber que mesmo com um valor mínimo de vazão de ar a ser empregado no ambiente de trabalho, certas exigências a serem seguidas por normas podem afetar o cálculo feito em estudo, sendo necessárias mudanças operacionais para tentar equalizar a salubridade operacional com a norma empregada no país.

Palavras-chave: Ventilação de mina, dimensionamento da vazão de ar, mina subterrânea.

ABSTRACT

The mining enterprise has become increasingly productive, competitive and technological, bringing to reality and making possible large and more complex operations. Along with this factor, an effective modeling is necessary to guarantee good working conditions for those who operate in this system. The ventilation system of an underground mine is one of the essential tools for underground operation, which aims to assist and support the safe extraction of ore. In this context, regulatory standards govern minimum working conditions in carrying out underground operations, which must go hand in hand with an operation that increasingly seeks profit for its enterprise. The present work aims to carry out a dimensioning of the ventilation system of an underground mine, complying with regulatory standards in Brasil in order to guarantee a healthy operation in the work environment. The ventilation system of a mine concerns the condition of the environment in relation to its temperature, amount of air, level of toxic gases present and even operational visibility. In order to guarantee an ideal air flow dimensioning of an underground mine, it must be taken into account the number of workers in the environment, the number of simultaneous equipment in the operation, the amount of explosives used, even the amount of production of the enterprise. After the study, it is possible to perceive that even with a minimum value of air flow to be used in the work environment, certain requirements to be followed by norms, can affect the calculation made in the study, being necessary operational changes to try to equalize the operational salubrity with the standard used in the country.

Keywords: Mine ventilation, air flow sizing, underground mine.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	12
2.1. Objetivo Geral	12
2.2. Objetivos Específicos	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1. Objetivos da ventilação	13
3.2. Ventilação primária	14
3.3. Ventilação secundária	15
3.4. Recursos da distribuição de ar na mina	17
3.5. Ventiladores	18
3.6. Fontes de calor na mina	20
3.6.1. Gradiente geotérmico	21
3.6.2. Auto compressão	21
3.6.3. Máquinas (combustão)	21
3.7. Principais normas reguladoras da ventilação em uma mina subterrânea	23
3.7.1. NRM 06	23
3.7.2. NR 15	26
3.8. Resistências de um circuito de ventilação	29
3.9. Resistência de choque e atrito de um circuito	30
3.10. Redes de Ventilação	31
4. METODOLOGIA	33
5. ESTUDO DE CASO	38
5.1. Método de lavra	38

5.2. Sistema de Ventilação	40
6. DESENVOLVIMENTO	41
6.1 Dimensionamento do volume de ar para a ventilação secundária.....	41
6.1.1. Vazão de ar de acordo com a quantidade de explosivos.....	41
6.1.2. Vazão de ar de acordo com a quantidade de trabalhadores na frente de trabalho	42
6.1.3. Vazão de ar de acordo com a frota diesel	42
6.2. DIMENSIONAMENTO DA VAZÃO DE AR PRINCIPAL DA MINA	43
6.2.1 Vazão de ar considerando-se o número de pessoas.....	44
6.2.2 Vazão de ar para diluição dos gases dos motores a diesel	44
6.2.3 Vazão de ar para diluição dos gases dos explosivos.....	45
6.2.4 Vazão de ar para produção de rocha desmontada	45
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
7.1. Dimensionamento do volume de ar para a ventilação secundária.....	45
7.1.1. Vazão de ar de acordo com a quantidade de explosivos	45
7.1.2. Vazão de ar de acordo com a quantidade de trabalhadores na frente de trabalho.....	46
7.1.3. Vazão de ar de acordo com a frota diesel	46
7.1.4. Vazão de ar na frente de trabalho.....	46
<u>7.2. Dimensionamento da vazão de ar principal da mina</u>	<u>47</u>
7.2.1. Vazão de ar para pessoas	47
7.2.2. Vazão de ar para diluição dos gases dos motores a diesel	47
7.2.3. Vazão de ar para diluição dos gases dos explosivos.....	47
7.2.4. Vazão de ar para produção de rocha desmontada	48
7.2.5. Vazão total de ar requerido na mina	48
8. CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS.....	54

ANEXO 1.....	56
ANEXO 2.....	57

1. INTRODUÇÃO

O empreendimento mineiro mesmo sendo de cunho fundamental para a economia do país deve ser feito dentro dos limites e atendendo aos colaboradores que atuam no meio, aos dispositivos infraconstitucionais pertinentes. (MARTINS, 2018)

Como os bens minerais estão à disposição, com áreas podendo ser requeridas e lavradas pelos mais diversos empreendimentos, é dever o controle e a regulamentação exercida pelo Poder Público. Caso esse cenário ocorra de forma branda, a exploração dos recursos minerais tende a ser excessiva e degradante, o que pode causar impactos à sociedade brasileira, e até mesmo à economia do país (MARTINS, 2015).

A ventilação tem sido um dos maiores desafios para produção de uma mina bem como é uma das maiores reclamações dos colaboradores de uma mina, pois a ventilação impacta diretamente na saúde deles. O ambiente de mina é um ambiente considerado insalubre, isso porque é um ambiente em que há compressão do ar, o que contribui para o aumento de temperatura no ambiente, além da contaminação do ar na atmosfera, sendo necessário uma boa ventilação para diluição e remoção de gases nocivos à saúde.

A ventilação de mina tem como principal objetivo levar um fluxo de ar fresco de forma natural ou artificial, aos locais de trabalho em subsolo, e em quantidades suficientes para manter as condições necessárias de higiene e segurança dos colaboradores. Uma ventilação inadequada torna as condições ambientais da mina precárias para os operários e equipamentos, representando para a empresa uma perda de produtividade. (GALVÃO, 1988)

O projeto de ventilação subterrânea é um processo que envolve muitas etapas, a partir do qual um planejamento inadequado pode gerar perdas de produção além de causar uma série de problemas ambientais. Um projeto de ventilação eficaz exige que as quantidades necessárias de ar, exigências de pressão e temperatura sejam cumpridos de acordo com as normas. O estudo técnico, voltado à engenharia da ventilação, é um processo fundamental na lavra subterrânea, pois a partir dele é

possível realizar planejamentos de longo prazo da mina, e tornar a atividade mais rentável.

A ventilação de uma mina pode ser muito complexa, quando se trata de uma malha de escavação extensa. Segundo McPherson (1993) em uma determinada rede, há um grande número de combinações de resistências das galerias, ventiladores, e reguladores que lhe dará qualquer distribuição de fluxo desejado. No entanto, as técnicas de análise de rede que são úteis para aplicação industrial moderna devem permanecer fáceis de usar, e suficientemente rápida e flexível para permitir várias soluções alternativas a serem investigadas.

Há uma preocupação com os passos do sistema de ventilação em uma mina subterrânea e com o ensino e aprendizagem nesta área. Todavia, tomando como base obras realizadas nos últimos anos, o Brasil tem se preparado para uma constante melhoria do sistema de ventilação, operação auxiliar fundamental para a operação subterrânea. Melhorias realizadas tanto em sistemas operacionais na prática, quanto em simulações realizadas em laboratórios têm sido feitas com o objetivo de evoluir o assunto acerca da ventilação e mina, podendo destacar: o estudo e implementação de sistemas de refrigeração de vias subterrâneas; medições automatizadas e a modernização das aplicações, principalmente com a utilização de um modelo computacional. (SILVA et al, 2021)

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo apresentar o processo de dimensionamento do sistema de ventilação de uma mina subterrânea, bem como as normas que regem o mesmo.

2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do projeto são:

- Apresentar as variáveis presentes no dimensionamento do sistema de ventilação de uma mina subterrânea no Brasil;
- Apresentar principais normas que regulam o sistema de ventilação de uma mina;
- Abordar KPI's (*Key Performance Indicator*) a fim de avaliar a performance do sistema de ventilação;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Objetivos da ventilação

O sistema de ventilação principal das minas é feito através de ventilação mecânica ou natural, podendo ambos atuarem juntos forçada por ventiladores, que serão denominados como Exaustores Principais, por terem com princípio operacional, forçar a entrada de ar limpo para a mina e exaurir o ar poluído para a superfície, onde será descartado, criando assim a troca e a renovação contínua do ar no subsolo.

A entrada de ar fresco nas minas (adução de ar) da superfície para o subsolo, geralmente é feita através da rampa de acesso que interligará todos os níveis, galerias de adução de ar, poços e por raises de adução de ar limpo entre os níveis.

Após haver a renovação do ar nas frentes de trabalho no subsolo, o ar será conduzido para descarte na superfície, de forma ascendente, em caminhos construídos exclusivamente para passagem do ar exaustão, denominados como galerias de retorno de ventilação, criando assim a renovação constante do ar no subsolo.

O sistema de ventilação deve ser calculado e dimensionado para:

- Suprir o oxigênio no subsolo mantendo os limites de tolerância em no mínimo 19,5% em volume.
- Fazer a renovação contínua do ar no subsolo.
- Diluir de forma eficaz todos os gases inflamáveis ou nocivos no ambiente subterrâneo.
- Manter os níveis de poeira, temperatura e umidade relativa do ar, em níveis adequados ao trabalho humano.
- E ser mantido e operado de forma regular e contínua, conforme estabelecido nas Normas Regulamentadoras NR22.24.

A ventilação das frentes de desenvolvimento, enquanto não estiverem interligadas com o sistema de ventilação principal, será feita por ventiladores secundários, também chamados de auxiliares, que foram projetados para a capacidade de ventilar os trabalhos em uma frente de operação com a utilização

simultânea de equipamentos com motor a combustão diesel e seus respectivos operadores.

Este sistema consta da instalação do ventilador auxiliar, instalado na corrente principal de fluxo de ar limpo, captando o ar e insuflando o ar fresco até a frente de trabalho pelos dutos de ventilação, dimensionados em conformidade com a capacidade operacional dos ventiladores e do fluxo de ar necessário.

O ar poluído e viciado das frentes de desenvolvimento também será direcionado e descartado nos raises de exaustão. O fluxo de ventilação principal deverá garantir os índices de temperatura adequada ao corpo humano, garantindo que as atividades possam ser realizadas de forma intermitente, com descanso no próprio local de trabalho.

3.2. Ventilação primária

De acordo com McPherson (1993), a rede de galerias que compõem o sistema de ventilação pode ser dividida em três grandes categorias, com base em cada área que ele cobre. São elas:

- a) Sistema de ventilação principal ou primária;
- b) Sistema por distrito;
- c) Sistema auxiliar ou secundário;

O primeiro é executado ao longo das minas, nas galerias principais, o segundo, em distritos ou painéis em operação e terceiro nas áreas em que as galerias são cegas, ou seja, fundos de saco.

O ar fresco entra no sistema através de uma ou mais galerias em declive, que são as entradas da mina, ou outras ligações para a superfície, como os poços. O ar flui ao longo das galerias de entrada para as áreas de trabalho ou em locais onde a maioria dos poluentes são adicionados ao ar. Já o ar contaminado passa de volta através do sistema de retorno de ar. O ar de retorno passa de volta à superfície através de um ou mais poços de exaustão.

3.3. Ventilação secundária

O circuito secundário de ventilação de mina subterrânea funciona aparado em ventiladores, dutos e exaustores que trabalham no transporte de ar por todos os painéis que passam pelas frentes de trabalho. Este sistema tem por função melhorar a qualidade e a quantidade de ar que chega às frentes de serviço, além de diluir os gases tóxicos presentes no ambiente de trabalho. O circuito secundário tem como objetivo levar ar puro ou refrigerado até as frentes de lavra e é composto pelas plantas de refrigeração, ventiladores secundários, dutos e exaustores que transportam o ar até as frentes de trabalho.

O circuito secundário, ou auxiliar, de ventilação é responsável por levar o ar de adução às frentes de trabalho onde a corrente principal não consegue alcançar e tem por fim reduzir o custo com ventilação e destinar apenas a quantidade de ar necessária em uma área específica. (COSTA, 2019)

Um dos maiores problemas associados à ventilação secundária é a manutenção dos itens desse sistema. Casualmente, os dutos utilizados para levar o ar limpo até às frentes de serviço podem ser danificados pelo maquinário utilizado na mina, diminuindo a qualidade e a quantidade do ar que chega às frentes de trabalho.

Em função da forma como é movido o ar no sistema secundário, temos:

- Ventilação soprante ou por insuflamento, em que um ventilador lança o ar na frente que fica com pressão maior que o exterior, fazendo com que o ar viciado seja retirado do ambiente por meio de uma abertura, como mostra a Figura 1;



Figura 1 – Esquema de ventilação por insuflamento

Fonte: AMCA: System Effects (1995)

- Ventilação aspirante ou exaustora, em que um ventilador retira o ar que penetra na frente por meio de aberturas, criando uma pressão negativa no recinto em relação ao ar exterior, por isso o ar viciado é retirado.

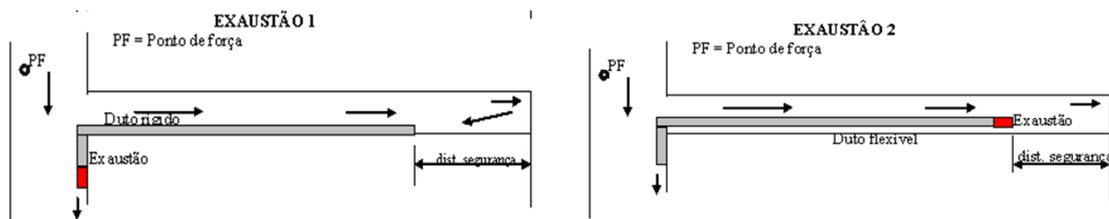


Figura 2 – Esquema de ventilação exaustora

Fonte: AMCA: System Effects (1995)

- Ventilação de superposição, que combina a soprante e a aspirante. Há ao mesmo tempo um ventilador que insufla o ar no recinto e outro que retira o ar viciado, devendo ficar em extremidades opostas para evitar a recirculação de ar e melhorar a diluição dos gases na frente.

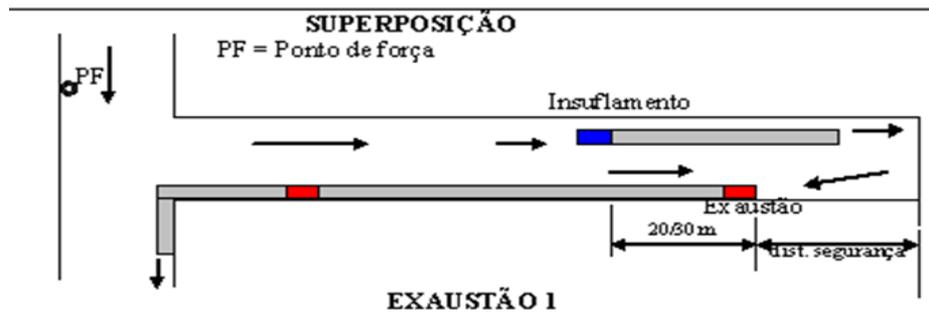


Figura 3 – Esquema de ventilação de superposição

Fonte: AMCA: System Effects (1995)

3.4. Recursos da distribuição de ar na mina

Os principais elementos do sistema de ventilação são divisores e controladores de fluxo de ar e os ventiladores. Esses recursos são responsáveis por fluir o ar e direcioná-lo para as frentes de serviços. Os dispositivos que exercem essa função na mina podem ser classificados como:

- Dispositivos de bloqueio
 - Dispositivos usados nos cruzamentos: alvenarias, portas e tapumes associados a dutos, desvios e portas duplas;
 - Dispositivo de distribuição de ar nas frentes de galerias em avanço tipo fundo de saco: alvenarias e tapumes guias, alvenarias e dutos guias, ventiladores auxiliares.
 - Definitivo: tapumes, barreiras, alvenarias (sem vazamento), selos;
 - Temporário: portas, portinholas, janelas;
 - De bloqueio de ar com circulação de homens ou máquinas: portas giratórias, portas duplas articuladas e montagens especiais;
 - Bloqueio com desvio ou regulação de corrente de ar: portas tapumes ou alvenarias e paredes associadas a tapumes, paredes ou dutos guias e selos.
- Dispositivos de Controle de Fluxo
 - Barramento de seção regulável;
 - Portas com janelas de seção regulável;
 - Tubulações e ventiladores auxiliares;

- Alvenarias e tapumes de bloqueio parcial.

Os dispositivos de controle de fluxo, fazem com que a distribuição das correntes de ar necessária a cada frente de serviço, seja feita principalmente usando-se a variação da resistência ao fluxo no ramal, o que permite regular a vazão, e sua distribuição ao longo da mina.

3.5. Ventiladores

O objetivo dos ventiladores é providenciar um aumento de pressão que permita o fluxo de ar através das vias áreas (dutos de ventilação) e frentes de trabalho, como também o aumento da vazão de ar da mina, a depender da sua função.

Ventiladores são equipamentos que fornecem a energia necessária ao ar para que ele se mova no interior das galerias da mina, em que o seu funcionamento provoca uma diferença de pressão no ambiente, fazendo com que o ar se mova devido a esta diferença de pressão. (MACHADO, 2011)

Os ventiladores centrífugos são equipamentos nos quais o ar adentra na direção do rotor, com o ar perpendicular à direção do eixo, e é lançado radialmente. A aplicação em mina subterrânea dos ventiladores centrífugos está ligada à necessidade de se obter altas pressões na saída do ar, e conseqüentemente nas frentes de trabalhos.

Já nos ventiladores axiais, a direção do escoamento do ar é aproximadamente paralela ao eixo do rotor. É um equipamento que permite o ajuste do ângulo de ataque das pás do rotor, proporcionando um significativo aumento de vazões, dependendo do passo escolhido para a operação. São os ventiladores mais comumente usados em mina subterrânea.

Exemplos de curvas características de um ventilador axial, para vários ângulos de ataque das pás do rotor (o aumento do ângulo de ataque exige maior potência do motor elétrico, que deve ser adequadamente dimensionado) são mostrados na Figura 4.

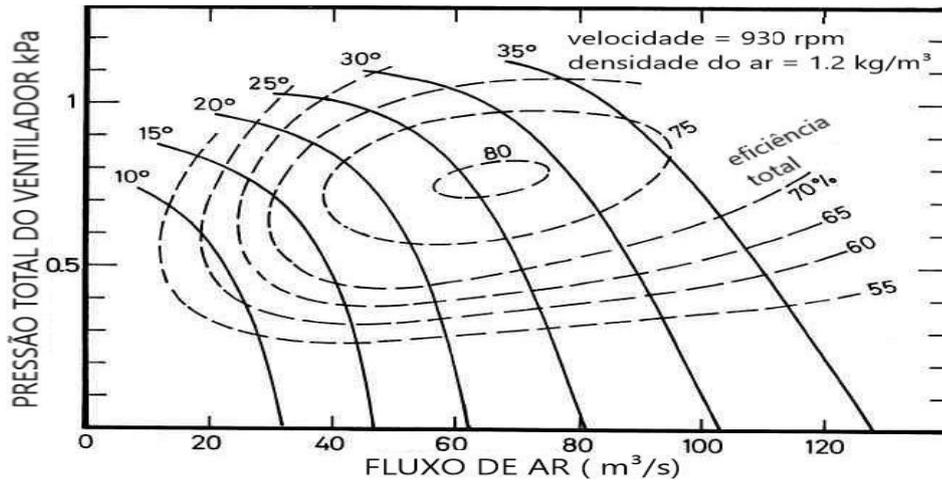


Figura 4 - Exemplo de curva característica de um ventilador axial em vários ângulos

Fonte: (Mc Pherson, 1997).

Os ventiladores principais são usados para conduzir o ar através dos dutos de ventilação e podem ser colocados no subsolo ou na superfície. Dependendo da sua posição no circuito de ventilação podem ser conectados em série ou paralelo. Ventiladores em série são usados para ganho de pressão com a mesma vazão, enquanto os ventiladores em paralelo para ganho de vazão com a mesma pressão, como demonstram as Figuras 5 e 6.

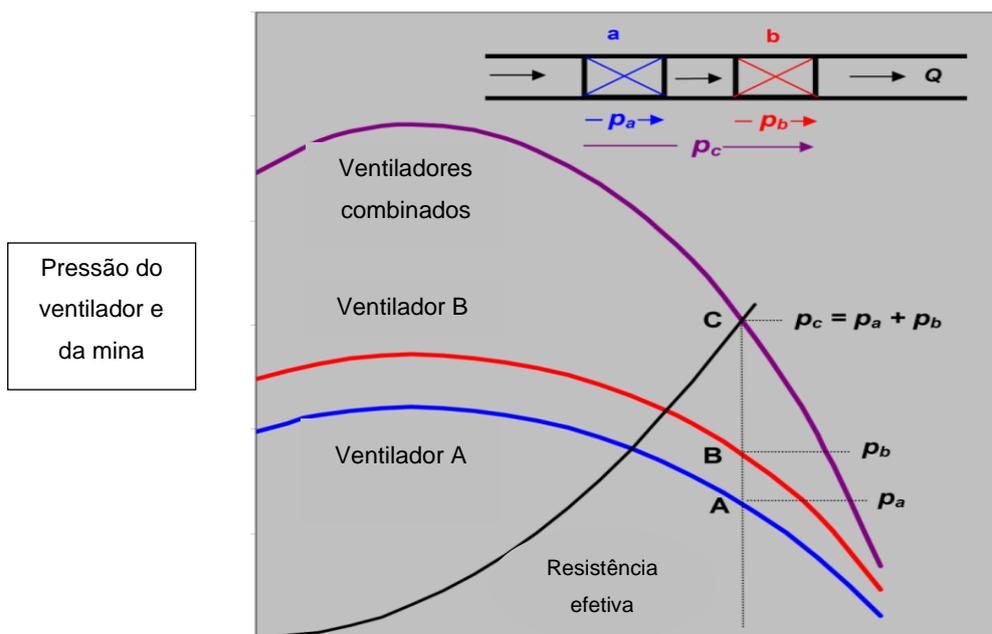


Figura 5 - Curva da resistência da mina de dois ventiladores conectados em série

Fonte: (McPherson, 2009).

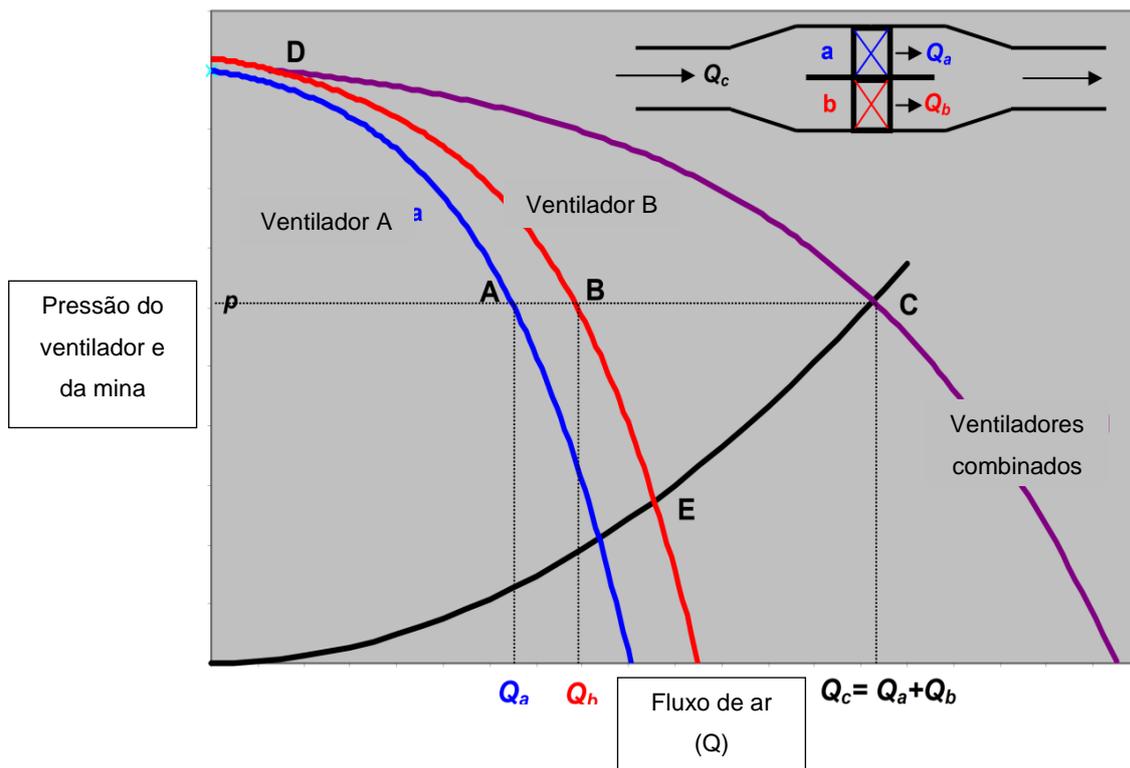


Figura 6 - Curva característica da mina com dois ventiladores conectados em paralelo

Fonte: (McPherson, 2009).

As Figuras 4, 5 e 6 demonstram o “Ponto de operação do ventilador”, que pode ser definido como o ponto de equilíbrio entre a pressão fornecida pelo ventilador e as perdas totais de pressão provocadas durante o escoamento do ar. O ponto de operação define o regime de funcionamento do equipamento em termos de pressão e vazão, quando conectado a uma galeria de ventilação.

3.6. Fontes de calor na mina

As temperaturas em minas subterrâneas são influenciadas por calor liberado naturalmente ou devido às operações mineiras, e constituem motivo de grande preocupação porque condiciona o funcionamento da mina, e afeta questões de segurança e as taxas produtivas. Segundo a literatura, podemos ter mais de 23 fontes de calor no subsolo. O calor proveniente das rochas, os motores a combustão, o uso de explosivos nas detonações, a rede de iluminação, a infiltração de águas subterrâneas, movimentação do maciço, a rede de ar comprimido e a presença de

grande número de trabalhadores são algumas das fontes de calor características de uma lavra em subsolo.

As principais fontes de calor presentes na mina subterrânea, são:

- rocha (gradiente geotérmico);
- conversão de energia potencial em energia térmica à medida que o ar desce em fluxos de ar verticais (auto compressão);
- motores de equipamentos a diesel.

3.6.1. Gradiente geotérmico

O fluxo de calor a partir das rochas é o componente mais importante no aumento da temperatura no local de trabalho. Quanto mais profundo é o ambiente em análise, maior será sua temperatura.

A importância desse fator geotérmico está relacionada com a possibilidade de estimar com precisão a temperatura do estrato rochoso em profundidade e, assim, inferir a taxa de calor liberado para o ar de ventilação. A taxa em que a energia térmica é transferida da rocha para o ambiente se deve à diferença de temperatura entre a superfície da rocha e a superfície da massa de ar.

3.6.2. Auto compressão

Pode-se dizer que a auto compressão não é uma fonte de calor, e sim um processo de mudança de energia. Quando entra em uma mina, ele sofre um aumento de pressão devido à compressão do fluido, o que gera um aumento de temperatura, e provoca a diminuição da capacidade de resfriamento do ar. (MVS, 2002)

Pode-se dizer que o aumento adiabático da temperatura do ar é um processo que ocorre durante a passagem do ar na entrada do sistema principal de ventilação causado pela compressão do fluido, e que ocasiona a conversão de energia potencial em energia térmica, dissipando calor. (HARTMAN, 1991)

3.6.3. Máquinas (combustão)

Considerando-se que eficiência térmica é a porcentagem de energia calorífica convertida em energia mecânica útil, na prática, isso significa que um motor de combustão interna diesel, com uma dada potência, produz essa potência em forma

de calor. Ou seja, o equipamento não é 100% eficiente, pois parte da energia é convertida em calor. Geralmente, o equipamento tem 70% rendimento, sendo os outros 30% convertido em calor.

No caso do equipamento de motor à diesel, haverá calor sensível e latente. O calor produzido por equipamentos a diesel tem uma parte significativa do calor gerado produzida como calor latente através do vapor de água nos gases do escapamento, e evaporação associados ao sistema de refrigeração do equipamento. (COSTA, 2019)

Motores a diesel produzem calor sensível e latente, e as principais fontes, são:

- radiador e corpo da máquina.
- gases de escape gerados pela combustão interna.
- processos de fricção da máquina fazendo seu trabalho.

A Figura 7 abaixo demonstra a proporção das fontes de calor de uma mina subterrânea metálica, sendo a auto compressão o item que mais impacta na temperatura no subsolo.

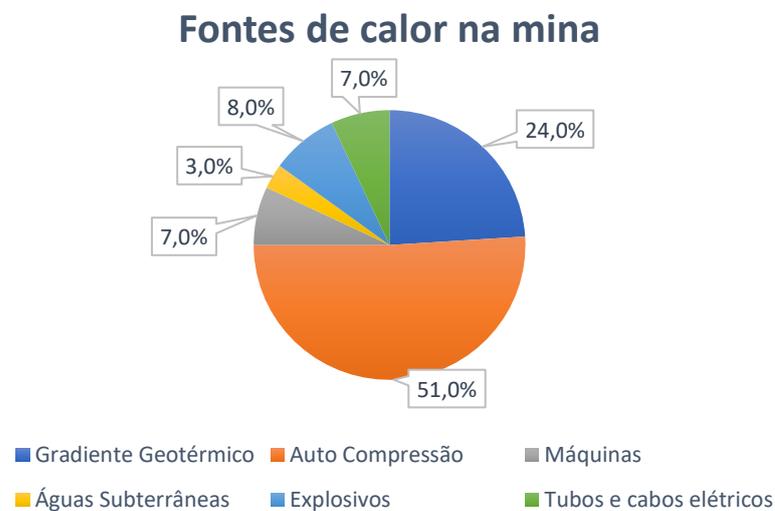


Figura 7 - Fontes de calor em uma mina metálica

Fonte: adaptado de Costa apud Payne e Mitra , 2019

3.7. Principais normas reguladoras da ventilação em uma mina subterrânea

No Brasil atualmente as legislações de segurança e saúde ocupacional aplicadas à indústria da mineração são a Norma Regulamentadora nº 22 – Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração do Ministério do Trabalho e Emprego, além das Normas Reguladoras da Mineração (NRM) da Agência Nacional de Mineração (ANM). As NRM's regulam o Código de Mineração e seu cumprimento é obrigatório para o exercício de atividades minerárias, cabendo ao Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM a fiscalização de suas aplicações através de profissionais legalmente habilitados. (MARTINS, 2018)

Pode-se dizer que as NRM's têm por objetivo regir o aproveitamento consciente das jazidas minerárias, considerando-se as condições técnicas e tecnológicas de operação e principalmente de segurança, para assim tornar o desenvolvimento do empreendimento minerário em busca permanente da produtividade, da segurança e saúde dos trabalhadores. (MARTINS, 2018)

3.7.1. NRM 06

Essa norma trata exclusivamente da ventilação em mina subterrânea, e utiliza alguns termos que são inerentes a essa atividade mineradora, como exposto na Tabela 1:

Tabela 1 – Termos usados para o ar na mina subterrânea

Termo	Significado
Ar de adução	Ar em condições de uso por máquinas e homens para ventilar frentes de trabalho
Ar fresco	É todo ar de adução proveniente da superfície em condições de uso por máquinas e homens, que não tenha sido utilizado para ventilar outras frentes
Ar viciado	Designa todo ar que foi utilizado para ventilar frentes de trabalho
Corrente Principal	É aquela em que ocorre ar de adução e que circula pelos principais acessos da mina

Corrente Secundária	É aquela derivada da corrente principal de ventilação, utilizada para ventilar as frentes de trabalho
Frente de Lavra	É o local onde ocorrem as operações destinadas à extração do minério
Frente de Serviço	É o local onde ocorrem as operações de infraestrutura da mina
Frente de Desenvolvimento	É o local onde ocorrem as operações que visam acessar o corpo de minério ou outras escavações
Frente de Trabalho	É o local onde ocorrem quaisquer operações dentro da mina com presença permanente ou esporádica de trabalhadores.
Painel de Lavra	É um o setor da mina que abrange um conjunto de frentes de trabalho que operam de forma integrada utilizando a mesma infraestrutura e independente de painéis distintos ou adjacentes
Grisu	É a mistura de gases inflamáveis e oxigênio contido no extrato mineral
Área	É a seção transversal da galeria expressa em metros quadrados
Operação Unitária	É cada uma das atividades necessárias à realização da lavra, tais como: perfuração, carregamento e desmonte, carga e transporte de material, saneamento e suporte de teto, laterais e piso e ventilação etc
Fundo de Saco	É a galeria onde só há um acesso de entrada e saída.

Fonte: NRM 06

Como projeto de ventilação de uma mina, deve ser elaborado um fluxograma atualizado periodicamente contendo os seguintes dados:

- localização, vazão e pressão dos ventiladores principais;
- direção do fluxo de ar;
- localização e função de todas os dispositivos de controle do fluxo de ventilação.

“As atividades em subsolo devem ter um sistema de ventilação que atenda o suprimento de ar nas frentes de trabalho da mina, além de uma renovação contínua

do ar. Também é necessário que a ventilação tenha como objetivo a diluição de gases inflamáveis e tóxicos no ambiente de trabalho, bem como manter a temperatura adequada ao trabalho” (NRM 06).

As frentes de trabalho em operação, devem ser ventiladas por ar de adução proveniente da corrente principal, ou terem auxílio de um sistema de ventilação secundária. Sobre a qualidade do ar, não é permitido que o mesmo ambiente de fluxo de ar contínuo tenha uma mistura entre o ar limpo que chega à mina, e o ar poluído proveniente das frentes de trabalho. Além disso, a concentração de oxigênio nestes locais não deve ser menor que 19% em volume (NRM 06)

A quantidade do ar fresco nas frentes de trabalho em atividade deve ser de, no mínimo, 2,0 m³/min por pessoa, devendo utilizar as fórmulas abaixo, prevalecendo a vazão que for maior, conforme a equação 1:

$$QT = Q1 \times n1 + 3,5 \quad (1)$$

Em que:

QT = vazão total de ar fresco em m³/min;

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

n1 = número de pessoas no turno de trabalho.

- Em função do consumo de explosivos

$$QT = (0,5 \times A) \times \frac{V}{t} \quad (2)$$

No qual:

QT = vazão total de ar fresco em m³/min;

A = quantidade total em kg de explosivos empregados por desmonte;

t = tempo de aeração (reentrada) da frente de trabalho em atividade em minutos;

V = volume gasoso gerado por quilo de explosivo em m³/kg.

- Em função de rochas desmontadas

$$QT = q \times T \quad (3)$$

Em que:

QT = vazão total de ar fresco em m³/min;

q = vazão de ar em m³/min para 1.000 t desmontadas por mês;

T = produção em t desmontadas por mês.

Já a velocidade do ar no subsolo não deve ser inferior a 0,2 m/s nem superior à média de 8,0 m/s onde haja circulação de pessoas. Ainda para uma maior segurança, o poço onde estão localizados os ventiladores principais e de emergência deve estar equipado com instrumentos para medição da pressão do ar. Todas as galerias de desenvolvimento, após 10 m de avanço, devem ser ventiladas através de sistema de ventilação auxiliar e o ventilador utilizado deve ser instalado em posição que impeça a recirculação de ar.

Para se ter um controle da ventilação na mina, devem ser executadas mensalmente, e porventura diariamente, medições para avaliação da velocidade, vazão do ar, temperatura de bulbo seco e bulbo úmido, levando em conta entrada da ventilação principal, frentes de lavra e de desenvolvimento e ventiladores principais.

3.7.2. NR 15

A NR 15 trata de atividades que devem ser consideradas insalubres, gerando direito ao adicional de insalubridade aos trabalhadores. É composta de uma parte geral, além de uma parte de 13 anexos, que definem os Limites de Tolerância para agentes físicos, químicos e biológicos. Os anexos da NR-15 tratam da exposição dos trabalhadores a ruído, calor ambiente, radiações ionizantes, trabalho sob condições hiperbáricas, radiações não ionizantes, vibrações, frio, umidade, agentes químicos poeiras minerais, além dos agentes biológicos. Especialmente neste estudo, serão retratados os anexos voltados, principalmente, para tolerância a gases, temperatura e poeira, que são os maiores agentes da insalubridade em minas subterrâneas.

O anexo 3 da NR15, trata dos limites de tolerância para a exposição ao calor, a qual tem a avaliação quantitativa realizada de acordo com os aspectos de

determinação da temperatura por meio do índice IBUTG - Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo, equipamentos de medição e formas de montagem. Em relação à temperatura, podem ser caracterizadas como insalubres as atividades realizadas em ambientes fechados em que o IBUTG (médio) medido ultrapassar os limites de exposição ocupacional estabelecidos com base no Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo apresentados no Anexo 1 e determinados a partir da taxa metabólica das atividades, apresentadas no Anexo 2, ambos contidos no final deste documento.

Já o anexo 12 da NR15, trata sobre os limites de tolerância para poeiras minerais. O presente anexo aplica-se às atividades nas quais os trabalhadores estão expostos ao amianto (forma fibrosa dos silicatos minerais, pertencentes aos grupos de rochas metamórficas das serpentinas) no exercício do trabalho.

Ainda falando sobre a tolerância de poeiras minerais, o limite de tolerância para poeira respirável, expresso em mg/m³, é dado pela Equação (4)

$$LT = \frac{8}{\%quartzo+2} \quad (4)$$

Já o limite de tolerância para poeira total (respirável e não - respirável), expresso em mg/m³, é dado pela Equação (5):

$$LT = \frac{24}{\%quartzo+3} \quad (5)$$

Em uma mina subterrânea, são diversos fatores que podem contaminar o ar em circulação no ambiente da mina, e que podem ser divididos em: gases naturais, gases gerados pela combustão do óleo diesel, gases gerados pelas detonações de explosivos, e poeiras minerais. Os gases são substâncias fluidas que estão presentes em grandes quantidades na natureza, e podem ser classificados como: asfixiantes simples, e asfixiantes químicos.

Os gases considerados asfixiantes simples, são aqueles inertes ao ser humano, e que o único perigo associado está no deslocamento do oxigênio do ar, o que pode provocar asfixia pela diminuição de oxigênio no ar inalado. São substâncias consideradas como asfixiantes simples: metano, gás carbônico, nitrogênio, hidrogênio e outros.

Já os gases denominados como asfixiantes químicos, são substâncias que têm a capacidade de produzir anóxia tissular, que interfere no aproveitamento do oxigênio

pelas células do corpo. Essas substâncias podem provocar asfixia mesmo quando presentes em baixas quantidades no ar, e tem como maior exemplo o monóxido de carbono (CO), e amônia. Os maiores contribuidores para a poluição do ar de uma mina subterrânea são as atividades relacionadas a: gases resultantes da detonação, da queima dos motores a diesel e fissuras oriundas de rochas.

A Norma Regulamentadora 15, em seu Anexo 11, estabelece que, para alguns gases, deve ser respeitado um limite de tolerância, nos quais não podem ser ultrapassados em nenhum momento da jornada de trabalho. A Tabela 2 apresenta alguns gases presentes na mina, bem como seu limite de tolerância e seus sintomas induzidos.

Tabela 2 – Gases presentes na mina subterrânea

Gás	Limite de tolerância	Sintomas
NH3 (Amônia)	20 ppm	Produz Lesão Tissular
CO (Monóxido de carbono)	39 ppm	Diminui a capacidade de respiração, levando ao risco de vida
CO2	3900 ppm	Apneia, cansaço e enfraquecimento
NO2	4 ppm	Pode causar morte, graças ao deterioramento das vias respiratórias
Oxigênio	Mínimo de 19% em volume	Abaixo de 10% de volume existe risco de vida
NO	4 ppm	Traz risco a vida após várias horas de exposição
H2S	8 ppm	Causa irritação na mucosa, olhos e vias respiratórias.

Fonte: NR 15

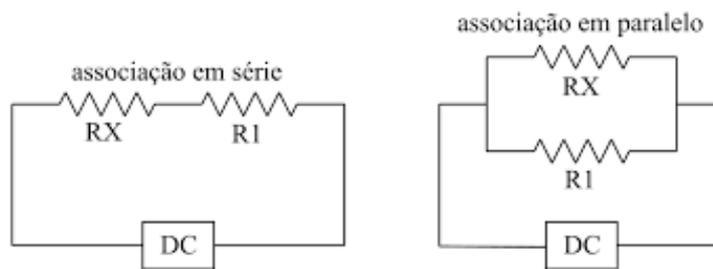
Para que haja um melhor controle desses gases dentro da mina, é necessário que haja uma quantidade suficiente de vazão de ar nas frentes de trabalho, não ocorra o reaproveitamento do ar, aconteça periodicamente a manutenção preventiva das frotas a diesel e que seja feito o arranjo da ventilação secundária dimensionado corretamente e com seus dutos no melhor estado possível.

3.8. Resistências de um circuito de ventilação

Os circuitos de ventilação podem ser comparados aos circuitos elétricos, por isso é prudente o uso das leis de Kirchhof, equação de Atkinson e a Lei de Ohm para os cálculos de resistência, pressões e energia consumida em um circuito de ventilação.

De maneira geral, os circuitos de ventilação em série, mantém a vazão e soma as pressões, e circuitos paralelos, se divide as vazões e mantém a pressão. O mesmo acontece para associações de ventiladores na mina. A Figura 8 mostra ambos os tipos de associações dos circuitos de ventilação.

Figura 8: Tipos de associações dos circuitos de ventilação



Fonte: Silva (2016)

Para fins de cálculo, a resistência equivalente de um circuito de ventilação em série pode ser calculada como:

$$Req = R1 + R2 + R3 + [...] \quad (6)$$

Enquanto que para o cálculo da resistência equivalente de um circuito de ventilação em paralelo pode ser expressa de acordo com a Equação 7.

$$Req = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} + [...] \quad (7)$$

A resistência pode ser um bom indicador para entender como as galerias estão se comportando na prática, já que ela é quantificada e determinada por números de galerias que são utilizados no circuito de ventilação, assim como mostra a Equação 8. As galerias oferecem resistências ao movimento do ar, que são influenciadas pelo tamanho das seções, perímetro, rugosidade da superfície, e pelo movimento de

homens, materiais e equipamentos. A resistência pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$R = K \times L \times \frac{Per}{A^3} \quad (8)$$

Em que:

- R= Resistência da galeria (Ns²/m⁸);
- K = fator de fricção (Ns²/m⁴);
- Per = perímetro da galeria (m);
- L = comprimento (m);
- A = área da seção transversal (m²);
- N = número de galerias.

3.9. Resistência de choque e atrito de um circuito

A circulação do fluxo do ar numa escavação subterrânea mina é realizada graças à diferença de pressão provocada por uma força motriz na entrada e saída do circuito. Essa força deve ser maior que todas as perdas de cargas impostas à passagem da corrente de ar ao longo de todo percurso, sendo suprido por alguma forma de energia.

A resistência imposta pelo ar nas vias de ventilação, pode ser dividida em resistência estática e de velocidade. Para fins de estudo, será analisada somente a resistência estática, que é dividida em resistência por choque, e resistência por atrito.

A perda de carga, ou resistência, por atrito tem uma relação entre a geometria das galerias, o coeficiente K entre ar e superfície interna da galeria e a vazão de ar, em que no geral representa a maior parte da perda de carga estática, observado em um escoamento do ar nas galerias. A perda de carga imposta pelo atrito, pode ser descrita como informa a equação abaixo:

$$Hf = R \times \frac{Q^2}{1000} \quad (9)$$

Em que:

- R= Resistência da galeria (Ns²/m⁸);
- Q= Vazão de ar (m³/s).

Já a perda de carga, ou resistência, imposta pelo choque do ar, acontece devido a toda mudança de direção do fluido, o que gera vórtices adicionais. A propagação dos turbilhões consome energia e, por conseguinte, a resistência das galerias pode aumentar significativamente. Essas perdas de carga podem ser geradas graças às variações das seções transversais, obstruções, partições de fluxos de ar e admissão e descarga do fluxo de ar. A perda de carga por choque tem um valor que não é constante e depende do tipo de alterações da área, obstruções, tipo de curvas, e demais alterações do fluxo de ar.

3.10. Redes de Ventilação

O sistema de ventilação de uma mina é um conjunto de elementos que funcionam de forma dinâmica, a serem alterados a todo momento. Assim, a ventilação é uma atividade ininterrupta que deve ser planejada a longo prazo para que não interfira negativamente na produção.

O principal objetivo da otimização da rede de ventilação, é a melhora do circuito de fluxo de ar nas faces de trabalho, bem como a melhora na eficiência para reduzir o custo de energia anual. Além disso, a assertiva análise das redes de ventilação é de suma importância para prever quantitativamente o fluxo de ar em diferentes galerias quando há a interligação física desses elementos, além de ser um importante meio para estimar a capacidade de combinação de ventiladores para gerar uma determinada quantidade de fluxo de ar em determinada frente de trabalho.

As redes de ventilação, na prática, podem ser divididas em:

- **Nó:** Pode ser definido como um ponto de interseção entre três ou mais galerias, em que o ponto de encontro desses trechos ocorre a junção de duas ou mais correntes de ar, como retrata o Ponto “O” da Figura 9.

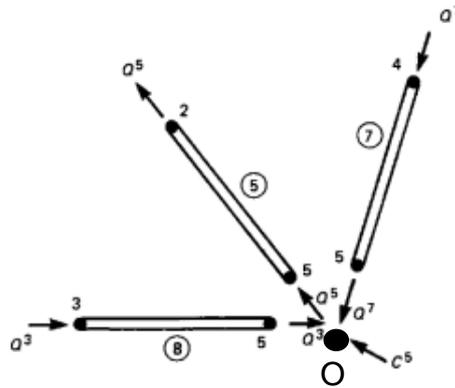


Figura 9: Esquema de um nó de rede de ventilação

Fonte: Silva (2016)

- Ramo: pode ser definido como uma galeria entre dois pontos de nós, assim como apontado do ponto “A” ao ponto “B” na Figura 10.

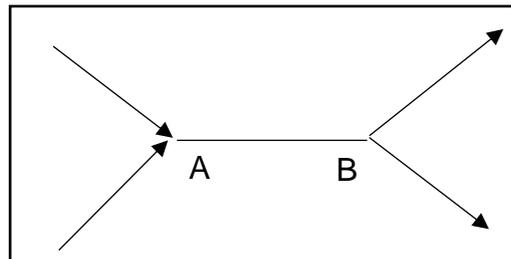


Figura 10: Esquema de um Ramo de uma rede de ventilação

- Malha de Ramos: é definido como um sistema de galeria. É a forma mais representativa de como funcionam as redes de ventilação de uma mina na prática. Na Figura 11 pode ser visualizada uma rede simplificada de ventilação, a qual é composta por nós, ramos, e que em uma visão geral, compõe uma malha de ramos.

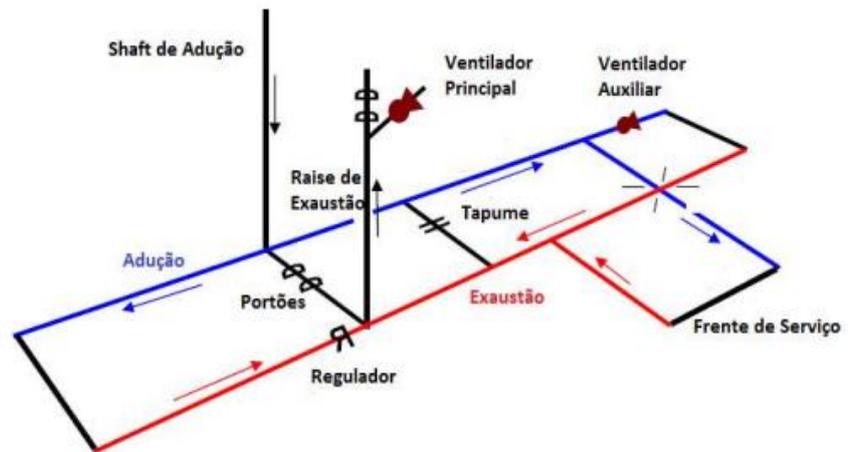


Figura 11: Esquema de uma malha de ramos na ventilação de mina

Fonte: McPherson (1993)

4. METODOLOGIA

Com o objetivo de se chegar a um dimensionamento de ventilação consistente e mais próximo da realidade, alguns métodos e equipamentos foram empregados ao longo do trabalho.

A vazão do ar é um dos principais parâmetros para determinar o balanço ou distribuição de ar no interior da mina. Com ele é possível identificar fugas ou problemas de ventilação ao longo do circuito da mina. Assim, para uma coleta confiável do valor da vazão do ar, um ponto dentro da galeria de estudo é determinado para o levantamento e a obtenção ocorre através:

- I. Seção ou fatia do trecho (m^2), onde ocorre a medida da vazão;
- II. A velocidade do ar na seção escolhida.

Ao realizar a medição da velocidade do ar no ponto ou seção escolhida, a vazão é calculada através da Equação 10:

$$Q = v \times A \quad (10)$$

Para uma medição de vazão de ar mais assertiva, deve-se evitar trechos com muita variação de seção e mudança de direção do ar provocam turbulência no local de medição, pois tornam imprecisas as medições de velocidade. Assim, a melhor escolha do ponto tem características constantes de geometria e rugosidade por um percurso longo, além de uma vazão alta para mitigar margens de erro dos equipamentos de medição. Essa condição permite que o ar flua de forma laminar,

produzindo leituras mais confiáveis de velocidade e conseqüentemente o cálculo da vazão. Após escolha do ponto, uma fatia ou corte no trecho da galeria de estudo representará uma seção onde a área deve ser medida. O levantamento da área das galerias, pode ser feito por métodos diretos de medidas, utilizando-se trenas manuais ou a laser, ou até mesmo com auxílio de equipamentos topográficos. A área é determinada pelo fator da altura e da largura da seção de corte.

Para as medidas de velocidade do ar na mina em estudo utilizou-se um anemômetro de pás, através do Kestrel 5000, mostrado na Figura 13. O aparelho pode medir valores mínimo, máximo, e médio, que é o valor contabilizado, gravados e visualizados por cada valor medido. “A técnica de levantamento utilizada para a obtenção das velocidades nas seções foi o método dos quadrados, com a qual determina-se o perfil de velocidades na galeria dividindo-a em seis retângulos imaginários de aproximadamente mesma área.” (Pinto, 2004) “O Anemômetro é posicionado no centro de cada retângulo e a velocidade considerada é a média aritmética das velocidades medidas, sendo esta velocidade, utilizada para o cálculo da vazão total na galeria.” (Pinto, 2004). A representação dos pontos no método do quadrado indica o posicionamento do medidor de velocidade. O método descrito para a coleta da velocidade do ar pode ser visto na Figura 12.

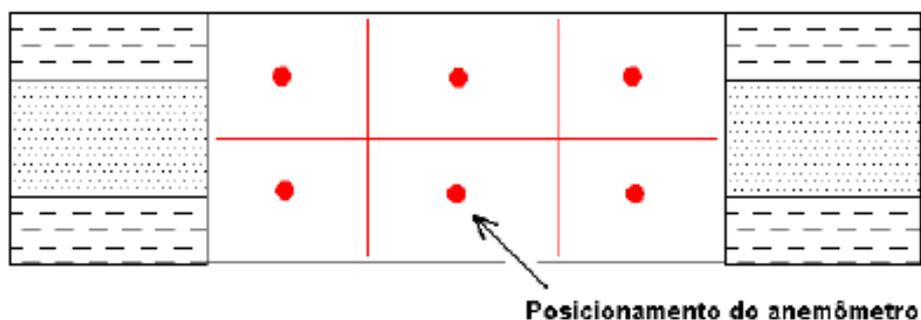


Figura 12 - Método do quadrado

Fonte: (PINTO, 2004)



Figura 13 – Medidor de Velocidade KESTREL

Fonte: KestrelMeters (2022)

A medição de temperatura, para uso do índice IBUTG, foi obtida a partir de medição *in loco* com monitor de estresse térmico, o TGD 400 (Figura 14). As temperaturas colhidas pelos aparelhos foram: Temperatura de globo (tg); Temperatura de bulbo seco (tbs) e Temperatura de bulbo úmido natural (tbn).



Figura 14 – Medidor de Temperaturas TGD 400

Fonte: InstruTherm (2015)

O IBUTG é um índice de sobrecarga térmica, definido por uma equação matemática que correlaciona alguns parâmetros medidos no ambiente de trabalho. A equação, para o cálculo do índice, varia em função da presença, ou não, de carga solar, conforme e apresentado a seguir, para ambientes internos ou externos, sem carga solar:

$$\text{IBUTG} = (0,7 \times \text{tbn}) + (0,3 \times \text{tg}) \quad (11)$$

Em que:

- IBUTG: Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo, em graus Celsius (°C);
- Tbn: Temperatura de bulbo úmido natural, em graus Celsius (°C);
- Tbs: Temperatura de bulbo seco, em graus Celsius (°C);
- Tg: Temperatura de globo, em graus Celsius (°C).

Quando as vestimentas utilizadas impedem a remoção do calor por evaporação do suor e convecção do ar, pode gerar uma sobrecarga térmica. A avaliação da exposição ao calor baseada no IBUTG foi desenvolvida, nesta mina em questão, para uniformes tradicionais de calça e camisa de mangas compridas.

O fluxo de ventilação principal deverá garantir os índices de temperatura adequada ao corpo humano, garantindo que as atividades possam ser realizadas de forma intermitente, com descanso no próprio local de trabalho, considerando as atividades como leve por ser considerada uma mina com operação mecanizada, estabelecendo como IBUTG a temperatura de 30°C, conforme estabelecido na NR15, anexo 3.

A coleta dos dados descritos foi realizada tanto nas frentes de serviço, quanto nas galerias principais da mina, sendo que os dados da temperatura foram coletados em sua maioria nas frentes de trabalho, onde essa questão costuma ser mais crítica devido à quantidade de máquinas e pessoas nos locais, além de serem locais com uma menor vazão de ar em comparação com as vias principais de ventilação.

A coleta de dados foi realizada conforme procedimento interno da empresa, desde a coleta da velocidade do ar, à escolha da seção e medição da área. Além disso, o procedimento de coleta dos valores de temperatura exigia um tempo de calibração do equipamento na frente, a fim de permitir a ambientação do aparelho. O procedimento de coleta também foi feito utilizando como base o exposto em Silva (2016).

Os dados coletados alimentavam um banco de dados no Excel, o qual servia para conferir a vazão em cada frente de serviço, e se as mesmas estavam aptas para a operação. Caso houvesse alguma inadequação, medidas deveriam ser tomadas para tornar o ambiente operacional, como por exemplo: realização de raises no local, avanço de ventiladores secundários e a inserção de reguladores e bloqueadores de ar em locais estratégicos. Já os dados colhidos nas vias principais de ventilação eram

colhidos de forma mensal, e tinham por objetivo a verificação do sistema de ventilação principal da mina.

Os valores de vazão e velocidade do ar colhidos em campo serviam para verificar se o sistema de ventilação estava operando conforme dimensionado anteriormente. Essa comparação podia ser feita através do software de modelamento utilizado, chamado VentSim[®]. Após o cálculo de dimensionamento do sistema de ventilação, são gerados valores de vazão de ar para a mina, e através do sistema principal de ventilação implementado para suprir esta demanda, o software mostra como o ar se comporta ao longo da mina, e em quais quantidades. A utilização desta ferramenta é importante pois permite visualizar a situação da ventilação em ocasiões do dia a dia da operação, como: parada de ventilador para manutenção, reguladores de ar operando de modo incorreto e frentes de trabalho em situações irregulares. Além disso, a coleta de dados diária é de suma importância para conferir se o sistema de ventilação principal e secundário da mina estão dimensionados de forma correta, o que pode levar a um redimensionamento de todo o escopo de ventilação. A Figura 15 resume o processo de tratamento e acompanhamento de dados coletados em campo, e como eles são importantes no processo de dimensionamento do sistema de ventilação.

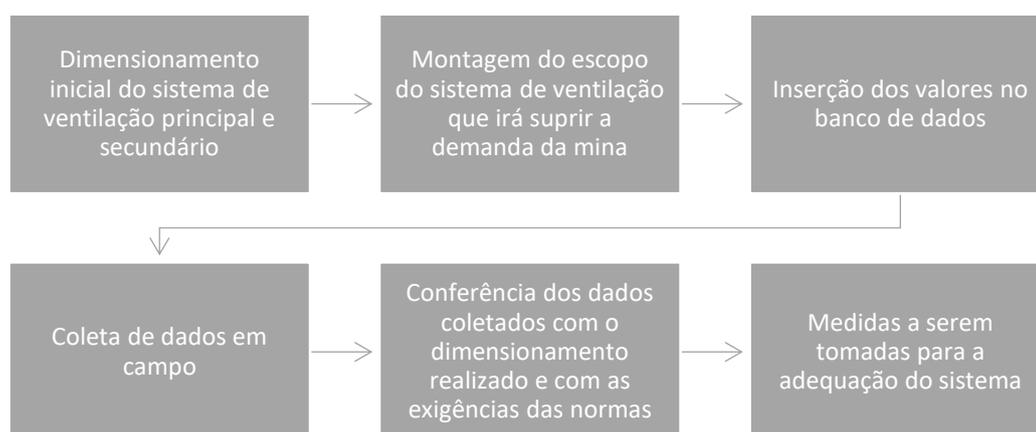


Figura 15: Fluxograma da metodologia do dimensionamento do sistema de ventilação

5. ESTUDO DE CASO

O trabalho em questão diz respeito à uma mina subterrânea localizada no estado de Minas Gerais, a qual possui dois métodos de lavra, sendo o VRM o mais utilizado e o Sublevel Open Stope (OS). A mina possui uma grande extensão horizontal, e conta com mais de 200 km de galerias escavadas, com seus níveis mais inferiores a uma profundidade de 400 m, podendo ser considerada uma mina de grande porte.

A lavra ocorre em blocos, podendo ser com perfuração ascendente ou descendente, sendo a malha ascendente mais utilizada. As galerias da mina podem ser divididas em: Rampas, Acessos, Galerias de Transporte, Galeria de Minério e Travessas. A seção média das galerias é de 5,5 m x 5,5 m. Já os raises secundários possuem variadas seções, a depender da necessidade de cada local, sendo a seção mais comum 3m x 3m.

O ciclo operacional nas escavações é constituído por atividades com sequência lógica e operacional. Assim sendo discriminados na sequência: perfuração; carregamento com explosivos; desmonte; ventilação; carregamento e transporte; saneamento; contenções; levantamento topográfico. Tendo em média o tempo total de um ciclo de 24 horas com avanço médio de 4 metros de escavação, quando se trata de desenvolvimento horizontal.

5.1. Método de lavra

O método de lavra conhecido como VRM (Vertical Retreat Mining) destaca-se pelo maior controle geomecânico da rocha, otimização da reserva lavrável e melhor controle da diluição. De acordo com Andrade (2008) o método de lavra pode ser realizado por perfuração ascendente ou descendente, paralelamente ou de forma radial. O método é ideal para corpos mineralizados de inclinação igual ou superior a 45°, para que dessa forma a massa desmontada escoe para a galeria, assim como representada na Figura 16. Neste método de lavra existem três zonas do realce, que são:

- Face livre: delimitada pelas travessas, sendo geralmente limitadas pelo contato geológico do minério. A face livre deve ser a primeira a ser detonada, cuja perfuração é feita através do slot;
- Under Cut: representa a abertura na porção inferior do realce;

- Over cut: representa a abertura pela porção superior do realce.

VRM (Vertical Retreat Mine)

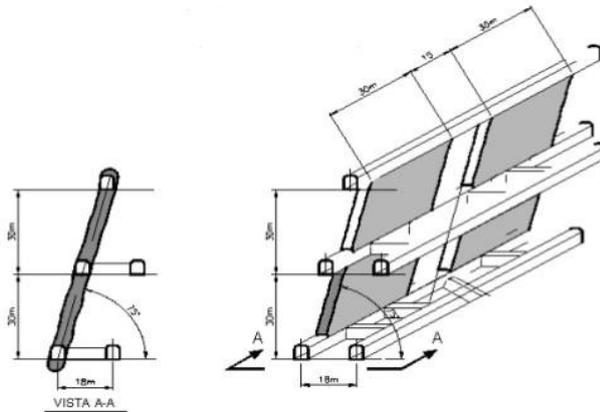


Figura 16: Blocos de lavra VRM

Fonte: Pereira (2018)

Após a lavra do material escoado, deve ser feito o preenchimento da galeria para que os demais blocos, tanto do mesmo nível, quanto de níveis superiores possam ser lavrados.

O método sublevel open stope pode ser realizado em mineralizações estreitas, que necessitam de uma baixa diluição para a lavra. Da mesma forma que o VRM, o corpo mineralizado deve ter uma inclinação superior a 45° para que o material possa escoar para a galeria e garantir a lavra do mesmo. Pilares são utilizados para garantir a estrutura do bloco, mas podem ser lavrados posteriormente. (SILVA, 2018)

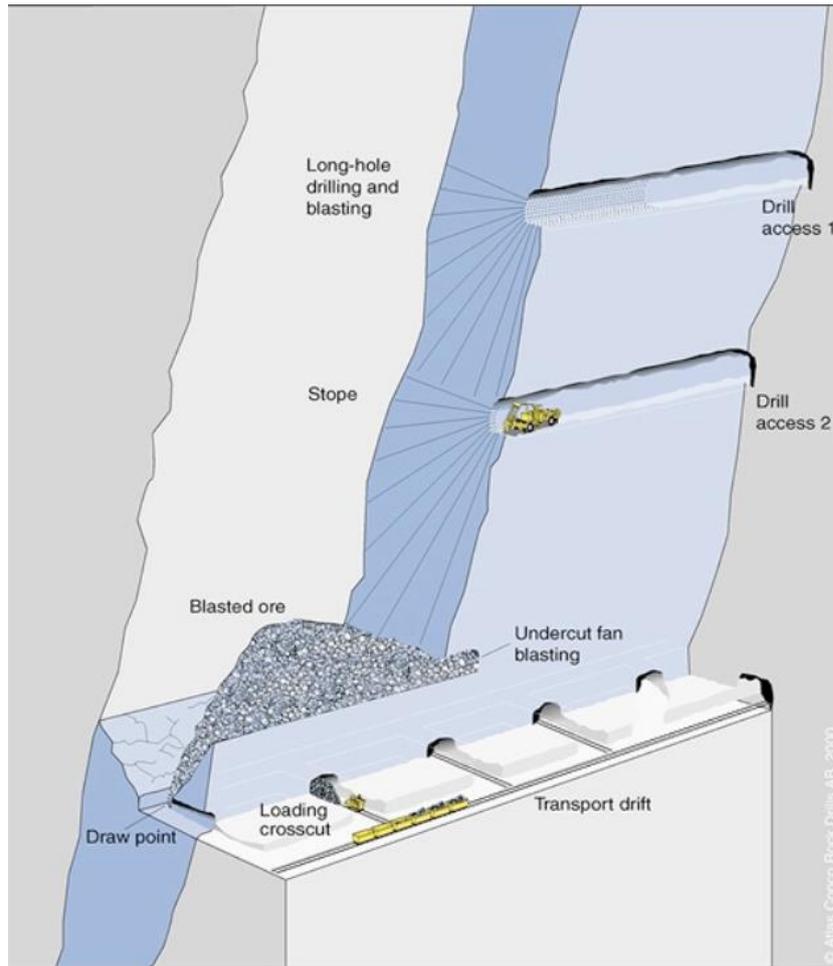


Figura 17: Método de Lavra Open Stope

Fonte: Atlas Copco (2007)

5.2. Sistema de Ventilação

O sistema de ventilação principal da Mina é feito através de ventilação mecânica, forçada por ventiladores, que serão denominados como Exaustores Principais, por terem com princípio operacional, forçar a entrada de ar limpo para a mina e exaurir o ar poluído para a superfície, onde será descartado, criando assim a troca e a renovação contínua do ar no subsolo. Os ventiladores são dimensionados a partir da necessidade de vazão de ar na mina, e de acordo com a resistência imposta pelo circuito de ventilação. O dimensionamento é feito através das curvas dos ventiladores, fornecidas pelo fabricante, e pode ser simulado através de softwares de simulação.

O ar limpo provém dos acessos principais (rampas) e são distribuídos nas Galerias de Transporte (GT), Galerias de Minério (GM) e travessas através da

ventilação auxiliar, composta por dutos de ventilação e ventiladores secundários. O sistema de ventilação auxiliar tem como objetivo buscar o ar proveniente dos acessos principais e destiná-lo às frentes de serviços dos níveis. Como as frentes de serviço são, muitas das vezes, fundos de saco, o ar não circula por estes locais de forma espontânea, sendo necessário um mecanismo para tal. Como uma alternativa à ventilação auxiliar, têm-se os raises de adução, os quais são responsáveis por levar o ar limpo de um nível para o outro sem a necessidade de instalação de ventiladores.

6. DESENVOLVIMENTO

6.1 Dimensionamento do volume de ar para a ventilação secundária

Para determinar a vazão de ar para o desenvolvimento de rampas e galerias, foram utilizados os critérios empregados na NR 22, onde a vazão para as frentes de serviço é dimensionada de acordo com os seguintes fatores:

- Quantidade de explosivo utilizado no desmonte da face de trabalho;
- Número de pessoas na frente de trabalho;
- Potência, em CV, da frota dos motores a combustão diesel utilizados na frente de serviço.

6.1.1. Vazão de ar de acordo com a quantidade de explosivos

A vazão de ar de acordo com a quantidade de explosivos deve ser calculada da Equação 2:

$$QT = (0,5 \times A) \times \frac{V}{t} \quad (2)$$

Em que:

QT= vazão total de ar fresco em m³/min;

A= quantidade total em kg de explosivos empregados por desmonte;

t= tempo de aeração (reentrada) da frente de trabalho em atividade em minutos;

V= volume gasoso gerado por quilo de explosivo em m³/kg;

Neste trabalho, foram utilizadas as seguintes premissas operacionais relacionadas ao desmonte:

- Carga de explosivos para detonação na rampa: 450 kg
- Carga de explosivos para detonação de galerias: 300 kg
- Para o cálculo da vazão de ar necessária para diluição dos gases de explosivos, foi utilizada a maior carga de explosivos na frente de desenvolvimento = 450 kg;
- Volume gasoso gerado pela detonação de explosivos = 20 m³/kg;
- O tempo de reentrada após a detonação foi de 60 minutos.

6.1.2. Vazão de ar de acordo com a quantidade de trabalhadores na frente de trabalho

Como demonstra a NR 22.24.7.2, a quantidade do ar fresco nas frentes de trabalho deve ser de no mínimo, 2 m³/min por pessoa.

O número estimado de pessoas por frente de serviços pode ser considerado como duas pessoas durante as atividades de perfuração e limpeza, e de até 10 pessoas durante as atividades de equipagem e serviços diversos.

6.1.3. Vazão de ar de acordo com a frota diesel

O ciclo operacional de maior demanda de equipamentos nas operações de desenvolvimento é a atividade de limpeza do material desmontado nas detonações.

Na rampa principal e na galeria de transporte, esta atividade é realizada por uma carregadeira removendo o material desmontado e por um caminhão transportando o material desmontado.

Nas galerias de desenvolvimento produtivo, esta atividade é realizada por apenas uma carregadeira removendo o material desmontado.

Durante a atividade de remoção do material desmontado do desenvolvimento, os únicos equipamentos que adentram na frente de serviço são uma carregadeira e um caminhão, os quais exercem as atividades simultaneamente.

Para o cálculo da vazão de ar necessária na frente de desenvolvimento para diluição dos gases de motores a combustão diesel, é levada em consideração a NR 22.24.7.3.2.

$$QT = 2,65 \times (P1 + 0,75 \times P2 + 0,5 \times Pn) \quad (13)$$

Em que:

QT= vazão total de ar fresco em m³/min;

P1= potência em cavalo-vapor do equipamento de maior potência em operação
(Caminhão com Potência do motor 362 CV);

P2= potência em cavalo-vapor do equipamento de segunda maior potência em operação (Carregadeira com Potência do motor 358 CV);

Pn= somatório da potência em cavalo-vapor dos demais equipamentos em operação.

6.2. DIMENSIONAMENTO DA VAZÃO DE AR PRINCIPAL DA MINA

Os cálculos para dimensionar o volume total da vazão de ar necessária da mina em questão foram feitos conforme a NR22, mais especificamente na NR:22.24.8, nas quais as atividades subterrâneas a vazão de ar fresco nas frentes de trabalho será dimensionada de acordo com o disposto no Quadro I, prevalecendo à vazão que for maior. Além disso, o fluxo total de ar fresco na mina será, no mínimo, o somatório dos fluxos das áreas de desenvolvimento e dos fluxos exigido da vazão principal.

QUADRO I - Cálculo da vazão de ar fresco conforme disposto em norma

A) Cálculo da vazão de ar fresco em função do número máximo de pessoas ou máquinas com motores a combustão a óleo diesel

$$Q_T = Q_1 \times n_1 + Q_2 \times n_2 \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Onde :

Q_T = 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 = 3,5 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

$$Q_T = \frac{0,5 \times A}{t} \text{ [m}^3\text{/min]}$$

t

Em que:

Q_T = vazão total de ar fresco em m³/min.

A = quantidade total em quilogramas de explosivos empregados por desmonte

t = tempo de aeração (reentrada) da frente em minutos

C) Cálculo da vazão de ar fresco em função da tonelagem mensal desmontada

$$Q_T = q \times T \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Em que:

Q_T = vazão total de ar fresco em m³/min.

q = vazão de ar em m³/minuto para 1.000 toneladas desmontadas por mês

(mínimo de 180 m³/minuto/1.000 toneladas por mês)

T = produção em toneladas desmontadas por mês.

Fonte: NRM 22

6.2.1 Vazão de ar considerando-se o número de pessoas

A vazão de ar deve ser de 2 m³/minuto por pessoa. Será tomado como base o número máximo de colaboradores no turno = 75 pessoas

6.2.2 Vazão de ar para diluição dos gases dos motores a diesel

Para calcular a quantidade de cavalo motor (CV) dos motores a combustão diesel que trabalham simultaneamente no subsolo, foi considerado o espaço de tempo em que terá o maior número de máquinas trabalhando simultaneamente na mina. De acordo com a norma, a vazão de ar fresco na frente de trabalho deve ser aumentada em 2,65 m³/min para cada CV de potência instalada.

$$Q_T = Q_1 \times n_1 + Q_2 \times n_2 \text{ (14)}$$

Onde:

Q_T = vazão total de ar fresco em m³/min

Q_1 = quantidade de ar por pessoa (2,0 m³/min)

n_1 = número de pessoas no turno de trabalho

Q_2 = 3,5 m³/min /cv dos motores a óleo diesel

n2= número total de cavalo-vapor dos motores a óleo diesel em operação

6.2.3 Vazão de ar para diluição dos gases dos explosivos

$$QT = (0,5 \times A) \times \frac{V}{t} \quad (2)$$

Em que:

QT = vazão total de ar fresco em m³/min

A = quantidade total em kg de explosivos empregados por desmonte

t= tempo de aeração (reentrada) da frente de trabalho em atividade em minutos

V= volume gasoso gerado por quilo de explosivo em m³/kg = 20 m³/kg

Para calcular a quantidade de explosivos utilizados por desmonte, foram utilizados os seguintes fatores:

1° - Toneladas de rochas desmontadas por turno no desenvolvimento e na lavra.

2° - Três turnos de trabalho diários, com detonação realizada duas vezes ao dia

3° - Razão de carga média = 0,9 Kg de explosivos / tonelada desmontada.

4° - Tempo de intervalo entre os turnos = 60 minutos

6.2.4 Vazão de ar para produção de rocha desmontada

Para calcular a quantidade de rocha desmontada, o fator de toneladas de rochas desmontadas mensalmente no desenvolvimento e na lavra deve ser considerado o valor de no mínimo de 180 m³/minuto, sendo a fórmula:

$$QT = 180 \text{ m}^3/\text{minuto}/1.000 \text{ toneladas por mês} \quad (15)$$

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1. Dimensionamento do volume de ar para a ventilação secundária

7.1.1. Vazão de ar de acordo com a quantidade de explosivos

$$QT = (0,5 \times A) \times \frac{V}{t} \quad (2)$$

$$QT = (0,5 \times 450) \times 20/60$$

$$QT = 75 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$QT = 1,25 \text{ m}^3/\text{s}.$$

7.1.2. Vazão de ar de acordo com a quantidade de trabalhadores na frente de trabalho

Cálculo do volume de ar em função da quantidade de pessoas na frente de trabalho

$$QT = 2 \text{ m}^3/\text{min} \times 10 \text{ (16)}$$

$$QT = 20 \text{ m}^3/\text{min} = 0,33 \text{ m}^3/\text{s}$$

7.1.3. Vazão de ar de acordo com a frota diesel

$$QT = 2,65 (P1 + 0,75 \times P2 + 0,5 \times Pn) \text{ (13)}$$

$$QT = 2,65 (P1 + 0,75 \times P2 + 0,5 \times Pn)$$

$$QT = 2,65 (362 + 0,75 \times 358 + 0,5 \times 0)$$

$$Qt = 1670,8 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$Qt = 27,84 \text{ m}^3/\text{s}$$

7.1.4. Vazão de ar na frente de trabalho

A vazão total de ar em cada frente de trabalho é determinada prevalecendo a maior demanda de ventilação calculada. Portanto, vazão de ar na face de trabalho será a do item 7.1.3.

$$\text{Vazão necessária} = 27,84 \text{ m}^3/\text{s}$$

O sistema de ventilação de frentes de desenvolvimento, consiste em um ventilador captando ar limpo em uma corrente principal de ventilação e insuflando-o através de dutos de ventilação até a face de trabalho de desenvolvimento.

Os cálculos de ventilação para frentes de desenvolvimento visam trabalhar com a menor perda de pressão possível para os ventiladores e conseqüentemente alcançar maiores distâncias com um único equipamento, já que a principal perda de pressão de um ventilador está diretamente relacionada ao diâmetro do duto de ventilação e ao comprimento da coluna de dutos. Além disso, erros no acoplamento dos dutos, e rasgos dos mesmos representam uma perda de vazão de ar ao longo da distância percorrida do duto.

7.2. Dimensionamento da vazão de ar principal da mina

7.2.1. Vazão de ar para pessoas

Vazão de ar necessária= 75 x 2 m³/min (16)

Vazão de ar necessária= 2,5 m³/s

7.2.2. Vazão de ar para diluição dos gases dos motores a diesel

A vazão necessária para a diluição dos gases dos motores a diesel foi determinada conforme mostra a Tabela 3. Nela estão contidos os equipamentos que operam na mina, juntamente com suas especificações de potência e utilização do equipamento (UF).

Tabela 3 – Equipamentos operacionais da mina

Equipamento	Informação do equipamento		Informação da Mina	
	(CV)	UF (%)	Quantidade	(CV) Total
Jumbo	180	30%	5	270
Caminhões	360	80%	13	3744
Cabolt	150	70%	3	315
Boltec	95	70%	3	200
Scaler	160	60%	2	192
FanDrill	160	70%	3	336
Carregadeira	360	70%	4	1008
Comboio	160	50%	1	80
Normet (Plataforma)	110	50%	2	110
Projetor de Concreto	110	50%	2	110
Caminhão Pipa	160	85%	1	136
Caminhão Munk	160	50%	1	80
Veículo Leve	160	85%	7	952
Caminhão de Explosivos	160	5%	1	8
Caminhão de Transporte Pessoal	200	20%	2	80
Soma			50	7.621

$$QT = Q1 \times n1 + Q2 \times n2 \quad (14)$$

$$Qt = 75 \times 2 + 3,5 \times 7621$$

$$Qt = 447 \text{ m}^3/\text{s}$$

7.2.3. Vazão de ar para diluição dos gases dos explosivos

Para o cálculo da vazão de ar para diluição dos gases dos explosivos é necessário estimar a quantidade de massa desmontada por turno para associarmos à razão de carga praticada nos desmontes. Assim, será considerada uma massa

desmontada mensal de 120.000 toneladas. Dessa forma, temos que a massa desmontada por turno é:

Massa desmontada por dia: 120000 t / 30 dias

Massa desmontada por dia: 4000 t

Sendo o desmonte realizado em dois turnos, temos que:

Massa desmontada por turno: Massa desmontada por dia / quantidade de turnos com desmonte

Massa desmontada por turno: 4000 / 2

Massa desmontada por turno = 2000 toneladas

Usando uma razão de carga de 0,9 kg/t, temos que a quantidade de explosivo utilizado por turno é:

Quantidade de explosivo utilizado por turno = Massa desmontada por turno x Razão de carga

quantidade de explosivo utilizado por turno = 2000 x 0,9

quantidade de explosivo utilizado por turno = 1800 kg

Assim, temos que:

$$QT = (0,5 \times A) \times \frac{V}{t} \quad (2)$$

$$QT = (0,5 \times 1800) \times 20 / 60$$

Vazão de ar = 5 m³/s

7.2.4. Vazão de ar para produção de rocha desmontada

A vazão de ar para a produção de rocha desmontada deve ser calculada da seguinte forma:

Vazão de ar = 180 m³/minuto a cada 1.000 toneladas por mês

Temos que, como anteriormente demonstrado, a produção mensal é de 120.000 toneladas. Dessa forma:

Vazão de ar = 180 x 120 m³/min

Vazão de ar = 360 m³/s

7.2.5. Vazão total de ar requerido na mina

Para definição da maior vazão de ar requerida em cada mina, foram considerados os seguintes fatores:

1° - Maior demanda de ventilação conforme a NR 22.24.8 - Em outras minas e demais atividades subterrâneas a vazão de ar fresco nas frentes de trabalho será dimensionada de acordo com o disposto no Quadro II, prevalecendo a vazão que for maior.

QUADRO II - Determinação da vazão de ar fresco conforme disposto em norma

- a) Cálculo da vazão de ar fresco em função do número máximo de pessoas ou máquinas com motores a combustão a óleo diesel.
- b) Cálculo da vazão de ar fresco em função do consumo de explosivos
- c) Cálculo da vazão de ar fresco em função da tonelagem mensal desmontada

Fonte: NRM 22

2° - Foi adicionado o fator de 10% sobre a demanda de ventilação necessária para repor as perdas de ar através de portões de ventilação e tapumes.

3° - Vazão total de ar limitada a 288 m³/s para atender à NR 22.24.10, onde é determinado que a velocidade do ar no subsolo não deve superior à média 8 m/s. Considerando a área da rampa principal como de 36 m², a vazão de ar máxima deve ser o fator entre a área e máxima velocidade de ar permitida.

Assim, a vazão de ar necessária na mina fica calculada da seguinte forma:

- Maior demanda de ventilação: 492 m³/s
 - A fim de atender à demanda de vazão de ar para diluição dos gases dos motores a diesel
- **Vazão de ar final: 288 m³/s**
- Para atender à NR22.24.10 – Velocidade máxima do ar na rampa principal.

Após a obtenção dos resultados, temos uma base de dados acerca do da quantidade de ar que deve ser destinada à mina. Para o sistema de ventilação secundário, chegou-se a conclusão que deve ser destinada às frentes de desenvolvimento e lavra uma quantidade de ar de 27,84 m³/s, e esse ar destinado será feito através de ventiladores secundários posicionados dentro da mina, com

dutos de ar direcionando o ar às frentes em questão. Para garantir a quantidade de ar necessária, deverão ser instalados ventiladores de potência de 125 CV, com dutos de 1200 mm de diâmetro, os quais devem ter no máximo, 400 metros de extensão, e obedecer a uma distância máxima da saída do duto à face de 20 metros.

Já o sistema principal de ventilação deve ter uma quantidade de ar que entra na mina de 492 m³/s, entretanto, como exigido por Norma, o valor para a entrada de ar não pode ultrapassar os 288 m³/s. Como pode ser notado, a vazão de ar permitida por norma é apenas 58% da vazão necessária, tomando por base a vazão requerida para diluição dos gases dos motores a diesel. A aplicação da NR22.24.10, pode ocasionar um problema para a operação da mina, já que o ar limpo necessário para a exaustão de diesel e para a quantidade de rocha desmontada exige mais quantidade de ar para garantir uma operação adequada. Problemas, como excesso de diesel no ambiente e excesso de poeira, podem afetar a saúde dos trabalhadores a longo prazo, além de ser um grande empecilho na visibilidade do ambiente, podendo ocasionar acidentes devido à baixa visualização do local.

Como sugestão a esse empecilho, ventiladores principais localizados na superfície podem fazer o insuflamento de ar para o interior da mina através de dutos reforçados. Essa resolução tem por objetivo diminuir a velocidade do ar nos acessos principais de entrada, e destinar certa quantidade de vazão para os dutos de ventilação instalados. Dessa forma, a vazão poderia ser dividida, fazendo com que o limite de velocidade do ar seja respeitado, porém, mantendo a mesma quantidade de ar que entra na mina.

Para balizar os números foram feitas comparações com o simulado no software VentSim. Os dados de vazão principal estavam condizentes com o que foi coletado em campo e ao que foi dimensionado, tanto na entrada, quanto na saída de ar. Os valores podem variar de acordo com algumas inconformidades do sistema operacional, como por exemplo, as fugas de ar observadas em portões, tapumes e nos próprios realces de lavra, entretanto, quando o sistema estava operando de forma ideal, os valores do VentSim indicavam valores condizentes com o que operava na prática.

Já no sistema secundário, as medições costumavam se distanciar ao que o simulador mostrava. Isso ocorria devido à maior dinamicidade das frentes de desenvolvimento e lavra, onde nem sempre o sistema operava conforme deveria, principalmente devido à condição dos dutos, que podiam estar rasgados ou acoplados

de forma falha, e à extensão dos dutos de ventilação, o que ocasiona perdas de ar ao longo do caminho percorrido pelo fluido.

8. CONCLUSÃO

Este trabalho mostrou o funcionamento de um sistema de ventilação em uma mineração subterrânea, as normas regulamentadoras que o regem, tendo como principal foco o dimensionamento de vazão de ar principal e auxiliar, e a tolerância para os gases tóxicos presentes no ambiente.

O cálculo da vazão necessária para uma mina subterrânea é de extrema importância para a operação da mesma. Ao mesmo tempo que garante uma operação segura, tornando o ambiente de trabalho mais saudável aos trabalhadores, é uma ferramenta indispensável aos trabalhos em subsolo segundo as normas regulamentadoras. Além disso, o estudo acerca da vazão de ar necessária para a mina pode ser uma importante fonte de economia para um empreendimento, pois uma vazão de ar superdimensionada pode ocasionar gastos exacerbados na energia elétrica da unidade, bem como na compra de ativos que poderiam ser dispensáveis.

Na ventilação auxiliar, os ventiladores secundários devem suprir a quantidade de ar necessária nas frentes de trabalho, para que garantir uma boa operação nos chamados “fundos de saco”. De toda forma, a coleta de dados das frentes de serviço com medidores de velocidade do ar, dos gases e temperatura deve ser realizada constantemente para garantir o funcionamento adequado do sistema e permitir alterações de frequência dos ventiladores durante o decorrer do desenvolvimento da do modo mais assertivo.

Medições e verificações no sistema principal de ventilação também devem ser realizadas com frequência a fim de conferir a quantidade de ar de entrada e de saída da mina. O procedimento de verificação de vazão principal de ar deve ser realizado obrigatoriamente de forma mensal, e, nele verificações nos reguladores de ar também devem ser realizadas, a fim de minimizar as perdas de ar ao longo do sistema, o que pode ocasionar uma baixa vazão nos níveis mais inferiores da mina.

Atualmente, existem novas tecnologias e dispositivos que podem ser utilizadas para otimizar ainda mais o sistema de ventilação de mina, e uma delas é a ferramenta de Ventilação sob Demanda (VOD). Esse sistema permite que a ventilação destinada às frentes de serviço, ou até mesmo a ventilação principal, seja feita conforme a operação no local, de forma remota e com um maior controle. Além de permitir um menor custo

envolvido à operação, a ferramenta pode trazer ganhos à saúde dos trabalhadores, visto que traria uma maior eficiência ao sistema de ventilação.

Dessa forma, a operação de um empreendimento mineiro subterrâneo deve obedecer às normas que o regulam, sendo obrigação da mina encontrar formas e meios para que todos os requisitos sejam cumpridos. Um planejamento detalhado do início de um projeto de mina subterrânea é parte essencial para um bom funcionamento da ventilação ao longo da operação, visto que um sistema mal planejado e dimensionado pode levar a descumprimentos a medida que o ambiente subterrâneo se expanda.

Além disso, o uso de modelos de simulação para o circuito de ventilação é uma ferramenta importante nos projetos de dimensionamento da ventilação, pois é capaz de prever as demandas futuras de vazão e infraestrutura em geral. Isso possibilita a tomada de decisões mais assertivas e otimiza os investimentos.

REFERÊNCIAS

ANDRADE FILHO, H. R. Aumento da recuperação de lavra na Mineração Caraíba S/A. Jaguarari, BA. Revista Eletrônica Brasil MiningSite. Anexos. Artigos. 2008.

AMCA. System Effects – Air Movement & Control Association Internacional. AMCA Publication 200-95 (R2011) | Air Systems. Artigo Publicado, 1995.

ATLAS COPCO. Mining Methods in Underground Mining. (2007)

Brasil. Código de Mineração. Código de Mineração : e legislação correlata: NRM 06. – 2. ed. – Brasília : Senado Federal, Subsecretaria de Edições Técnicas, 2011.

COSTA, L.V. Análise via simulação da ventilação em mina subterrânea – Estudo de caso mina Córrego do Sítio I. Tese de Doutorado. UFOP. 2019.

GALVÃO, N.J.P; Ventilação em Minas Subterrâneas - CIA MINEIRA DE METAIS, artigo interno da empresa, Vazante-MG, 1988, 62p.

HARTMAN, H. L.; Mutmansky, J. M.; Ramani, R. V.; Wang, Y. J. Mine Ventilation and Air Conditioning. 2nd Edition Reprint with corrections ed. Wiley-Interscience, 1991.

HARTMAN, H. L. et al. Mine Ventilation and Air Conditioning. John Wiley & Sons, Inc.3° ed. 1997.

INSTRUTHERM. Medidor de stress térmico Mod TGD 400. Disponível em: < <https://www.instrutherm.com.br/medidor-de-stress-termico-mod-tgd-400>> . 2015.

KESTRELMETERS. Medidor ambiental Kestrel 5000. Disponível em: < https://br-kestrelmeters.glopalstore.com/products/kestrel-5000-environmental-meter?utm_campaign=pr_r&utm_source=https://kestrelmeters.com&utm_medium=wi_proxy&utm_content=en_US&utm_term=c> . 2022

MACHADO, H.G. Gestão de riscos em minas subterrâneas – Avaliação de ventilação de Minas profundas. Tese de Mestrado. UFOP. 2011.

MARTINS, C.F.V. Avaliação das normas reguladoras de mineração para minas subterrâneas no brasil e da legislação mineral brasileira para segurança em subsolo. Dissertação de Pós-Graduação, UFOP. 2018

MARTINS, V. S. Jus Navigandi. Usurpação mineral e defesa do patrimônio público. Disponível em: <<http://jus.com.br/revista/texto/21108/usurpacao-mineral-e-defesa-do-patrimonio-publico#ixzz2PPvTftEU>>. Acesso em: 25 julho de 2022.

McPHERSON, M. J.; Subsurface Ventilation and Environmental Engineering. 1st edition. London: Chapman & Hall, 1993. 904p.

McPHERSON, M. J. Subsurface Ventilation Engineering. Mine Ventilation Services. 2009.

MVS 4. Study Material for the Certificate in Mine Environmental Control. Workbook 2: Thermal Engineering. 2002

NR-15, Atividades e Operações Insalubres (115.000-6), Brasil: Ministério do Trabalho e da Previdência Social Secretaria Nacional do Trabalho, 2002, 65p.

NR-22, Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração (122.000-4), Brasil: Ministério do Trabalho e da Previdência Social Secretaria Nacional do Trabalho, 2002, 102p.

PEREIRA, F.C. Estudo da economia energética com a implementação do sistema de ventilação sob demanda na mina vazante. Trabalho de Conclusão de Curso. UFOP, 2018.

PINTO, P.C; Construção de modelos computacionais de redes de fluxo para circuitos de ventilação de minas em subsolo. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

SILVA, J. M. 2018. Lavra por corte e enchimento. Lavra Subterrânea. DEMIN/EM/UFOP.

SILVA, J.M.; SANTOS, R.C.P; FILHO, A.O.S. Expansion of human resources and infrastructure in mine ventilation in Brazil, II Simposio Internacional em Ventilacion de Sudamerica. Artigo publicado, 2021.

SILVA, W.T Construção de um modelo digital do circuito de ventilação da mina de Vazante, utilizando o programa Ventsim. Trabalho de Conclusão de Curso. FINOM, 2016

ANEXO 1

Quadro 1 – Limite de exposição ocupacional ao calor.

\bar{M} [W]	$\overline{IBUTG}_{MAX}[^{\circ}C]$	\bar{M} [W]	$\overline{IBUTG}_{MAX}[^{\circ}C]$	\bar{M} [W]	$\overline{IBUTG}_{MAX}[^{\circ}C]$
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
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 – NR 15

ANEXO 2

Quadro 2 – Taxa metabólica por tipo de atividade

Atividade	Taxa metabólica (W)
Sentado	
Em repouso	100
Trabalho leve com as mãos	126
Trabalho moderado com as mãos	153
Trabalho pesado com as mãos	171
Trabalho leve com um braço	162
Trabalho moderado com um braço	198
Trabalho pesado com um braço	234
Trabalho leve com dois braços	216
Trabalho moderado com dois braços	252
Trabalho pesado com dois braços	288
Trabalho leve com braços e pernas	324
Trabalho moderado com braços e pernas	441
Trabalho pesado com braços e pernas	603
Em pé, agachado ou ajoelhado	
Em repouso	126
Trabalho leve com as mãos	153
Trabalho moderado com as mãos	180
Trabalho pesado com as mãos	198
Trabalho leve com um braço	189
Trabalho moderado com um braço	225
Trabalho pesado com um braço	261
Trabalho leve com dois braços	243
Trabalho moderado com dois braços	279
Trabalho pesado com dois braços	315
Trabalho leve com o corpo	351
Trabalho moderado com o corpo	468
Trabalho pesado com o corpo	630

Em pé, em movimento	
Andando no plano	
1. Sem carga	
• 2 km/h	198
• 3 km/h	252
• 4 km/h	297
• 5 km/h	360
2. Com carga	
• 10 kg, 4 km/h	333
• 30 kg, 4 km/h	450
Correndo no plano	
• 9 km/h	787
• 12 km/h	873
• 15 km/h	990
Subindo rampa	
1. Sem carga	
• com 5° de inclinação, 4 km/h	324
• com 15° de inclinação, 3 km/h	378
• com 25° de inclinação, 3 km/h	540
2. Com carga de 20 kg	
• com 15° de inclinação, 4 km/h	486
• com 25° de inclinação, 4 km/h	738
Descendo rampa (5 km/h) sem carga	
• com 5° de inclinação	243
• com 15° de inclinação	252
• com 25° de inclinação	324
Subindo escada (80 degraus por minuto - altura do degrau de 0,17 m)	
• Sem carga	522
• Com carga (20 kg)	648
Descendo escada (80 degraus por minuto - altura do degrau de 0,17 m)	
• Sem carga	279
• Com carga (20 kg)	400
Trabalho moderado de braços (ex.: varrer, trabalho em almoxarifado)	320
Trabalho moderado de levantar ou empurrar	349
Trabalho de empurrar carrinhos de mão, no mesmo plano, com carga	391
Trabalho de carregar pesos ou com movimentos vigorosos com os braços (ex.: trabalho com foice)	495