MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

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)

por

Rafael Roleto Cardoso

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Novembro de 2014

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

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)

por

Rafael Roleto Cardoso

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Sergio Viçosa Möller

Comissão de Avaliação:

Prof. Paulo Otto Beyer

Prof. Pedro Barbosa Mello

Prof. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 14 de Novembro de 2014.

AGRADECIMENTOS:

Agradeço aos meus familiares e amigos que estiveram presentes durante o período da graduação provendo todo o suporte necessário para a conclusão desta jornada.

Em especial, agradeço ao meu Orientador Prof. Sergio Viçosa Möller que me aconselhou durante esse período. Seus conselhos direcionaram o trabalho para os assuntos importantes da área em estudo.

Também, agradeço a Carbonífera Criciúma S.A., na pessoa de Carlos Schneider que possibilitou a visita a Mina do Leão II para a realização deste trabalho.

"Without their courage and sacrifice, history would indeed be written by self-declared victors, the rich, and the powerful." Jeremy Scahill

Cardoso, R.R. 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). 2014. 26f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RESUMO

O sistema de ventilação de minas subterrâneas tem o objetivo de proporcionar aos trabalhadores condições para operarem os equipamentos durante a mineração subterrânea de forma a atender os requisitos de segurança e de saúde ocupacional. Nesse contexto, o presente trabalho visa a análise do sistema de ventilação para a Mina do Leão II, localizada no Rio Grande do Sul, que tem, como mineral extraído, o carvão. Além disso, o método principal de lavra utilizado nessa pesquisa é o de Frente Longa. Para a realização da análise do sistema de ventilação, é necessário verificar as vazões de ar essenciais para as frentes de trabalho e demais áreas, sendo obrigatório ter conhecimento das condições da mina (dimensões, fator de atrito de Atkinson, produção entre outros). Após verificado a vazão de ar, dois métodos foram aplicados para verificar o sistema de ventilação. O primeiro é um método analítico para obter uma estimativa inicial da resistência da mina e auxiliar na escolha do ventilador principal. Já o segundo é por meio de softwares (VnetPC + Pro e Ventsim Lite) na qual é possível obter um resultado mais completo, considerando os elementos relevantes ao sistema de ventilação de minas e verificar se o ventilador estará apto para suprir a demanda da mina. Conforme as condições citadas e com as devidas simplificações, a utilização dos softwares – por conseguinte – produz um resultado mais completo quando comparado ao método analítico, sendo mais simples de utilizar e de simular diversas fases da vida útil da mina.

PALAVRAS-CHAVE: Ventilação subterrânea, Condições, Simulação.

Cardoso, R.R. An analysis of a ventilation system of an underground mine divided in three stages of mining to a coal mine based on Mina do Leão II (RS). 2014. 26p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ABSTRACT

The ventilation system for underground mines aims to provide conditions for workers to use equipment during underground mining meeting the requirements of occupational health and safety. In this context, this paper aims to analyze the ventilation system of Mina do Leão II, located in Rio Grande do Sul, whose mineral mined is coal. In addition, the main mining method used in this research is Longwall. To perform the analysis of the ventilation system is necessary to check the airflow rates for the workplace and other areas, being mandatory to know the conditions of the mine (dimensions, Atkinson friction factor, production etc.). After checking the airflow rate, two methods were applied to check the ventilation system. The first is an analytical method to obtain an initial estimate of the mine resistance and support to select the main fan. The second method is through software (VnetPC Ventsim + Pro and Lite) in which it is possible to obtain a more complete result, considering the relevant components of the mine ventilation system and to verify if the fan will be able to supply the mine demand. With the cited conditions and appropriate simplifications, the use of the software produces a more robust result compared to the analytical method, as well as being easier to use and able to simulate various stages of the mine life.

KEYWORDS: Underground Ventilation, Conditions, Simulation

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO 1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 1
3. REFERENCIAL TÉORICO 1
3.1. Cálculo das vazões de ar 1
3.2. Equação da energia e cálculo da perda de carga 2
3.3. Legislação Brasileira 3
3.4. Elementos do sistema de ventilação 3
3.4.1. Ventiladores 4
3.4.2. Reguladores 4
3.4.3. Portas 4
3.4.4. Barragens 4
3.4.5. Cruzamento de ar 5
3.5. Modelos de Ventilação 5
4. DESCRIÇÃO DA MINA ESTUDADA 6
4.1. Métodos de Lavra 6
4.1.1. Método de Frente Longa 6
4.1.2. Método de Câmaras e Pilares 6
4.2. Leiaute da mina e caracterização 7
4.3. Sistema de ventilação utilizado 8
5. CONSIDERAÇÕES DA MODELAGEM 8
6. APLICAÇÃO DOS MÉTODOS 9
6.1. Cálculo das vazões de ar 9
6.2. Cálculo da resistência da mina e seleção dos ventiladores 10
6.3. Aplicação do método computacional para a simulação da vazão de ar e considerações sobre o método 11
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS 14
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 15
APÊNDICE I 16
APÊNDICE II 16
APÊNDICE III 17
APÊNDICE IV 17
APÊNDICE V 17
ANEXO I 17
ANEXO II 18
ANEXO III 18
ANEXO IV 19
ANEXO V 20
ANEXO VI 20

1. INTRODUÇÃO

A análise do sistema de ventilação de minas subterrâneas possui extrema importância para garantir as condições adequadas de respiração dos trabalhadores no subsolo e, também, possibilitar a diluição de gases e a remoção da poeira originada pela mineração. Essa avaliação auxiliará na escolha de um ventilador principal que seja apto a atender toda vida útil da mina. É possível alcançar tais objetivos quando os parâmetros de mineração definidos como a taxa de extração de minério, o número de operadores atuando no ambiente, os dados de emissões de gases (há geração de metano em minas de carvão) e a geração de poeira devido ao método de lavra que – para esta análise – será de frente longa, do inglês *Longwall*. Com esses dados, é possível calcular valores de vazões de ar com intuito de diluir possíveis contaminantes e de atender a norma vigente no Brasil.

Após calculados tais valores, a realização dessa análise analítica das quedas de pressões visando a obtenção da resistência da mina é executável. Todavia, uma aproximação é esperada, visto que não são considerados determinados elementos do sistema de ventilação – como os reguladores de ar. Para obter um resultado mais aproximado, softwares para a simulação de vazão de ar são utilizados e, assim, verificar se o ventilador principal está capacitado para o sistema proposto.

Neste trabalho, verifica-se a utilização da solução analítica para auxiliar a escolha do ventilador principal e de um método numérico, por meio de programas computacionais, para simular as vazões de ar para uma mina de carvão. O método de lavra de Frente Longa será aplicado para a extração de minério, também haverá três estágios de modo a simular o início, o meio e o fim de vida da mina para verificar se o ventilador é competente para o sistema proposto. Essa metodologia empregada possibilita a verificação do sistema de ventilação de outras minas, modificando três fatores: o método de lavra, os parâmetros de mineração e o leiaute da mina.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O sistema de ventilação de minas é fundamental para garantir as condições básicas de trabalho para o ser humano de maneira a diluir a concentração de possíveis contaminantes que possam surgir durante o processo de mineração. Desta forma, conforme Mcpherson, 1993 há duas maneiras de desenvolver o sistema de ventilação, analiticamente ou numericamente, esse segundo método tornou-se mais prático a partir de 1960 quando houveram diversas pesquisas para tornar mais eficiente o método numérico de avaliar sistemas de ventilação de minas. Também, Pereira, 2013 apresenta um estudo com os principais parâmetros para a implantação de um sistema de ventilação em minas subterrâneas, bem como um método analítico para a escolha do ventilador principal (baseado na Lei do Quadrado da ventilação de minas) e o uso do programa VnetPC para auxiliar a determinação o sistema auxiliar de ventilação.

3. REFERENCIAL TÉORICO

Neste capitulo, os métodos utilizados são apresentados para os cálculos de vazão de ar e de perda de carga. Também são apresentados os elementos constituintes do sistema de ventilação e da legislação.

3.1. Cálculo das vazões de ar

Para calcular a vazão de ar necessária com a finalidade de suprir as frentes de trabalho conforme Brasil, 1999 dois procedimentos foram utilizados para esse cálculo. O primeiro em função do número de pessoas e o segundo no caso de desenvolvimento sem uso de veículos a diesel. Assim, para a vazão de ar em função do número de pessoas:

$$Qt = Q1n \tag{3.1}$$

Onde *Qt* é a vazão total, *Q1* é a quantidade de ar por pessoa e *n* é o número de pessoas no turno de trabalho. Já para o cálculo de vazão de ar para o desenvolvimento sem o uso de veículos diesel:

$$Qt = QdA \tag{3.2}$$

Onde *Qt* é a vazão total, *Qd* é a vazão de ar para área em desenvolvimento e *A* é área em desenvolvimento. Contudo, há geração de gás metano e de poeira proveniente do processo de mineração em minas de carvão. Então, mais dois métodos de cálculo de vazão foram adicionados, havendo um para a remoção do gás metano e o outro para a redução da concentração de poeira no ar, segundo Mcpherson, 1993. Portanto, a vazão de ar para a remoção de gás metano é dada por:

$$Qt = \frac{100Eg}{Cg} \tag{3.3}$$

Onde *Qt* é a vazão total, *Eg* é a taxa de emissão de gás metano e *Cg* é a máxima concentração do mesmo permitida por lei em percentual de volume. Já para o cálculo de vazão de ar para reduzir a concentração de poeira no ar é dado por:

$$Qt = \frac{EdP}{Cd} \tag{3.4}$$

Onde *Qt* é a vazão total, *Ed* é a taxa de emissão de poeira, *P* é a taxa de produção de minério e *Cd* é a máxima concentração de poeira permitida por lei.

3.2. Equação da energia e cálculo da perda de carga

A equação da energia é empregada para relacionar as condições entres dois pontos para um sistema de trajeto único, dada por:

$$\frac{p1}{\rho} + \frac{v1^2}{2} + gz1 + w12 = \frac{p2}{\rho} + \frac{v2^2}{2} + gz2 + F12 \tag{3.5}$$

Onde *p* é a pressão, *v* a velocidade, *z* é a elevação, *g* aceleração da gravidade, *ρ* é a massa especifica, *w12* é trabalho do eixo por unidade de massa e *F12* são as perdas de carga do caminho, os índices 1 e 2 indicam a posição no curso. Também para o cálculo de velocidade a partir da vazão que é dado por:

$$Q = VA \tag{3.6}$$

Onde *Q* é a vazão, *V* é a velocidade e *A* é a área.

De acordo com Mcpherson, 1993 para o cálculo de perda de carga em minas subterrâneas, primeiramente, calcula-se a resistência de Atkinson que é o fator que governa a quantidade de ar que irá passar por um setor quando um diferencial de pressão for aplicado no mesmo. Esse fator varia conforme a rugosidade e a geometria de cada setor, e é dado por:

$$R = kL\frac{per}{A^3} \tag{3.7}$$

Onde *R* é a resistência de Atkinson, *k* é o fator de atrito de Atkinson que é o coeficiente de Chezy Darcy multiplicado pela massa específica do ar dividido por dois para o caso de turbulência totalmente desenvolvida, *L* é comprimento do setor, *per* é o perímetro da seção do setor e *A* é área da seção do setor, o fator de atrito de Atkinson utilizado considera massa especifica do ar em 1,2 kg/m³. Além da resistência de Atkinson, também há a resistência de Atkinson para perdas menores, que é utilizada para calcular as perdas de cargas em curvas, dada por:

$$Rs = \frac{X\rho}{2A^2} \tag{3.8}$$

Onde *Rs* é a resistência de Atkinson para perdas menores, *X* é o fator de perda de carga menor, *ρ* é a massa especifica do ar sendo utilizado o valor de 1,2 kg/m³ e *A* é área da seção do setor. Entretanto, nem todos os setores possuem uma seção quadrada ou circular, logo, o diâmetro hidráulico é introduzido para auxiliar nos cálculos de seções com diferentes formatos, sendo aplicado para casos em que a razão entre altura e largura for inferior a 4. A equação é dada por:

$$Dh = \frac{4A}{per} \tag{3.9}$$

Onde *Dh* é o diâmetro hidráulico, *A* é a área da seção do setor e *per* é o perímetro da seção do setor. Portanto, com a resistência de Atkinson calculada é possível calcular a queda de pressão por atrito de cada setor pela Lei do quadrado para ventilação em minas, dada por:

$$p = RQ^2 \tag{3.10}$$

Onde *p* é a queda de pressão por atrito, *R* é a resistência de Atkinson de cada setor e *Q* é a vazão de ar que irá percorrer aquele setor. Para estimar a resistência de Atkinson da mina, soma-se todas as quedas de pressão de todos os setores e junto a vazão total de ar utilizada no sistema de ventilação aplica-se a equação 3.10 obtendo-se a resistência da mina segundo Mcpherson, 1993. Portanto, ao obter o valor de resistência de Atkinson da mina é possível verificar a pressão necessária para diferentes vazões de ar. Esse valor, todavia, é apenas uma aproximação visto que os reguladores não são considerados nessa análise.

3.3. Legislação Brasileira

No Brasil, as condições de ventilação são determinadas pela Norma Regulamentadora 22, de acordo com Brasil, 1999. O sistema deve atender os seguintes requisitos: (a) suprimento de oxigênio; (b) renovação continua de ar; (c) diluição de gases inflamáveis e de poeiras do ambiente de trabalho; (d) temperatura e umidade adequados ao trabalho humano e (e) ser mantido e operado de forma regular e continua. Também conforme a Brasil, 1999 para minas de carvão a vazão de ar para cada frente de trabalho deve ser de 0,1 m³/s por pessoa, já para os demais travessões deve haver uma vazão de ar de 4,2 m³/s onde houver a circulação de pessoas e máquinas. Além de que para o caso de desenvolvimento sem o uso de veículos ou equipamentos a óleo diesel, a vazão de ar deverá ser dimensionada à razão de 0,25m³/s por metro quadrado de frente em desenvolvimento. Também, a velocidade do ar não deve ser inferior a 0,2 m/s ou superior à média de 8 m/s onde haja circulação de pessoas.

3.4. Elementos do sistema de ventilação

Para a análise do sistema de ventilação é necessário conhecer os principais elementos que compõem o sistema. Na figura 3.1 são mostrados os principais elementos:

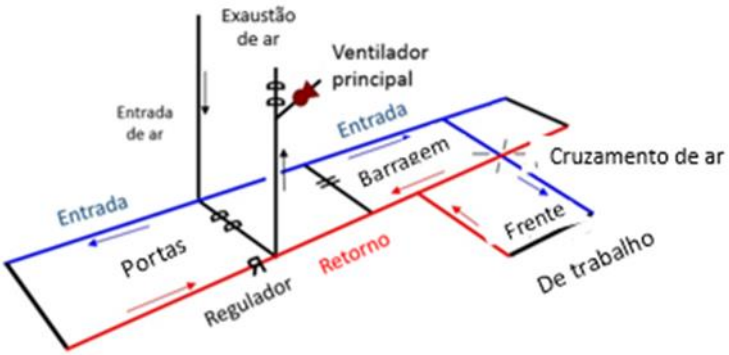


Figura 3.1 – Principais elementos do sistema de ventilação. (Fonte: Mcpherson, 1993)

Na figura 3.1 são verificados esquematicamente os principais elementos que são os ventiladores, os reguladores, as portas, as barragens e os cruzamentos de ar, definidos a seguir:

3.4.1. Ventiladores

É o principal método de insuflar ou fazer a exaustão da vazão de ar para alimentar o sistema de ventilação de mina, também podem ser utilizados ventiladores auxiliares para ajudar a ventilar frentes de trabalho ou realizar a exaustão de ar das mesmas. Os ventiladores podem ser instalados de forma a fazer a exaustão de ar de uma mina ou forçar o insuflamento de ar para a mesma. A escolha desse método geralmente está associada ao tipo de contaminantes presentes no ar, como gases nocivos ou poeiras. É possível instalá-los de modo a fazer combinações seja em série, seja em paralelo, visando ao aumento de pressão ou de vazão de ar respectivamente, dependendo da necessidade do sistema.

3.4.2. Reguladores

É um sistema que realiza a abertura ou o fechamento de orifícios para regular a vazão de ar necessária para ventilar uma seção da mina. Esse método compreende na instalação de uma porta com um sistema de persianas, ou com um painel de correr, para regular a vazão de ar para uma determinada seção da mina pela abertura ou fechamento dessas estruturas propostas. Esse mecanismo pode ser manual ou automático e irá atuar a partir do monitoramento pela vazão ar presente nos setores da mina. Na Figura 3.2 (a) é mostrado o modelo de regulador.

3.4.3. Portas

As portas são instaladas em locais em que é necessário manter um acesso entre um sistema de entrada de ar e de retorno de ar. No caso, é um sistema composto por duas portas separadas a uma determinada distância. A primeira porta ao ser aberta faz com que um determinado equipamento ou veículo possa acessar o espaço vago e, consequentemente, realizar o fechamento para, posteriormente, abrir a segunda porta para o mesmo atravessar o sistema de portas. Assim, com esse método não há alteração nas vazões de ar ou inversão do sentido da vazão de ar. Além disso as portas são instaladas de modo a abrir para o lado de maior pressão. Desse modo elas realizam o auto fechamento e mantem o sentido da vazão de ar. Na Figura 3.2 (b) é mostrado o modelo de portas.

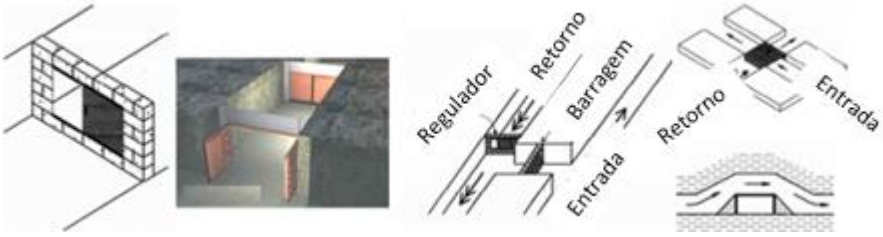
3.4.4. Barragens

Com o desenvolvimento da mina, novas seções são abertas enquanto as antigas são esgotadas. Quando uma frente de trabalho está exaurida, é desnecessário manter a

ventilação daquele setor. Portanto, esse isolamento da seção é realizado com a construção de uma parede de alvenaria, de madeira ou de aço proporcionando o fechamento por completo com o uso das barragens. Também é recomendado realizar um bom fechamento para evitar o vazamento de gases provenientes da rocha, como metano no caso de minas de carvão. Na Figura 3.2 (c) é mostrado o modelo de barragem.

3.4.5. Cruzamento de ar

O cruzamento de ar ocorre em locais na qual a vazão de ar de entrada cruza com a vazão de ar de retorno, no entanto, estes fluxos de ar não podem se misturar. Então, é realizada a construção de uma passagem, na qual a vazão de ar de retorno usará um caminho da passagem e a vazão de ar de entrada usará o outro caminho de modo a não haver a mistura de ar. Na Figura 3.2 (d) É mostrado o modelo de cruzamento de ar.



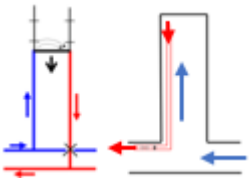
(a) (b) (c) (d)

Figura 3.2 – (a) Modelo de regulador, (b) modelo de portas, (c) modelo de barragem, (d) modelo de cruzamento de ar. (Fonte: Division of Mines, 2004)

3.5. Modelos de Ventilação

Para a ventilação do método de Frente Longa o sistema de ventilação proposto foi o de entrada única recuando com um formato similar a um “U”, conforme é mostrado na Figura 3.3 (a).

Para a ventilação do método Câmara e Pilares um sistema auxiliar de ventilação é proposto para fazer a exaustão do ar utilizado na abertura do painel, conforme mostra a Figura 3.3 (b).



(a) (b)

Figura 3.3 – (a) Modelo “U” de ventilação para o método de Frente Longa, (b) Modelo de ventilação auxiliar para o método de Câmara e Pilares. (Fonte: Mcpherson, 1993)

Na Figura 3.3 (a) o ar fresco (em azul) proveniente de uma via de entrada (galeria subterrânea) entra por um lado do painel a ser minerado e é conduzido até a frente de trabalho. Após ficar contaminado com metano e poeira devido ao processo de mineração, o ar contaminado (em vermelho) retorna pelo outro lado do painel sendo dispersado em uma via de retorno sem se misturar com o ar fresco, pois haverá um cruzamento de ar. Como é mostrado na Figura 3.3 (b) o ar fresco será conduzido à frente de trabalho pelas galerias subterrâneas até chegar ao local de mineração. Assim, um duto auxiliar será instalado próximo ao equipamento de mineração para realizar a exaustão do ar contaminado devido o processo de mineração.

4. DESCRIÇÃO DA MINA ESTUDADA

Nesta seção serão apresentadas as informações da mina para a verificação do sistema de ventilação. Também serão mostrados os aspectos sobre mineração relevantes ao processo de análise do sistema de ventilação.

4.1. Métodos de Lavra

Para este trabalho foram utilizados dois tipos de lavra para a análise do sistema de ventilação conforme Carbonífera Criciúma S.A., 2014. O método de Frente Longa que é o responsável pela mineração propriamente dita, na qual há extração de carvão em grandes quantidades e o de Câmaras e Pilares que é responsável pela abertura de novas galerias que posteriormente serão mineradas pelo método de Frente Longa.

4.1.1. Método de Frente Longa

O método de lavra empregado para a mineração neste caso é o de Frente Longa. Sendo definido:

> "O método de frente longa extrai minérios ao longo de uma face frontal reta que contenha uma grande extensão longitudinal. A área próxima a face de mineração é mantida aberta para gerar espaços para os operadores e o maquinário." [Hullistrud e Bullock, 2001]

Na figura 4.1 (a) é possível verificar o método de mineração descrito acima, na qual a cortadeira faz um movimento transversal realizando a extração do minério e avançando longitudinalmente. Na parte posterior, há os suportes hidráulicos que fazem a sustentação do teto e o avanço em conjunto com a cortadeira, e à medida que os suportes hidráulicos avançam, o teto irá desmoronar.

Segundo Alvarenga, 2012 o método de lavra de Frente Longa é comum para minas de carvão para profundidades de 300 m a 1600 m e possui uma altíssima produtividade, sendo largamente empregado nos EUA, Austrália e outros países. Esse tipo de lavra – entretanto – foi utilizado somente uma vez e de forma experimental em Minas do Leão I no Brasil.

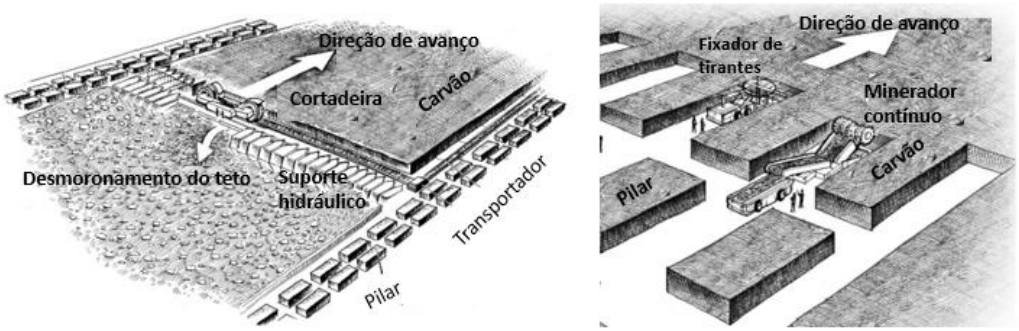
Como o método de Frente Longa foi aplicado somente uma vez no Brasil e de modo experimental, os valores de vazões para as frentes de trabalho podem ser comparados a valores de outras minas para obter uma ideia de grandeza. Consoante Mayes e Gillies, 2000 a vazão de ar nas frentes de trabalho variaram de 25 m^3/s até 100 m^3/s com uma seção de lavra variando de 1,8 m até 5,5 m de altura, com as mais variadas taxas de emissão de gases iniciando em 0,1 m^3/t até 22 m^3/t contendo metano e dióxido de carbono numa pesquisa com 16 minas utilizando o método de Frente Longa na Austrália.

4.1.2. Método de Câmaras e Pilares

O método de lavra empregado para abrir novas galerias é o de Câmaras e Pilares, em inglês conhecido como *Room and Pillar.* Sendo definido:

> "O método deixa pilares para suportar o teto; também para recuperar a máxima quantidade de minérios. Durante a mineração objetiva-se deixar o menor número possível de pilares. O teto é mantido intacto, e tirantes são instalados para reforçar a rocha. Câmaras e pilares são geralmente organizados em padrões regulares. Os pilares podem ser projetados com seções circulares ou quadradas ou em uma forma de paredes alongadas separando as câmaras." [Hullistrud e Bullock, 2001]

Na figura 4.1 (b) é possível verificar o método de mineração descrito acima, na qual o minerador contínuo faz a abertura de novas galerias enquanto o fixador de tirantes aplica os tirantes no teto.



(a) (b)

Figura 4.1 – Método de Frente Longa (a), Método de Câmaras e Pilares (b). (Fonte: Colorado School of Mines, 2011)

4.2. Leiaute da mina e caracterização

O leiaute simplificado da Mina do Leão 2 usado para a análise desse trabalho é mostrado na Figura 4.2.

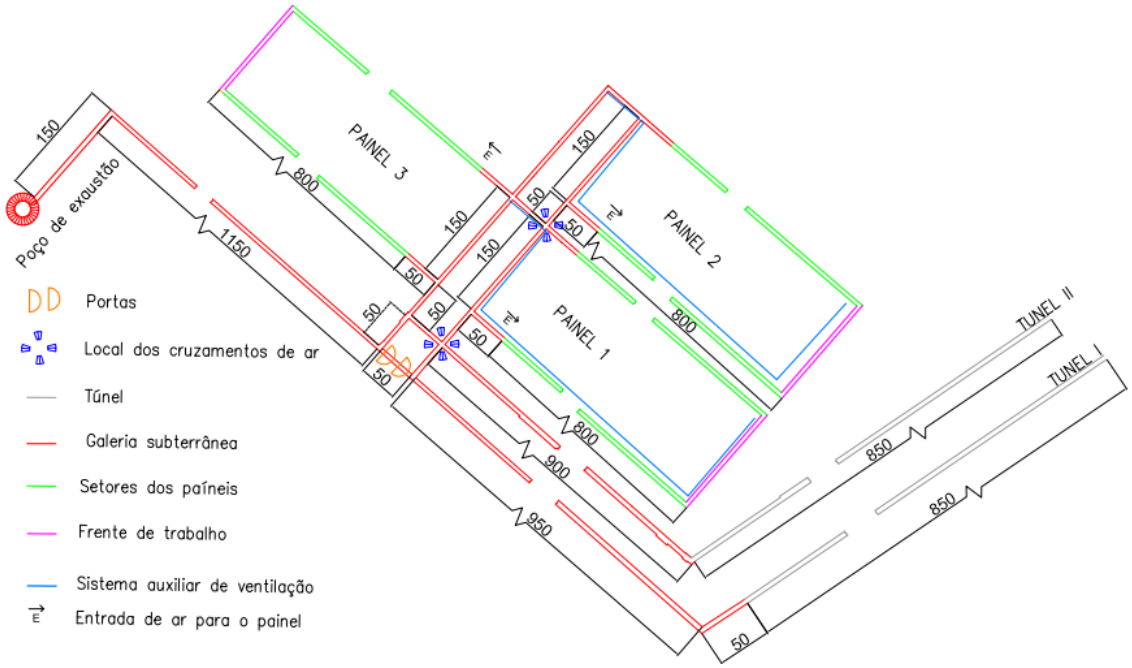


Figura 4.2 – Leiaute simplificado da Mina do Leão II com os principais elementos do sistema.

Na Figura 4.2 estão mostrados os setores da mina, no qual o túnel 1 é para o acesso de veículos, de operadores e de entrada de ar. Já o túnel 2 é usado para a retirada de minérios da mina por meio de um transportador e também entrada de ar. As galerias subterrâneas são usadas para a ventilação, dependendo da posição de entrada de ar ou de retorno de ar, e também para a locomoção dos operadores e máquinas. Os painéis que serão minerados foram divididos em Painel 1, Painel 2 e Painel 3 - compondo os estágios de mineração. É possível, também, localizar as portas e os cruzamentos de ar. Todas as dimensões estão em metros. Os estágios foram divididos da seguinte maneira:

a) Estágio 1: compreende a fase inicial da mina na qual é a abertura do painel 1.
b) Estágio 2: é a simulação da metade da vida da mina abrangendo a mineração do painel 1 e a abertura do painel 2.

c) Estágio 3: é o final de vida da mina no que compreende somente a mineração do painel 3.

Os três estágios são uma simulação da vida da mina para dimensionar o ventilador principal de modo que esse atenda todos os estágios de vida da mina para as variadas vazões de ar e quedas de pressão devidas às mudanças no sistema de ventilação. Há o sistema auxiliar de ventilação utilizado para abertura de novas frentes de trabalho para realizar a exaustão do ar utilizando um duto flexível com reforço e diâmetro de 0,8 m - esse conforme Carbonífera Criciúma S.A., 2014, pois esse valor é verificado em outras minas. O percurso do sistema auxiliar de ventilação está na Figura 4.2. Os dados referentes a área de cada setor, ao perímetro, ao fator de atrito de Atkinson, ao formato da seção e a condição da superfície são mostrados no Anexo V. Além dos dados de cada setor mostrados no Anexo V, é imprescindível o conhecimento dos dados de mineração para a abertura de novas frentes de trabalho e para as frentes de trabalho que são mostrados no Anexo VI. No Anexo VI são mostrados os números de operadores empregados, a área de frente em desenvolvimento (área que está sendo minerada) e da quantidade de minério extraído por turno. Além disso, o carvão presente na Mina do Leão II é do tipo Betuminoso. Os dados dos Anexos V e VI são segundo Carbonífera Criciúma S.A., 2014 exceto o valor do fator de atrito de Atkinson para sistema auxiliar de ventilação que foi utilizado conforme Mcpherson,1993 para o duto selecionado.

4.3. Sistema de ventilação utilizado

Conforme mostrado na seção 3.5 o modelo de ventilação para o método de Frente Longa é o de entrada única recuando em formato de “U”, pois ele se ajusta a disposição das galerias subterrâneas já construídas em Minas do Leão II, assim, havendo uma galeria subterrânea principal para a entrada de ar fresco e outra galeria subterrânea principal em paralelo para o retorno do ar de exaustão.

Já para o método de Câmaras e Pilares o sistema auxiliar de ventilação foi escolhido, porque proporciona menor emissão de poeira para os trabalhadores conforme Kissel, 2003.

5. CONSIDERAÇÕES DA MODELAGEM

Para a realização deste trabalho foi preciso assumir algumas simplificações, listadas abaixo:

1- Não foram feitos estudos sobre temperatura e umidade no ambiente de trabalho, pois não havia informações sobre a temperatura da rocha e sobre a potência dos equipamentos utilizados no processo de mineração (fontes de calor). Dessa maneira, a temperatura foi considerada constante.
2- A massa específica do ar foi considerada constante, fixado em 1,2 kg/m³, pois a profundidade máxima na mina é de 220 m e a temperatura é constante.
3- Na análise analítica não foram consideradas as perdas de cargas para os reguladores devido à dificuldade do cálculo, por meio de resistência equivalente.
4- No túnel 2 há um transportador de correias o que implica numa maior perda de carga, logo, a consideração usada é que toda a energia perdida pelo ar na parte superior do transportador (movimento contrário do minério em relação ao ar) é recuperado na parte inferior do transportador onde há o movimento solidário do ar com correia.
5- Para o cálculo de queda de pressão por atrito para o método de Frente Longa foi considerado o caso com maior a maior queda de pressão, ou seja, a frente de trabalho está na distância máxima em relação as galerias subterrâneas (850m) e após isso ela irá se aproximando das galerias conforme o método de ventilação empregado.
6- Para as galerias em desenvolvimento foi considerado que a vazão de ar percorreu todo o trajeto do painel como ocorre no método de Frente Longa. Essa metodologia foi usada visto que os softwares e o método analítico trabalham com sistemas fechados, assim

não é possível colocar um setor sem saída com um sistema auxiliar de ventilação para fazer a exaustão do ar.

7- Os valores de emissão de poeira e metano foram retirados da literatura, pois Minas do Leão II não está em operação.
8- O fator de atrito de Atkinson foi considerado constante e para a situação de escoamento turbulento e totalmente desenvolvido. Assim, não são considerados variações nas superfícies dos setores, bem como pequenas expansões e contrações nas vias foram desconsideradas Também todas as curvas são consideradas de 90°.
9- Não foram considerados obstruções nos setores (circulação de máquinas e equipamentos obstruindo as vias).

Considerando essas simplificações, na Tabela 5.1 estão os dados utilizados para a emissão de poeira e metano, bem como os valores máximos para poeira betuminosa e metano permitidos pela norma brasileira.

Tabela 5.1 – Valores de emissão de poeira e metano e os respectivos limites

Método de mineração	Concentração de Poeira [mg/m³]	Emissão de Poeira [mg/s]	Emissão de Metano [m³/t]	Concentração máxima de poeira [mg/m³]	Concentração máxima de metano [%]
Frente longa	0,75	14,6	10	0,9	1
Câmaras e Pilares	0,5	4,8	10		

A emissão de poeira para o método de lavra de Frente Longa mostrada na Tabela 5.1 foi obtida para uma extração média de 2050 toneladas por turno utilizando uma cortina (evitando que a poeira do desmoronamento se espalhe, ocorre atrás dos suportes hidráulicos), uso de spray de água (prevenindo a geração de poeira no ponto de corte) e considerando apenas o corte unidirecional (na direção em que o ar está escoando) de acordo com Stricklin e Haney, 2014. Já para o procedimento de lavra de Câmaras e Pilares a emissão de poeira mostrada na Tabela 5.1 foi obtida utilizando um sistema auxiliar de exaustão junto a um sistema de cortina para isolar a área de trabalho e a aplicação de spray de água no ponto de corte para prevenir a geração de poeira no local em que os operadores estão posicionados conforme indicado por Kissel, 2003.

No caso de emissão de metano, conforme mostra a Tabela 5.1, o valor utilizado é para minas subterrâneas pertencentes a jazida de Leão (que contempla Mina do Leão I e II) conforme observado pelo Sindicato Nacional da Industria de Extração de Carvão Mineral, 2006. Já os valores para máxima concentração de poeira e de metano foram obtidos conforme American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2010.

6. APLICAÇÃO DOS MÉTODOS

Nesta seção são aplicados os métodos descritos neste trabalho, desde o cálculo da vazão de ar utilizada no sistema de ventilação até a simulação de vazões por meio dos softwares.

6.1. Cálculo das vazões de ar

Conforme descrito no capítulo três, há 4 maneiras de calcular a vazão para as frentes de trabalho: duas de acordo com Brasil,1999 e duas conforme Mcpherson,1993. Segundo Brasil,1999, os demais setores que possuem circulação de pessoas e de máquinas necessitam uma vazão de 4,2 m³/s. A Tabela 6.1 sumariza os resultados de vazão de ar para as frentes de trabalho.

Tabela 6.1 – Valores de vazões de ar conforme os 4 métodos de cálculo para as frentes de trabalho

Método de mineração	Vazão de ar para o n° de pessoas (eq. 3.1) [m³/s]	Vazão de ar para desenvolvimento (eq. 3.2) [m³/s]	Vazão de ar para metano (eq. 3.3) [m³/s]	Vazão de ar para poeira (eq. 3.4) [m³/s]
Frente longa	0,2	2,5	48,6	15,7
Câmaras e Pilares	0,2	1	6,9	5,3

Portanto, para a escolha da vazão de ar para as frentes de trabalho o valor deve suprir a demanda dos demais valores de vazão de ar e não sendo o somatório desses valores calculados conforme a Brasil,1999. Desse modo, a vazão para a frente de trabalho da Frente longa é de 48,6 m³/s e para Câmaras e Pilares é de 6,9 m³/s.

6.2. Cálculo da resistência da mina e seleção dos ventiladores

Para o cálculo da resistência de Atkinson para a mina em cada um dos estágios e para o sistema auxiliar de ventilação foi utilizado os dados descritos no capitulo 4.2, e posterior aplicação da equação 3.7. Já para as resistências de Atkinson para perdas menores foram usados os dados do capítulo 4.2 e os dados de fator de perda de carga menor presentes em Mcpherson, 1993 para curvas (Anexo I) e posterior aplicação da equação 3.8. Após o cálculo de resistência de Atkinson para cada setor e para cada trecho do sistema auxiliar de ventilação, foram calculadas as quedas de pressão por atrito de acordo com as vazões de ar dimensionadas para as frentes de trabalho e locais de circulação para cada um dos estágios e para o sistema auxiliar de ventilação (ambos conforme capítulo 6.1). Desse modo ao fazer o somatório de queda de pressão de todos os setores para cada um dos estágios, e com a vazão de ar total para cada um dos estágios, ao aplicar a equação 3.10 encontra-se a resistência de Atkinson para a mina em cada um dos estágios. Essa metodologia também foi aplicada para o cálculo de queda de pressão no sistema auxiliar de ventilação, porém o somatório foi para cada trecho do duto. No Apêndice I estão os cálculos de resistência de Atkinson para os setores da mina e trechos do sistema auxiliar de ventilação. Na Tabela 6.2 é possível verificar a resistência de Atkinson para os casos citados acima.

Tabela 6.2 – Resultados obtidos coma a metodologia analítica para os três estágios e sistema auxiliar de ventilação

Estágio	Vazão Total [m³/s]	Queda de Pressão por atrito [Pa]	Resistência de Atkinson [Ns²/m⁸]
Estágio 1	16	20	0,078
Estágio 2	65	765,95	0,181
Estágio 3	58	750,52	0,223
Sistema auxiliar	6,9	422,17	8,76

Portanto, com os dados da resistência de Atkinson para cada estágio é possível construir o gráfico de pressão por vazão de ar para auxiliar na escolha do ventilador principal. Entretanto, esses valores são uma aproximação, porque os reguladores de vazão de ar não foram incluídos devido à complexidade do cálculo. Além disso, no caso do sistema auxiliar de ventilação é necessário considerar a pressão para expelir o ar de retorno do duto para a via de retorno. Esse cálculo foi realizado pela equação da energia e considerando uma velocidade de exaustão de 3,45 m/s e sem variações de altura no percurso. Há necessidade de que uma pressão total de 429 Pa seja fornecida para o sistema auxiliar de ventilação. Portanto, na Figura 6.1 é mostrado o gráfico de pressão por vazão de ar para os três estágios.

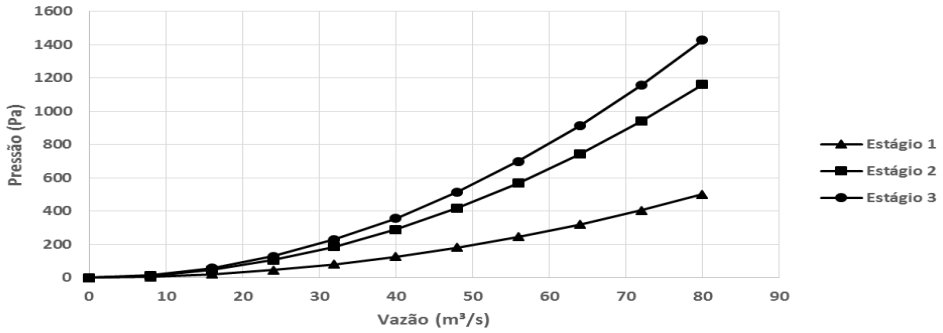


Figura 6.1 – Gráfico de pressão x vazão de ar para as resistências de Atkinson para cada estágio da mina.

Como é possível verificar na Figura 6.1, o caso mais crítico é o estágio 3, em que é necessário uma pressão de, aproximadamente, 750 Pa para uma vazão de 58 m³/s. Visto que essa pressão necessária diminuirá à medida que o painel for minerado, pois a frente de trabalho irá se aproximar das galerias subterrâneas causando uma menor queda de pressão por atrito. Desse modo, essa é a primeira estimativa para a escolha do ventilador principal. Como há uma dificuldade em encontrar catálogos para ventiladores com uma alta vazão o modelo encontrado é o HCLP 160 Fläktwoods (do catalogo Fläktwoods, 2010) para ser instalado no poço de exaustão. O ventilador é instalado nessa posição de modo a realizar a exaustão do ar da mina, pois conforme Mcpherson, 1993 é o mais indicado para minas com geração de gases. Além disso, o ventilador escolhido é um modelo centrifugo, com as pás curvadas para trás, sendo apto a trabalhar em ambientes com poeira. A escolha desse ventilador foi por este ser mais estável e assim haver uma menor probabilidade de estolar com baixas vazões. O ventilador escolhido foi o Fläktwoods Aerofoil fan 80JM/25/4/9/26 para o sistema auxiliar de ventilação com 0,8m de diâmetro para dutos conforme o catalogo da Fläktwoods, 2013. Esse ventilador é axial e foi escolhido por poder funcionar no sentido reverso da rotação (caso seja necessário soprar ar para alguma frente de trabalho). Esse ventilador atende a vazão de 6,9 m³/s e uma pressão de 429 Pa. As curvas características de ambos ventiladores encontram-se nos Anexo II e III.

6.3. Aplicação do método computacional para a simulação da vazão de ar e considerações sobre o método

As simulações realizadas nesse estudo têm o intuito de avaliar se o ventilador principal é capaz de suprir a demanda da mina para cada estágio. Segundo Chasm Consultin, 2013 e Mine Ventilation Services, 2013 o modelo numérico empregado nos softwares Ventsim Lite e VnetPC + Pro é Hardy Cross. Então, os dados de entrada para o software VnetPC + Pro para essas análises foram: as vazões de ar dimensionadas no capítulo 6.1, as resistências de Atkinson para cada setor (O software calcula os reguladores para obter as vazões de ar desejadas) e a curva característica do ventilador principal. Da Figura 6.2 até a Figura 6.4 são mostradas as simulações de vazões de ar para os três estágios pelo software VnetPC + Pro.

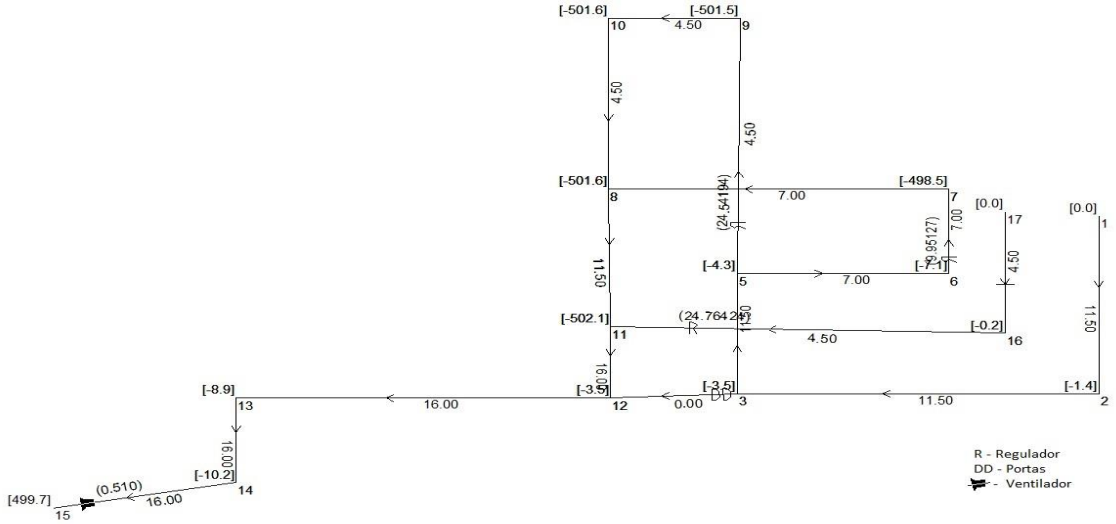


Figura 6.2 – Simulação da vazão de ar para o estágio 1 utilizando o ventilador selecionado com o programa VnetPC + Pro.

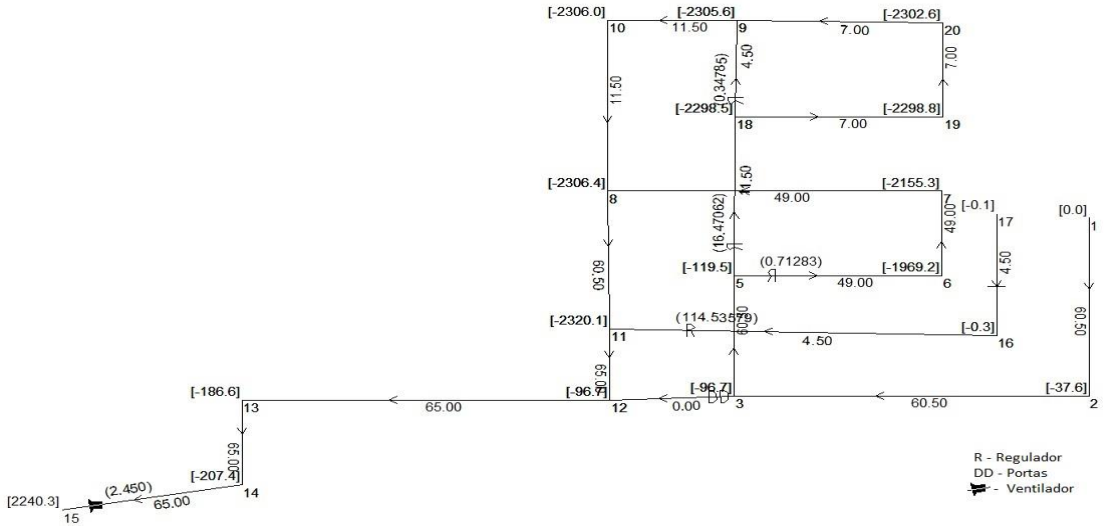


Figura 6.3 – Simulação da vazão de ar para o estágio 2 utilizando o ventilador selecionado com o programa VnetPC + Pro.

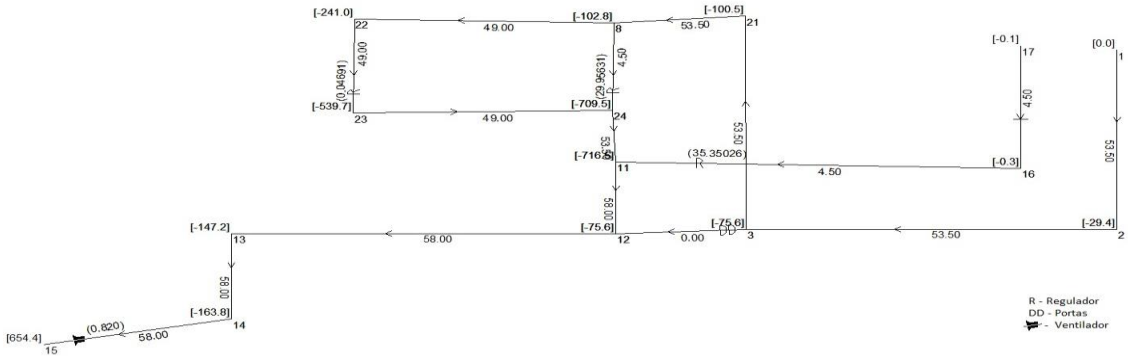


Figura 6.4 – Simulação da vazão de ar para o estágio 3 utilizando o ventilador selecionado com o programa VnetPC + Pro.

Nos três casos, o software aplicou reguladores no túnel 2 (como a resistência de Atkinson do túnel 2 é menor comparado aos setores que serão minerados – em paralelo – causaria uma maior vazão de ar no túnel 2, assim, o regulador é instalado nessa posição),

galeria subterrânea onde há circulação (para direcionar a maior vazão de ar para frente de trabalho) e nas frentes de trabalho (a pressão fornecida pelo ventilador está acima do necessário). É possível notar que houve uma redução na mina no estágio 3. Isso ocorre devido a instalação das barragens, pois não é necessário ventilar as áreas que não serão mais utilizadas. Os termos entre colchetes são as pressões relativas.

Já para o software Ventsim Lite os dados de entrada foram as resistências de Atkinson para cada setor, e foi necessário instalar os reguladores nos setores para direcionar a correta vazão de ar para cada frente de trabalho e cada área de circulação (esta instalação de reguladores é por meio da colocação de uma resistência de Atkinson em um setor e posteriormente avaliação da simulação da vazão de ar, repetindo o processo até alcançar o valor de vazão de ar desejado) além da curva característica do ventilador. Do Apêndice III até o Apêndice V são mostradas as simulações para a vazão de ar do software Ventsim Lite para os três estágios propostos.

Para os três casos, foram instalados reguladores no túnel 2 (como a resistência de Atkinson do túnel 2 é menor comparado aos setores que serão minerados – em paralelo – causaria uma maior vazão de ar no túnel 2, assim, o regulador é instalado nessa posição), na galeria subterrânea onde há circulação (para direcionar a maior vazão para frente de trabalho) e nas frentes de trabalho (a pressão fornecida pelo ventilador está acima do necessário). Com os resultados obtidos é possível comparar os valores de vazão de ar e de pressão para o método analítico e para as simulações conforme mostra a Tabela 6.3. No estágio 3, é mostrado no Apêndice V a presença do painel 1 e do 2, todavia ambos estão sem vazão de ar (conforme mostra a legenda) devido a instalação das barragens.

Tabela 6.3 – Comparação entre os resultados obtidos com o método analítico e através das soluções numéricas.

Estágio	Método Analítico		Rotação do Ventilador nas simulações [RPM]	VnetPc + Pro		Ventsim Lite		Variação entre simulações [%]	
	Vazão [m³/s]	Pressão [Pa]		Vazão [m³/s]	Pressão [Pa]	Vazão [m³/s]	Pressão [Pa]		
Estágio 1	16	20	300	16	510	16,8	497,3	4,76%	-2,55%
Estágio 2	65	765,95	800	65	2450	65,8	2396,2	1,22%	-2,25%
Estágio 3	58	750,52	600	58	820	59,4	734,5	2,36%	-11,64%

Conforme é verificado na Tabela 6.3, o método analítico nos estágios 1 e 2 possui uma pressão necessária muito inferior comparado as duas simulações, isso é decorrente da ausência de reguladores no cálculo. No estágio 3, os três métodos estão próximos havendo variação de até 11,64% entre eles, mesmo não sendo incluído os reguladores no método analítico. Quando as simulações foram comparadas, os resultados de vazão de ar variaram até 4,76% e para pressão até 11,64%. Essas diferenças ocorreram, uma vez que no software VnetPC + Pro a vazão de ar é inserida em cada setor conforme calculado e o software calcula os reguladores (resistências de Atkinson) necessários para obter tais valores. O Ventsim Lite é diferente, pois é inserida a vazão total e os reguladores são inseridos manualmente (resistências de Atkinson na forma de tentativa e erro até obter o valor de vazão de ar desejado por meio da simulação). Para as simulações em ambos os softwares, o sistema de ventilação possui o mesmo número de setores e nós (1° estágio 17 setores e 16 nós, 2° estágio 20 setores e 19 nós e 3° estágio 16 setores e 15 nós). Dessa maneira, é possível inserir a mesma resistência em cada setor. Também, conforme Brasil, 1999 a velocidade máxima do ar não pode exceder 8 m/s, dessa forma a máxima velocidade encontrada foi de 6,3 m/s, assim não excedendo o limite.

Os resultados obtidos levaram em conta as simplificações 6, 8 e 9 (descritas no capítulo 5) devido às condições do método numérico (sistema fechado e resistência de Atkinson constante) utilizados nos softwares para inserir as condições de contorno. Outro fator a ser considerado é que poderá haver vazamentos na portas e barragens e também nos setores em que há transportadores de minério, logo, a condição aplicada pode não ser a ideal.

Todos esses elementos podem causar variações nas perdas de carga do sistema mesmo com essas limitações o ventilador se mostrou apto (sendo até superdimensionado).

Além disso, conforme a simplificação número 6 para a frente em desenvolvimento, a pressão fornecida pelo ventilador está apta a fazer a vazão de ar circular por todo o trajeto do painel em desenvolvimento. Quando o painel estiver em desenvolvimento (painel parcialmente minerado) a configuração do regulador (abertura ou fechamento dos orifícios) deverá ser alterada para controlar a vazão de ar para a galeria em desenvolvimento e para as galerias adjacentes. No caso da frente de trabalho para o método de Frente Longa, como a pressão máxima necessária ocorre no início da mineração do painel (posição mais afastada das galerias), ao realizar o movimento de aproximação das galerias será necessário regular os reguladores para mantar a vazão de ar correta para cada setor, pois haverá uma redução da pressão necessária.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho propôs dois métodos, um analítico e um numérico por meio da utilização de programas computacionais disponíveis para a análise do sistema de ventilação da Mina do Leão II, de forma que o método analítico apresenta duas dificuldades. A primeira é que o sistema não contempla os reguladores no cálculo (o cálculo para incluir os reguladores seria por meio de resistência equivalente) o que torna o método impreciso e difícil de calcular. A segunda dificuldade é que não é recomendável para grandes leiautes devido ser imprescindível calcular a queda de pressão para diversos setores e com as mais variadas vazões de ar, podendo gerar erros. Já para a aplicação dos softwares há uma maior simplicidade, sendo necessário conhecer a resistência de Atkinson para cada setor e as vazões necessárias. Vale ressaltar que o VnetPC + Pro realiza o cálculo dos reguladores, porém possui uma plataforma gráfica pouco amigável. Já o Ventsim Lite necessita a instalação de reguladores e de diversas simulações do sistema de ventilação até obter o resultado desejado por meio da variação da resistência dos reguladores. Para os softwares no quesito resultado, a diferença referente a pressão requerida no ventilador foi de 11,64% e para as vazões de ar de 4,76% o que pode ser considerado aceitável.

Também vale ressaltar que os resultados obtidos são válidos para as considerações de temperatura constante, de massa especifica constante, não havendo obstruções nos setores devido a máquinas e equipamentos e que não haverá variações no fator de atrito de Atkinson para os setores. Além disso, os valores de emissão de metano e de poeira no processo de mineração podem ser diferentes dos empregados nesse trabalho (dados da literatura), pois dependerá se as condições descritas forem seguidas e também do equipamento empregado. Por fim, os reguladores instalados na mina serão ajustados por meio de medição de vazão de ar em cada setor.

Assim, para a correta utilização dos softwares, é necessário ter o conhecimento das condições dos setores (presença de máquinas, área, fator de atrito de Atkinson de perda, entre outros) e das condições de mineração para calcular as vazões corretas de cada setor. Para a escolha do ventilador principal, esta pode ser auxiliada pelo método analítico como valor referência ou o software VnetPC + Pro fornecerá a pressão necessária para a condição requerida, já no Ventsim Lite é necessário inserir a curva característica do ventilador para realizar as simulações. Também cabe ressaltar que é necessário criar diversos estágios para verificar qual será mais crítico e se o ventilador será apto a suprir essa demanda (também podem ser usados diversos ventiladores até encontrar o ideal). Dessa forma, para a realização das simulações o bom conhecimento das condições da mina é fundamental para o correto dimensionamento do sistema de ventilação e que os softwares estão aptos a fornecer um bom resultado mesmo com as devidas simplificações.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvarenga, J. F.; "**Estudo de índices Operacionais de Lavra Subterrânea no Brasil**". 2012. 71f. Dissertação (Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2012.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists; "**TLVs ® e BEIs ® Baseado na Documentação dos Limites de Exposição Ocupacional (TLVs) para Substâncias Químicas e Agentes Físicos & Índices Biológicos de Exposição (BEIs)**", Associação Brasileira de Higienistas Ocupacionais (ABHO), Edição 2010.

Brasil, Ministério da Ciência e Tecnologia, Sindicato Nacional da Industria de Extração de Carvão Mineral; "**Emissões fugitivas da mineração e do tratamento do carvão mineral**", Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa, Relatórios de referência. 2006.

Brasil, Ministério do Trabalho e do Emprego (MTE); "**Norma Regulamentadora N° 22: Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração**", Portaria MTE n.º 2.037. 1999.

Carbonífera Criciúma S.A.; "**Mina**", Apresentação interna para Rafael Roleto Cardoso. Minas do Leão, Agosto de 2014.

Chasm Consulting; "**Ventsim visual user guide**", User's manual and Tutorial. 2013.

Colorado School of Mines; "**Coal Mining Methods**", Energy and Minerals Field Institute. 2011.

Division of mines; "**First Class Mine Foreman Certification Study Guide**", Virginia Department of Mines, Minerals and Energy. 2004.

Fläktwoods; "**HC Centrifugal Fans for Industry**", Technical data. 2010.

Hullistrud, W. A.; Bullock, R. L.; "**Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies**", Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc., 1st edition, 2001.

Kissell, F. N.; "**Handbook for Dust Control in Mining**", Information Circular 9465 - U.S. Department of Health and human services - Centers for Disease Control and Prevention National Institute for Occupational Safety and Health. 2003.

Mayes, T. I., Gillies, A. D. S.; "**A Review of Current Australian Longwall Mine Ventilation Practice**", First Mine Environment and Ventilation Symposium, 55-64p. 2000.

Mcpherson, M. J.; "**Subsurface Ventilation and Environmental Engineering**", Chapman & Hall, 1st edition, 1993. 904p.

Mine Ventilation Services, Inc.; "**VnetPC + Pro**", User's manual and Tutorial. 2013.

Pereira, M.R.; "**Estudo dos principais parâmetros para a implantação do sistema de ventilação em minas subterrâneas: uma aplicação no software VnetPC**". 2013. 60f. Trabalho de Conclusão do Curso (graduação em Engenharia de Minas) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado de Minas Gerais, 2013.

Stricklin, K. G., Haney, R. A.; "**Longwall dust control practices**", Mine Safety and Health Administration – MSHA. 2014.

Fläktwoods; "**Fläktwoods Fan Express Range**", Fan catalog. 2013 Disponível em: http://my.amca.org/members/documents/catalogs/jma60-99%20%20june99.pdf.

APÊNDICE I

Resistências de Atkinson utilizadas nos setores e sistema auxiliar de ventilação, bem como as resistências de Atkinson para perdas menores.

Setor	Fator de atrito de Atkinson [kg/m³]	Área [m²]	Per. [m]	Comp. [m]	Fator de perda de carga menor [adm.]	Diâmetro hidráulico [m]	Resistência de Atkinson [Ns²/m⁸]
Túnel 1	0,005	20,7	18,5	850	-	-	0,0089
Túnel 2	0,005	19,7	18,5	850	-	-	0,0103
Galeria subterrânea 950 m	0,005	17,3	17	950	-	-	0,0156
Galeria subterrânea 900 m (transportador)	0,005	16,3	17	900	-	-	0,0177
Galeria subterrânea 50 m	0,005	17,3	17	50	-	-	0,0008
Galeria subterrânea 150 m	0,005	17,3	17	150	-	-	0,0025
Galeria subterrânea 1150 m	0,005	17,3	17	1150	-	-	0,0189
Galeria secundária entrada 800 m	0,012	15	16	800	-	-	0,0455
Galeria secundária retorno 800 m	0,016	15	16	800	-	-	0,0607
Frente de trabalho 150 m	0,02	8	12	150	-	-	0,0703
Poço de exaustão	0,003	28,3	18,8	220	-	-	0,0005
Curva 90° túnel 1	0,005	20,7	18,5	-	1,56	4,48	0,0022
Curva 90° túnel 2	0,005	19,7	18,5	-	1,56	4,26	0,0024
Curva 90° Galeria sub.	0,005	17,3	17	-	1,2	4,07	0,0024
Curva 90° Frente de trabalho	0,016	15	16	-	1,26	-	0,0034
Cruzamento de Ar	0,005	17,3	17	16	1,2	4,07	0,0003
Duto sist. Auxiliar 1210 m	0,011	2,01	5,02	1210	-	-	8,2280
Curva 90° duto	0,011	2,01	5,02	-	1,2	-	0,1782

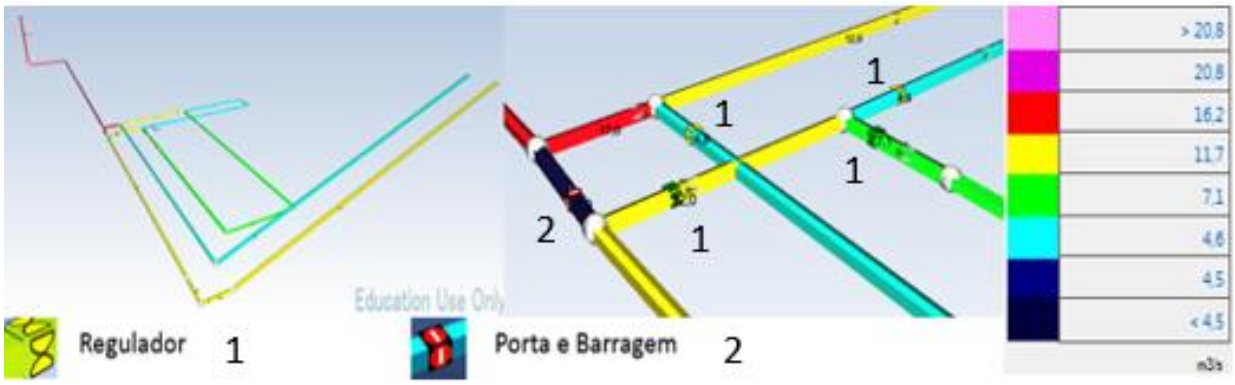
APÊNDICE II

Foto do tipo de seção e do transportador.

Foto de uma frente de trabalho.

APÊNDICE III

Simulação da vazão de ar para o estágio 1 utilizando o ventilador selecionado com o programa Ventsim Lite.



APÊNDICE IV

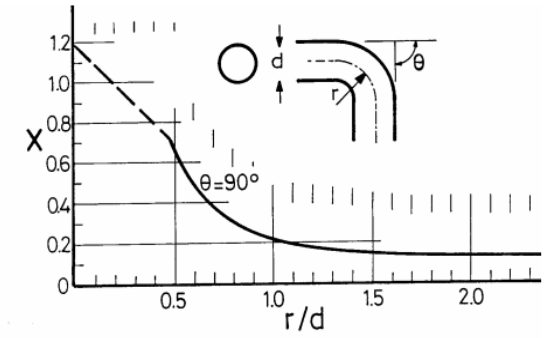
Simulação da vazão de ar para o estágio 2 utilizando o ventilador selecionado com o programa Ventsim Lite.

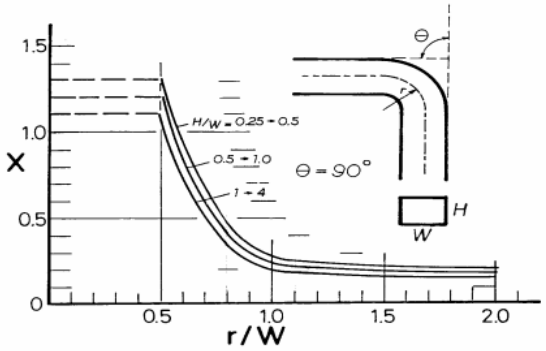
APÊNDICE V

Simulação da vazão de ar para o estágio 3 utilizando o ventilador selecionado com o programa Ventsim Lite.

ANEXO I

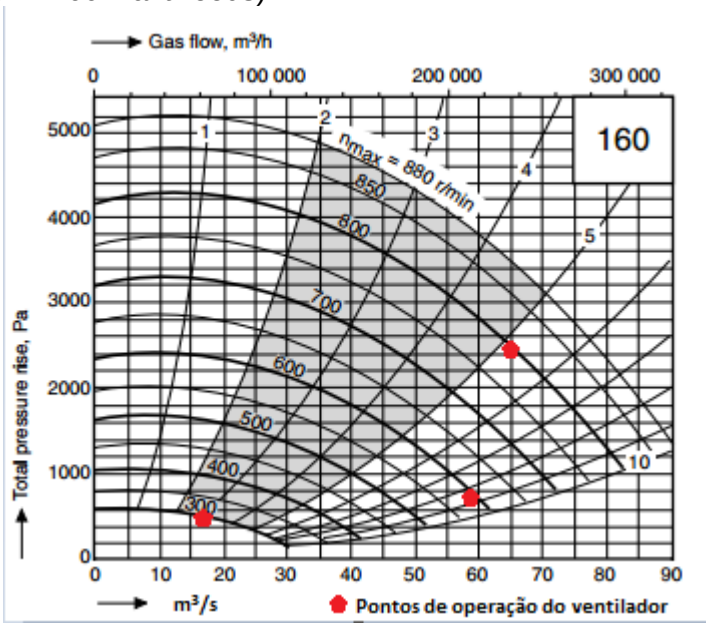
Fator de perda de carga menor para curvas circulares e para curvas quadradas





ANEXO II

Curva característica do ventilador principal empregado com os pontos de operação dos estágios 1, 2 e 3 (HCLP 160 Fläktwoods)

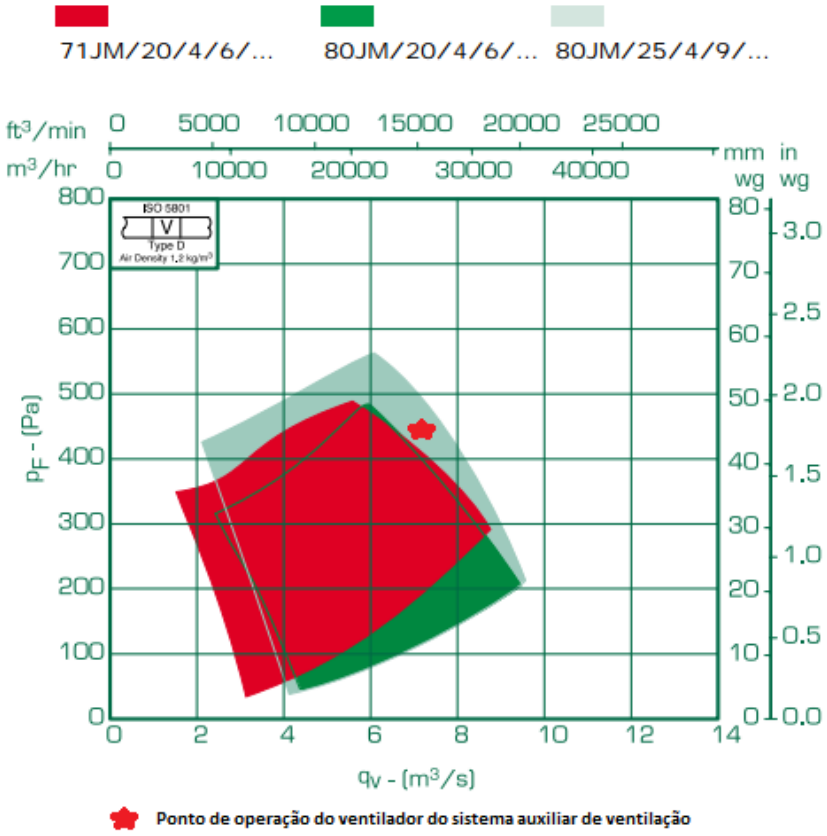


Estágio 1 – 16 m³/s – 510 Pa
Estágio 2 – 65 m³/s – 2450 Pa
Estágio 3 – 58 m³/s – 850 Pa

ANEXO III

Curva característica do ventilador auxiliar empregado (Fläktwoods Aerofoil fan 80JM/25/4/9/26)

Ponto de operação do sistema auxiliar de ventilação – 6,9 m³/s – 429 Pa



ANEXO IV

Método Hardy Cross

Em ambos os softwares (VnetPC Pro + Demo e Ventsim Lite (versão educacional) o método numérico de resolução é o Hardy Cross. Assim, de acordo com Mcpherson,1993 para a demonstração desse método é necessário ter de uma ramificação (sistema de ventilação) fechada e atribuir os nós, uma malha e os setores. Após isso, definir uma vazão e uma direção inicial e aplicar as resistências de Atkinson para cada setor conforme mostrados na Figura IV.1.

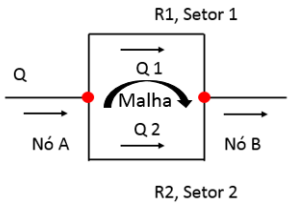


Figura IV.1 – Modelo de ramificação mostrando os nós, malha, setores, resistências (R) vazões (Q) e direção.

Na figura IV.1 estão representados os setores, resistências (R1 e R2) os nós (nó A e nó B) e o sentido da vazão e a vazão (Q, Q1 e Q2). Portanto, de acordo com a equação da queda de pressão para cada setor e sendo considerada uma forma geral da Lei do quadrado para ventilação de minas atribuindo um índice *n,* temos:

$$p = RQ^n \qquad \text{(IV.1)}$$

E que a perda de carga total do sistema fechado é:

$$\sum p = \sum RQ^n \qquad \text{(IV.2)}$$

Também considerando que para cada setor podemos adotar uma correção Δ para a vazão de ar:

$$Q = Qo + \Delta \quad \text{(IV.3)}$$

De modo que:

$$\sum p = \sum R(Qo + \Delta)^n \quad \text{(IV.4)}$$

Desta forma, aplicando o binômio de Newton para determinar Δ:

$$R(Qo + \Delta)^n = R\left(Qo^n + nQo^{n-1}\Delta + \frac{n(n-1)}{1.2}Qo^{n-2}\Delta^2 + \cdots\right) \quad \text{(IV.5)}$$

Como o valor Δ é pequeno em relação a Qo, os termos que contém Δ elevados a uma potência igual ou superior a 2 são desconsiderados:

$$\sum R(Qo^n + nQo^{n-1}\Delta) = 0 \quad \text{(IV.6)}$$

Assim, isolando Δ, temos:

$$\Delta = \frac{-\sum RQo^n}{\sum nRQo^{n-1}} \quad \text{(IV.7)}$$

Por fim, aplicando *n*=2 e caso haja algum ventilador em algum anel a equação fica:

$$\Delta = \frac{-\sum(RQo^2 - pf)}{\sum(2RQo - sf)} \quad \text{(IV.8)}$$

Onde *pf* é pressão fornecida pelo ventilador e *sf* é a inclinação da curva característica de pressão e vazão do ventilador. Desta forma com o valor correção para a vazão definido, o processo iterativo deve ser aplicado até que Δ assuma um valor desejado (próximo a zero).

ANEXO V

Caracterização dos setores da mina.

Setor	Área [m²]	Perímetro [m]	Fator de atrito de Atkinson [kg/m³]	Formato da seção	Condição da superfície
Túnel 1	20,7	18,5	0,005	Arqueada	Arcos de aço com concreto
Túnel 2	19,7	18,5	0,005	Arqueada	Arcos de aço com concreto
Galerias Subterrâneas	17,3	17	0,005	Arqueada	Arcos de aço com concreto
Via de entrada do Painel	15	16	0,012	Retangular	Poucas irregularidades
Via de retorno do Painel	15	16	0,016	Retangular	Algumas irregularidades
Frente de mineração do Painel	8	12	0,02	Retangular	Algumas irregularidades
Poço	28,3	18,8	0,003	Circular	Concreto liso
Sistema auxiliar de ventilação	2,01	5,03	0,011	Circular	Flexível com reforço

ANEXO VI

Informações sobre os métodos de mineração.

Método de mineração	Extração por turno de 8 horas [t]	Área de frente em desenvolvimento [m²]	Número de operadores
Frente longa	1400	10	2
Câmaras e Pilares	200	4	2