

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais  
PPGEM-UFRGS

*LONGWALL:*  
ESTADO DA ARTE, GEOMECÂNICA, PLANEJAMENTO E APLICAÇÃO

Fernando Alves Cantini Cardozo

Área de Concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa

Porto Alegre

2015

Fernando Alves Cantini Cardozo

*LONGWALL:*

ESTADO DA ARTE, GEOMECÂNICA, PLANEJAMENTO E APLICAÇÃO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Orientador: Prof. Dr. André Cezar Zingano

Área de Concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa

Porto Alegre

2015

Fernando Alves Cantini Cardozo

*LONGWALL:*

ESTADO DA ARTE, GEOMECÂNICA, PLANEJAMENTO E APLICAÇÃO

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia na área de Tecnologia Mineral e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia

---

Orientador: Prof. Dr. André Cezar Zingano

---

Coordenador do PPGEM: Prof. Dr. Carlos Perez Bergmann

Aprovada em: 17/12/2015

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Carlos Otávio Petter, UFRGS

Prof. Dr. Paulo Salvadoretti, UFRGS

Prof. Dr. Jorge Dariano Gavronski, UFRGS

À minha mãe Luci e a todos que creem que a  
educação transforma.

*“A menos que você se importe de montão, nada vai mudar, não vai não.”*

Dr. Seuss, in: O Lorax

## AGRADECIMENTOS

Certa vez li que os agradecimentos são a única parte de uma dissertação em que colocamos nossos sentimentos e podemos agradecer as pessoas que nos foram importantes na sua realização. Pois bem, sucintamente discordo em parte do autor da mesma, pois considero que cada palavra escrita em todo o texto aqui presente é também uma forma de agradecimento as pessoas que durante toda minha vida foram importantes e que das formas mais singelas me incentivaram a chegar até aqui; peço desculpa por não poder mencionar todas as pessoas as quais devo um muito obrigado, mas garanto que todas estão em meus pensamentos.

Agradeço primeiro a Deus pelo dom da vida.

A minha mãe Luci que me deu os ensinamentos mais valiosos, e sempre será um exemplo para uma vida inteira.

A minha família, a qual tenho tanto orgulho.

Ao meu orientador André Zingano, pelos anos de convivência e por sempre estar disponível para o que for.

Agradeço aos muitos colegas de Eng. de Minas por tudo e por sempre me incentivarem. Em especial aos colegas do laboratório de Mecânica de Rochas, os quais têm participação ativa neste trabalho. Difícil um imaginar um lugar melhor para se trabalhar.

Aos meus eternos colegas do Maria Imaculada que sempre acreditaram mais em mim do que eu mesmo.

Obrigado a Todos.

## RESUMO

Devido ao esgotamento de jazidas economicamente lavráveis a céu aberto, migrou-se para a lavra subterrânea. Porém, como isso é uma prática antiga, alguns métodos de lavra subterrânea deixaram de ser economicamente viáveis devido ao aprofundamento da lavra. Um exemplo disso é a lavra de carvão no sul do Brasil, onde jazidas exploradas a céu aberto ou mesmo pelo método de Câmaras e Pilares, começam a vislumbrar seu exaurimento técnico de lavra, por altos custos e baixa produtividade, o que norteia a busca por alternativas econômicas mais lucrativas. Uma destas alternativas é o método *Longwall*, praticamente desconhecido no Brasil, porém com crescente e não nova intenção de implementação no país. Isso já se refletiu em tentativas de operações e em novos estudos conceituais de viabilidade para o estado do Rio Grande do Sul. Estes fatores justificaram este estudo que teve por objetivo lançar luz sobre a lavra de carvão pelo método de *Longwall*, de modo a respaldar a sua implementação no Brasil. Sendo assim, o método foi descrito com enfoque em seus principais pontos, tais como, geomecânica e planejamento; além de apresentar estudos conceituais de lavra em dois cenários. O primeiro projeto conceitual apresenta um cenário tradicional objetivando implementação no Rio Grande do Sul; o segundo, tem por objetivo apresentar relativa flexibilidade do método, adaptando-o a um cenário não tradicional. Concluiu-se com este trabalho que fatores como geomecânica e correto planejamento de lavra são imprescindíveis para o sucesso da implementação do método. A partir dos resultados do estudo conceitual I e da versatilidade proposta no estudo II se justifica o aprofundamento nos estudos de operações por *Longwall* no país.

**Palavras-chave:** Lavra subterrânea, *Longwall*, geomecânica.

## ABSTRACT

Due to the exhaustion of economically mining deposits, migrated to the underground mining. However, as this is an ancient practice, some underground mining methods are no longer economically viable due to the deepening of the mining. An example of this is the mining of coal in southern Brazil, where deposits exploited opencast or even by the Room and Pillars, begin to envision your fatigue, mining technical high costs and low productivity, which guides the search for more profitable economic alternatives. One of these alternatives is the Longwall method, virtually unknown in Brazil, but with growing and not new intention of implementation in the country. It already was reflected in attempts to operations and on new conceptual studies of feasibility for the state of Rio Grande do Sul. These factors justify this study that aimed to shed light on the mining of coal by Longwall method, in order to support its implementation in Brazil. Therefore, the method has been described with focus on its key points, such as, geomechanics and planning; In addition to presenting conceptual studies of raging in two scenarios. The first conceptual design features a traditional setting with the objective of implementation in the Rio Grande do Sul; the second aims to introduce on the flexibility method, adapting it to a non-traditional setting. This work concluded that factors like geomechanics and correct planning of mining are indispensable for the successful implementation of the method. From the results of the study and conceptual versatility proposal in study II justification the deepening in the studies of Longwall operations in the country.

**Keywords:** underground mining, Longwall, rock mechanics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - <i>Layout</i> de antiga mineração por <i>LW</i> .....	19
Figura 2 - Foto de uma antiga frente de lavra de <i>LW</i> , estabilização da frente com prumos de madeira e calça empilhada.....	20
Figura 3 - Produtividade por método de lavra, EUA.....	20
Figura 4 - Principais jazidas de carvão RS e SC. ....	21
Figura 5 - Frente de <i>Longwall</i> Leão I.....	23
Figura 6 - <i>Layout</i> da Mina do Leão I com destaque dos painéis lavrados por <i>LW</i> .....	23
Figura 7 - Exemplo de <i>scanline</i> .....	26
Figura 8 - Valores dos parâmetros constituintes do RMR.....	27
Figura 9 - Tempo de auto suporte de escavações por RMR e largura de galeria. ....	28
Figura 10 - Teoria da Área Tributária .....	29
Figura 11 - Relação entre profundidade e largura do pilar para o método Obert-Duvall.....	32
Figura 12 - Mecanismos de suporte de teto. ....	33
Figura 13 - Parafuso de teto coluna total. ....	34
Figura 14 - Designer típico de uma mina de <i>Longwall</i> em carvão.....	36
Figura 15 - Frente de lavra ((1) <i>shields</i> (2) <i>shearer</i> (3) AFC).....	39
Figura 16 - <i>Frames</i> e <i>Chocks</i> .....	40
Figura 17 - <i>Shield</i> de duas pernas. ....	41
Figura 18 - <i>Shearer</i> (cortadeira). ....	42
Figura 19 - Calha de arraste (AFC) individual. ....	42
Figura 20 - <i>Stage Loader</i> instalado na frente de lavra.....	43
Figura 21 - <i>Stage Loader</i> ((1) seção de carga (2) britagem (3) seção transporte (4) seção de descarga).....	43
Figura 22 - <i>Continuous miner</i> .....	44
Figura 23 - <i>Miner bolter</i> . ....	45
Figura 24 - Esquema da ventilação de <i>Longwall</i> .....	46
Figura 25 - Sistema de inertização pra GOB. ....	47
Figura 26 - Ângulo de <i>caving</i> . ....	48
Figura 27 - Delimitação de zonas perturbadas devido à altura de lavra (AL).....	49
Figura 28 - Efeitos do abatimento de teto na lavra por <i>Longwall</i> e subsidência na superfície.51	
Figura 29 - Distribuição empírica para a subsidência em função do tamanho do painel. ....	52
Figura 30 - Forma básica da subsidência em superfície.....	53
Figura 31 - Determinação de subsidência máxima.....	55
Figura 32 - Correção da subsidência para máxima.....	55
Figura 33 - Relações para determinação de perfil de subsidência.....	56
Figura 34 - Subsidência gerada pela interação de dois painéis. ....	58
Figura 35 - Efeito da subsidência em uma região plana.....	58
Figura 36 - Análise paralela ao avanço de lavra.....	60
Figura 37 - Análise perpendicular ao avanço de lavra. ....	61
Figura 38 - Modelo para tensões sob <i>shield</i> . ....	62
Figura 39 - Mecanismo de <i>windblast</i> . ....	66
Figura 40 - Abordagem do teto exposto como galeria. ....	66
Figura 41 - Tempo de auto-suporte em função de RMR 50 e variação de tamanho de galeria. ....	67
Figura 42 - Velocidade do vento no tempo em evento de <i>windblast</i> . ....	68

Figura 43 - Relação entre a área de falha do <i>goaf</i> com a pressão gerada e velocidade de vento. ....	68
Figura 44 - Velocidade do vento no tempo em evento de <i>windblast</i> . ....	69
Figura 45 - Análise de <i>windblast</i> para colapso de <i>goaf</i> de 4000 m <sup>2</sup> . ....	70
Figura 46 - Pilar barreira em painel de <i>Longwall</i> . ....	71
Figura 47 - Discretização por elementos finitos. ....	72
Figura 48 - Modelos a serem estudados, painel inclinado e horizontal. ....	73
Figura 49 - Seção atípica de <i>Longwall</i> , com camada com mergulho de 15° (A), detalhe com escavação perpendiculares ao piso e teto e (C) detalhe com escavação paralela ao eixo vertical. ....	74
Figura 50 - Galerias auxiliares do painel de <i>Longwall</i> , antes de sua lavra, detalhe nas galerias e pilares. ....	75
Figura 51 – Frente de <i>Longwall</i> e galerias auxiliares após a lavra do painel, detalhe da tensão acumulada nos pilares. ....	75
Figura 52 – Detalhe mostrando a deformação no modelo, convergência na frente de lavra e galeria auxiliar. ....	76
Figura 53 - Localização município de Triunfo no estado do Rio Grande do Sul. ....	78
Figura 54 - Perfil geológico típico para a área, baseado em um furo de sonda realizado em 2009. ....	81
Figura 55 - Relação entre espessura e reserva de carvão. ....	83
Figura 56 - Recursos da Camada I2B. ....	83
Figura 57 - Localização da área com espessura maior que 2m. ....	84
Figura 58 - <i>Layout</i> geral da mina Triunfo mostrando a disposição dos painéis de lavra. ....	90
Figura 59 - Reserva em Mton e espessura média de cada painel de lavra. ....	92
Figura 60 - <i>Layout</i> detalhado dos painéis de lavra. ....	93
Figura 61 - Detalhe do <i>layout</i> do acesso ao painel de <i>Longwall</i> . ....	94
Figura 62 - Localização do poço e plano inclinado. ....	95
Figura 63 - <i>Layout</i> da entrada da Mina ....	96
Figura 64 - Seção lateral do plano inclinado e uma seção do plano inclinado. ....	97
Figura 65 - Circuito simplificado de ventilação. ....	100
Figura 66 - Esquema do circuito de ar fresco e viciado dentro do painel de lavra e <i>bleeder</i> para o painel 1 e para os demais painéis do setor oeste da mina. ....	101
Figura 67 - Localização dos poços de ventilação e setores de abrangência de cada poço. ....	101
Figura 68 - Cálculo do suporte de teto. ....	103
Figura 69 - Sequência de produção para os primeiros 5 anos de desenvolvimento da mina Triunfo. ....	105
Figura 70 - Sequência de produção nos primeiros anos de desenvolvimento da mina. ....	107
Figura 71 - Localização de Cúcuta no estado de Santander/Colômbia. ....	109
Figura 72 - Minas existentes na região. ....	110
Figura 73 - Camada de carvão aflorando. ....	111
Figura 74 - Testemunho de sondagem furo P2. ....	112
Figura 75 - Testemunho de sondagem furo P5. ....	112
Figura 76 - Testemunho de sondagem furo P6. ....	113
Figura 77 - Transporte manual de carvão em vagonetas. ....	113
Figura 78 - Detalhe painel (fundo). ....	115
Figura 79 - Painel modelo 1500m por 150m. ....	115
Figura 80 - Participação na Lavra. ....	116
Figura 81 - Participação na Mina. ....	116
Figura 82 - Conceito de conjunto de painéis ....	117
Figura 83 - Vista superior da topografia e camadas de carvão. ....	118

Figura 84 - Vista perspectiva da topografia e camada.....	119
Figura 85 - Corte da topografia e camada. ....	119
Figura 86 - Possível encaixe de painéis (1500m x 150m) na camada.....	120
Figura 87 - Possível conjunto de painéis. ....	120
Figura 88 - Mini <i>Tracker Loader</i> . ....	121
Figura 89 - Rompedor hidráulico de controle remoto Brokk 260. ....	122
Figura 90 - Dimensões Brokk 260.....	122

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características das zonas perturbadas em escavações de <i>Longwall</i> . ....	50
Tabela 2 - Coeficiente P e a.....	54
Tabela 3 - Máxima subsidência para diferentes profundidades e tamanhos de painéis considerando lavra de camada de 2 metros. ....	57
Tabela 4 - Recursos por camada.....	82
Tabela 5 - Furo RD08 - Triunfo RS. ....	86
Tabela 6 - Furo RD10 - Triunfo RS. ....	86
Tabela 7 - RMR Furo RD08.....	87
Tabela 8 - RMR Furo RD10.....	87
Tabela 9 - Parâmetros geomecânicos RD08.....	88
Tabela 10 - Parâmetros geomecânicos RD10.....	88
Tabela 11 - Estimativa de reserva de carvão para os painéis de lavra.....	91
Tabela 12 - Frente de <i>Longwall</i> para 400m de largura.....	98
Tabela 13 - Conjunto para desenvolvimento de galerias (3 conjuntos). ....	99
Tabela 14 - Dados de desenvolvimento.....	106
Tabela 15 - Produção por dia, mês e ano em função da largura do painel. ....	106
Tabela 16 - Produção por painel em massa e volume. ....	117

## LISTA DE ABREVIACOES, SÍMBOLOS E UNIDADES

A	rea
C&P	Câmaras e Pilares
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho assistido por computador)
EUA	Estados Unidos da América
F.S.	Fator de Segurança
ft	<i>foot</i> (ps)
GPa	Giga Pascal
h	espessura da camada lavrada
H	espessura da cobertura
ha	hectare
KPa	Quilo Pascal
LPM	Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro
LW	<i>Longwall</i>
m	Metro
MEF	Método dos Elementos Finitos
MN	Mega Newton
MPa	Mega Pascal
Mtpa	Milhões de toneladas por ano
N	Newton
Pa	Pascal
RMR	<i>Rock Mass Rating</i> (Qualidade de Maciço Rochoso)
ROM	<i>Run of Mine</i> (material lavrado)
RQD	<i>Rock Quality Designation</i> (ndice de Qualidade da Rocha)
RS	Rio Grande do Sul
S	Subsidência
SC	Santa Catarina
UCS	<i>Uniaxial Compressive Strength</i> (Tensão de Compressão Uniaxial)
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
w	largura
$\gamma$	peso específico
$\sigma$	tensão

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>14</b>
1.1	INTRODUÇÃO.....	14
1.2	META.....	15
1.3	OBJETIVO ESPECÍFICO.....	15
1.4	METODOLOGIA.....	16
1.5	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	17
<b>2.</b>	<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>18</b>
2.1	<i>LONGWALL</i> , ESTADO DA ARTE .....	18
2.2	<i>LONGWALL</i> NO BRASIL .....	21
2.3	GEOMECÂNICA APLICADA A SUBSOLO .....	24
<b>2.3.1</b>	<b>Classificação de maciço .....</b>	<b>24</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Tensões em pilares .....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Dimensionamento de Pilar .....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Suporte de Teto .....</b>	<b>32</b>
<b>3.</b>	<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>35</b>
3.1	MINA DE <i>LONGWALL</i> .....	35
<b>3.1.1</b>	<b>Desenho de Mina (Layout).....</b>	<b>35</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Divisão dos Processos .....</b>	<b>37</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Desenvolvimento .....</b>	<b>38</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Equipamentos para <i>Longwall</i>.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1.5</b>	<b>Ventilação em mina de <i>Longwall</i>.....</b>	<b>46</b>
3.2	GEOMECÂNICA APLICADA A <i>LONGWALL</i> .....	47
<b>3.2.1</b>	<b><i>Caving</i> sob área minerada (<i>GOAF</i>).....</b>	<b>47</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Potencial de <i>caving</i> (<i>cavability</i>) .....</b>	<b>48</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Subsidência.....</b>	<b>50</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Consequências Hidrológicas .....</b>	<b>58</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Tensões para frente <i>Longwall</i>.....</b>	<b>60</b>
<b>3.2.6</b>	<b>Tensões sobre <i>Shields</i> .....</b>	<b>61</b>
<b>3.2.7</b>	<b>Tensões excessivas pela lavra.....</b>	<b>63</b>
<b>3.2.8</b>	<b>Dimensionamento de pilares para <i>Longwall</i> .....</b>	<b>63</b>

3.2.9	Golpe de Ar ( <i>windblast</i> ).....	65
3.2.10	Pilares Barreiras .....	70
3.2.11	Modelos numéricos .....	71
4.	<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>77</b>
4.1	ESTUDO CONCEITUAL DE EXPLORAÇÃO MINERAL .....	77
4.2	ESTUDO I (APLICAÇÃO TRADICIONAL) .....	78
4.2.1	Contexto.....	78
4.2.2	Geologia e Avaliação da Jazida .....	79
4.2.3	Recursos e Reservas.....	81
4.2.4	Caracterização geomecânica .....	84
4.2.5	<i>Layout</i> de Mina .....	89
4.2.6	Equipamentos .....	97
4.2.7	Transporte do Carvão .....	99
4.2.8	Ventilação .....	100
4.2.9	Suporte de teto .....	102
4.2.10	Pilares e Pilares Barreiras .....	103
4.2.11	Plano e sequência de lavra .....	104
4.2.12	CAPEX e OPEX .....	107
4.3	ESTUDO II (APLICAÇÃO ALTERNATIVA) .....	108
4.3.1	Conceito .....	108
4.3.2	Geologia e Avaliação da Jazida .....	110
4.3.3	Desenho de Mina ( <i>Layout</i> ) .....	114
4.3.4	Topografia e encaixe dos painéis.....	118
4.3.5	Equipamentos .....	120
4.3.6	Transporte do Carvão .....	123
4.3.7	Ventilação .....	123
4.3.8	Suporte de teto .....	123
4.3.9	Pilares e Pilares Barreiras .....	124
5.	<b>CAPÍTULO V</b> .....	<b>125</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	125
5.2	TRABALHOS FUTUROS .....	126
	<b>REFERÊNCIA</b> .....	<b>127</b>

## 1. CAPÍTULO I

### 1.1 INTRODUÇÃO

O aproveitamento e exploração de recursos minerais é algo feito pela humanidade há milhares de anos, desta necessidade nasceu e se desenvolveu a engenharia de exploração de recursos minerais, a qual encontra-se no presente momento altamente evoluída, tecnologicamente e tecnicamente. Muito dessa evolução é oriunda da necessidade, pois, era natural que para muitos bens minerais, que com o tempo e suas históricas explorações as minerações de simples técnicas deixassem de ser possíveis. Seja isso pelo exaurimento de jazidas economicamente exploráveis, ou pela necessidade de grandes aumentos de produção, isto para diversos fins.

Estes pontos podem ser facilmente vistos no caso do carvão mineral, bem este que no passado foi extensivamente explorado em minas a céu aberto, as quais a partir de seus exaurimentos foram migradas para jazidas que necessitavam de exploração por métodos de lavra subterrâneos, devido ao aprofundamento delas. Outra mudança, no caso do carvão, é devido ao aumento de demanda, crescente devido ao requerimento industrial e energético, o qual no caso do Brasil representa parte estável da matriz energética do país.

Tomando como base o exposto acerca da realidade do carvão mineral no Brasil, fica evidente a importância de estudos de métodos de produção eficientes, ou mais especificamente métodos de lavra, onde toma forma a opção pelo método de *Longwall*, este já consagrado pelo mundo afora, amplamente usado nos EUA, Europa, Austrália e China. Neste trabalho irá se tomar como base para a aplicação do método jazidas de carvão, porém, cabe previamente salientar, que esta é apenas uma referência, pois este método toma como base para sua implementação parâmetros específicos, os quais são geralmente compatíveis com a lavra de carvão.

De maneira sucinta podemos simplificar o método como compatível com altas produções de ROM, algo acima de 2 Mtpa, existência de um *hangingwall*, camada ou formação geológica logo acima da camada minerada, de chamada baixa qualidade geomecânica. Ou seja, deseja-se um material friável, de baixa resistência e alto grau de fraturamento. Estes fatores isolados ou preferencialmente unidos, garantem a ocorrência do *caving*, abatimento do teto sob a área de minério já lavrado, sendo ao contrário dos demais métodos de lavra subterrânea,

indesejável a estabilidade do teto, pois a não ocorrência do abatimento do teto como previsto pode levar a ocorrência de um abatimento catastrófico, o abatimento súbito (*rockburst*). Percebidos esses fatores, fica evidente a necessidade de um correto conhecimento e caracterização geomecânica da jazida a ser explorada, sobretudo para a correta aplicação do método de *Longwall*.

O Método de *Longwall* mostra sua complexidade e desafios a partir de suas exigências de características geomecânicas, pois, se por um lado se idealiza um teto de baixa qualidade geomecânica para que ocorra o *caving* sob a área já lavrada, por outro lado teremos áreas de uso permanente que deverão estar sob este mesmo teto, sendo estas as galerias de desenvolvimento pelas quais transitam pessoas e equipamento, além de comporem sistema de ventilação e de retirada de minério lavrado. Tendo em vista isso, é lógico que se objetiva a estabilidade das estruturas destas áreas, o que se torna um desafio, ao se considerar as características geomecânicas tidas como ideais, o que nos requer um grande esforço de estabilização do teto destas áreas, isto considerando a situação ideal de característica de jazida.

Um contra ponto seria a existência de um *hangingwall* de, assim dita, boa qualidade. Sua existência seria extremamente favorável para as áreas permanentes, pois diminuiria o esforço utilizado para a estabilização; tornando-as seguras, mas traria insegurança sob a área lavrada, pois teríamos grandes áreas onde estabilizações não são previstas. Normalmente um painel de *Longwall* apresenta dimensões de frente de lavra em torno de 300 metros. Em poucos casos utiliza-se menores dimensões, pois tornaria a lavra não econômica, por tamanhos variáveis de recuo, como por exemplo 2000 metros.

## 1.2 META

Esta dissertação tem por meta lançar luz acerca da lavra pelo método de *Longwall*, de maneira a descrevê-lo como um todo em suas características, com ênfase em suas contornantes geomecânicas, principais limitantes do método, além de apresentar possíveis soluções para casos de diferentes contornantes geoestruturais, os quais requerem adaptações ao método.

## 1.3 OBJETIVO ESPECÍFICO

O presente projeto de dissertação de mestrado tem por objetivo atingir a meta proposta através da dissecação da meta em objetivos específicos, estes mais pontuais, porém estudando

os fatores geomecânicos da lavra por *Longwall*, iniciando com uma revisão histórica e conceitual do método com baixo histórico de uso no Brasil (apenas uma referência concreta).

A proposta de dissertação envolve ainda o estudo de variações do método, regidas por condicionantes técnicas, tais como produção, geologia estrutural e características geomecânicas, onde estas seriam contrárias às condições tradicionalmente ideais. Assim pretende-se demonstrar algum grau de versatilidade ao método estigmatizado por não possuí-la.

Como em qualquer trabalho técnico de engenharia é comum a dificuldade de dissertar sobre qualquer assunto sem referências práticas, normalmente utiliza-se delas ou de estudos de caso. Neste estudo apresentaremos dois casos baseados em dados e cenários reais, sobre os quais desenvolve-se estudos conceituais de lavra por *Longwall*: o primeiro apresentando um cenário próximo do ideal e o segundo um cenário não comum ao método. Em ambos os estudos se dissertaram pontos acerca de estruturas como acessos, tais como planos inclinados, desenvolvimento de galerias e sua estabilidade. Para analisar a estabilidade das galerias e da frente de lavra, e da interação entre ambas, são apresentadas as conceituações teóricas.

Para o desenvolvimento do supracitado se desenvolveu os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar o Estado da Arte do *Longwall*, e sucintamente da geomecânica de lavra subterrânea;
- Apresentar todas as estruturas existentes no método e principais equipamentos utilizados;
- Analisar os aspectos geomecânico específicos do método;
- Dissertar sucintamente sobre subsidência e seus efeitos;
- Apresentar estudo conceitual de uma mina por *Longwall*;
- Apresentar estudo conceitual de uma mina com adaptações não tradicionais do método de *Longwall*;
- Dissertar acerca dos resultados obtidos e trabalhos futuros;

#### 1.4 METODOLOGIA

Para cumprir os objetivos propostos serão utilizadas diversas ferramentas. Para o Estado da Arte foi realizada revisão bibliográfica em literatura diversa, além de consulta a profissionais

com experiência no tema, tendo também sido consultadas empresas fornecedoras de equipamentos específicos.

Para os estudos conceituais foi utilizado uma ampla e diversa gama de dados, de diversas áreas, uma caracterização geomecânica de maciço realizada através de amostras de furos de sondagem, dados estes constituintes de acervo do LPM/UFRGS. Também foram utilizados dados geográficos, como mapas de relevo, e mapas com profundidades das camadas trabalhadas.

Para realizar os estudos conceituais e referencial teórico, foram utilizados diferentes recursos computacionais tais como *software* CAD, de modelamento geológico, planilhas eletrônicas de cálculo, *software* de modelamento numérico (utilizando MEF).

Cabe salientar que os dados previamente dispostos já foram recebidos tratados, ou seja, por traz deles foram realizadas análises químicas, ensaios geomecânicos, tratamentos computacionais de mapas e interpolação de valores (trabalho geoestatístico). Estes dados foram dispostos pelo LPM/UFRGS.

## 1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Os próximos capítulos desta dissertação estarão organizados conforme o descrito abaixo.

Capítulo II: Trará o Estado da Arte da lavra pelo método de *Longwall* e da geomecânica aplicada à lavra subterrânea.

Capítulo III: Disserta sobre aspectos técnicos e procedimentos de lavra por *Longwall*, desde o planejamento até a execução, destacando o papel de geomecânica como diretriz no processo de lavra.

Capítulo IV: Apresentará projetos conceituais de lavra pelo método *Longwall*, sendo o primeiro um projeto clássico e no segundo o conceito de lavra por *Longwall* é adaptado para as características da jazida e seu contexto regional.

Capítulo V: Contará com conclusões acerca dos temas abordados nos capítulos anteriores. É apresentada também sugestões de trabalhos futuros.

## 2. CAPÍTULO II

### 2.1 LONGWALL, ESTADO DA ARTE

**“No *Longwall* aplicado à mineração de carvão, não é mantida a integridade do teto imediato acima do carvão recém-minerado. Este teto deve deslocar do teto principal, separando-se em blocos e caindo no vazio deixado atrás da linha de suportes automarchantes. O processo de deslocamento é acompanhado por empolamento (aprox. 50%) e o teto imediato ocupa o vazio deixado pelo carvão minerado, atuando como um leito natural contra o qual o teto principal converge. O maior papel do teto imediato é deslocar e empolar, preenchendo o vazio minerado e retendo a convergência do teto principal, mantendo sua integridade.”**  
**(BRADY; BROWN, 1995)**

O trecho acima é um ótimo resumo do que é e como funciona o método de lavra por *Longwall*. Porém, usá-lo como método de exploração de carvão mineral não é algo novo, pois os princípios deste método datam do final do século 17, nas proximidades de Shropshire, Inglaterra, onde surgiu o chamado método Shropshire. Várias modificações no método original ocorreram no decorrer do tempo, porém sempre o método envolveu a lavra em *Longwall* (grande parede ou face). Nestas lavras a área em que o carvão era extraído, chamado de *gob* (palavra de origem celta para caverna), era parcialmente preenchida com rochas.

Até o início do século XX a mineração de carvão na Inglaterra era feita predominantemente pelo método chamado de *bord and pillar*, equivalente ao Câmaras e Pilares (C&P), onde as passagens eram feitas em carvão com larguras de 12 a 20 ft (3,6 a 6,1 m), e deixados pilares de 50 ft (15,24m) de largura e 100 ft (30,5m) de comprimento, estes deixados por segurança. Para extrair parte ou totalidade do carvão deixado nos pilares posteriormente a lavra das passagens, foram testadas técnicas de recuperação dos pilares deixados, porém nem sempre bem sucedidas (EIA, 1995). Devido ao aumento da demanda de carvão o antigo método *bord & pillar*<sup>1</sup> passou a ser considerado um desperdício. Neste contexto alguns fatores positivos a lavra em *LW* ficaram evidentes, a constar:

---

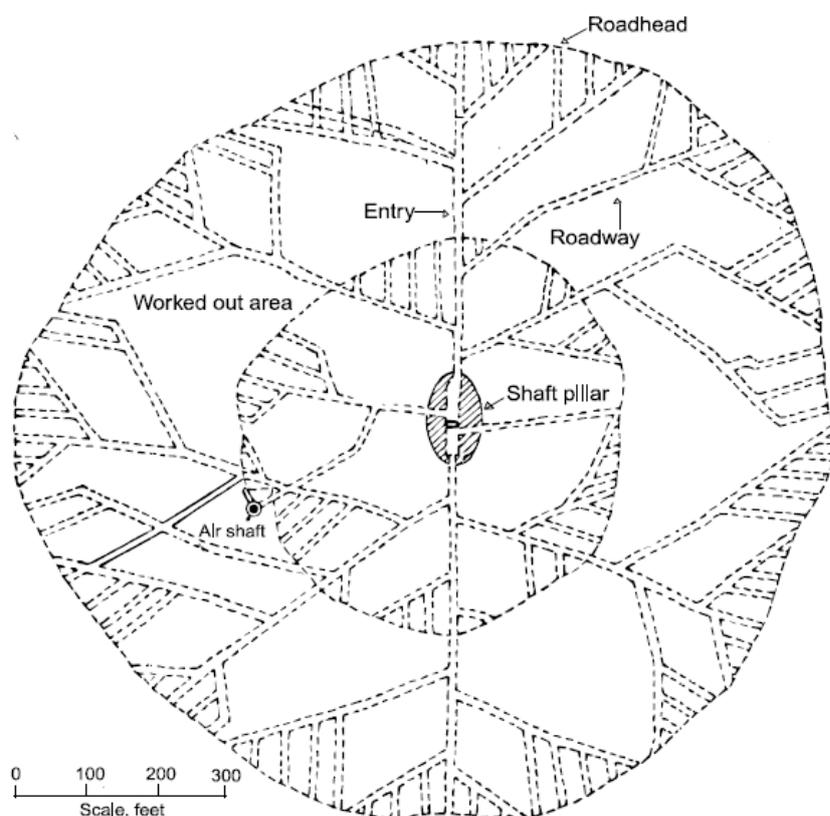
<sup>1</sup> Método semelhante ao Câmaras e Pilares conhecido hoje, porém mais rudimentar; e assim chamado na Inglaterra.

- abertura de mina com menor despesa de capital
- remuneração em menor tempo possível
- rendimento da área é maior
- ventilação é mais fácil
- trabalhadores ficam agrupados, facilitando a supervisão

O *layout* geral das minas de *LW* inicialmente era em formato circular, irradiando a partir do eixo central; as principais galerias eram feitas em diagonal a partir de um pilar central. Eram utilizadas linhas de prumos de madeira para se fazer a estabilização da frente de lavra, os quais eram movidas a medida que a mineração avançava, ou também por “pacotes” de caliça de rocha. E nas áreas já lavradas o colapso do teto era aceitável. Quando os suportes eram retirados o teto colapsava devido ao próprio peso, mas se necessário era derrubado (EIA, 1995).

Em 1924 a produtividade foi aumentada quando algumas minas passaram a utilizar transportadoras ao longo da face lavrada, em detrimento do transporte manual por vagonetas.

Figura 1 - *Layout* de antiga mineração por *LW*



Fonte: EIA, 1995

Figura 2 - Foto de uma antiga frente de lavra de LW, estabilização da frente com prumos de madeira e caliça empilhada.



Fonte: Bauer, 2006

A mecanização do método de lavra como é conhecido atualmente, só foi desenvolvida na Alemanha nos anos 50 e 60. A partir dos anos 70, os Estados Unidos iniciaram a aplicação do método de *Longwall* com maior produção, iniciando no estado de West Virginia.

Em 2013 os Estados Unidos produziram 189,2 Mton de carvão por *Longwall*, sendo que 53% da produção de carvão em minas subterrâneas neste período correspondia ao *Longwall* neste país. A produtividade do método foi de 4,15 t/homem-hora (USA) contra uma média de 2,5 t/homem-hora para os demais métodos, segundo dados de 2013. (EIA, 2015).

Figura 3 - Produtividade por método de lavra, EUA.



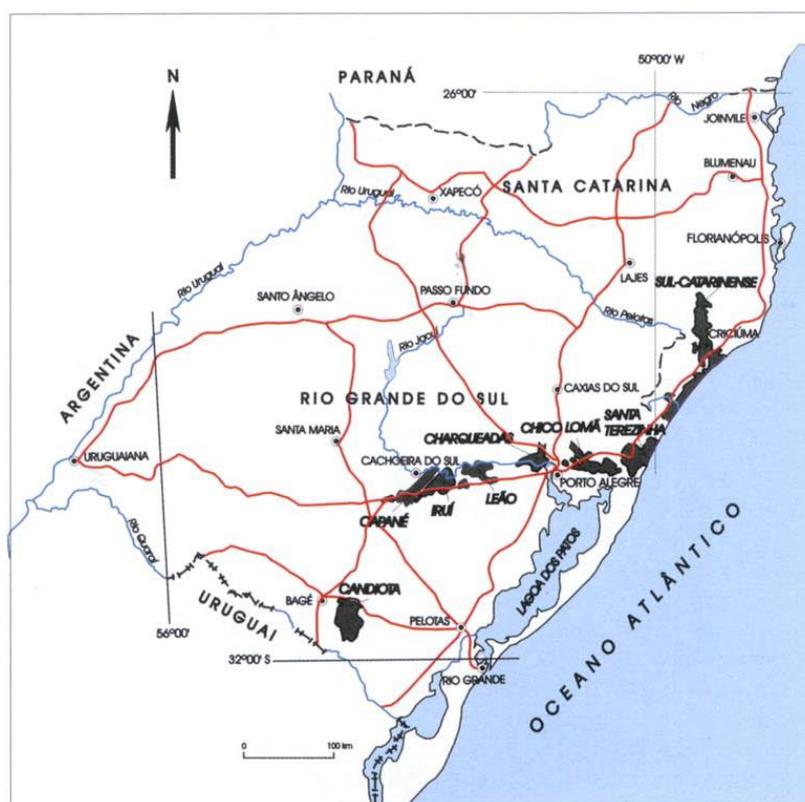
Fonte: EIA, 2015

## 2.2 LONGWALL NO BRASIL

A mineração de carvão no sul de Brasil já é secular, historicamente realizada por método de lavra a Céu Aberto e C&P, em minas subterrâneas, em Santa Catarina na região de Criciúma, no Rio Grande do Sul em Candiota e Minas do Leão e no Paraná na mina de Cambuí (mapa da figura 4). Devido as baixas produtividades e recuperações do método de C&P no passado sempre houveram intenções de implementação de métodos mais produtivos, onde se encaixa o *LW*.

Neste contexto, a Mina do Leão I, no Rio Grande do Sul, representou um marco na mineração brasileira pelo pioneirismo na implementação do método de *Longwall*.

Figura 4 - Principais jazidas de carvão RS e SC.



Fonte: Gomes *et al.* 1998

A, a Mina do Leão I, é a maior referência em lavra por *LW* no Brasil. Existindo algumas referências ao método *LW* empregado em minas de Santa Catarina, porém isto na década de 30, ou seja, com tecnologia e grau de mecanização do mesmo período.

O ambiente para a escolha do método foi o dos anos 1978-1979, época em que foram estabelecidos [planos e estratégias de expansões da indústria carbonífera, a nível nacional. No RS a CRM (Companhia Rio-grandense de Mineração), empresa estatal voltada à exploração de carvão mineral no estado; estava em um cenário de expansão (para a Mina do Leão I), mirando na época chegar a uma produção de 600.000 tpa, a atual produção da carbonífera, totalmente proveniente do método C&P era de 180.000 tpa. Ou seja, ter um acréscimo de produção de 420.000 tpa, sendo que deste total estimava-se ter uma produção de 360.000 tpa proveniente apenas da frente de *LW* e 60.000 do desenvolvimento de acessos, galerias principais e secundárias, estas desenvolvidas segundo as premissas do método C&P.

Visto este vislumbre de acréscimo de produção o método de *LW* se mostrava a alternativa mais interessante, já que neste período ele era difundido pelo mundo e apresentava índices produtivos mais interessantes que utilizações em C&P, método que ainda era dominante nos EUA, porém perdia espaço aceleradamente em comparação com *LW*.

Em 1977 a empresa contratou consultoria nacional e internacional para o desenvolvimento de um projeto básico de mina para a então futura Mina do Leão II, este projeto apontou para a implementação de *LW*, e foi este projeto que baseou a ampliação da Leão I, com utilização de *LW*, isto com a finalidade de que esta ampliação serviria de escola para a futura Leão II, assim preparando equipes, engenheiros e demais partes envolvidas.

As contornantes geológicas das Minas Leão I e II, eram amplamente compatíveis ao método, conclusão esta observada na época por consultores e técnicos da empresa. Os estudos da época apontaram para um painel de *LW* de 61 metros de largura, totalizando 70 metros com as galerias laterais. Sendo explorada uma camada de 1,75 m de carvão, entre os painéis, eram projetados pilares de 25 metros, estes dimensionados por método empírico ( $15 \times$  altura lavrada).

Os suportes da frente de *LW* adquiridos foram do modelo *chock* (mostrados na figura 5), amplamente utilizado na época, estes apresentavam capacidade de suporte de 240 ton. Entretanto, após se iniciar a produção da frente de *LW*, em 1982, as adversidades surgidas eram ironicamente referentes à baixa qualidade do teto, fator positivo para a correta implementação do método em sua versão tradicional. Devido à baixa qualidade do teto e do tipo de suporte surgiram os problemas operacionais com queda de material entre os *chocks*, a frente e atrás deles, o que atrasava a operação e danificava componentes, os quais eram de difícil reposição pois todo o equipamento fora importado da Inglaterra, muitas peças eram encomendadas a indústria nacional, mas ela não supria todas as necessidades.

Figura 5 - Frente de *Longwall* Leão I

Fonte: Cortesia prof.º Jorge Gavronski

Por fim, devido à dificuldade técnica e logística de manutenção dos equipamentos, substituição de peças e a baixa produtividade que rotineiras paradas causavam decidiu-se por desativar a frente de *LW*. Na figura 6 é apresentado o *layout* da Mina do Leão I, onde estão destacados os painéis executados por *Longwall*.

Figura 6 - Layout da Mina do Leão I com destaque dos painéis lavrados por *LW*

Fonte: Cortesia prof.º Jorge Gavronski

Quanto à realidade mineral atual do Brasil, cabe salientar que o método de *LW* contraria as orientações governamentais regidas pelo DNPM (departamento nacional de produção mineral), órgão governamental responsável pela mineração brasileira, que exige a estabilidade integral de estruturas mineiras subterrâneas, contraditoriamente ao método, que se baseia no colapso do teto, e acarreta subsidência na superfície.<sup>2</sup>

## 2.3 GEOMECÂNICA APLICADA A SUBSOLO

O termo Geomecânica se refere ao estudo das propriedades mecânicas de rochas e maciços rochosos. Podemos fazer uma pequena distinção em suas aplicações: geomecânica de superfície e de subsolo, onde obviamente a geomecânica de subsolo se aplica a engenharia de túneis e de lavra subterrânea, pois quando falamos em geomecânica de superfície temos como tema principal a estabilidade de taludes; já para subsolo temos como tema a estabilidade de escavações, mais corriqueiramente tratada como estabilidade do maciço, onde, em muitos casos tensões em paredes e piso se apresentam como problemas sérios e complexos.

Segundo Fiore e Carmignani (2009) entende-se por maciço rochoso uma massa de rocha interrompida por descontinuidades, constituída de blocos discretos, estes com propriedades de rochas intactas, sendo as descontinuidades representadas por juntas, falhas, contatos litológicos e foliações metamórficas.

A presença e características de descontinuidades é o principal fator de controle de resistência mecânica e deformabilidade do maciço. É conhecido que a resistência de uma massa de rocha depende mais das descontinuidades presentes do que da resistência da porção intacta.

Isto é de simples compreensão ao se pensar em dois exemplos: uma massa de granito (rocha de ótima competência) extremamente fraturado e uma massa de carvão quase sem presença de fraturas; fica implícito que a massa de granito apresenta menor resistência a esforços, acarretando em maiores problemas de estabilização.

### 2.3.1 Classificação de maciço

As classificações de maciços tem por objetivo mensurar a qualidade deles; existindo, para tanto, atualmente diversos sistemas de classificação. Cada sistema possui um objetivo

---

<sup>2</sup> Esta restrição não está prevista em lei, porém, é uma postura adotada pelos órgãos competentes, que não permitem ela ao se licenciar empreendimentos mineiros.

distinto, utilizando parâmetros quanti e qualitativos. Podemos citar alguns sistemas de classificação: RMR, MRMR, GSI, Sistema Q, entre outros<sup>3</sup>.

O índice de qualidade de rocha (RQD) proposto por Deere (1963) utilizado em grande parte dos sistemas de classificações; e também considerado um dos índices mais representativos em mecânica de rochas.

O valor RQD corresponde à porcentagem obtida pela divisão da soma de todos os comprimentos de pedaços de um testemunho de sondagem (em diâmetro NX) de tamanho igual ou superior a 10 cm, pelo comprimento total da manobra de sondagem. (Equação 1)

$$RQD = 100 \sum_{i=1}^{i=n} \frac{x_i}{L} \quad (1)$$

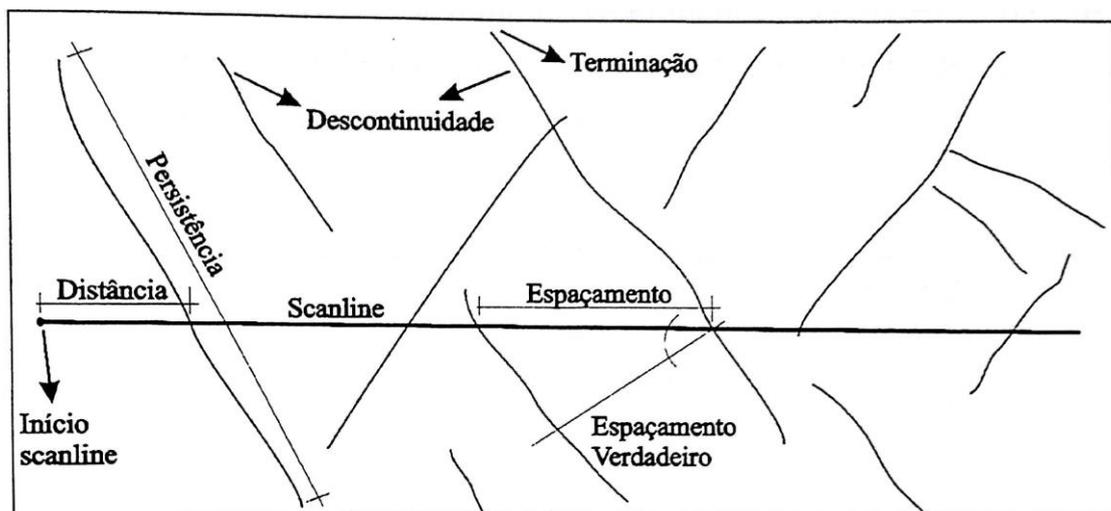
Onde  $x_i$  representa os pedaços maiores ou iguais a 10 cm e L o tamanho total da manobra. No caso de um RQD 100% indica uma recuperação de mesmo índice, implicando em um maciço rochoso intacto. Sendo assim temos o RQD como ótima ferramenta para mensurar a qualidade do maciço.

Ao não dispormos de testemunhos de sondagem, mas de face onde as descontinuidades são visíveis, Palmström (1982) sugere a estimativa de RQD a partir delas utilizando correlações. Ao analisarmos as descontinuidades aflorantes em uma face exposta, fazemos o que chamamos de *scanline*, análise de descontinuidades ao longo de um lineamento traçado.

$$RQD \cong 100e^{-\lambda t}(\lambda t + 1) \quad (2)$$

---

<sup>3</sup> Neste trabalho será abordado apenas a classificação RMR. Para o caso da classificação GSI, esta pode ser inferida pelo valor do RMR subtraindo-se 5.

Figura 7 - Exemplo de *scanline*.

Fonte: Zingano, 2002

Onde  $\lambda_t$  é a densidade de descontinuidades em uma linha, equação válida para o método de *scanline* (PRIEST; HUDSON, 1981), escaneamento por linha.

Vários autores e estudos consideram, entretanto, a varredura por linha deficitária em comparação com a varredura por janelas (ZINGANO, 2002), onde as descontinuidades são analisadas dentro de certas áreas (PRIEST, 1993).

### *Rock Mass Rafting* (RMR)

Bieniawski (1973), desenvolveu este sistema de classificação originalmente para escavações em túneis, porém hoje aplicado em diversos tipos de túneis civis e na mineração (ZINGANO, 2002)

O sistema utiliza cinco parâmetros principais para classificar o maciço rochoso (ZINGANO, 2002):

- Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta (UCS)
- RQD
- Espaçamento entre descontinuidades
- Qualidade das descontinuidades
- Presença de água no maciço

Na Figura 8 são apresentados os parâmetros que compõem a classificação, baseada em um somatório de pesos dos parâmetros considerados. Sendo assim, a classificação varia de 0 a 100, na tabela de Bieniawski (1989).

Figura 8 - Valores dos parâmetros constituintes do RMR.

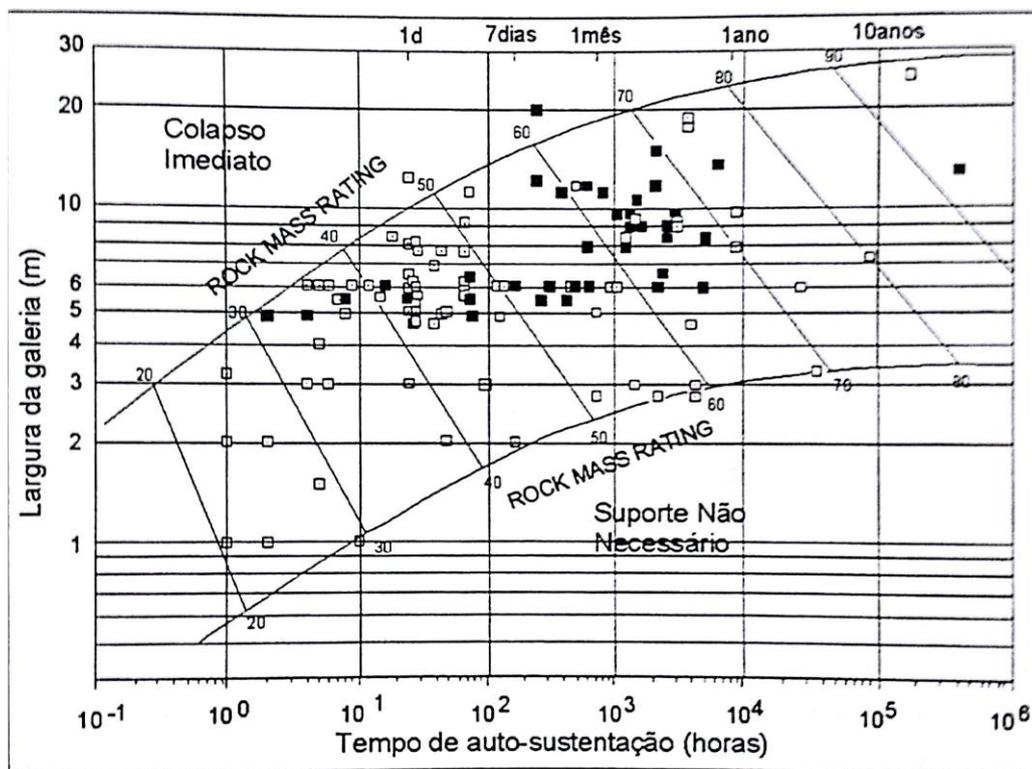
A. Parâmetros de classificação e seus índices								
Parâmetro		Valores						
1	Resistência rocha intacta	Índice de carga pontual (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	Valores baixos, recomendado compressão uniaxial	
		Compressão Uniaxial (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5
	<b>Índice</b>	<b>15</b>	<b>12</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
2	RDQ ou RQD* (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	<b>Índice</b>	<b>20</b>	<b>17</b>	<b>13</b>	<b>8</b>	<b>3</b>		
3	Espaçamento médio (m)	>2	0.6-2	0.2-0.6	0.06-0.2	<0.06		
	<b>Índice</b>	<b>20</b>	<b>15</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>5</b>		
4	Condições das descontinuidades	Superfície muito rugosa, não contínua, sem separação, sem intemperismo	Superfície levemente rugosa, separação <1mm, levemente intemperizada	Superfície levemente rugosa, separação <1mm, forte intemperismo	Superfícies planas ou preenchimento <5mm ou abertura entre 1-5mm contínua	Preenchimento >5mm ou abertura >5mm contínua		
	<b>Índice</b>	<b>30</b>	<b>25</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>0</b>		
5	Presença de água	Fluxo de água por 10m de galeria (l/min)	Sem ocorrência de água	<10	10-25	25-125	>125	
		Razão pressão de água na junta pela tensão principal	0	<0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5	
	Condições gerais	Seco	Pingos	Molhado	Gotejamento	Fluxo contínuo		
	<b>Índice</b>	<b>15</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>0</b>		
B. Ajustes para a orientação das descontinuidades em relação a escavação								
Direção e mergulho das descontinuidades		Muito favorável	Favorável	Fraco	Desfavorável	Muito desfavorável		
Índices	Galerias	0	-2	-5	-10	-12		
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25		
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60		
C. Classificação geomecânica a partir dos índices								
Escore		100-80	80-61	60-41	40-21	<20		
Classe		I	II	III	IV	V		
Descrição do maciço		Muito bom	Bom	Fraco	Pobre	Muito pobre		
D. Significado da classificação geomecânica								
Classificação		I	II	III	IV	V		
Tempo auto-sustentação / vão (m)		20 anos p/15 m	1 ano p/10 m	1 semana p/5 m	10 horas p/2.5 m	30 minutos p/1 m		
Coesão (kPa)		>400	300-400	200-300	100-200	<100		
Ângulo de atrito interno (graus)		>45	35-45	25-35	15-25	<15		

Fonte: Adaptado de Zingano, 2002

Diversos autores estudaram e relacionaram a classificação RMR com diferentes aspectos na mineração subterrânea na aplicação em túneis, relacionando RMR com suporte de teto, tipo de suporte e tempo de auto suporte.

Abaixo na figura 9 é apresentado o ábaco com as relações entre RMR, largura de galeria e tempo de auto suporte, proposto por Bieniawski (1989).

Figura 9 - Tempo de auto suporte de escavações por RMR e largura de galeria.



Fonte: Adaptado de Bieniawski, 1989

### 2.3.2 Tensões em pilares

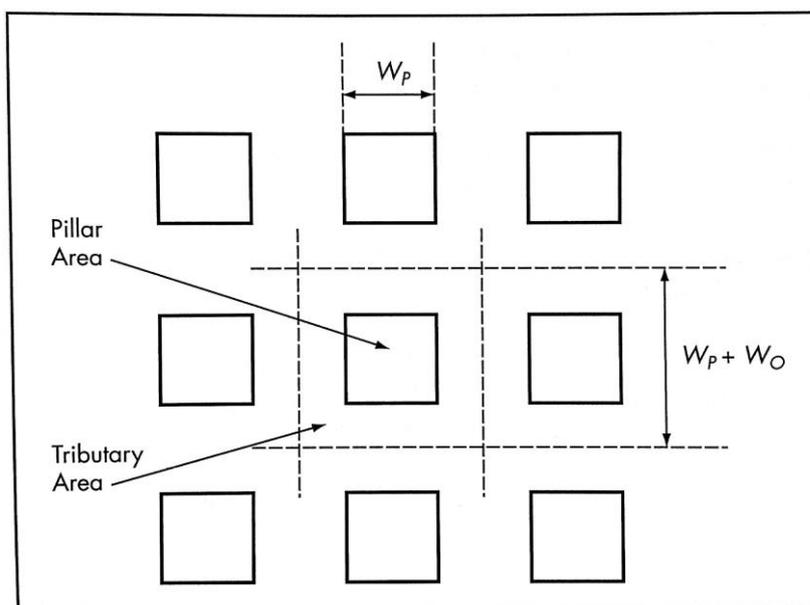
A tensão vertical sobre um pilar ( $\sigma_c$ ) é considerada como sendo função do peso do maciço rochoso da cobertura sobre o pilar (teoria da área tributária), determinado pela espessura e peso específico do material (OBERT; DURVALL, 1967). Deve-se considerar a área do pilar (A) e a área de influência do pilar ( $A_p$ ), também chamada de área tributária, como mostrado na equação (3) e na figura 10.

Teoria da Área Tributária:

Onde  $\gamma_c$  representa o peso específico da cobertura total

$$\sigma_c = \frac{A^2 H \cdot \gamma_c}{A_p^2} \quad (3)$$

Figura 10 - Teoria da Área Tributária



Fonte: Adaptado de Bullock, 2011

Na figura acima, a qual ilustra a teoria da área tributária,  $w_p$  é a largura do pilar e  $w_o$  a largura da galeria.

Já para as tensões horizontais, diferentes causas para estas são levantadas na literatura, sendo a mais comum e de fácil compreensão é a de indução pela tensão vertical (BRADY; BROWN, 1995). Porém, para o caso de mecânica de pilares, as tensões horizontais são normalmente desprezadas.

### 2.3.3 Dimensionamento de Pilar

O dimensionamento de pilares em minas de carvão no Brasil (Santa Catarina) é realizado atualmente por meio de método empírico, através de metodologia aplicada e sugerida para o dimensionamento de pilares no Brasil, as quais, historicamente, são análogas a métodos empíricos propostos por diversos autores em bibliografia.

Esses métodos utilizam o carregamento dos pilares por meio da teoria da área tributária (SALAMON; MUNRO, 1967; PENG, 2008) e a resistência do pilar ( $\sigma_p$ ) de carvão em função

da resistência da camada de carvão pela relação largura/altura, conforme as fórmulas abaixo, onde ( $w$ ) é a largura do pilar, ( $h$ ) é a altura do pilar e ( $\sigma_1$ ) é a resistência da camada de carvão.

$$\sigma_p = \sigma_1 \frac{w^{0,46}}{h^{0,66}} \quad (4)$$

$$\sigma_p = \sigma_1 \left( 0,64 + 0,36 \frac{w}{h} \right) \quad (5)$$

$$\sigma_p = \sigma_1 \left( 0,788 + 0,222 \frac{w}{h} \right) \quad (6)$$

A equação (4) corresponde ao método de Salomon (sul-africano), (5) a de Bieniawski e a (6) ao método de Obert-Duvall, o qual acrescido de ponderações compõem o denominado método CIENTEC. Salienta-se a existência de diversos outros métodos empíricos para o dimensionamento de pilares, entretanto, como se tratam de métodos empíricos, estes têm forte relação com os depósitos sob os quais foram desenvolvidos, os quais com características diferentes dos seus brasileiros, motivo este responsável pelo sub dimensionamento de pilares, possível causa de rompimentos no passado da mineração sul-brasileira.

Atualmente é unicamente adotado no Brasil o método CIENTEC, por ser este desenvolvido sob estudos realizados em camada de carvão catarinense (camada bonito) (ZORZI *et al.* 1991).

Porém deve se levar em conta problemas no dimensionamento dos pilares em profundidades elevadas (mais de 300 metros de cobertura) onde ao se seguir o método encontramos pilares com mais de 50 metros, o que é algo hoje discutível, pelos métodos não terem sido desenvolvidos em tal cenário. Zingano (2010), discute o tema de limites para o dimensionamento de pilares, nos quais a partir de grandes profundidades (300 m) a teoria da área tributária é, segundo Zingano (2010), de uso errôneo, pois as tensões no maciço e sobre as galerias mineradas têm comportamento diferente do pensado para áreas tributárias.

Uma maneira simples de entender o assunto, seria pensar que a partir de certo tamanho de pilares, as galerias deixam de influenciar umas nas outras e começam a ter comportamento de túneis simples, onde as tensões são provenientes apenas das escavações dele.

Matematicamente podemos notar incoerência no método devido ao fato de, ao se tender ao infinito a profundidade, o tamanho dos pilares tende ao infinito da mesma forma.

Fixando um valor de 1,3 para F.S., densidade de camada 0,027 MN por metro cúbico, espessura de camada e largura de galeria para 4 metros ambos (valores padrões) ao analisarmos a equação notamos a tendência da função ao infinito (Equação 12). O mesmo se faz por inferência ao plotarmos o gráfico de H x w (Figura 11).

$$F.S. = \frac{\sigma_p}{\sigma_c} \quad (7)$$

Para F.S. igual a 1 temos:

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_c} = \frac{4(0,788 + 0,222 \frac{w}{4})}{\frac{(w + 4)^2 H \cdot 0,027}{w^2}} \quad (8)$$

$$\frac{(w + 4)^2 H \cdot 0,027}{w^2} = 4(0,788 + 0,222 \frac{w}{4}) \quad (9)$$

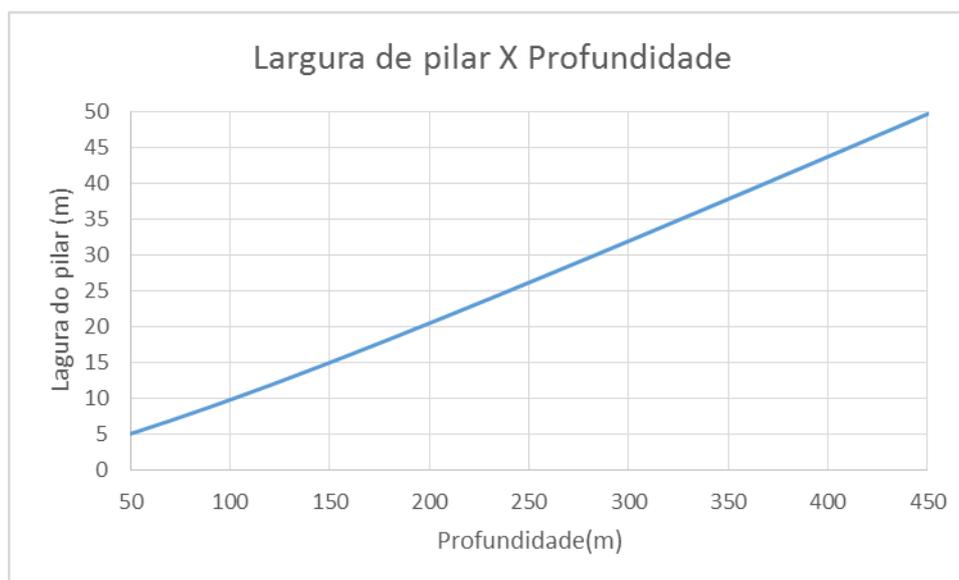
$$H = \frac{4(0,788 + 0,222 \frac{w}{4})w^2}{(w + 4)^2 \cdot 0,027} \quad (10)$$

$$H = \frac{4(0,788w^2 + 0,222 \frac{w^3}{4})}{(w + 4)^2 \cdot 0,027} \quad (11)$$

Ao simplificarmos as constantes com a, b e c:

$$H = \frac{(bw^2 + cw^3)}{a(w + 4)^2} \quad (12)$$

Figura 11 - Relação entre profundidade e largura do pilar para o método Obert-Duvall.



Fonte: Autoria própria

Salamon *et. al.* (1996) afirmam que para o pilar estar sujeito ao carregamento previsto pela teoria das áreas tributárias, as dimensões do painel devam ser maiores que 5 ou 6 pilares de largura ou a largura do painel seja igual à altura de cobertura sobre o painel (SALAMON; ORAVECZ, 1976; PENG, 2008).

Porém, em contrapartida, não é estimado um limite de validade para esta teoria. Pois temos os casos de grandes profundidades (minas em operação em Santa Catarina) e também grandes *slopes* (caso *LW*). Recomendando-se para estes, análises numéricas ou empírica. (PENG 2006, e 2008 ZINGANO, 2010).

No caso do *LW*, onde nos encontramos em uma situação que se afasta da teoria das áreas tributárias, Peng (2006), cita duas alternativas: o modelo americano para *designer* de pilares para *LW*, método ALPS (MARK, 1990), *analysis of Longwall pillar stability* e utilização de modelamento numérico.

### 2.3.4 Suporte de Teto

Para que tenhamos uma operação bem sucedida, tanto durante a produção quanto desenvolvimento, a manutenção das galerias é fundamental pois eventuais ocorrências com caimentos de teto, além de representarem sério risco à vida de trabalhadores, são fatores de paralisação no desenvolvimento, pois podem vir a danificar equipamentos e bloquear passagens. Caimentos em galerias laterais ao painel em produção também são altamente

indesejadas, pois representam riscos aos trabalhadores da frente de lavra que as utilizam como acessos, além de ser um risco à ventilação da mina. Por isso o correto tratamento do teto das galerias auxiliares é ponto de suma importância.

Temos como ponto positivo, que atualmente o quesito controle de maciço em minas subterrâneas de carvão está bem evoluído e possui extensa bibliografia de boa qualidade.

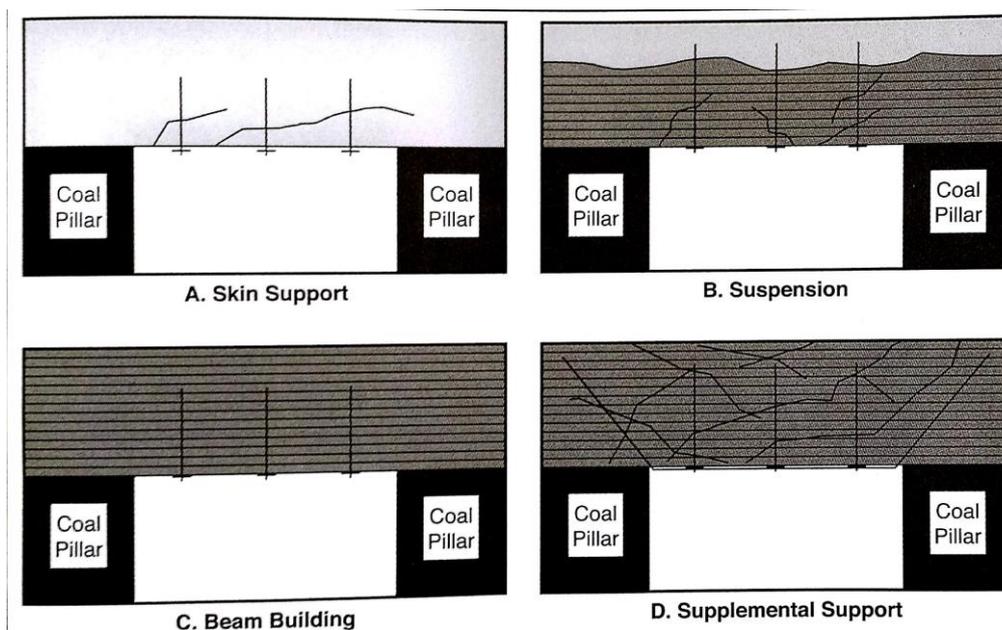
Atualmente o sistema de suporte mais utilizado em minas de carvão é o de parafusos de teto (PENG, 2008). Complementa-se esse sistema eventualmente com telas e/ou tirantes.

A intenção primária da utilização de parafusos de teto em minas de carvão é o suporte e reforço do teto da mina (HEASLEY, 2013). Normalmente, dependendo da geologia estratigráfica e das condições das tensões, podemos classificar os mecanismos de suporte em 4 categorias segundo sua função (MARK, 2000):

- i. Suporte superficial (*skin support*)
- ii. Suspensão
- iii. Viga suspensa
- iv. Suporte suplementar

Exemplos destes mecanismos são mostrados na figura 12.

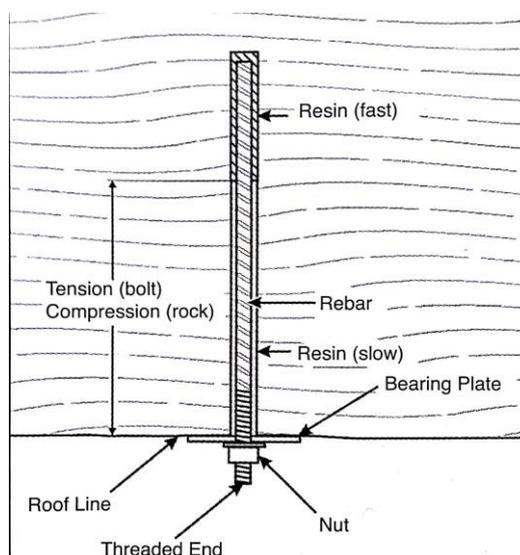
Figura 12 - Mecanismos de suporte de teto.



Fonte: Adaptado de Mark, 2000.

Brady & Brown (1995) descrevem os diferentes tipos de parafusos de tetos usados na mineração em geral, seus materiais e suas técnicas de aplicação. Peng, (2006 e 2008) descreve a utilização de parafusos de teto especificamente na mineração de carvão e os mecanismos diferenciados dela. Atualmente o tipo de suporte mais utilizado é o parafuso com utilização de resina (concreto chumbador), esta introduzida no furo em bisnagas com duas fases, resina e catalizador, para posteriormente ser introduzido no furo o parafuso de teto que faz a mistura das fases à medida que penetra no furo. A utilização de resina tem também uma importante utilidade adicional em minas de carvão, fazendo a união das estratificações do teto (PENG, 2008).

Figura 13 - Parafuso de teto coluna total.



Fonte: Adaptado de Heasley, 2013

Outro mecanismo muito utilizado para suporte de teto são os denominados tirantes, os quais se diferenciam em função e execução dos parafusos de teto. Tirantes têm função de suspender a viga formada pela aplicação dos parafusos de teto, sua aplicação é com carga pontual de resina em sua ponta. Tirantes podem ser do tipo cabo (flexível) ou barra (rígido). Parafusos de teto têm de modo geral tamanhos de aproximadamente 1,5 m e tirantes com tamanhos superiores a isso.

### 3. CAPÍTULO III

#### 3.1 MINA DE *LONGWALL*

A mineração subterrânea de carvão pelo método de *Longwall* tradicional é determinada por diversos fatores, como condições de jazida, necessidade produtiva, impactos ambientais e legislação.

Dentre essas condições, as características geomecânicas e estruturais da jazida são consideradas como sendo as principais determinantes à utilização do método (PENG, 2006; MISHRA, 2013; BESSINGER, 2011 e EIA; 1995), pois este é um método, como já comentado, que se baseia no abatimento do teto da área minerada para alívio de pressão, além de ser uma mineração de grandes frentes de lavra, assim necessitando de camada contínuas.

Para que tenha êxito uma operação por *Longwall* são pontos chave, segundo Peng (2006) e Stefanko (1983) *apud* Mishra (2013)<sup>4</sup>:

- Condições da camada minerada
- Resistência do teto, a resistência do teto deve ser moderada, para que ocorra o *caving*
- Resistência do piso, o piso deve ser competente para suportar as tensões geradas e permitir o trabalho
- Inclinação da camada, idealmente a camada deve ser tabular
- Profundidade, sistemas de *LW* trabalham bem em grandes profundidades

##### 3.1.1 Desenho de Mina (Layout)

As faces de *Longwall* variam em largura e comprimento, porém baseiam-se em uma relação comprimento/ largura elevada.

A largura dos painéis de *Longwall* varia de 600 a 1450ft (183 a 442m) sendo em média entre 900 e 1.000 ft, com tendência da largura aumentar devido à alta produtividade, o menor custo ocorre quando o corte nos dois sentidos de passada do equipamento de corte do carvão.

---

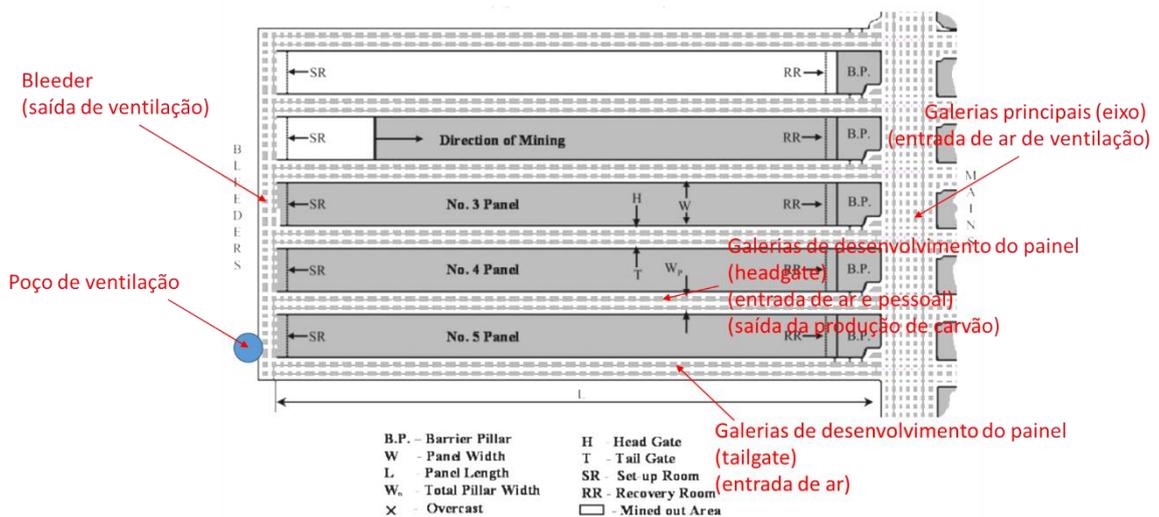
<sup>4</sup> STEFANKO, R. 1983. **Coal Mining Technology: Theory and Practice**. NY: SME-AIME. *apud* MISHRA, 2013

O comprimento do painel varia entre 3.000 a 16.000 ft. (914-4.877 m) com comprimento médio entre 8.200 e 13.120 ft. (2.500-4.000 m) (PENG 2006).

Uma das condições de contorno para definir a largura e comprimento do painel é definir que apenas uma mudança dos equipamentos da frente de *Longwall* de um painel para outro ocorra durante um ano de produção, pois o tempo de mudança de painel pode durar de 15 a 30 dias dependendo da largura do painel, condições de estabilidade do teto e experiência da equipe. Sendo assim, é coerente minimizar ao máximo essa necessidade, porém o fator desenvolvimento também deve ser ponderado.

As galerias de desenvolvimento do painel de *Longwall* podem variar de largura, dependendo do número de galerias utilizado e largura dos pilares. Nos Estados Unidos é utilizado sistema de duas, três ou quatro galerias de desenvolvimento, dependendo das condições de estabilidade e geologia. O sistema mais utilizado é com três galerias em cada lado do painel. Cada lado do sistema de galerias do painel tem um nome e função.

Figura 14 - Designer típico de uma mina de *Longwall* em carvão



Fonte: Adaptado de Peng, 2006

A figura 14 mostra um conjunto de painéis de lavra paralelos e as galerias principais no sentido perpendicular aos painéis. Um lado é chamado de *headgate* e o outro é chamado de *tailgate*. No caso da figura 14, o *headgate* está à direita de quem olha o painel para o sentido das galerias principais, sentido de saída do painel, e o *tailgate* está do lado esquerdo. Pelo *headgate* ocorre a saída de carvão, entrada de pessoal, suprimento e todo o sistema de energia

e hidráulica dos equipamentos da frente de lavra. No *tailgate* não há atividade ou circulação de pessoal, ele apenas tem função de entrada de ar e ventilação. Pode-se observar que as galerias de desenvolvimento se confundem entre painéis ou um lado das galerias de desenvolvimento é comum para dois painéis. Na figura 14, o painel 2 está em produção, o painel 1 foi lavrado e o painel 3 está em desenvolvimento. Para o painel 2, seu *tailgate* foi *headgate* do painel 1. Seguindo a sequência, as galerias que são *headgate* para o painel 2 serão *tailgate* para o painel 3. Esse sistema é importante para o planejamento e desenvolvimento da mina. Então, enquanto um painel está em produção, o painel seguinte está em seu desenvolvimento, escavação das galerias do *headgate*. Portanto, é muito importante a sincronia entre a operação de desenvolvimento e a operação da produção: quando a produção em um painel encerrar o próximo painel deve estar pronto para receber os equipamentos e iniciar a produção.

Dois setores do painel de *Longwall* são importantes: a galeria de início do painel (*setup room*) e as galerias de encerramento do painel (*recovery room*). O *setup room* é o local de montagem dos equipamentos na frente (ou face) do painel de *Longwall* e início das operações de recuo do painel e produção, e está posicionado junto às galerias de ventilação (*bleeders*). O *recovery room* são galerias escavadas antes da chegada da frente de *Longwall* e está localizado na frente do painel, próximo às galerias principais (*mains*). Nesse local é encerrada a produção e os equipamentos são retirados e movidos para o próximo painel. Nesse momento é feita a manutenção e troca de equipamentos.

Peng (2006), diz que um painel é pensado sobre dois diferentes pontos de vista que são geralmente complementares, a engenharia industrial (produção) e o controle de maciço (geomecânica). A engenharia industrial visa a integração harmônica entre todas as partes e equipamentos contribuindo para uma alta produção, considerando segurança, visão econômica e meio ambiente, enquanto o controle de maciço considera a estabilidade estrutural do painel. Estes dois pontos devem ser considerados para o projeto de painel de *Longwall* (PENG, 2006).

### 3.1.2 Divisão dos Processos

Podemos dividir, baseado na dinâmica dos processos, uma mina operando por *LW* em produção e desenvolvimento, assim como podemos dividir os equipamentos referentes a estas duas áreas.

Porém é de fundamental importância para uma operação geral harmoniosa que estas duas áreas trabalhem em conjunto, uma considerando a outra (PENG, 2006).

### 3.1.3 Desenvolvimento

Segundo Peng (2006) o desenvolvimento dos painéis é parte integral do planejamento de *LW*.

O desenvolvimento das estruturas necessárias para a operação de lavra é parte fundamental para uma produção otimizada, pois a produção da frente de *LW* é dependente do desenvolvimento completo das estruturas auxiliares. Para uma mina de *LW* produtiva deve-se garantir que o desenvolvimento não atrase a produção, isto é, o desenvolvimento de um painel deve estar concluído para que se comece a produção pela frente de lavra. O não cumprimento dessa máxima causa enormes prejuízos técnicos e financeiros.

Por dia de parada da frente de lavra, milhares de reais são perdidos, isto é de simples constatação se pensarmos nos milhares de toneladas que deixam de ser produzidas e na depreciação do equipamento. Outro fator que deve ser considerado é o fator técnico, pois ao deixar a frente de lavra demasiado tempo parada corremos o risco de o acomodamento do maciço e de suas tensões, dificultarem a movimentação da frente ou até mesmo danificarem equipamentos.

Basicamente o desenvolvimento em minas de *LW* se assemelha ao método de C&P. As frentes de desenvolvimento são constituídas em geral por um minerador contínuo para corte do carvão, dois *Shuttle cars* para carregamento do carvão até o *feeder-breaker* que alimenta a correia transportadora, sendo também fundamental o *roof bolter* responsável pela colocação de parafusos e tirantes, para suporte de teto.

Essencialmente dois métodos de desenvolvimento são aplicados mundo afora (DEMICHIEI, BECK, 2001):

- Conjunto minerador contínuo e *roof bolter*
- *Miner bolter*

O primeiro já é tradicionalmente conhecido no sul do Brasil (minas de SC), e em termos de *LW* é ideal para um teto de média qualidade, pois para tetos de baixa qualidade podem se apresentar problemas devido à demora na estabilização do teto (colocação dos parafusos de teto).

Para solucionar os problemas com a auto estabilidade do teto surgiram comercialmente os *miner bolter* junção do minerador contínuo e *roof bolter*, equipamento capaz de realizar as duas atividades, desmonte mecânico do carvão e suporte de teto.

### 3.1.4 Equipamentos para *Longwall*

Para o sucesso de uma operação de mina por *Longwall*, é imprescindível a correta seleção de equipamentos para o trabalho em mina de carvão (MISHRA, 2013). Os equipamentos tanto para a produção quanto para o desenvolvimento devem ser compatíveis entre si e com as premissas da lavra.

#### 3.1.4.1 Produção frente de lavra

Para a frente de lavra, o conjunto de equipamentos que deve operar em harmonia recebe o nome homônimo do método de lavra, *Longwall*, sendo composto por *shearer*, *shields* e AFC. Na figura 15 é apresentada uma frente de *Longwall* completa e em operação.

Figura 15 - Frente de lavra ((1) *shields* (2) *shearer* (3) AFC).



Fonte: Cortesia prof.º André Zingano

##### 3.1.4.1.1 Sistema de proteção da frente de lavra (*shields*)

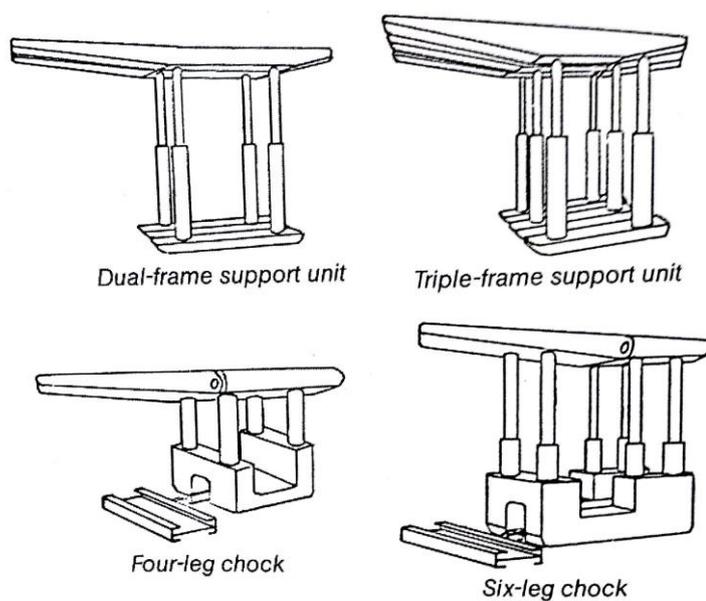
Os *shields* não apenas têm a função de suportar o teto e proteger todos os demais componentes da frente de lavra (*shearer* e AFC), mas principalmente de prover segurança a todas as atividades mineiras associadas à lavra (PENG, 2006). A correta seleção e utilização

dos suportes, é um pré requisito para uma operação bem sucedida. Esta seleção é referente principalmente às dimensões e capacidade de carga destes equipamentos, sendo que fabricantes apresentam grandes linhas comerciais e normalmente vêm a atender especificações do comprador.

Os suportes vêm a corresponder de 60 a 80 % do capital inicial investido em uma frente de lavra, dependendo da largura do painel.

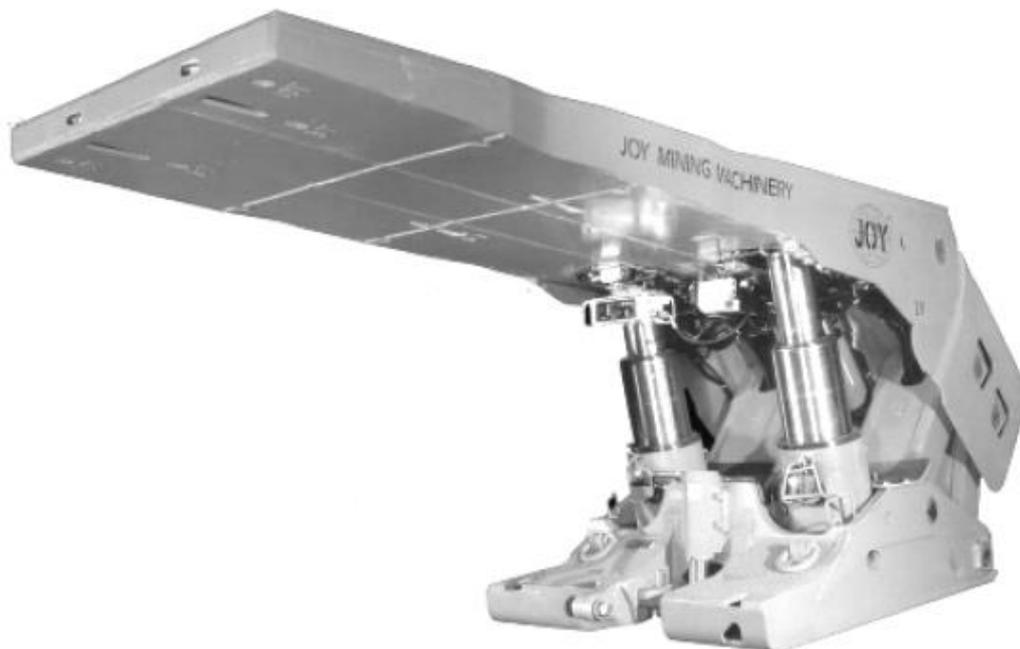
Atualmente a utilização dos modelos de suporte *shield* correspondem à totalidade das operações por *Longwall* tradicional em carvão, sendo que sua primeira aparição foi no ano de 1975 em West Virginia (PENG, 2006). Os *shields* como são conhecidos hoje foram precedidos pelos já não utilizados modelos *frames* e *chocks*.

Figura 16 - *Frames* e *Chocks*.



Fonte: Adaptado de Peng, 2006

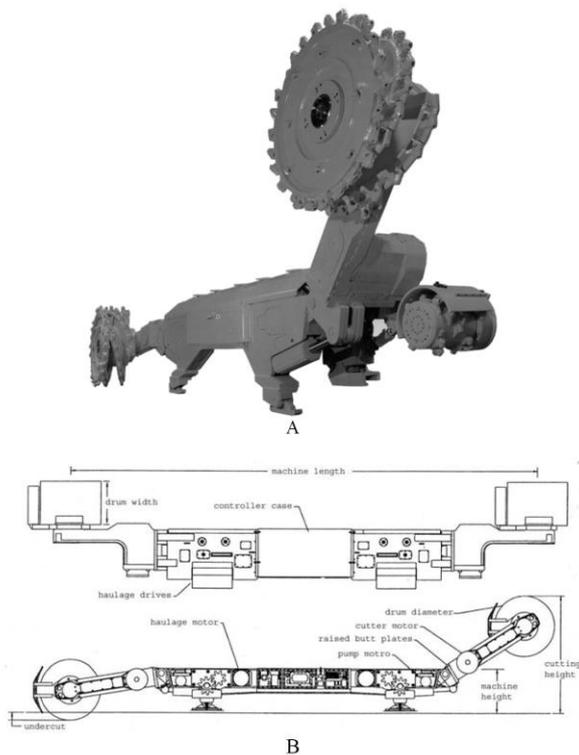
Figura 17 - *Shield* de duas pernas.



Fonte: Joy

#### 3.1.4.1.2 *Shearer (cortadeira)*

Um *Shearer* é um equipamento especializado para corte de carvão, o que não exclui sua utilização em geologias com resistências similares a do carvão (por exemplo: fosfatos), o *shearer* consiste de um ou dois tambores de corte, com *bits* de corte, acoplados a braços que se movem horizontalmente na frente de lavra. O movimento do *shearer* corta a camada em fatias. O diâmetro dos tambores de corte deste equipamento varia sempre compatibilizando com a espessura minerada. As rotações dos tambores normalmente variam de 30 a 60 rpm (MISHRA, 2013).

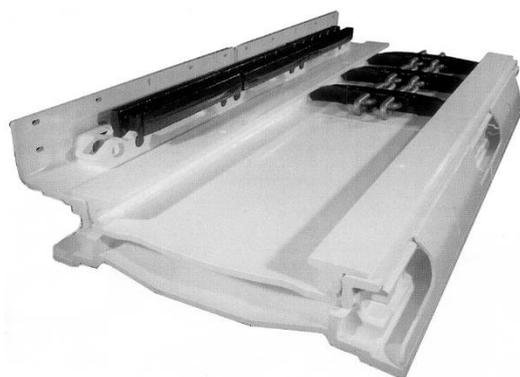
Figura 18 - *Shearer* (cortadeira).

Fonte: Joy

### 3.1.4.1.3 Sistema de transporte do *shearer*

O sistema responsável pelo movimento do *shearer* é o AFC (*armored face conveyor*, ou calha de arraste). O sistema AFC além de ser o sistema de movimentação dos *shields*, é responsável pelo seu suporte. O sistema é composto por partes conectas entre si, porém com flexibilidade para realizar o avanço. Este avanço é compatível com o avanço da lavra.

Figura 19 - Calha de arraste (AFC) individual.



Fonte: Joy

### 3.1.4.1.4 *Stage Loader (sistema de transferência do carvão)*

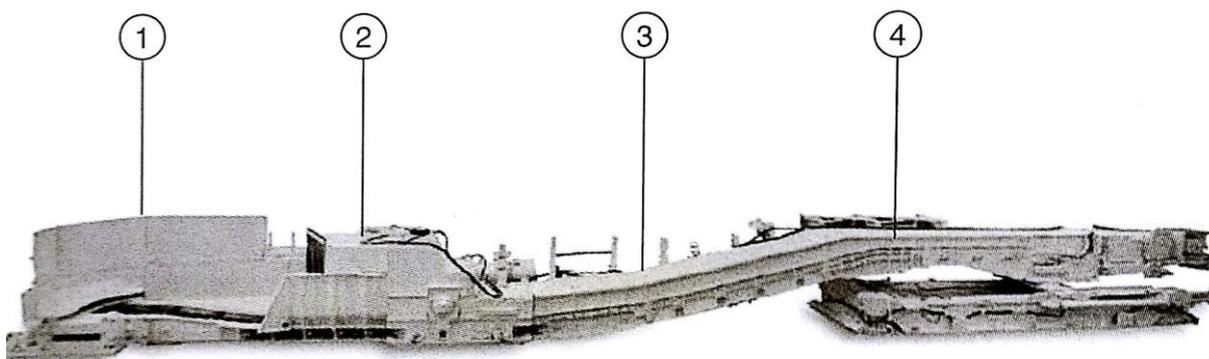
O *stage loader* é parte integrante da frente de lavra responsável pela transferência do carvão desmontado pelo *shearer* do AFC para a correia transportadora que se encontra na galeria perpendicular à frente de lavra. Este componente deve ser projetado para que opere suavemente para obter uma eficiente recuperação do carvão na transferência para a correia (MISHRA, 2013). Atualmente com a crescente modernização, estes componentes usufruem de sensores e microcomputadores embarcados, para que o processo apresente respostas instantâneas a variações nas condições de trabalho.

Figura 20 - *Stage Loader* instalado na frente de lavra.



Fonte: Joy

Figura 21 - *Stage Loader* ((1) seção de carga (2) britagem (3) seção transporte (4) seção de descarga).



Fonte: Adaptado de Mishra, 2013

### 3.1.4.2 Equipamentos para desenvolvimento

#### 3.1.4.2.1 Minerador contínuo (*continuous miner*)

Mineradores contínuos são considerados a mais eficiente forma de se trabalhar em carvão subterrâneo, onde são largamente utilizados no método de C&P (LINEBERRY; PAOLINI, 1992). São considerados também altamente seguros do ponto de vista de operacionalidade, pois permitem sua operação remota, e fazem dispensável o emprego de desmorte por explosivo. Comercialmente são oferecidos diversos modelos de mineradores contínuos, sendo que a correta seleção do equipamento é fundamental para uma operação bem sucedida (PENG, 2006). Tanto para o método de C&P, quanto para o *LW*, o ideal é que a largura do tambor de corte do minerador seja o mais próximo possível da largura da galeria. Para a utilização no desenvolvimento em *LW* a utilização de minerador se tornou unanime devido as necessidades produtivas e estruturais das escavações, em comparação à utilização de explosivos que oferecem um avanço lento e problemas com estabilidade.

Figura 22 - *Continuous miner*.



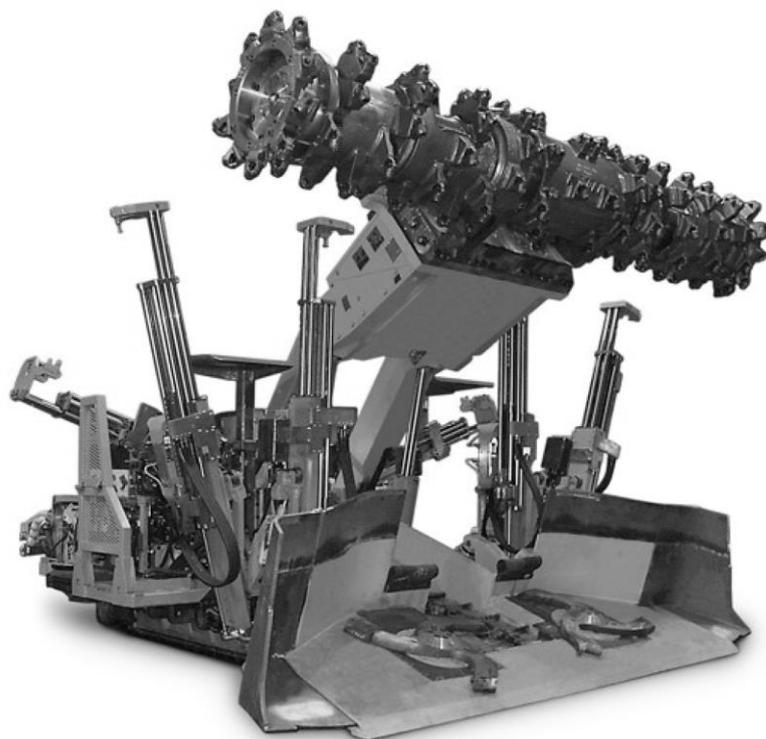
Fonte: Joy

#### 3.1.4.2.2 Miner bolter

Os primeiros *miner bolters* surgiram em meados de 1980, com duas perfuratrizes de teto incorporadas aos já tradicionais *continuous miners* (PENG, 2009), assim ao associar em um

mesmo equipamento a perfuração de teto para suporte e avanço, se eliminou uma atividade do ciclo, além de uma representativa segurança ao diminuir o tempo de teto exposto sem suporte. Cabe salientar que este equipamento não executa as duas atividades simultaneamente, a grande vantagem está em não necessitar a retirada do minerador da galeria para que o suporte de teto seja efetuado por outro equipamento (*roof bolter*).

Figura 23 - *Miner bolter*.



Fonte: Joy

#### 3.1.4.2.3 *Demais equipamentos para desenvolvimento*

Os demais equipamentos constituintes de uma frente de desenvolvimento são *Shuttle car*, *feeder breaker* e *roof bolter*, além de serem considerados também equipamentos auxiliares como tratores e equipamentos de transporte de trabalhadores.

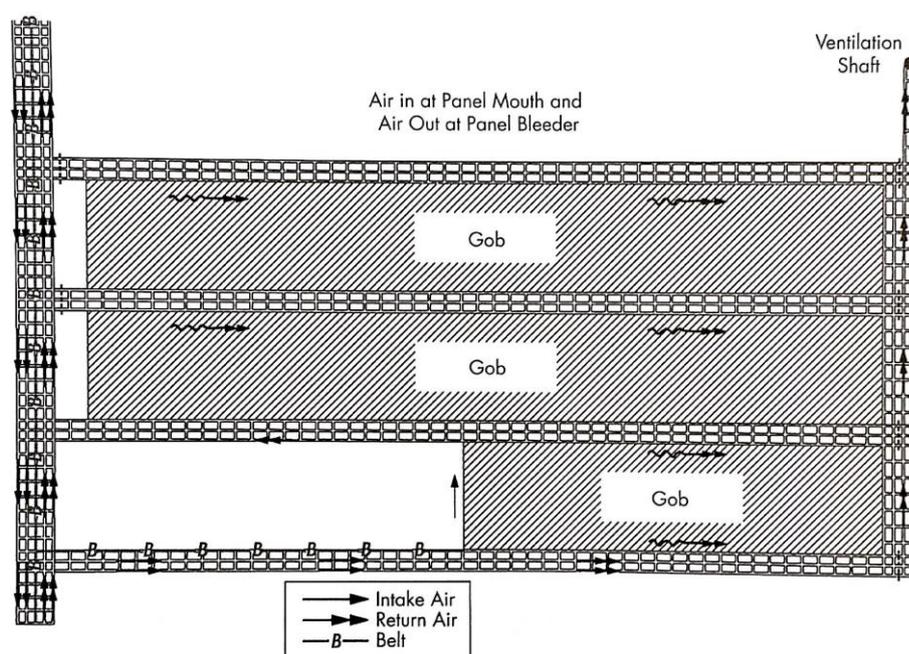
Um típico conjunto mecanizado de desenvolvimento tem a proporção de dois *shuttle car* para cada CM ou MB. Para o caso de operação com CM também é recomendada a proporção de dois *roof bolter* (LINEBERRY; PAOLINI, 1992; TIEN, 2011 e BISE, 2013)

### 3.1.5 Ventilação em mina de *Longwall*

Peng (2006) afirma que a ventilação é um dos mais críticos fatores no planejamento de mina *LW*.

Entretanto, a dinâmica da ventilação para frentes de *LW* é extremamente simples: o ar novo deve passar pelo *headgate* e dele pela frente da lavra, após isso o ar passa para o *tailgate* e dele para o *bleeder*, e então para o *shaft*, localizado no *bleeder*.

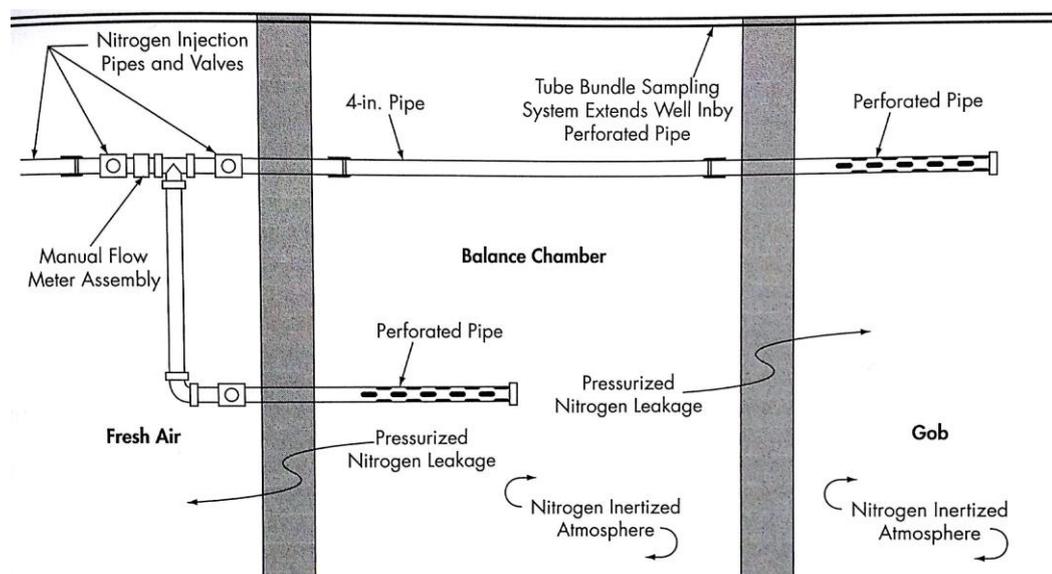
Figura 24 - Esquema da ventilação de *Longwall*.



Fonte: Adaptado de Bessinger, 2011

Um sério problema associado à lavra subterrânea de carvão é o risco de explosões por concentrações de metano (BESSINGER, 2011), risco este acentuado para minas de *LW* devido sobretudo às grandes áreas de *goaf*, as quais o sistema de ventilação não atende, para tanto é sugerido o monitoramento constante dos gases nessa região (BESSINGER, 2011; LUO; ZHOU, 2013; PENG, 2006), sendo que em alguns cenários, sistemas de inertização com nitrogênio são utilizados, por ser um gás inerte, o nitrogênio age como uma capa protetora que impede as reações explosivas do metano com o oxigênio. Sistemas de proteção semelhantes a este são comuns nas mais variadas áreas industriais para prevenção de explosão.

Figura 25 - Sistema de inertização pra GOB.



Fonte: Adaptado de Bessinger, 2011

Quanto à vazão de ar requerida para minas de *Longwall*, MISHRA (2013), fala que muitas minas nos EUA trabalham com 472 m<sup>3</sup>/s, e normalmente 47 m<sup>3</sup>/s apenas para a frente de lavra. Cabe salientar que a legislação brasileira não abrange minas de carvão por *LW* apenas para o método C&P (NBR 22, 1999).

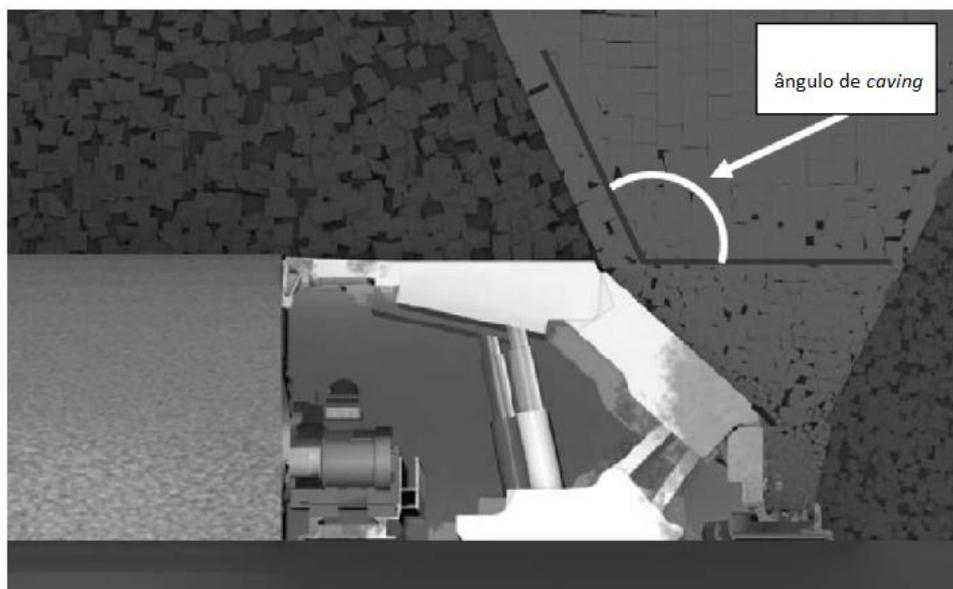
### 3.2 GEOMECÂNICA APLICADA A *LONGWALL*

Para minas de *LW*, assim como para qualquer mineração subterrânea, o tratamento geomecânico das estruturas de lavra são regidos por fatores como o tipo de lavra e a litologia a ser trabalhada, os aspectos apresentados a seguir são referentes à lavra por *Longwall* tradicional em carvão.

São apresentadas considerações sobre os pilares e as tensões excessivas geradas pela lavra, assim como o comportamento geomecânico referente ao *caving*.

#### 3.2.1 *Caving* sob área minerada (*GOAF*)

Humphries & Poulsen (2008) consideram que um teto de boa resistência apresenta um ângulo de *caving* de apenas 40 a 70 graus, enquanto um material mais friável apresenta ângulo de *caving* até 100-110 graus.

Figura 26 - Ângulo de *caving*.

Fonte: Adaptado de Humphries & Poulsen, 2008.

### 3.2.2 Potencial de *caving* (*cavability*)

Estudar o potencial de *caving* (*cavability*) é ponto importante para o processo, ao entendermos o potencial das camadas superiores de sofrerem o *caving*, assim aliviando o campo tensional. Para tanto, temos duas vias, modelamento numérico e estimativa empírica.

Vakili & Hebblewhite (2010) apresentaram estudo detalhado sobre *cavability* via modelamento numérico, onde por exemplo, se levam em consideração parâmetros como o módulo de elasticidade (de Young), a espessura da camada, os espaçamentos horizontal e vertical das discontinuidades e as tensões principais horizontal e vertical.

Porém, visto a dificuldade de se trabalhar com modelos numéricos para *caving*, outro caminho a ser tomado é a estimativa por método empírico.

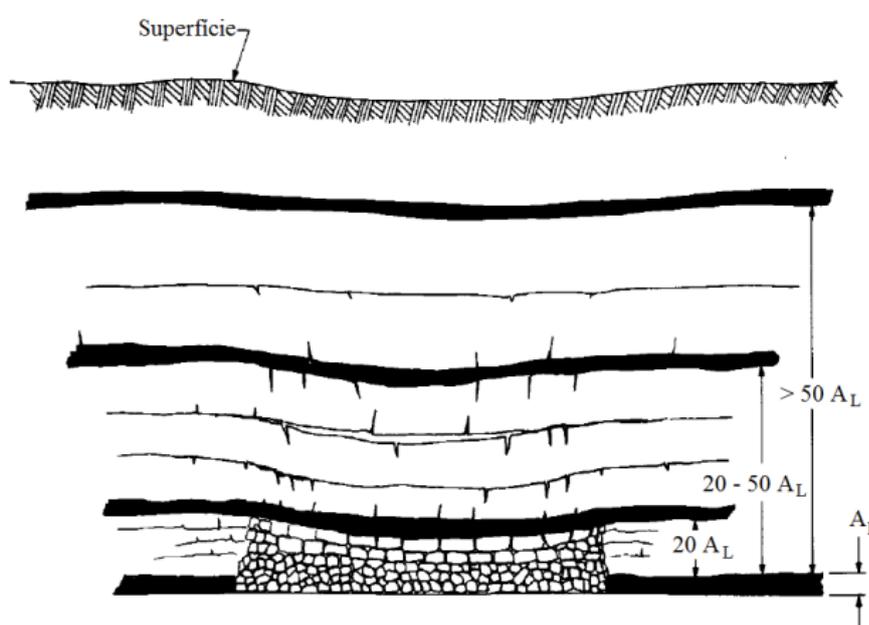
Humphries e Poulsen (2008) sugere a utilização de método empírico simplificado para calcular um índice de *cavability* (CI), o qual leva em consideração a tensão de ruptura uniaxial (UCS), profundidade de escavação (H) e espessura da camada (h). Onde quanto mais positivo o valor de CI maior a ocorrência de *caving*.

$$CI = -2,64 + 0,0395 H - 0,72 UCS + 0,191 h \quad (13)$$

Seccatore *et. al.* (2012) diz que um material com resistência abaixo de 25 MPa (UCS) e profundidade superior a 150 metros oferecem condições ideais para que se ocorra o *caving*. Originalmente essa expressão foi utilizada por Seccatore *et. al.* (2012) para se referir a camadas de carvão de grande espessura mineradas por método *top caving*, porém, observada a semelhante mecânica do sistema *LW* tradicional, podemos considerar isto válido para a geologia de teto.

Outro ponto que merece atenção e estudo referente ao *caving* é de sua propagação nas camadas acima da área de lavra. A maneira como o *caving* se propagara pode vir a influenciar pontos, como, fatores ambientais e operacionais. Uma grande propagação do *caving* pode inviabilizar uma lavra posterior de camadas superiores, requerer supores mais robustos para a frente de lavra e gerar grandes fluxos de água no caso de atingir-se algum aquífero. Chekan *et al.* (1993) em seus estudos descreve a existência de três zonas de perturbação, devido ao colapso do teto sobre a zona minerada por *LW*, onde cada zona apresenta características próprias de perturbação em seu estrato, dependente da localização da zona dependente da altura lavrada ( $A_L$ )

Figura 27 - Delimitação de zonas perturbadas devido à altura de lavra ( $A_L$ ).



Fonte: Adaptado de Chekan *et. al.* 1993

Onde segundo Chekan *et. al.* (1993) as zonas de perturbação apresentam as seguintes características:

Tabela 1 - Características das zonas perturbadas em escavações de *Longwall*.

ZONAS	INTERVALO	CARACTERÍSTICAS	
Zona Colapsada	Região de Colapso completo	3 -6 AL	Estratos colapsam, fragmentos em blocos irregulares de forma plana, de maneira aleatoria
	Região de Colapso parcial	6 -12 AL	Estratos assumem grau significativo de flexão, levando a intensa fraturação ou deslocamento
	Limite superior da zona de colapso	12 -20 AL	Estratos podem se separar ao longo de planos e fraturas e juntas podem abrir; as camadas individuais permanecem intactas e os deslocamentos são menos provaveis
Zona Fraturada	20 -50 AL	Estratos são divididos em blocos pelas fraturas e fissuras oriundas da separação das camadas; a flexão não é tão abrupta e as fraturas são menos pronunciadas	
Zona Flexionada	50 AL- superfície	A flexão dos estratos é gradual e distribuida sobre uma grande distancia horizotal sem causar grandes fissuras	

Fonte: Adaptado de Chekan *et. al.* 1993

### 3.2.3 Subsidiência

No método de lavra de Câmaras e Pilares, os pilares têm a função de sustentação do maciço rochoso de cobertura para evitar a subsidiência da superfície.

Para que isso ocorra, os pilares e galerias devem ser corretamente dimensionados para suportar o rearranjo das cargas do maciço rochoso, caso contrário haverá uma sobrecarga nos pilares fazendo com que esses colapsem e conseqüentemente ocorrerá a subsidiência da superfície. Na lavra de carvão pelo método de *Longwall*, por ser um método onde ocorre o abatimento do teto atrás da frente de lavra do painel de *Longwall*, a ocorrência de subsidiência é esperada e levada em consideração nos projetos.

Diversos autores debatem esse tema, seus danos e seu raio de abrangência, porém é de consenso que o raio de abrangência dos efeitos é dependente de fatores como:

Geometria do painel de lavra

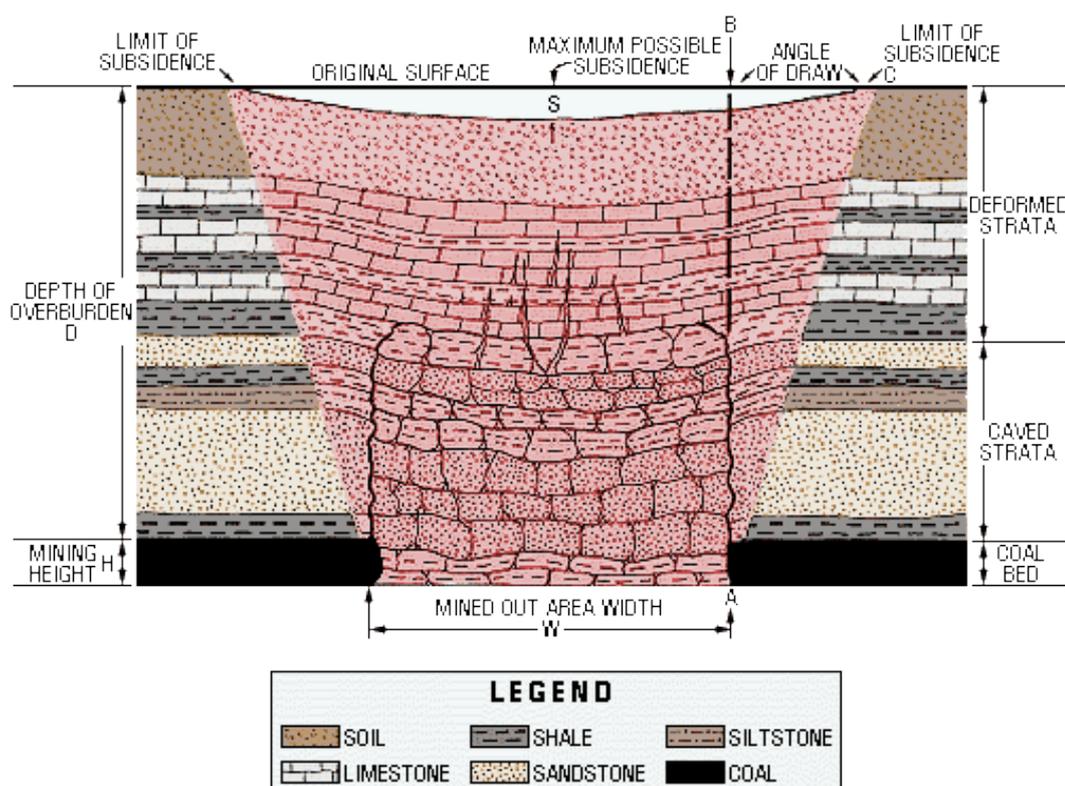
Profundidade da camada explorada

Estratigrafia acima da camada explorada

Em um melhor cenário, efeitos na superfície são imperceptíveis, já em cenários típicos a subsidência na superfície é aparente e danosa se não for pré-estudada.

Abaixo, a figura 28 mostra a dinâmica típica da subsidência proveniente da lavra por *LW*.

Figura 28 - Efeitos do abatimento de teto na lavra por *Longwall* e subsidência na superfície.



Fonte: West Virginia Geological and Economic Survey<sup>5</sup>

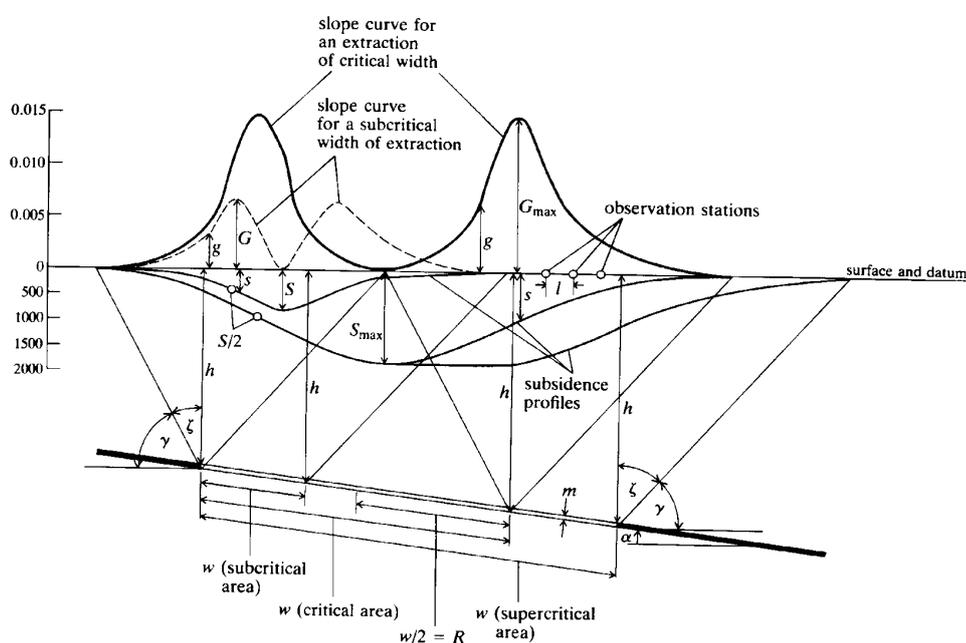
Visto a possível ocorrência de danos pela subsidência, uma melhor compreensão da mesma se faz necessária; isto para que uma possível área de abrangência seja mensurada, assim como um possível perfil da mesma. Podendo assim serem tomadas previamente medidas

<sup>5</sup> Disponível em < <http://www.wvgs.wvnet.edu/www/geohaz/geohaz3.htm> > Acesso em ago. 2015

preventivas ou mitigadoras. Como ferramentas para o estudo de subsidência em carvão, podemos fazer uso de diversos métodos empíricos apresentados em bibliografia, por exemplo, o apresentado no *SME-Mining Engineering Handbook* (HARTMAN, 1992) também apresentado por Peng (1992).

Para o estudo de subsidência por metodologia empírica um primeiro passo é a determinação da máxima subsidência ocorrente. Na figura 29 são apresentados perfis de subsidência em função da largura do painel a ser lavrado no método de *LW*.

Figura 29 - Distribuição empírica para a subsidência em função do tamanho do painel.



Fonte: NCB, 1975 *apud* Brady & Brown, 1995<sup>6</sup>

Na figura acima são apresentadas três hipóteses:

Largura de painel subcrítica

Largura de painel crítica

Largura de painel supercrítica

Analisando a subsidência das três hipóteses, notamos que a máxima subsidência possui limite diretamente relacionado com largura do painel.

<sup>6</sup> National Coal Board (1975) **Subsidence Engineers Handbook**, 2nd (ver.) edn, National Coal Board Mining Dept, London. *apud* BRADY; BROWN, 1995.

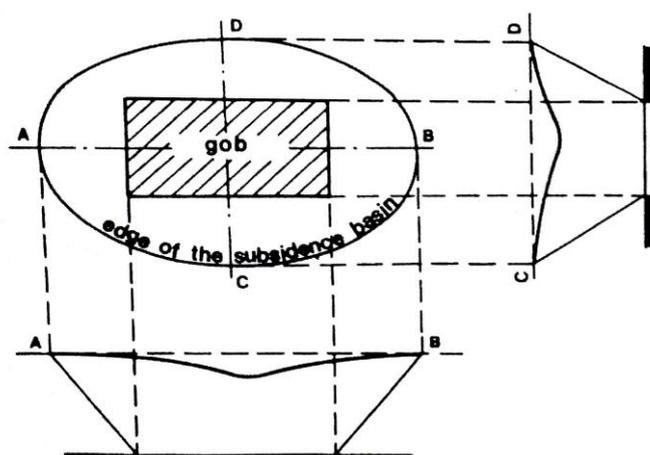
Luo & Peng (1997), apresentam uma fórmula empírica para estimar a largura crítica relacionada com a máxima subsidência.

$$W_c = 100 + 1,048h \quad (4)$$

Onde  $W_c$  é a largura crítica do painel e  $h$  a profundidade da camada.

Peng (2006 e 1992) e diversos autores citam que a máxima subsidência sempre irá se concentrar no centro do painel explorado (figura 30), o que também irá ocorrer durante o avanço da lavra, ou seja, a máxima subsidência sempre estará no centro da área já colapsada (lavrada).

Figura 30 - Forma básica da subsidência em superfície.



Fonte: Adaptado de Peng, 1992

Peng (1992) apresenta fórmula empírica para determinação da máxima subsidência ( $S_{max}$ ), em função de um fator de subsidência ( $a$ ) e de uma altura crítica e da altura de lavra ( $m$ ).

$$\begin{aligned} S_{max} \\ = a * m \end{aligned} \quad (5)$$

Onde “ $a$ ” é ainda em função de  $P$ , um coeficiente das propriedades estratigráficas.

$$\begin{aligned} a \\ = 0,5(0,9 + P) \end{aligned} \quad (6)$$

Peng (1992) apresenta diferentes maneiras de determinação do coeficiente P: desde maneira direta e simplificada (tabela 1) a métodos de maior complexidade com outros fatores ponderadores<sup>7</sup>.

Tabela 2 - Coeficiente P e a.

Classificação da Rocha	P	a
Dura	0,0 - 0,3	0,45 - 0,6
Média-Dura	0,3 - 0,7	0,6 - 0,8
Branda	0,7 - 1,1	0,8 - 1,0

Fonte: Adaptado de Peng, 1992

Para o caso de largura de painel menor que a crítica, Peng (1992) apresenta a seguinte equação:

$$S_0 = a * m * \sqrt{\frac{w_1}{w_c} * \frac{w_2}{w_c}} \quad (7)$$

Onde  $w_1$  e  $w_2$  são comprimento e largura do *goaf* respectivamente, e  $w_c$  a largura crítica de subsidência.

Para descrever analiticamente o perfil de subsidência são apresentados na bibliografia diferentes modelos matemáticos, Peng (1992) apresenta o modelo de exponencial negativa e de tangente hiperbólica, onde a mais utilizada nos EUA é da tangente hiperbólica.

$$S(x) = 1/2 * S_0 * (1 - \tanh \frac{cx}{H}) \quad (8)$$

Onde a tangente hiperbólica pode ser representada por função exponencial:

$$\tanh x = \frac{1 - e^{-2x}}{1 + e^{-2x}} \quad (9)$$

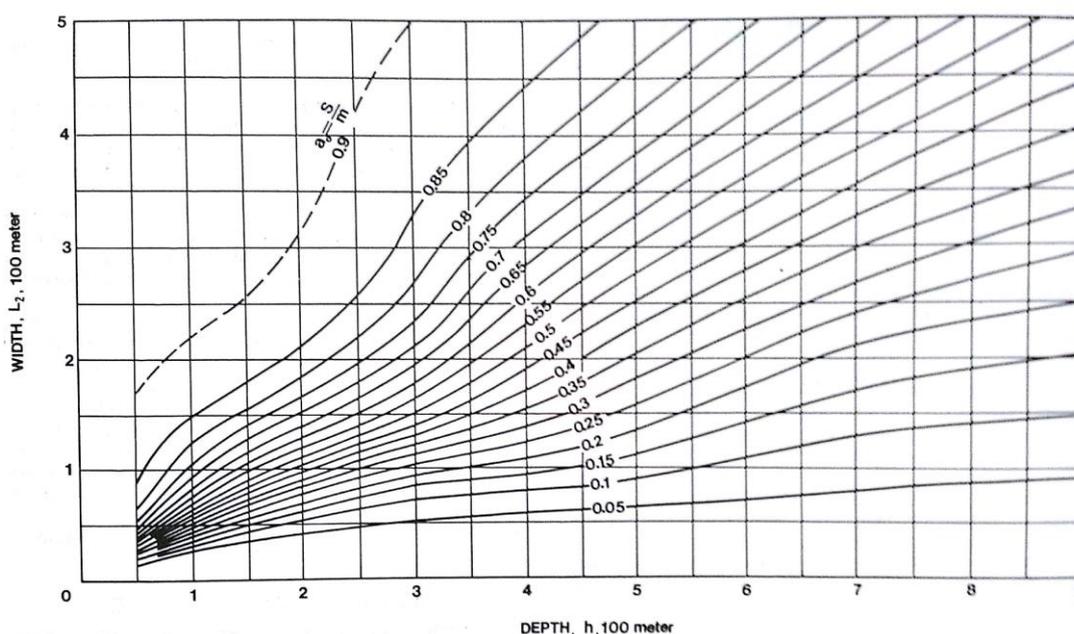
<sup>7</sup> Outros modos de determinar o fator P são apresentados em Peng (1992).

No modelo de tangente hiperbólica (equação 8) é utilizada a constante (c), a qual é inferida conforme a estratigrafia, Peng (1992) sugere o valor de 8,3. Já H corresponde à profundidade da zona minerada e x à distância contada a partir do centro da subsidência

Outra opção para a estimativa de subsidência é a solução gráfica (NCB, 1975 *apud* PENG, 1992<sup>8</sup>), esta mais prática para estimativas iniciais, porém sem considerar as características geomecânicas dos estratos.

Primeiramente utiliza-se o gráfico da figura 31 para determinar a subsidência máxima (S) em função da largura do painel (w), da profundidade (h) e da espessura da camada (m).

Figura 31 - Determinação de subsidência máxima.

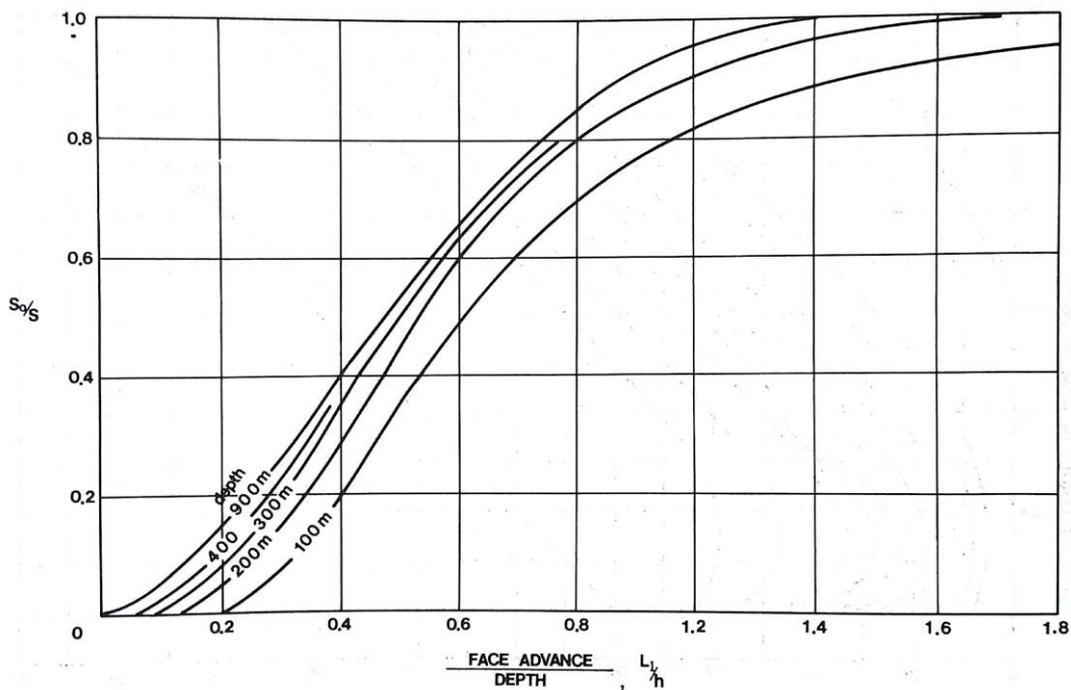


Fonte: Adaptado de NCB, 1975 *apud* Peng, 1992<sup>9</sup>

Para a hipótese de não estarmos em uma condição de largura crítica, é utilizado o gráfico abaixo para correção da subsidência.

Figura 32 - Correção da subsidência para máxima.

<sup>8 e 9</sup> National Coal Board (1975) **Subsidence Engineers Handbook**, 2nd (ver.) edn, National Coal Board Mining Dept, London. *apud* PENG, 1992.

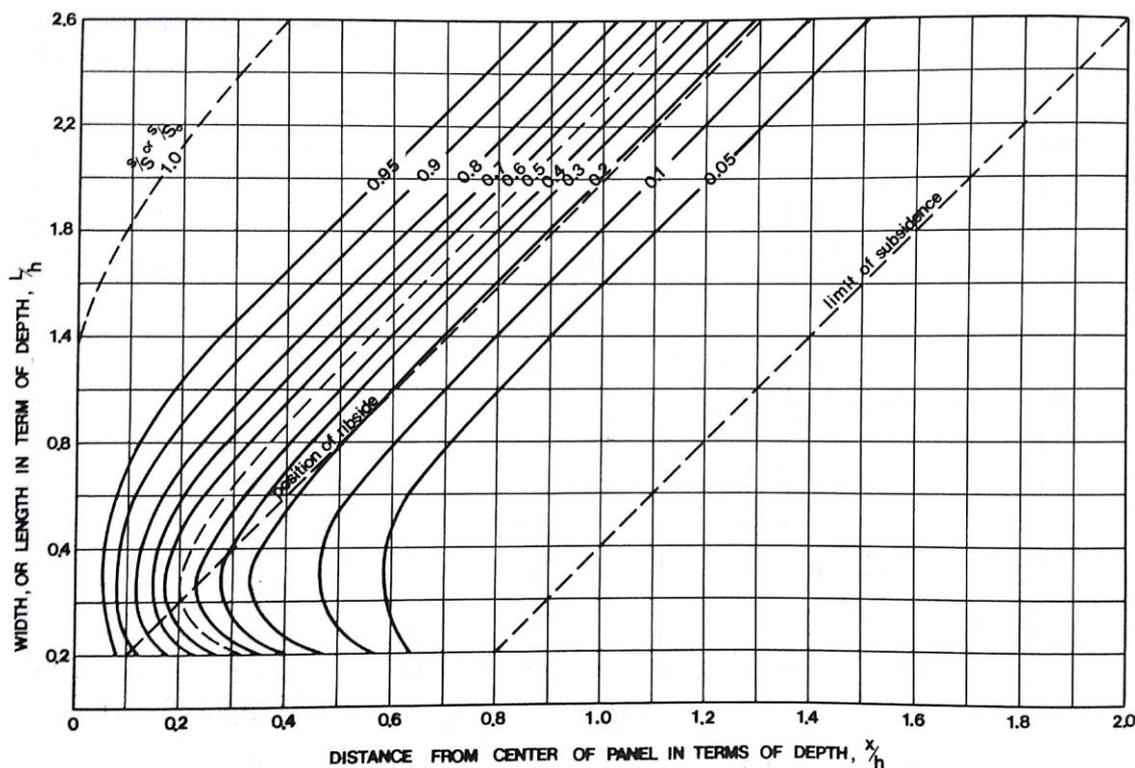


Fonte: Adaptado de NCB, 1975 apud Peng, 1992<sup>10</sup>

Por fim utiliza-se o gráfico da figura 33 para se determinar o perfil da subsidência. No gráfico fixamos a razão largura por profundidade e analisamos a linha fixada, da esquerda para a direita, assim teremos na linha fixada a razão entre a subsidência na posição e a subsidência máxima, a posição é dada no eixo horizontal e está apresentada como razão entre a posição, a contar do centro do painel, e a profundidade, portanto, ao termos a profundidade encontramos a posição.

Figura 33 - Relações para determinação de perfil de subsidência.

<sup>10</sup> National Coal Board (1975) **Subsidence Engineers Handbook**, 2nd (ver.) edn, National Coal Board Mining Dept, London. *apud* PENG, 1992.



Fonte: Adaptado de NCB, 1975 apud Peng, 1992<sup>11</sup>

Abaixo é apresentado a máxima subsidência estimada pelo método para diferentes profundidades pelo método gráfico (NCB, 1975 apud PENG, 1992<sup>12</sup>).

Tabela 3 - Máxima subsidência para diferentes profundidades e tamanhos de painéis considerando lavra de camada de 2 metros.

profundidade (m)	subsidência			máxima
	largura do painel (m)			
	200	300	400	
250	1,88	2,18	2,25	2,25
300	1,65	2,08	2,18	2,18
350	1,38	1,90	2,13	2,13

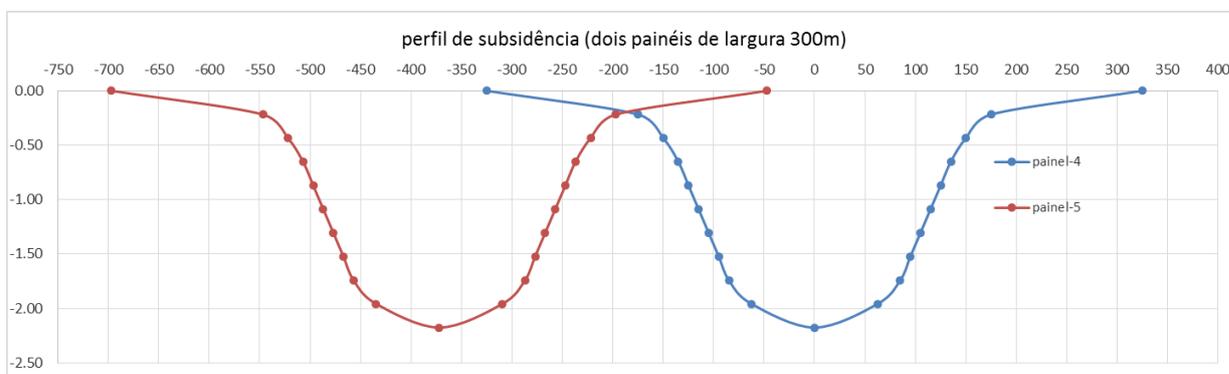
Fonte: Autoria própria

Cabe levantar também a real possibilidade de relação entre as subsidências geradas na relação de painéis próximos. Para o caso de interação das subsidências geradas por painéis

<sup>12 e 11</sup> National Coal Board (1975) **Subsidence Engineers Handbook**, 2nd (ver.) edn, National Coal Board Mining Dept, London. apud PENG, 1992.

próximos, deve-se primeiramente analisar o perfil de subsidência individual e posteriormente sobrepô-los como na figura 34.

Figura 34 - Subsidência gerada pela interação de dois painéis.



Fonte: Autoria própria

A figura 35 abaixo mostra o efeito da subsidência em uma região plana no estado de Illinois, EUA. Pode-se observar as depressões que representam o abatimento do teto sobre os painéis de *Longwall*.

Figura 35 - Efeito da subsidência em uma região plana.



Fonte: Cortesia prof. <sup>o</sup> André Zingano

### 3.2.4 Consequências Hidrológicas

Um dos maiores problemas associado à lavra por *Longwall*, consequência da subsidência provocada pelo teto abatido, são as possíveis alterações em lençóis freáticos e aquíferos (PENG, 2006), pois acredita-se que o fraturamento ao se propagar causaria fugas em possíveis aquíferos existentes, e até mesmo em lençóis freáticos (sempre superficiais). Fatos estes que geram grandes críticas ao método, porém deve-se ponderar que para termos real dimensões dos possíveis danos, estudos hidrológicos e hidrogeológicos detalhados devem ser realizados, e também de possíveis mitigações e alternativas durante a exploração.

A constar alternativas: rebaixamento de lençol freático, rebaixamento de aquífero e bombeamento total de aquífero.

Ao se estudar a interação da lavra subterrânea e hidrogeologia, vários cenários podem ser levantados, ao não termos um estudo hidrogeológico da área em estudo.

A citar algumas hipóteses:

- Inexistência de aquífero e lençol freático; nesta hipótese não haveriam danos ao sistema de águas subterrâneas.
- Existência de aquífero e lençol freático acima da área minerada; este cenário nos abre diversas possibilidades, dependendo do porte do aquífero. Se tratando de um aquífero de pequeno porte os possíveis danos ambientais seriam diminutos e o provável direcionamento de água para a frente de lavra não representaria um problema. Já na hipótese de um aquífero de grande porte dependendo das condições, o simples direcionamento de água para a frente de lavra poderia inviabilizá-la tecnicamente.
- Aquífero abaixo da lavra; não representaria problema técnico para a lavra porém, dependendo das condições, podem ocorrer problemas ambientais, relacionados a alterações na qualidade d'água, devido ao contato com zona lavrada e o aumento do fraturamento.

Cabe mais uma vez salientar que estas hipóteses estão atreladas a condicionantes geológicas. Um exemplo claro, seria a existência de um aquífero abaixo da zona lavrada, não sendo a área lavrada área de recarga do aquífero, ou a presença de aquíclode isolando o aquífero.

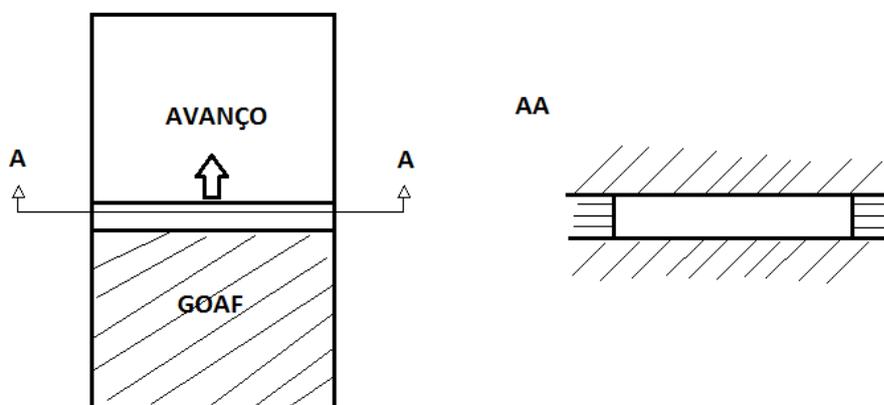
Outro ponto que deve ser lembrado é na hipótese de se necessitar realizar um rebaixamento de aquífero, e das implicações ambientais que esta ação pode acarretar, tal como subsidência devido à retirada de água em zonas antes com presença, algo corrente em zonas de carste (CABRAL *et al*, 2006).

Peng (2006), destaca que na maioria das minerações por *LW* após se cessar a atividade de extração os aquíferos tendem naturalmente a se estabilizarem e retornar as suas características pré mineração.

### 3.2.5 Tensões para frente *Longwall*

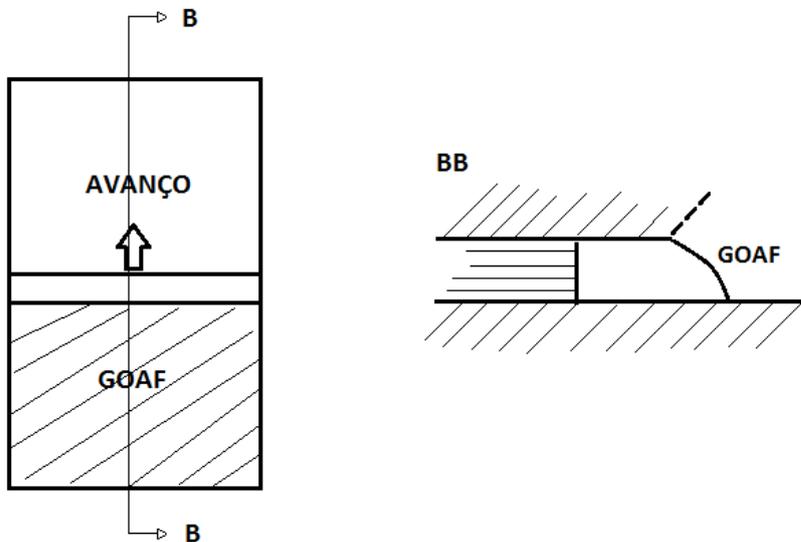
Estudar as tensões presentes em uma frente de lavra por *Longwall* não é algo tão implícito como para os pilares e frente de lavra, por exemplo, para o método C&P, visto a dinâmica de lavra que nos apresenta uma grande frente, a qual, nos apresenta “rocha sã” em um lado e material fragmentado do outro, por isso, pensar nas tensões envolvidas nos requer mudanças nas referências de análises, fazendo-se por exemplo a análise perpendicular à frente de lavra para mensurarmos tensão em teto e parede.

Figura 36 - Análise paralela ao avanço de lavra.



Fonte: Autoria própria

Figura 37 - Análise perpendicular ao avanço de lavra.



Fonte: Autoria própria

### 3.2.6 Tensões sobre *Shields*

Peng (2006), descreve o processo de cálculo de tensões na frente de *LW* em diferentes abordagens e fins.

Para a estimativa de tensões nos *Shields* Peng (2006), trabalha como sendo a tensão atuante neles a coluna de influência do *caving* (Figura 38). Igual metodologia é apresentada no SME 2011 (BESSINGER, 2012).



vantagens de se trabalhar com *shields* superdimensionados, o que viria a dar mais integridade à frente de lavra, devido às tensões suportadas e redistribuídas pelos próprios *shields*.

### 3.2.7 Tensões excessivas pela lavra

Citada em Brady & Brown (1995), Peng (2006), Bessinger (2011), as tensões excessivas nas frentes de *LW*, geradas pela retirada do carvão, merecem atenção devido ao fato de provocarem sobrecarga na frente de lavra e nos pilares das laterais no momento em que o carvão é retirado, em comparação ao método de C&P, porém também deve-se levar em consideração a acomodação de tensões com o avanço da lavra devido ao acomodamento sobre o *goaf*.

É importante levar em consideração este assunto sobre acúmulo de tensões, pois no momento em que ele ocorre os pilares das galerias laterais deixam de estar em um cenário de esforços regidos pela área tributária e passam a estar em estado de sobre pressão, sobretudo na face voltada ao painel de lavra.

Diversos autores abordam o tema, porém a dinâmica dos estudos é em geral empírica, com a exceção da abordagem por análise numérica, abordada por Peng (2006).

Porém cabe lembrar que este tipo de abordagem tem muitas variáveis a serem incorporadas ainda, e no presente momento ainda não são capazes de descrever com precisão o fenômeno estudado.

### 3.2.8 Dimensionamento de pilares para *Longwall*

Conforme o supracitado, deve-se levar em consideração no dimensionamento de pilares que estarão em influência do acréscimo de tensão gerado pela lavra estas tensões. Para tanto, a lógica nos diz que neste cenário não estamos mais sobre carregamento regido por áreas tributárias.

Peng (2006) cita duas populares opções para estas situações a utilização da metodologia ALPS, *analysis of Longwall pillar stability*, ou por modelagem numérica, sendo que a metodologia ALPS (MARK, 1990) baseia-se primeiramente no método Bieniawski para dimensionamento de pilares.

Para a resistência do pilar é considerada a metodologia de Bieniawski.

$$\sigma_p = \sigma_1(0,64 + 0,36 \frac{w}{h}) \quad (21)$$

Onde  $\sigma_1$  corresponde à resistência da camada e  $\sigma_p$  à resistência do pilar;  $w$  e  $h$  correspondem respectivamente à largura do pilar e à altura lavrada.

Porém, obviamente, a dinâmica de lavra não altera a resistência do pilar; o que o método ALPS apresenta é a estimativa de esforço a qual os pilares estariam sendo expostos, sendo que para isto considera inteiramente o sistema de pilares como sendo um único elemento.

Para estimar a capacidade de carga do sistema de pilares, Mark (1990) apresenta a seguinte metodologia:

$$B_p = \frac{\sigma_p w l_p}{l_p + w_e} \quad (22)$$

Onde o  $B_p$  é capacidade individual de um pilar,  $w$  a largura do pilar,  $l_p$  o comprimento do pilar e  $w_e$  a largura da galeria.

Capacidade de carga do sistema de pilares:

$$B = \sum_i^n B_{pi} \quad (23)$$

Carga sobre o *headgate*:

$$L_H = L_d + L_s F_h R \quad (24)$$

Carga sobre o *bleeder*:

$$L_B = L_d + L_s R \quad (25)$$

Carga sobre o *tailgate*:

$$L_r = L_d + (1 + F_t) L_s \quad (26)$$

Onde  $L_d$  é a carga sobre o sistema e  $L_s$  é a carga lateral dada em função da profundidade de do ângulo que o caving faz com a vertical.

$F_t$  e  $F_h$  são fatores, seus respectivos valores são 0,7 e 0,5. O  $L_d$  (carga de desenvolvimento) é dado considerando a teoria das áreas tributárias, considerando largura dos pilares e das galerias. Aplicada em linha transversal ao sistema

O valor de R segue a seguinte equação:

$$R = 1 - \left[ \frac{D - w_t}{D} \right]^3 \quad (27)$$

Onde o fator R é proporcional a  $w_t$ , largura do sistema de pilares, e D é encontrado pela equação:

$$D = 9,3\sqrt{H} \quad (28)$$

Onde H é a profundidade da camada minerada.

Por fim, o fator de segurança (FS) é a razão entre a capacidade de carga do sistema de pilares (B) e a carga sobre o sistema (L)

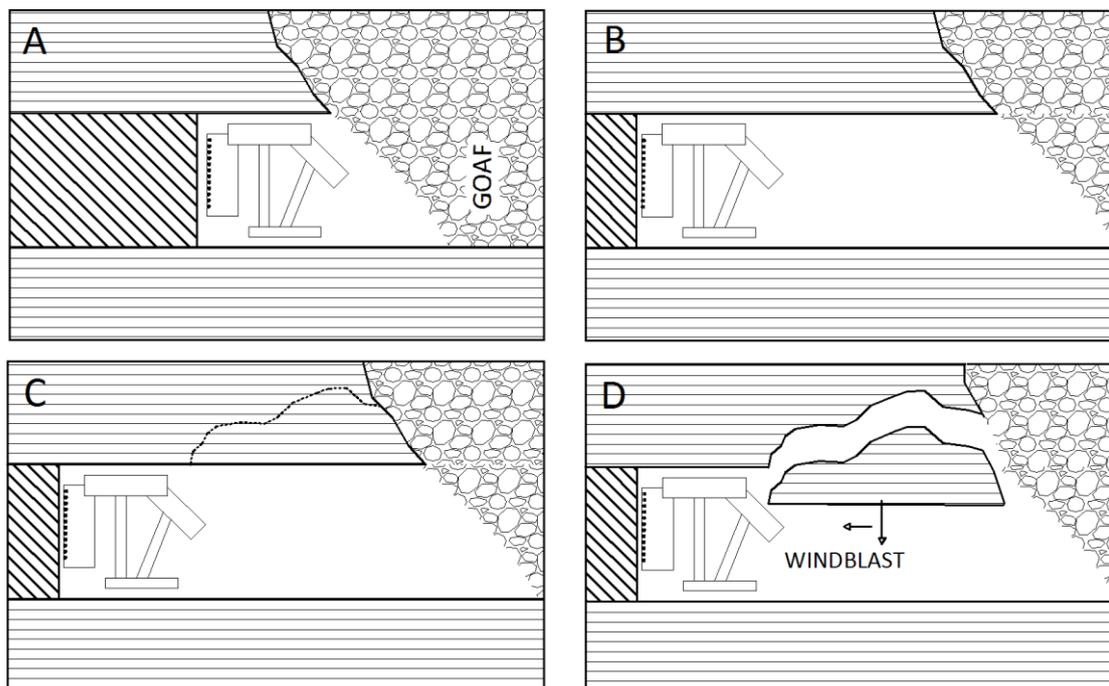
$$FS = \frac{B}{L} \quad (29)$$

### 3.2.9 Golpe de Ar (*windblast*)

Historicamente *windblast* na mineração subterrânea de carvão está associado à ruptura violenta de pilares (FOWLER; SHARMA, 2004)

Edwards (1998), descreve o monitoramento sísmico como forma de prevenir e antever a ocorrência de *windblast*, assim reduzindo o risco de perdas humanas.

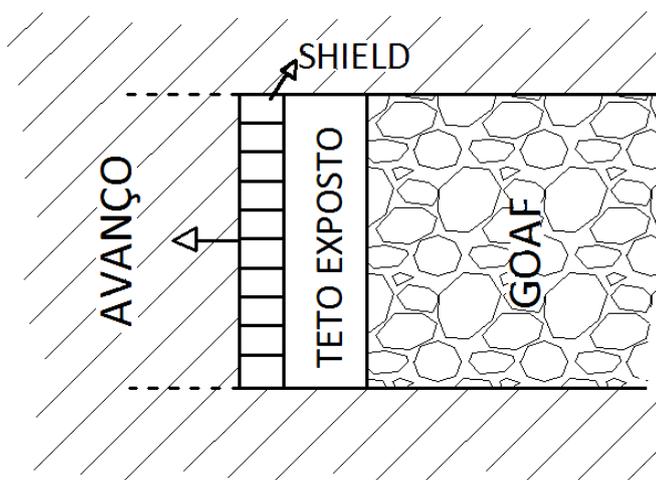
Na figura 39 está exemplificado o mecanismo de geração de *windblast* em mina de LW, onde A representa a situação normal, idealizada onde não há significativo teto exposto; em B o espaço entre o *goaf* e a frente de lavra começa a ser excessivo deixando grande fração do teto exposto. Em C e D mostra-se o colapso do teto imediato e ocorrência do *windblast*, em função do colapso do teto.

Figura 39 - Mecanismo de *windblast*.

Fonte: Autoria própria

Uma abordagem para estudar o colapso do teto imediato é pensarmos na fração de teto exposto como uma galeria, isto é válido devido à grande extensão da frente de lavra (mais de 150 metros) desta forma, de posse da classificação RMR do maciço podemos estimar tempo de auto-suporte.

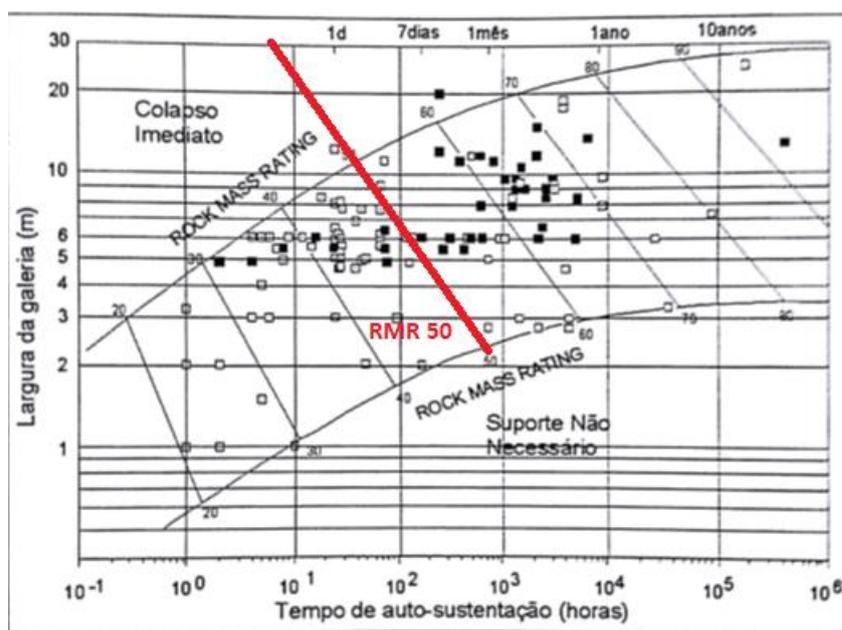
Figura 40 - Abordagem do teto exposto como galeria.



Fonte: Autoria própria

Para fins de exemplo consideremos RMR de 50 para o teto imediato, valor este coerente com as jazidas de carvão sul-brasileira (ZINGANO *et al.* 2014); com a fixação do RMR podemos avaliar vide o gráfico de Bieniawski (Figura 41), o espaçamento em que o colapso do teto é imediato (12 metros pelo gráfico).

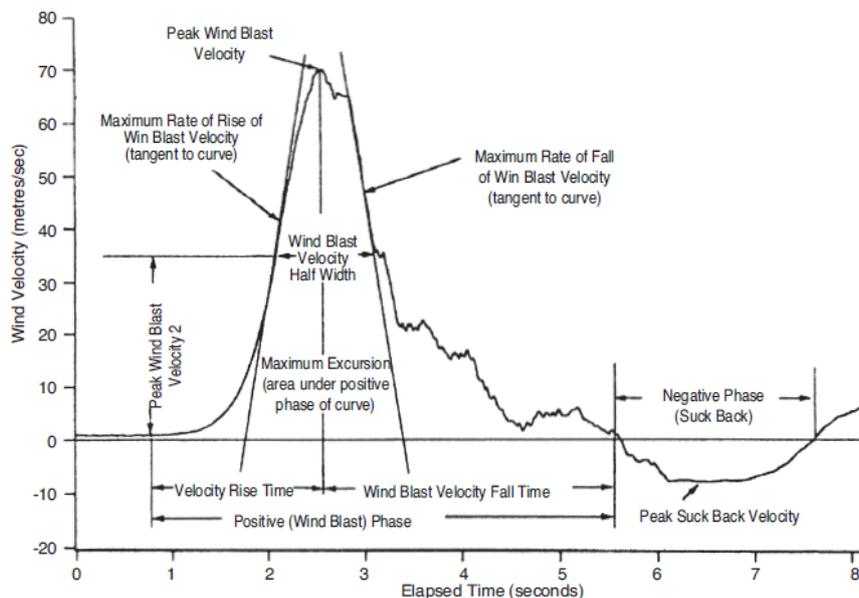
Figura 41 - Tempo de auto-suporte em função de RMR 50 e variação de tamanho de galeria.



Fonte: Adaptado de Bieniawski, 1989

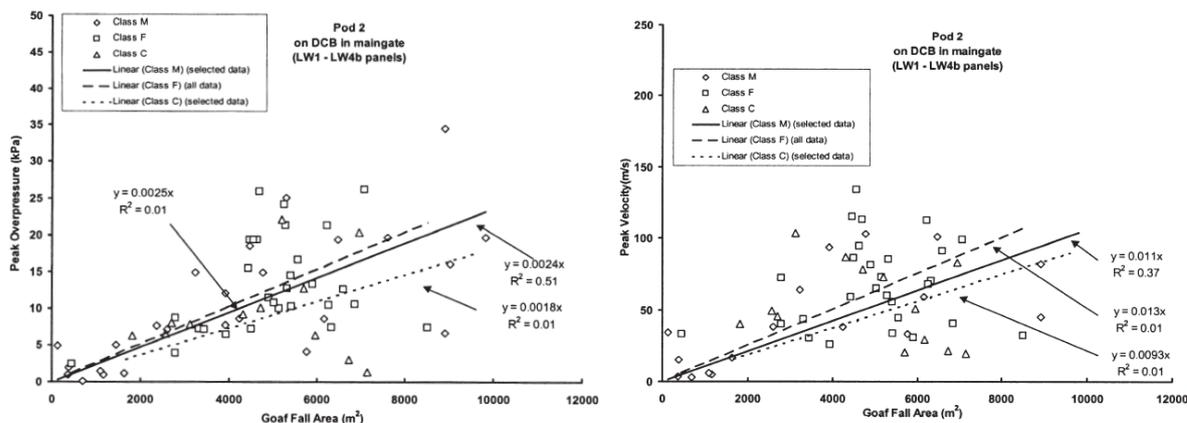
Fowler & Sharma (2004) estudaram a clara relação entre a área de falha do *goaf* e a potencialidade de danos de eventos de *windblast* em duas minas australianas de *LW* em carvão, *Newstan Colliery* e *Moonee Colliery*.

Figura 42 - Velocidade do vento no tempo em evento de *windblast*.



Fonte: Fowler & Sharma, 2004

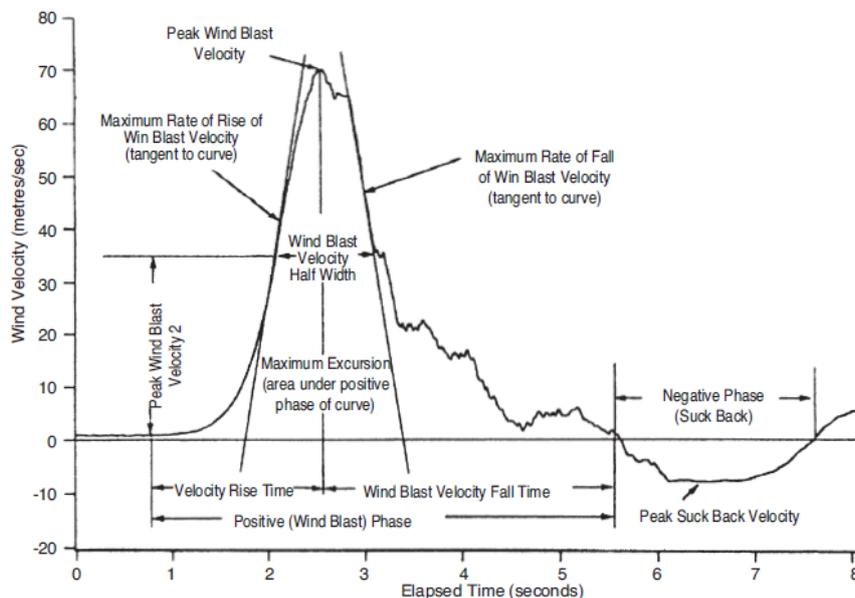
Figura 43 - Relação entre a área de falha do *goaf* com a pressão gerada e velocidade de vento.



Fonte: Fowler & Sharma, 2004

Estes mesmos autores desenvolveram estudos de dinâmica temporal de evento de *windblast*, ou seja, como o evento se comporta no tempo, apresentando um pico de velocidade a 2.5 segundos após o início do evento.

Figura 44 - Velocidade do vento no tempo em evento de *windblast*.



Fonte: Fowler & Sharma, 2004

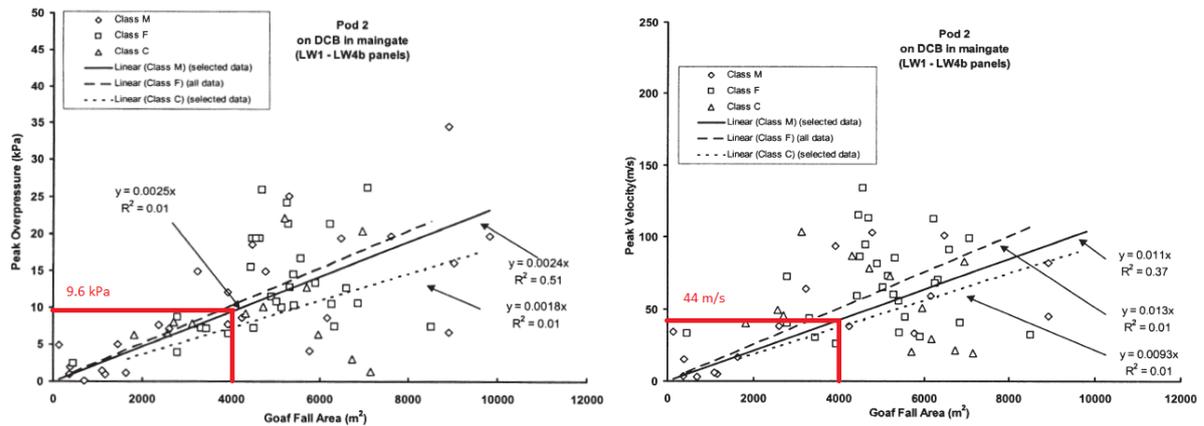
Considerando o estudo de Fowler & Sharma, um teto exposto de 10 metros (limite segundo Bieniawski, para RMR 50) e uma frente de 400 metros, largura média de frente de  $LW$ . Temos assim uma área exposta e de iminente ruptura de  $4000 \text{ m}^2$ , seguindo as equações interpoladas empiricamente de Fowler & Sharma para a chamada classe M (de maior correlação entre *goaf* e *windblast*) apresentadas abaixo.

$$\text{Pico de velocidade (m/s)} = 0,011 * \text{Área de Goaf colapsada(m}^2\text{)} \quad (30)$$

$$\text{Pico de pressão (kPa)} = 0,0024 * \text{Área de Goaf colapsada(m}^2\text{)} \quad (11)$$

Temos uma estimativa de um pico de velocidade de  $44 \text{ m/s}$  e pico de pressão de  $9,6 \text{ kPa}$ .

Figura 45 - Análise de *windblast* para colapso de *goaf* de 4000 m<sup>2</sup>.



Fonte: Adaptado de Fowler & Sharma, 2004

Seguindo esta lógica empregada, ao pensarmos em um teto mais competente (maior RMR) teríamos *a priori* um maior vão exposto, o que nos levaria a maiores impactos de *windblast*.

Wischusen (1999), Fowler & Sharma (2004) e Seccatore *et al.* (2012) citam e descrevem a necessidade de se induzir o *caving*, caso ele não ocorra naturalmente, isto para prevenir acidentes (ocorrência de *windblast*), ou atenuá-los.

Wischusen (1999) descreve a aplicação de fraturamento hidráulico, uso de fluido sobre pressão, e Seccatore *et al.* (2012) descrevem o uso de explosivos para a fragmentação, isto com o emprego de furos espaçados e de baixa carga. Para a realização de uma pré-fragmentação temos duas opções viáveis:

- Perfuração sob a camada, pela superfície; está viável quando a camada explorada não for muito profunda.
- Perfuração pelas laterais da camada, caso generalista.

### 3.2.10 Pilares Barreiras

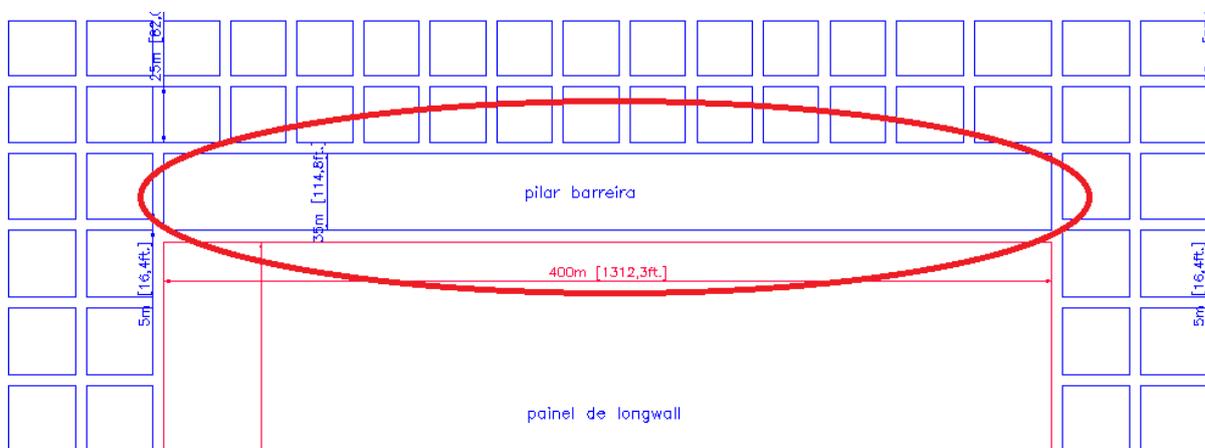
O pilar barreira na mineração por *Longwall* é importante para que as tensões de abatimento na face do *Longwall* não atinjam os pilares do eixo. A consequência dessa sobrepressão seria a ruptura dos pilares e fechamento da mina. Por isto, cabe posicioná-los entre o final do painel de *Longwall* e o eixo, assim separando as tensões do painel de estruturas de importância permanente (acessos e eixos).

Tradicionalmente, os pilares barreiras são projetados com base em práticas precedentes e fórmulas empíricas. (BRADY; BROWN, 1995)

O estado da Pensilvânia sugere uma metodologia para pilares barreira onde a largura do pilar deve ser de 10% da profundidade mais 45 ft (13m) (PENG, 2006). Esta metodologia foi desenvolvida e aplicada com sucesso nas minas de carvão do Reino Unido (PENG, 2008).

Peng (2008) apresenta outras fórmulas empíricas para o dimensionamento de pilares barreiras, porém destaca que a forma mais razoável para se dimensionar pilares barreiras é por modelamento numérico.

Figura 46 - Pilar barreira em painel de *Longwall*.



Fonte: Autoria própria

### 3.2.11 Modelos numéricos

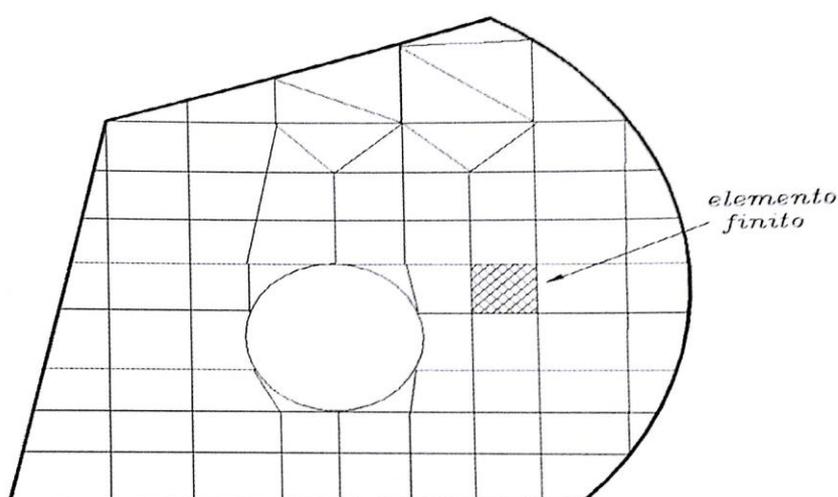
Vermeer *et al.* (2001), diz que a determinação de cargas atuantes em reforços (tirantes, arcos metálicos e etc.) e o próprio fator de segurança das escavações, pode ser realizada de forma satisfatória por meio de análises numéricas em duas dimensões. Porém, a determinação com razoável grau de acuracidade para o quesito deslocamentos necessita de modelos tridimensionais, com uso de malhas refinadas. O que necessita de grande esforço computacional.

Modelos numéricos por elementos finitos constituem-se basicamente na discretização de um modelo do problema em elementos finitos (Figura 47), vários autores apontam para a necessidade de cuidados na discretização de modelos pois quanto mais bem discretizados mais coerentes com a realidade serão os resultados. Neste ponto podemos apontar desvantagem na formatação de modelos numéricos para lavra de *Longwall*, isto devido as grandes dimensões

dos modelos a serem representados, frentes de mais de 300 metros, que ao serem pouco discretizadas (com elementos muito grandes) podem nos fornecer resultados não relevantes.

O método dos elementos finitos comumente utilizado é baseado no método de Rauleigh-Ritz e prevê a divisão do meio contínuo em um número finito de pequenas regiões (elementos finitos) tornando o meio contínuo em discreto. (ASSAN, 2003).

Figura 47 - Discretização por elementos finitos

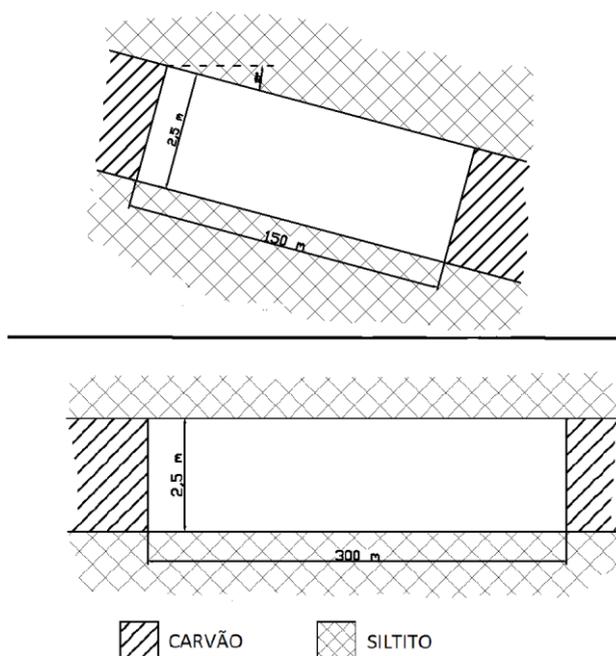


Fonte: Adaptado de Assan, 2003.

Para exemplificar as tensões na frente de *Longwall* e nos pilares em contato com o painel, foram montados modelos no *software* Phases 6, que utiliza de MEF. Cabe salientar que existem diversos *softwares* comerciais que utilizam de MEF e também outras formas de resolução, a constar: método das diferenças finitas, elementos de borda, método dos deslocamentos, entre outros. Foram montados dois casos para exemplificar a utilização de modelos numéricos, casos estes de difícil estudo analítico.

O primeiro modelo apresenta as distribuições de tensões verticais para painel com inclinação de  $15^\circ$ , com paredes lavradas perpendiculares ao teto e ao mantendo-as verticais. Os outros modelos representam a condição típica de uma frente de *LW*, sendo um modelo representando apenas galerias auxiliares e seus respectivos pilares, antes da lavra do painel, e por último o modelo com o painel lavrado.

Figura 48 - Modelos a serem estudados, painel inclinado e horizontal.



Fonte: Autoria própria

Para os modelos numéricos foram considerados como parâmetros valores padrões de parâmetros geomecânicos para sistema piso-camada-teto. Valores estes oriundos de histórico de análises realizadas no LPM-UFRGS. Como a intenção dos modelos é apenas exemplificar o uso deles para determinação de tensões, foram feitas simplificações nas propriedades e materiais, tal como considerar um mesmo material para teto e piso e sua homogeneidade, cenário este irreal, porém admissível para o caso ilustrativo.

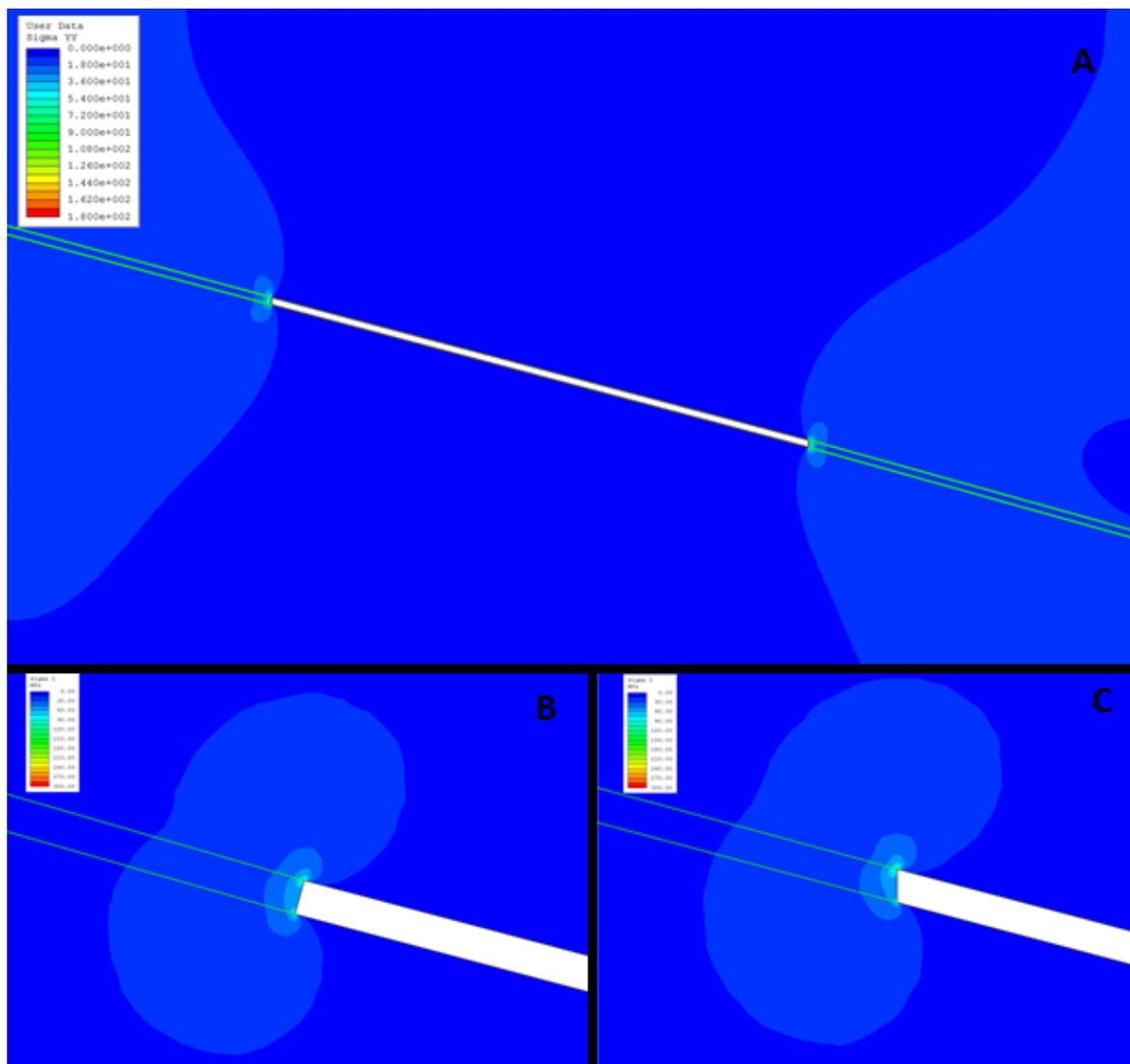
Foram utilizados dois materiais, camada de carvão, teto e piso de siltito. Os modelos consideraram o critério de Mohr-Coulomb<sup>13</sup>.

- Carvão:
  - Módulo de elasticidade: 600 Mpa
  - Coesão: 0,76 Mpa
  - $\Phi$ : 28,4°
- Siltito:
  - Módulo de elasticidade: 550 Mpa
  - Coesão: 0,8 Mpa
  - $\Phi$ : 28°

<sup>13</sup> Apresentado em Brady & Brown, 1995 e Peng 2008

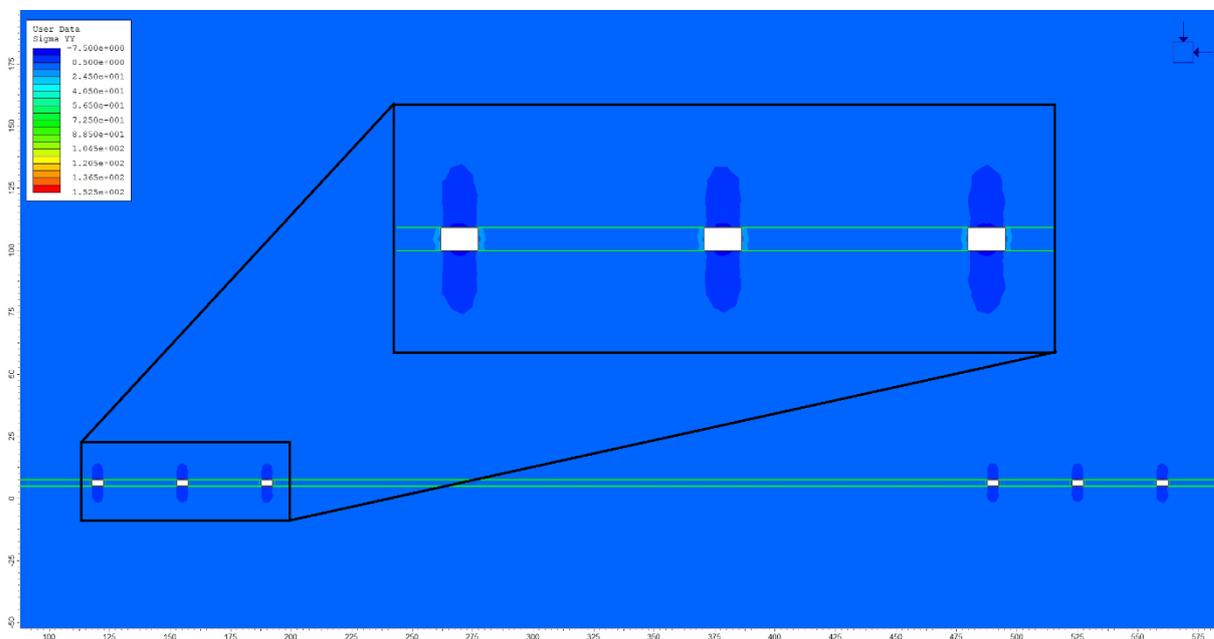
Modelo I:

Figura 49 - Seção atípica de *Longwall*, com camada com mergulho de 15° (A), detalhe com escavação perpendiculares ao piso e teto e (C) detalhe com escavação paralela ao eixo vertical.



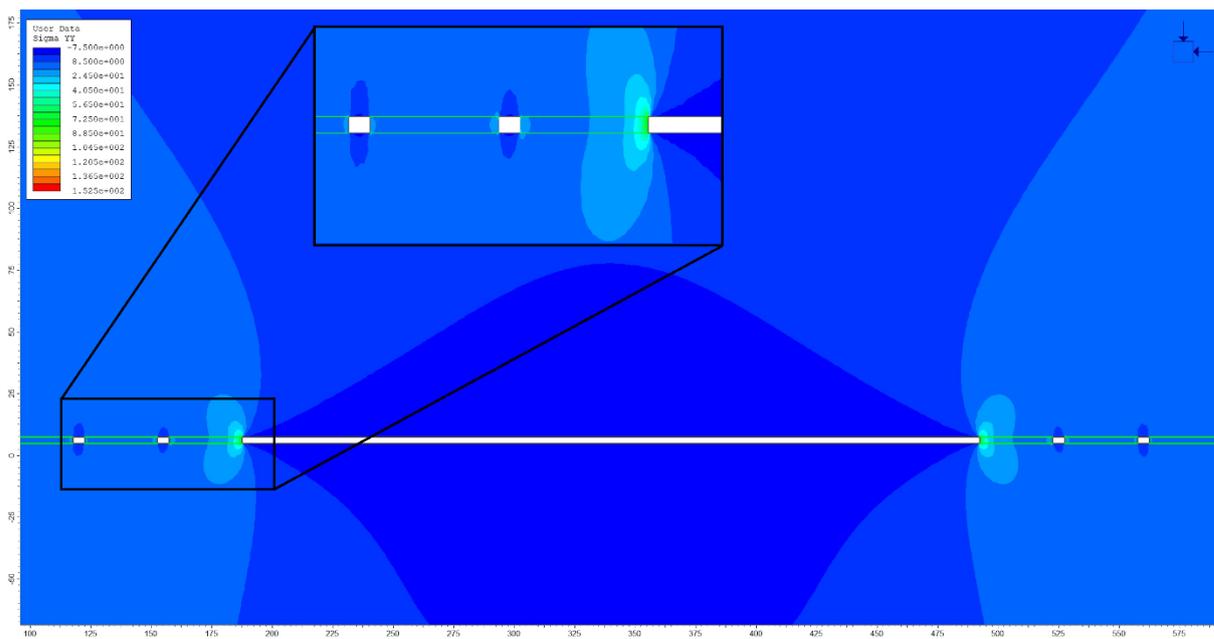
Fonte: Autoria própria

## Modelo II:

Figura 50 - Galerias auxiliares do painel de *Longwall*, antes de sua lavra, detalhe nas galerias e pilares.

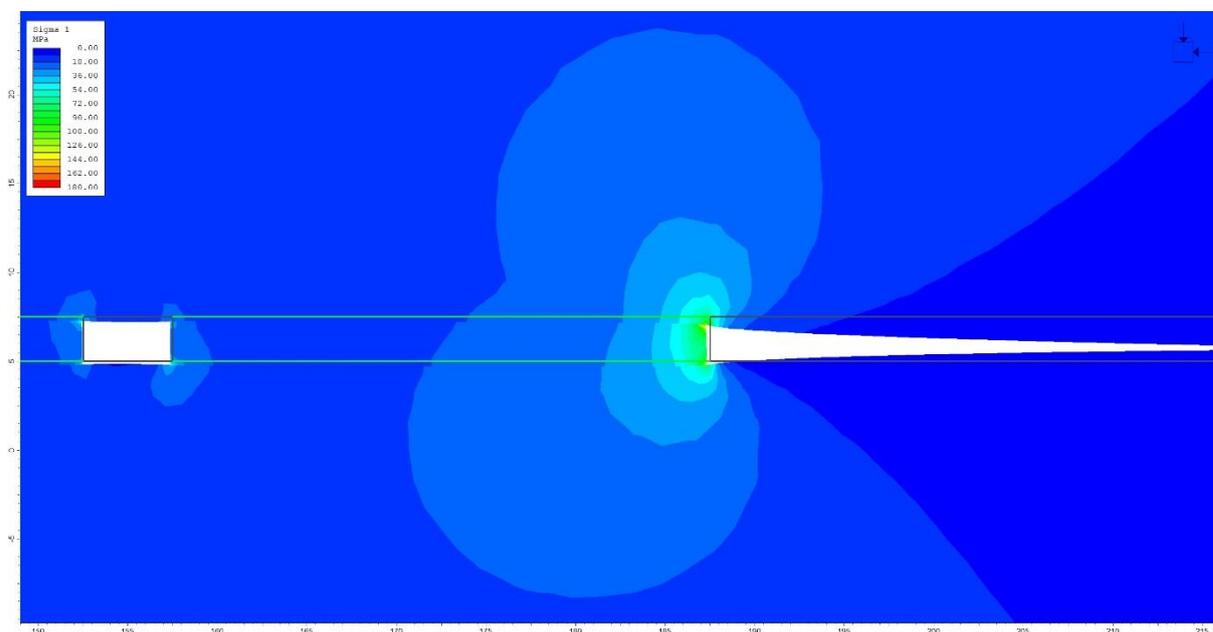
Fonte: Autoria própria

## Modelo III:

Figura 51 – Frente de *Longwall* e galerias auxiliares após a lavra do painel, detalhe da tensão acumulada nos pilares.

Fonte: Autoria própria

Figura 52 – Detalhe mostrando a deformação no modelo, convergência na frente de lavra e galeria auxiliar.



Fonte: Autoria própria

Os modelos I e II nos apresentam uma situação de difícil estudo, onde nota-se o acúmulo de tensão nas paredes devido à geometria escolhida. Ao analisar-se os modelos III e IV facilmente verifica-se o acúmulo de tensão sobre os pilares, devido à lavra do painel.

Quanto a representatividade de modelos numéricos, cabe destacar que ela está diretamente relacionada com os parâmetros de entrada dos *softwares*, ou seja, a coleta de dados e parâmetro deve ser alvo de grande atenção, pois a qualidade e representatividade dos modelos gerados é diretamente proporcional aos dados de entrada.

## 4. CAPÍTULO IV

Neste capítulo serão apresentados dois estudos de caso de mineração por *Longwall*, estes dois estudos conceituais são apresentados para exemplificar a aplicação do método. O primeiro estudo tem como condição de contorno um cenário típico para a aplicação do método, tanto para exigência de produção e principalmente para o cenário geomecânico. Já o segundo apresenta um cenário atípico, tanto em exigência de produção quanto no cenário geomecânico, neste estudo conceitual o método de *Longwall* é apresentado como uma opção de otimização de lavra em comparação ao método de Câmaras e Pilares com recuperação de pilares.

### 4.1 ESTUDO CONCEITUAL DE EXPLORAÇÃO MINERAL

Um estudo conceitual é a primeira fase da sequência que rege um projeto final de lavra. Ele objetivamente se baseia em uma pequena gama de dados e tem a função de orientar os próximos passos e decisões a serem tomadas.

Na sequência de estudos a serem realizados o estudo conceitual é o primeiro passo.

Sequência de estudos para um empreendimento mineiro:

- i. Estudo conceitual
- ii. Estudo de pré viabilidade
- iii. Estudo de viabilidade
- iv. Projeto de detalhe
- v. Projeto final de lavra

Sendo que a medida que se avançam nos estudos a quantidade de informações também avança, sendo necessário para cada um desses estudos uma quantidade de dados condizente com sua complexidade. Os estudos apresentados na sequência se encaixam no nicho de estudos conceituais, por serem feitos com base em poucas quantidades de dados, e baseada em revisão bibliográfica e conhecimento empírico.

## 4.2 ESTUDO I (APLICAÇÃO TRADICIONAL)

### 4.2.1 Contexto

Estudo conceitual técnico de implementação de lavra por *LW* tradicional em recuo em um depósito de carvão mineral, localizado no município de Triunfo/Rio Grande do Sul, Brasil; através de dados de acervo do LPM/UFRGS.

A jazida de Triunfo está localizada no município de Triunfo (Figura 53), cerca de 50km de Porto Alegre. A área de estudo para o desenvolvimento de uma mina subterrânea está vizinha ao pólo petroquímico a nordeste, o parque do delta do Jacuí e o Rio Jacuí ao sul e a mina de Charqueadas a oeste.

Figura 53 - Localização município de Triunfo no estado do Rio Grande do Sul.



Fonte: Wikipédia<sup>14</sup>

Esta região está amarrada a uma série de áreas de pesquisa e lavra, incluindo a mina de Charqueadas, dominando uma área aproximada de 39000 ha.

Com base nos dados disponíveis foi realizado um estudo visando a melhor alternativa de lavra e aproveitamento econômico da jazida de Triunfo, levando-se em consideração:

<sup>14</sup> Disponível em <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Triunfo\\_\(Rio\\_Grande\\_do\\_Sul\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/Triunfo_(Rio_Grande_do_Sul))> Acesso em Ago. 2015

mínimo impacto ambiental e social, rentabilidade do empreendimento, facilidade de operação, maior produtividade na lavra e recuperação da jazida.

Já é de longa data o conhecimento da existência da Jazida de Triunfo e o interesse de aproveitamento econômico, por se tratar de uma Jazida de grande volume de carvão com boa qualidade, mas de camadas mais profundas que as camadas exploradas atualmente no Brasil.

No passado, sua exploração foi preterida frente à exploração de jazidas mais superficiais no Rio Grande do Sul, as quais exploradas a céu aberto, com custos menores. Porém, com diminuição das reservas de carvão de fácil exploração a céu aberto e a perspectiva de aumento da demanda de carvão mineral, justificou a necessidade de estudar esta jazida novamente.

Nos anos 70 e 80 foi desenvolvida a mina de Charqueadas que está cerca de 3km a oeste da área em estudo. Na época, o principal problema na lavra de carvão era o controle maciço relativo a sustentação e estabilização do teto imediato e algum soerguimento de piso.

Em 2008 e 2009, uma empresa carbonífera realizou algumas sondagens com objetivo de desenvolver uma mineração de carvão, mas devido às condições geológicas (principalmente pela qualidade do teto imediato) e econômicas da empresa, o projeto foi encerrado.

A experiência de mineração do passado e os resultados dos projetos mais recentes ajudaram na decisão de estudar e fazer a avaliação para aplicação do método de *Longwall*.

#### **4.2.2 Geologia e Avaliação da Jazida**

A geologia da jazida de Triunfo não difere muito em relação as demais jazidas de carvão da região do baixo Jacuí. Formada basicamente por uma sequência de camadas de siltito e carvão, como mostra a figura 54.

Quanto a espessura de camada, está prevista para em torno de 2,5 a 3 metros de espessura para a camada I2B, a camada mais espessa e de melhor qualidade. Por este fator se considerou esta camada como alvo prioritário de extração, visto que a extração em múltiplas camadas em minas subterrâneas é atividade extremamente complexa, além de se ter obrigatoriamente a necessidade de se minerar primeiramente as camadas superiores que neste caso se trataria de minerar camadas de qualidade inferior, em espessura e teor de cinzas, o que não seria viável, isto, é claro, considerando a utilização do método de *Longwall*, o ideal para as características geomecânicas da jazida em questão. É de conhecimento que pelo método *C&P*, não haveria problema em se minerar múltiplas camadas de carvão simultaneamente, porém, as características geomecânicas da jazida praticamente inviabilizam a utilização deste método.

O teto imediato é composto por Siltito e Argilitos de média a baixa qualidade e baixa resistência, o que requer cuidado no desenvolvimento de galerias e suporte de teto rápido e eficiente, porém caracteriza cenário adequado para a utilização de um método *caving*, no qual o abatimento de teto é previsto e desejado. Nesse tipo de geologia, o abatimento do teto atrás da frente de *Longwall*, é esperado que seja quase imediato à passagem da frente. Esse processo torna-se interessante para aliviar as tensões na face da camada de carvão.

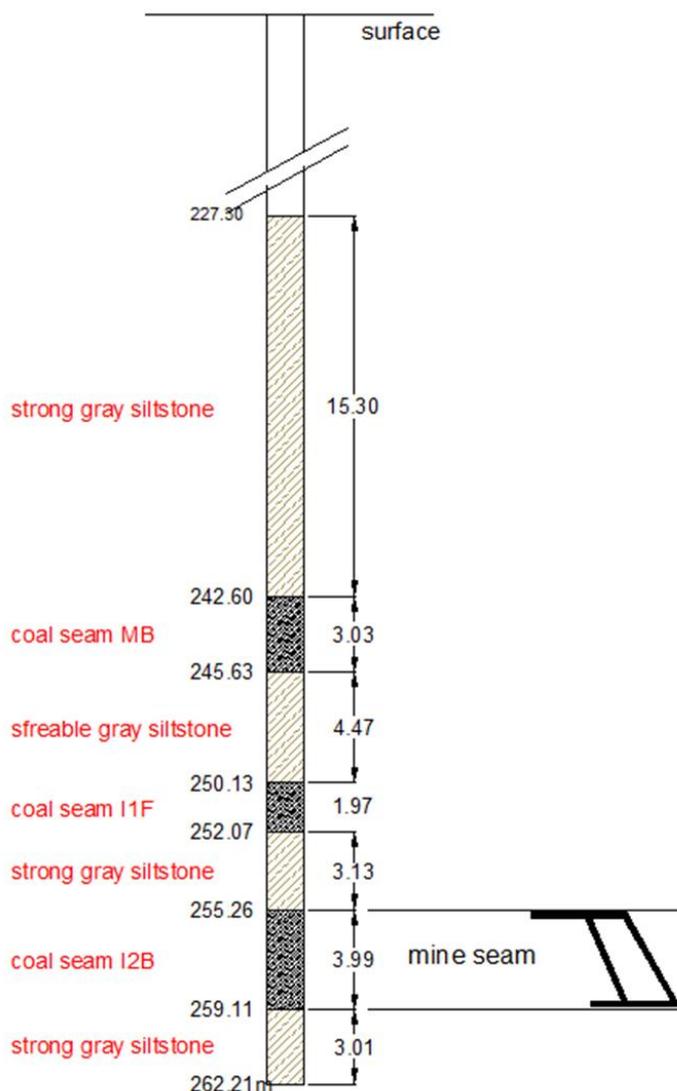
O piso é formado por siltito brando e fraco mecanicamente. Essa resistência baixa deve ser um desafio para o movimento da frente de *Longwall* e soerguimento de piso nas galerias. Esse tipo de problema foi experimentado na mina de Charqueadas e, também, na mina do Leão II.

A área possui três camadas de carvão principais (Figura 54). A camada MB superior com 2-3m de espessura e menos contínua; a camada I1F com 1,5-2,5m de espessura e a camada I2B com 2-4m de espessura, sendo a mais contínua de todas. A camada I2B é que tem melhor qualidade, com média de 45% de cinza in-situ. Por isso, todo esse projeto é montado sobre essa camada. As demais camadas contribuem com grande quantidade de carvão, mas com qualidade menor que a I2B. De qualquer forma, as camadas MB e I1F não devem ser descartadas para um plano maior de aproveitamento econômico.

As camadas de carvão podem ser consideradas como planas com mergulhos ou ondulações de baixo ângulo, menores que 5°.

Não há horizonte resistente dentro de uma faixa de 20m acima da camada I2B, como uma camada de arenito. Isto é um desafio para o suporte de teto nas galerias de desenvolvimento e acessos aos painéis de *Longwall*, mas é uma vantagem para o abatimento do teto nos painéis de *Longwall*.

Figura 54 - Perfil geológico típico para a área, baseado em um furo de sonda realizado em 2009.



Fonte: LPM/UFRGS

#### 4.2.3 Recursos e Reservas

A reserva de carvão dentro da área alvo é apresentada na tabela (4) abaixo. As três camadas de carvão totalizam 2,4 bilhões de toneladas, considerando as reservas medidas, indicadas e inferidas. Para a camada I2B a reserva medida é de 167 milhões de toneladas, contra 700 milhões de reserva indicada e inferida. Estes valores indicam a necessidade de maior investigação geológica para aumentar a reserva medida, ter melhor conhecimento geológico/estrutural e acerca do comportamento geomecânico da camada de carvão.

Tabela 4 - Recursos por camada.

<b>Camada</b>	<b>Medido</b> <i>(t in situ)</i>	<b>Indicado</b> <i>(t in situ)</i>	<b>Inferido</b> <i>(t in situ)</i>	<b>Total</b> <i>(t in situ)</i>
MB	72 477 577	207 394 669	358 739 058	638 611 304
I1F	204 100 802	268 619 643	368 723 460	841 443 905
I2B	167 372 005	336 521 767	399 982 687	903 876 459
<b>Total</b>	<b>443 950 384</b>	<b>812 536 079</b>	<b>1 127 445 205</b>	<b>2 383 931 668</b>

Fonte: LPM/UFRGS

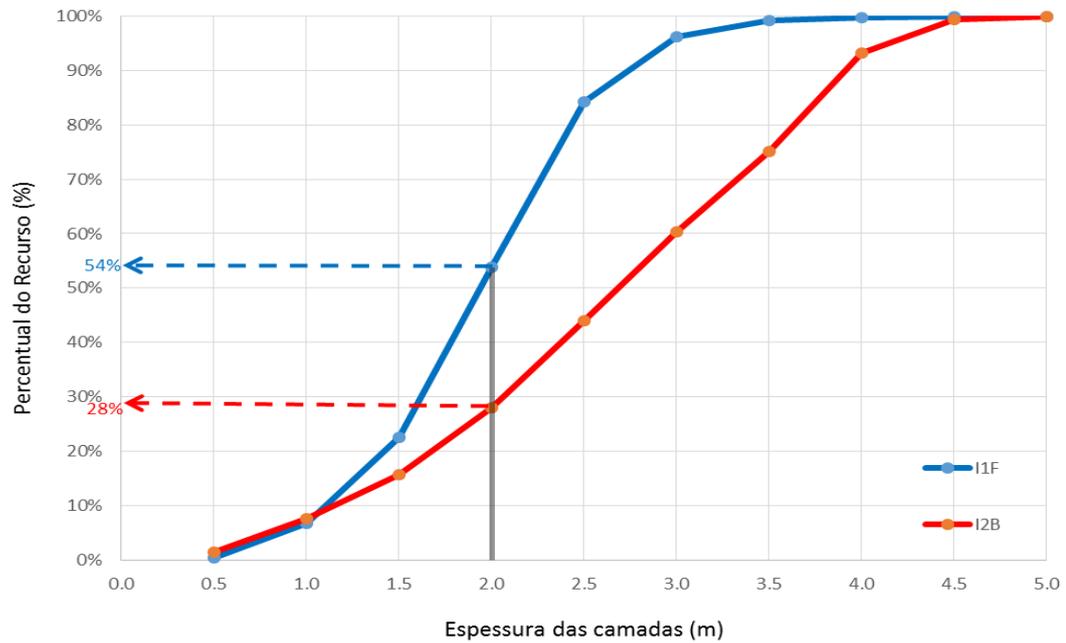
Outra informação importante é a espessura de rocha entre as camadas de carvão. Sabendo esse controle estrutural será possível fazer o planejamento e aproveitamento econômico das demais camadas (MB e I1F). Desta forma a jazida terá maior valor de retorno. A lavra de carvão em múltiplas camadas deve seguir planejamento e sequência de lavra de forma que não ocorra interferência da lavra de uma camada sobre a outra. Isso se dá por meio da lavra da camada superior primeiro e, depois, as camadas mais inferiores.

No caso da área de Triunfo, as camadas de carvão superiores possuem menor qualidade (maior teor de cinzas) e a espessura tem maior variabilidade e mais errática. Portanto, a decisão de lavra das camadas MB e I1F deve ser analisada em termos econômicos e de mercado. Principalmente, devido a variação alta aumenta a dificuldade do planejamento de lavra e definição do *layout* da mina e sequência de lavra.

Deve-se enfatizar que o nível de informações acerca da área é muito pequeno ainda, logo não se pode descartar nenhuma camada. O aproveitamento econômico da área de Triunfo requer maior detalhe na pesquisa para que a decisão do método de lavra e aproveitamento de todas as camadas tenham menor erro.

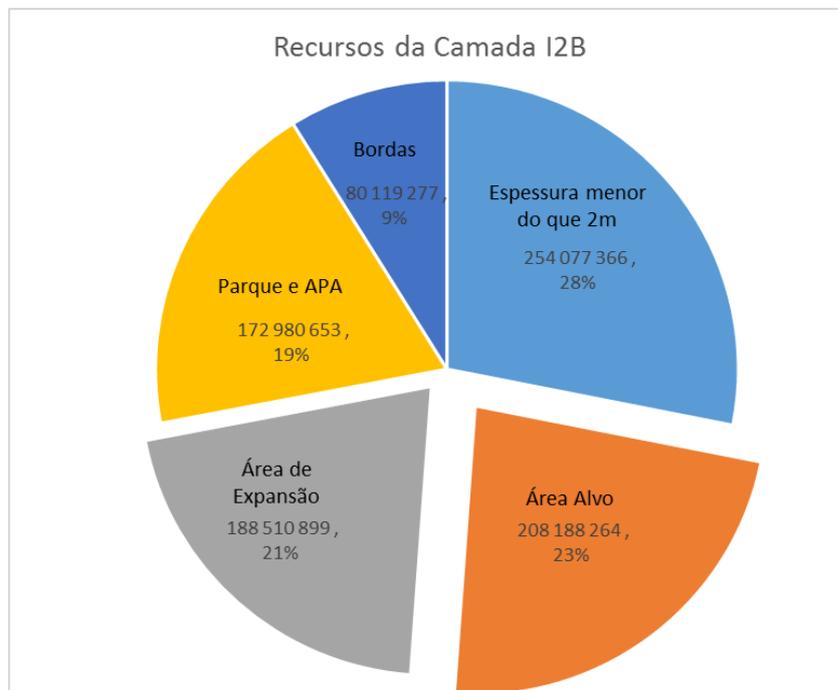
A figura 55 mostra uma relação entre a espessura da camada e reserva de carvão, mostrando a redução da reserva, a medida que aumenta-se a espessura mínima explotável. Para o caso deste estudo, a espessura mínima foi definida primariamente em 2m, a qual abrange a maior área da mina Triunfo. A figura 57 mostra a região em rosa que indica espessura maior que 2m. A linha vermelha mostra o limite da mina em estudo e ao sul a área de expansão.

Figura 55 - Relação entre espessura e reserva de carvão.



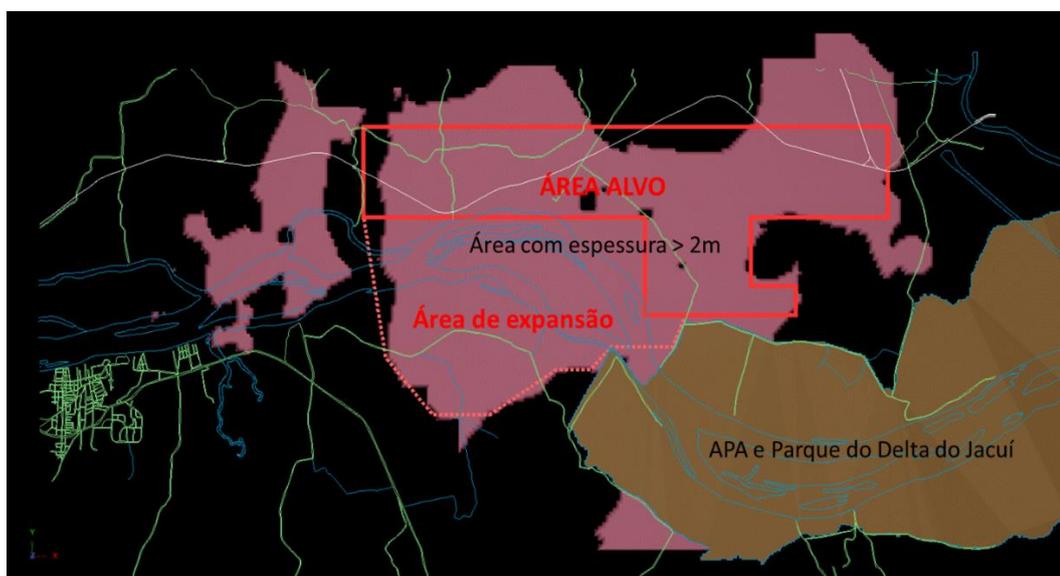
Fonte: LPM/UFRGS

Figura 56 - Recursos da Camada I2B.



Fonte: LPM/UFRGS

Figura 57 - Localização da área com espessura maior que 2m.



Fonte: LPM/UFRGS

#### 4.2.4 Caracterização geomecânica

O trabalho de caracterização geomecânica tem objetivo de definir e estimar as propriedades mecânicas de cada uma das camadas, principalmente para o sistema teto-pilar-piso.

Em 2009, uma empresa carbonífera do estado de Santa Catarina realizou alguns furos na área para coleta de amostras para análise de qualidade do carvão e caracterização geomecânica por meio de ensaios geomecânicos e classificação geomecânica realizados para as camadas de rocha que formam o maciço de cobertura e as que formam o sistema piso-pilar-teto para a jazida de Triunfo - RS.

A metodologia empregada para atingir os objetivos acima é a seguinte:

- Descrever os furos de sondagem para classificação do RQD, descontinuidades e espessuras das camadas;
- Preparação de corpos-de-prova para os ensaios geomecânicos. Esses corpos-de-prova serão preparados a partir dos testemunhos de furos de sondagem;
- Ensaios geomecânicos, resistência à compressão uniaxial e tensão/deformação;
- Classificação geomecânica das camadas por meio da classificação RMR (*Rock Mass Rating*);

A caracterização geomecânica foi baseada em dois furos de sondagem entregues pela empresa, juntamente com a descrição geológica. Os furos utilizados nesse trabalho foram os de sigla RD08 e RD10.

Como pode ser observado na descrição geológica dos dois furos de sondagem, as camadas são predominantemente formadas por siltito e as camadas de carvão, com algumas camadas de arenito. Os tetos imediatos das camadas de carvão (MB, I1F e I2F) são camadas de siltito cinza, maciço e com fraturas e *slickensides*.

A classificação geomecânica e os diversos ensaios que foram realizados seguindo as recomendações da ISRM - *International Society of Rock Mechanics* e da ASTM - *American Standard for Testing Methods*. Baseado na descrição geomecânica e nos ensaios de laboratório, foi determinada a classificação para cada camada. A classificação geomecânica utilizada neste trabalho foi a classificação RMR - *Rock Mass Rating* (BIENIAWSKI, 1989).

Os resultados dos ensaios e da classificação geomecânica foram adicionados ao perfil litológico tradicional, tornando-se fonte importante para o planejamento de lavra e informação básica para o projeto de suporte de teto e dimensionamento de pilares.

Este relatório parcial mostra os resultados e caracterização das camadas de carvão (MB, I1F e I2F) e das camadas encaixantes (teto e piso) dessas litologias. As camadas de cobertura, acima das camadas de carvão estão em processo de ensaio. Apenas a descrição foi completada.

A primeira etapa para a caracterização geomecânica é a descrição dos furos de sondagem em termos de parâmetros de qualidade geomecânica, com objetivo de determinar os parâmetros de quantidade e qualidade das descontinuidades das fraturas, que são:

- Espaçamento das descontinuidades
- RQD
- Rugosidade e preenchimento das descontinuidades

Este trabalho foi executado em todas as camadas para os dois furos de sondagem, desde a superfície até o final.

A tabela (5) mostra os valores médios para cada tipo de rocha dos resultados dos ensaios de compressão que foram realizados na época (2009). Pode-se observar que os resultados apresentados representam as resistências esperadas para cada tipo de rocha.

Média das resistências de cada camada para os furos RD08 e RD10:

Tabela 5 - Furo RD08 - Triunfo RS.

Litologia	Profundidade	Caixa	Resistência Compressão (MPa)	Módulo Young (GPa)
Siltito Cinza Consistente	227,30 - 242,60	54-58	19,87	3,26
<b>CARVÃO MB</b>	<b>242,60 - 245,63</b>	<b>58-59</b>	<b>20,41</b>	<b>1,93</b>
Siltito Cinza Pouco Friável	245,63 - 250,13	59-60	16,88	3,73
<b>CARVÃO I1F</b>	<b>250,13 - 252,07</b>	<b>60-61</b>	<b>10,86</b>	-
Siltito Cinza Consistente	252,07 - 255,26	61	18,28	2,07
<b>CARVÃO I2B</b>	<b>255,26 - 259,19</b>	<b>61-62</b>	<b>16,71</b>	<b>1,99</b>
Siltito Cinza Consistente	259,19 - 262,21	62-63	19,51	1,93

Fonte: LPM/UFRGS

Tabela 6 - Furo RD10 - Triunfo RS.

Litologia	Profundidade	Caixa	Resistência Compressão (MPa)	Módulo de Young (GPa)
Siltito Cinza Friável	204,06 - 219,92	52-56	7,43	1,24
<b>CARVÃO MB</b>	<b>219,92 - 222,98</b>	<b>56-57</b>	<b>17,31</b>	<b>1,72</b>
Siltito Cinza Pouco Friável	222,98 - 228,91	57-59	4,94	1,16
<b>CARVÃO I1F</b>	<b>228,91 - 231,05</b>	<b>59</b>	<b>26,16</b>	<b>1,56</b>
Siltito Cinza pouco Friável	231,05 - 235,03	59-60	9,46	1,42
<b>CARVÃO I2B</b>	<b>235,03 - 239,64</b>	<b>60-62</b>	<b>15,90</b>	<b>1,52</b>
Siltito Cinza Consistente	239,64 - 243,29	62	18,87	2,97
<b>CARVÃO</b>	<b>243,29 - 243,69</b>	<b>63</b>	<b>17,49</b>	<b>1,25</b>
Siltito Cinza Consistente	243,69 - 245,59	63	12,10	2,61
<b>CARVÃO</b>	<b>245,59 - 246,02</b>	<b>63</b>	<b>15,06</b>	<b>0,56</b>

Fonte: LPM/UFRGS

A caracterização geomecânica do depósito pôde ser aferida a partir de dados de explorações anteriores, especificamente dois furos de sondagem devidamente caracterizados e ensaiados pelo LPM/UFRGS.

Quanto à classificação RMR para as camadas de carvão e suas encaixantes (sistema piso-pilar-teto), estas são apresentadas nas tabelas (7 e 8) onde os índices de classificação foram retirados da descrição da sondagem e de ensaios de compressão uniaxial.

Para a classificação RMR, não foi considerado o parâmetro água. Portanto, o índice que considera a presença de água na classificação geomecânica foi considerado como camada seca (índice 15).

Classificação RMR para as camadas do sistema piso-pilar-teto:

Tabela 7 - RMR Furo RD08

Litologia	Profundidade	Caixa	Parâmetro				RMR	Classificação
			Resistência Compressão	RDQ	Espaçamento	Rugosidade		
Siltito	227.30 - 242.60	54-58	2	8	5	20	50	Fraco
Carvão MB	242.60 - 245.63	58-59	1	3	5	20	44	Fraco
Siltito	245.63 - 250.13	59-60	2	8	5	20	50	Fraco
Carvão I1F	250.13 - 252.07	60-61	2	8	5	20	50	Fraco
Siltito	252.07 - 255.26	61	2	8	5	20	50	Fraco
Carvão I2B	255.26 - 259.19	61-62	2	13	8	20	58	Fraco
Siltito	259.19 - 262.21	62-63	2	13	8	20	58	Fraco

Fonte: LPM/UFRGS

Tabela 8 - RMR Furo RD10

Litologia	Profundidade	Caixa	Parâmetro				RMR	Classificação
			Resistência Compressão	RDQ	Espaçamento	Rugosidade		
Siltito Cinza Friável	204.06 - 219.92	52-56	2	3	8	20	48	Fraco
Carvão MB	219.92 - 222.98	56-57	2	8	8	20	53	Fraco
Siltito Cinza Pouco Friável	222.98 - 228.91	57-59	1	3	8	20	47	Fraco
CARVÃO I1F	228.91 - 231.05	59	4	13	8	20	60	Fraco
Siltito Cinza pouco Friável	231.05 - 235.03	59-60	2	8	8	20	53	Fraco
CARVÃO I2B	235.03 - 239.64	60-62	2	13	8	20	58	Fraco
Siltito Cinza Consistente	239.64 - 243.29	62	2	17	8	20	62	Bom
CARVÃO	243.29 - 243.69	63	2	17	8	20	62	Bom
Siltito Cinza Consistente	243.69 - 245.59	63	2	17	8	20	62	Bom
CARVÃO	245.59 - 246.02	63	2	13	8	20	58	Fraco

Fonte: LPM/UFRGS

Pode-se observar que as camadas para os dois furos possuem classe IV, maciço rochoso fraco, estimulados principalmente pela baixa resistência à compressão e quantidade de descontinuidades.

Também se pode notar que existe uma boa correlação entre os resultados entre os dois furos para a classificação geomecânica.

Para definir a resistência das camadas foi utilizada a classificação geomecânica RMR e o critério de ruptura de Hoek & Brown<sup>15</sup>, a qual reduz o módulo de elasticidade em função da qualidade do desmonte e da intensidade das tensões nas paredes da escavação. As tabelas abaixo mostram os resultados finais para as propriedades mecânicas de cada camada.

Tabela 9 - Parâmetros geomecânicos RD08.

Rocha	Em (MPa)	$\sigma_{cm}$ (MPa)	c (MPa)	$\phi$ (graus)
Siltito cinza	242,7	2,5	0,78	25,5
Carvão MB	256,4	2,3	0,75	24,4
Siltito cinza	259,5	2,2	0,69	26,1
Carvão I1F	259,4	1,4	0,44	26,1
Siltito cinza	519,8	2,9	0,86	28,4
Carvão I2B	728,5	2,6	0,78	28,4
Siltito cinza	706,5	3,0	0,92	28,4

Fonte: LPM/UFRGS

Tabela 10 - Parâmetros geomecânicos RD10.

Rocha	Em (MPa)	$\sigma_{cm}$ (MPa)	c (MPa)	$\phi$ (graus)
Siltito cinza	242,7	0,9	0,29	25,5
Carvão MB	528,3	2,5	0,77	27,5
Siltito cinza	212,2	0,6	0,19	25,3
Carvão I1F	636,9	4,3	1,27	28,9
Siltito cinza	385,4	1,3	0,41	26,9
Carvão I2B	556,4	2,5	0,75	28,4
Siltito cinza	1443,1	3,2	0,95	29,5
Carvão	565,3	3,0	0,88	29,5
Siltito cinza	1180,3	2,1	0,61	29,5
Carvão	205,0	2,3	0,71	28,4

Fonte: LPM/UFRGS

<sup>15</sup> Apresentado em Brady & Brown, 1995 e Peng, 2008 ou em diversos outros.

Como se pode observar, as camadas apresentam resistências muito baixas, como era de se esperar para os tipos de rochas que foram descritas.

O planejamento de lavra e projeto de sustentação do teto e dimensões dos pilares podem ser realizadas para cada região da mina com características geomecânicas distintas, garantindo maior aproveitamento da jazida e maior confiabilidade das estruturas de contenção.

Esse tipo de condição geológica e geomecânica favorece aos métodos de lavra que contemplam abatimento de teto e produção de carvão nos painéis de lavra em recuo (*retreat mining*), como *Longwall* ou C&P com recuperação parcial ou total dos pilares.

A sustentação de galerias por meio de parafuso de teto deve ser estudada com muito critério, pois não existe camada resistente para ancoragem do parafuso e as rochas são sensíveis a umidade. Para que a viga seja montada na região ancorada deve-se priorizar a quantidade de pró-tensão, comprimento do parafuso e utilização de tela ou tira metálica para manter a viga.

Portanto, os equipamentos que serão utilizados para sustentação de teto devem considerar o uso de ar, e os de escavação o mínimo de água.

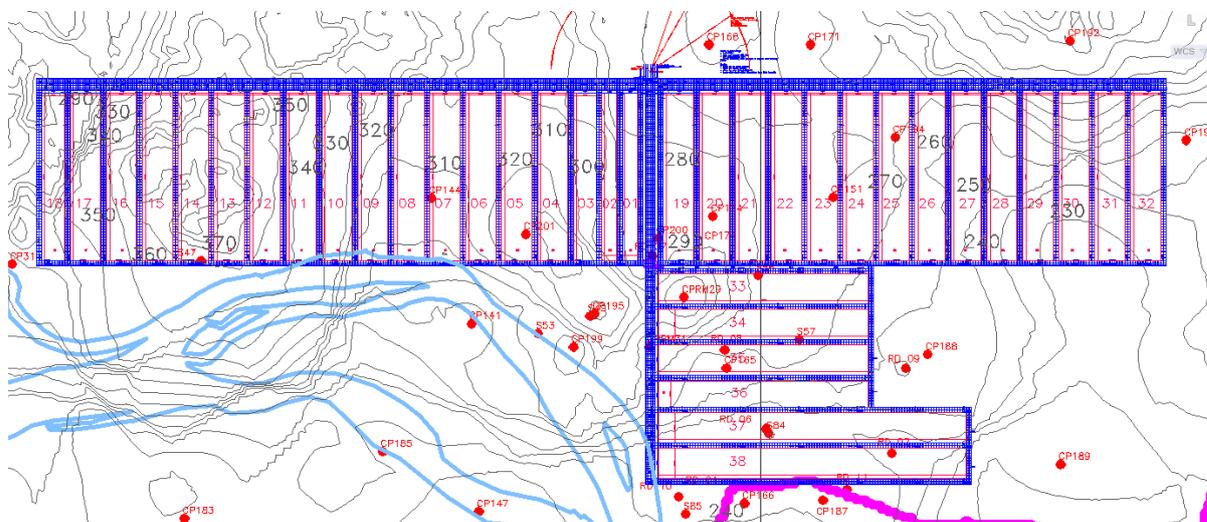
Para esta fase de projeto conceitual, a quantidade de sondagens disponível é suficiente para delimitação da variação de espessura e estimativa do comportamento das camadas de carvão e do teto e piso. Entretanto, faz-se necessária a investigação de detalhe para melhorar a qualidade de informação da área e redução das incertezas em termos de comportamento geomecânico.

#### **4.2.5 Layout de Mina**

O *Layout* de Mina foi desenvolvido tendo como base a área bloqueada por uma empresa carbonífera, como sendo a mais favorável ao empreendimento por estar dentro das reservas da empresa e fora de áreas de preservação, não estar sob o Rio Jacuí e estar na zona onde a camada de carvão I2B apresenta espessura superior a 2 metros, o que facilita a produção pelo método de *Longwall* permitindo uma espessura de corte de cerca de 2,5 metros a superior (figura 58). A área bloqueada é de 47.289.736,5m<sup>2</sup> (4.728,9ha) com recurso de 236.448.683,0 ton.

Foi considerado para o projeto a espessura de corte de 2.5m, porém é de conhecimento que a reserva possui zonas de espessura superior a este patamar, o que não deve acarretar grandes problemas visto que o *shearer* possui espessura de corte variável, podendo assim vir a aumentar conforme a espessura média da camada de carvão no painel minerado. Em especial neste caso o *shearer* deve cortar entre 2-3m.

Figura 58 - Layout geral da mina Triunfo mostrando a disposição dos painéis de lavra.



Fonte: Autoria própria

A mina Triunfo foi pensada de forma em se obter a maior área possível para os painéis de *Longwall* e com maior comprimento desses painéis. Foram planejados 38 painéis de *Longwall* que estão separados em três setores:

- (i) setor oeste que compreende os painéis de 1 a 18;
- (ii) setor leste que compreende os painéis de 19 a 32;
- (iii) setor sul que compreende os painéis de 33 a 38.

O comprimento dos painéis dos setores leste e oeste é de 2225m e no setor sul os painéis serão de 2777 e 4069m. A área total dos painéis de lavra é de 35.065.900,00 m<sup>2</sup> fazendo uma reserva de 175.329.500,00 toneladas, assumindo a espessura média de 2,5 m e densidade de 2 ton/m<sup>3</sup>. A tabela 11 mostra as reservas por largura de painel contando com espessura de 2,5m da camada.

A largura dos painéis foi inicialmente estabelecida em 300m, com os painéis 1 e 2 de 200m. Se optou por utilizar um tamanho reduzido nos três primeiros painéis, devido à necessidade de adaptação operacional ao método de lavra e o controle do maciço. Entretanto, a contribuição de carvão oriundo do desenvolvimento na produção total estava muito alta. O custo do desenvolvimento por tonelada de carvão é maior que na lavra do painel de *Longwall*. Portanto, foi decidido por aumentar a largura dos painéis para 400m, sendo os painéis 1 e 2 permanecendo em 200m para treinamento e aprendizado, e o painel 3 com 300m. Isso também reflete no fluxo de caixa de investimento, já que assim se pode adquirir os equipamentos de contenção da frente (*shields*) dentro do prazo de três anos. Atualmente, as larguras dos painéis de lavra de *Longwall* nos Estados Unidos está em torno de 1300-1400pés (396-427m).

Foi determinada a largura de galeria para 5m, esta visando atender os requisitos de segurança das galerias de desenvolvimento e operacionalidade de equipamentos dentro delas. Devido à baixa qualidade do teto imediato, não se pode fazer galerias mais largas para que a operação de suporte de teto tenha habilidade e tempo necessário para suportar um corte (ou avanço). Outra condição de contorno foi o tamanho dos equipamentos da frente de *Longwall*, como geradores, motores, alimentadores e equipamentos de transporte de carvão.

A altura das galerias e do corte do *shearer* na frente de *Longwall* ficou estipulada em 2,5m.

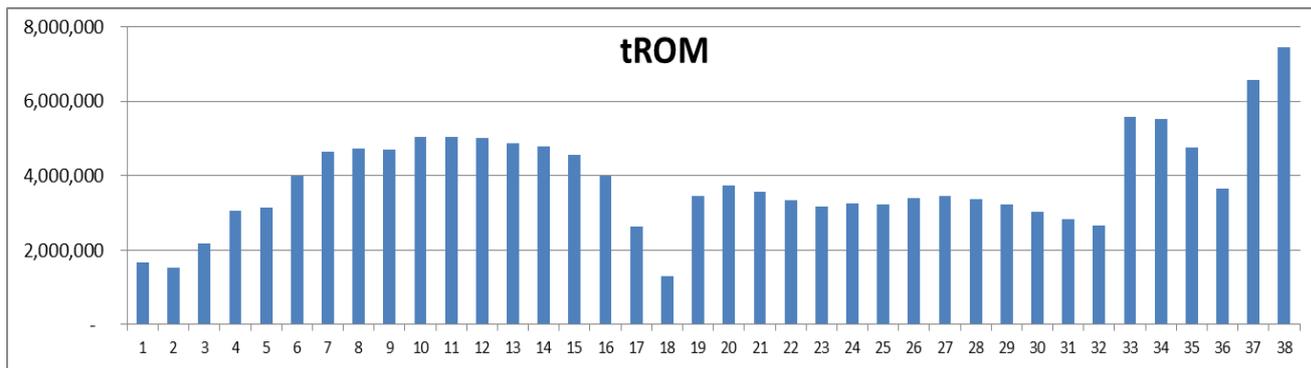
Tabela 11 - Estimativa de reserva de carvão para os painéis de lavra.

Espessura média (I2B)		2.5		m		
Painel		Número de painéis	Um Painel		Total Painéis	
Largura	Comprimento		Volume	Toneladas	Volume	Toneladas
200	2225	2	1.112.500,00	2.225.000,00	2.225.000,00	4.450.000,00
300	2225	1	1.668.750,00	3.337.500,00	1.668.750,00	3.337.500,00
400	2225	29	2.225.000,00	4.450.000,00	64.525.000,00	129.050.000,00
400	2777	4	2.777.000,00	5.554.000,00	11.108.000,00	22.216.000,00
400	4069	2	4.069.000,00	8.138.000,00	8.138.000,00	16.276.000,00
Somatório		38			87.664.750,00	175.329.500,00

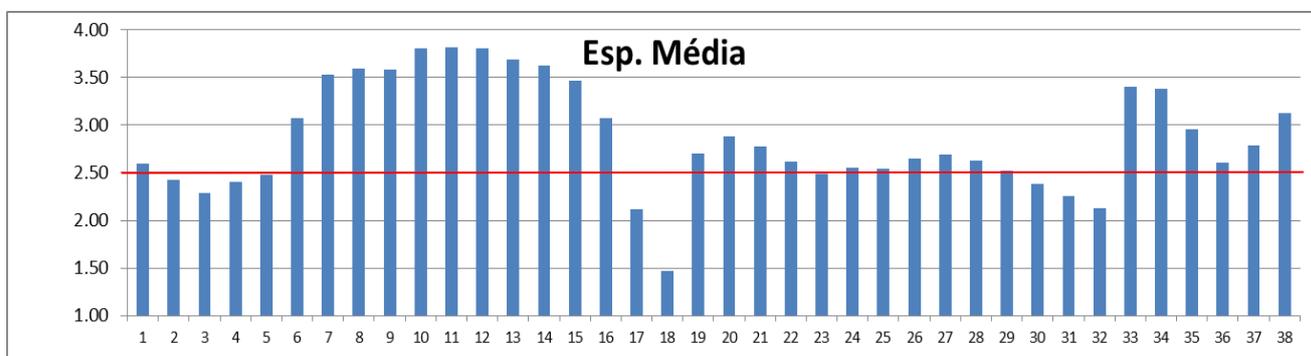
As galerias dos eixos e acessos aos painéis irão contribuir com 15 Mton de ROM. Somando com a reserva dos painéis, a reserva total lavrável (descontando pilares) é de 190 milhões de toneladas. Portanto, uma recuperação de 80,5% do recurso bloqueado para a mina Triunfo.

Os gráficos abaixo ( figura 59) mostram a reserva em Mton para cada painel de lavra em função da espessura média de cada painel. Pode-se observar a variação da reserva em função da espessura de cada painel onde o valor médio de 2,5m pode ser considerado para efeitos de cálculo de reserva e recurso para a mina como um todo.

Figura 59 - Reserva em Mton e espessura média de cada painel de lavra.



Fonte: LPM/UFRGS

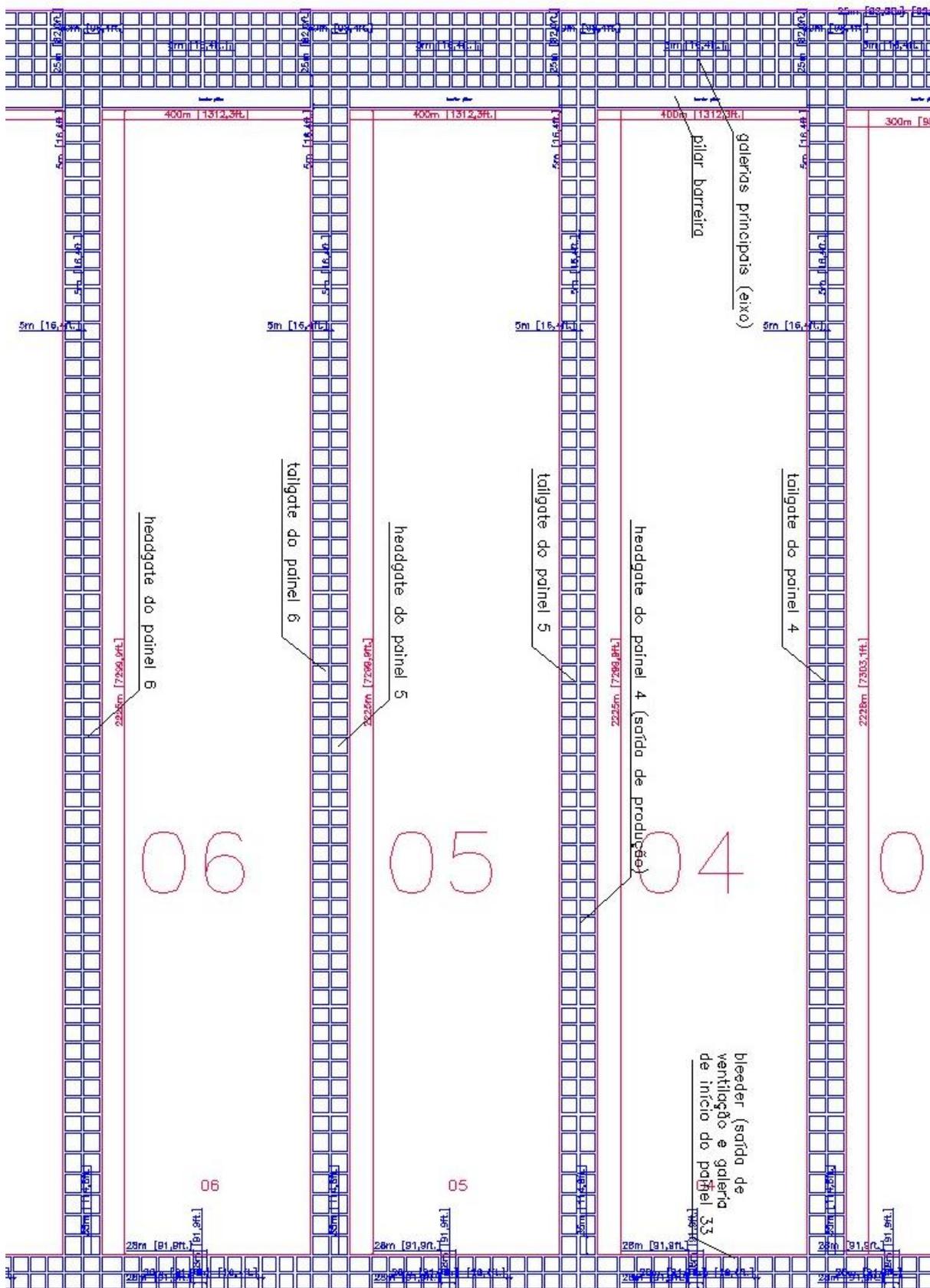


Fonte: LPM/UFRGS

A figura 60 abaixo mostra um painel de *Longwall* de suas galerias de acesso.

A mina Triunfo terá dois eixos (galerias principais), um no sentido Leste-Oeste e outro Norte-Sul, com 6 galerias com largura de 5m que tem objetivo de transporte de carvão, entrada de suprimentos e pessoal e ventilação (entrada de ar limpo). Em uma das galerias será instalada a correia transportadora que transportará o carvão para fora da mina até a planta de beneficiamento. Provavelmente, essa correia seja instalada na terceira galeria a partir do painel de lavra. A galeria de transporte será a primeira e segunda galerias a partir do painel de lavra. O transporte de pessoal e suprimento será sobre trilhos.

Figura 60 - Layout detalhado dos painéis de lavra.



Fonte: Autoria própria

A figura 61 mostra um detalhe do eixo e das galerias de acesso ao painel de lavra. O sistema de acesso aos painéis de lavra será com três galerias por razões de segurança e ventilação. Esse sistema é o mesmo utilizado nos Estados Unidos exatamente pelas mesmas razões.

As galerias têm largura de 5m e pilares quadrados de 30m de lado. O pilar barreira será de 35 metros. Alguns pilares possuem dimensões diferentes para adaptar a geometria dos painéis e pilares dos acessos aos painéis de *Longwall*. Deve-se salientar que esta geometria preliminar pode ser alterada para adaptação de equipamentos, transporte e ventilação, mas não vai alterar a concepção geral da mina.

Figura 61 - Detalhe do *layout* do acesso ao painel de *Longwall*.



Fonte: Autoria própria

O acesso ao subsolo será feito por meio de plano inclinado e poço (Figura 62 e 63).

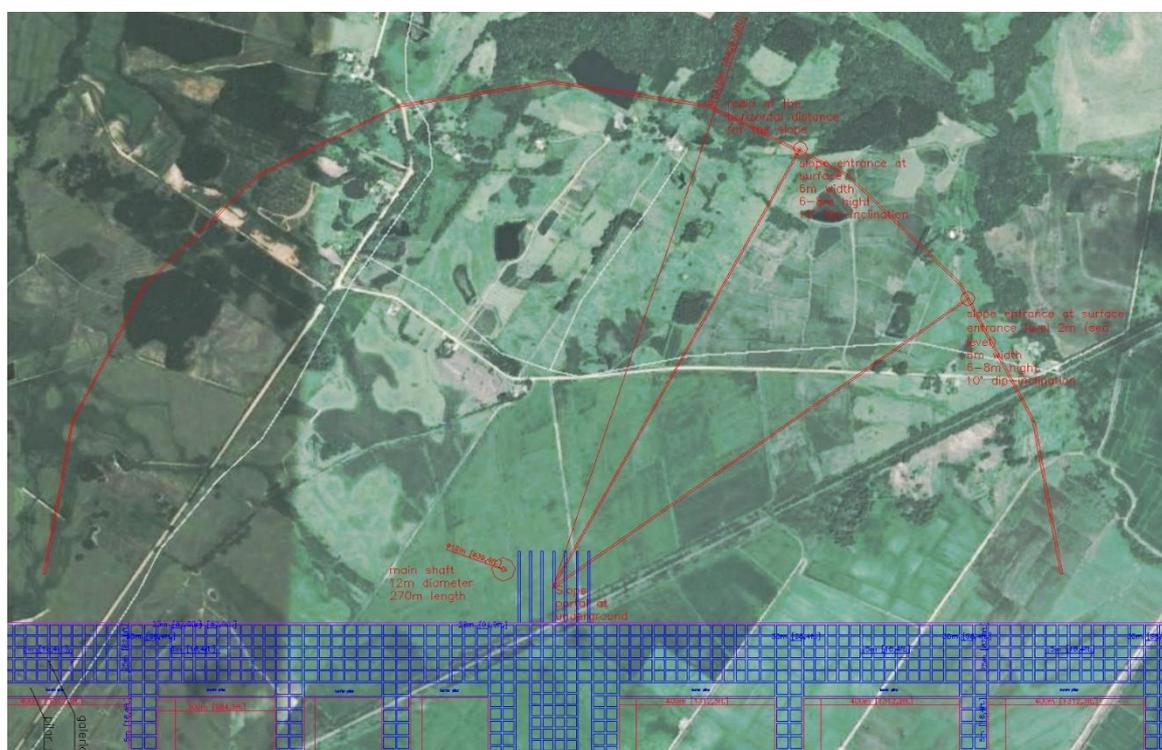
O plano inclinado terá inclinação de  $12^\circ$  e 1300m de comprimento para transporte de carvão e equipamentos e saída de emergência. O poço terá diâmetro de 12m para entrada e saída de pessoal e suprimentos. O pessoal terá elevador próprio, separado do elevador de suprimentos. O poço deve ser de grande diâmetro para movimentação de equipamentos, também. A profundidade ou comprimento do poço é de 270m.

A figura 62 abaixo mostra a posição do plano e do poço com a imagem de satélite de fundo.

A escolha do local da entrada do plano inclinado atende ao critério de acesso por estrada e próximo a estrada de ferro para escoamento da produção de carvão. Também há a possibilidade de transporte em curta distância até o terminal do navio do polo petroquímico. A altitude dessa área é mais elevada que o rio Jacuí, não havendo possibilidade de inundação. A saída do plano inclinado deve estar próxima à planta de beneficiamento, sendo mais um motivo para a escolha do local.

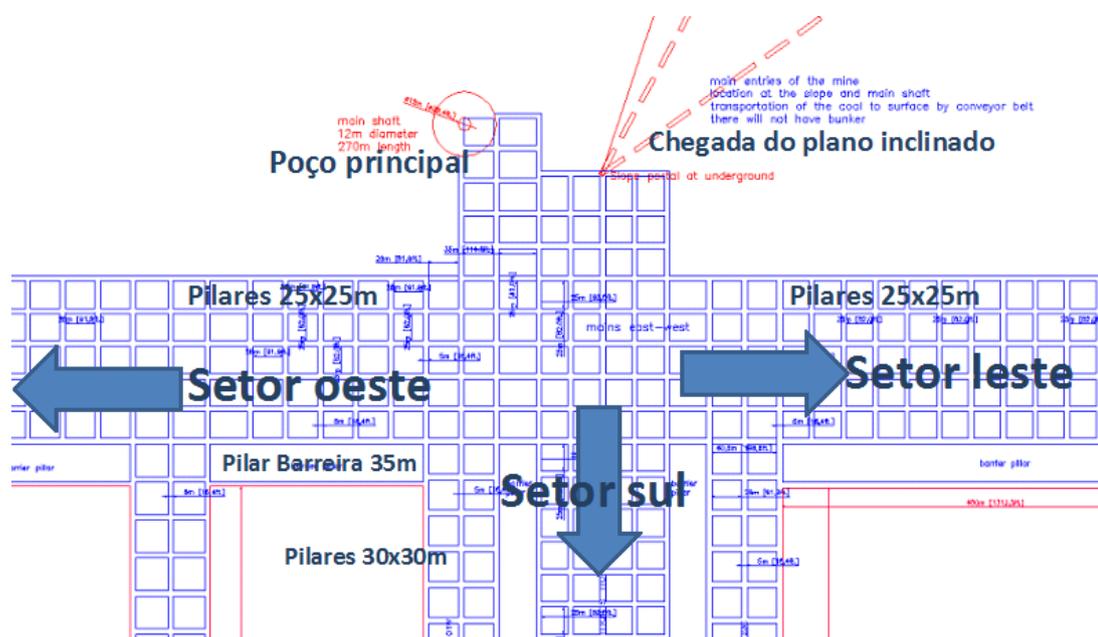
Foi desenhado um arco (figura 62) onde a saída do plano inclinado pode ser posicionada. A escolha do local pode ser definida no projeto de detalhe.

Figura 62 - Localização do poço e plano inclinado.



Fonte: Autoria própria

Figura 63 - Layout da entrada da Mina



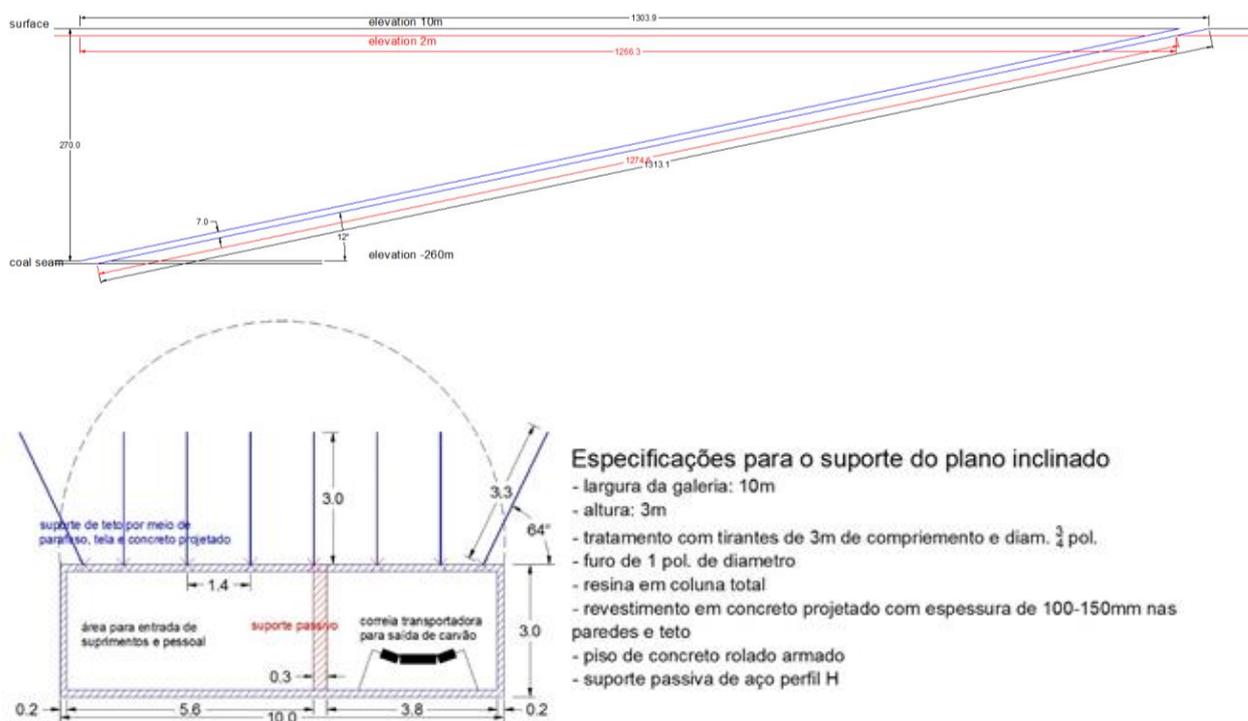
Fonte: Autoria própria

Outro detalhe importante da escolha do local do plano e poço é a posição central da mina em relação aos painéis de *Longwall* e dos dois eixos. Também, se for decisão da empresa executora, podemos expandir a mina e duplicar a produção, assim os acessos já estariam posicionados no centro de gravidade de distâncias aos painéis.

Para o plano inclinado pode-se considerar duas possibilidades de geometria. A primeira seria um plano inclinado único com largura de 10m (figura 64) ou dois planos inclinados com 5 ou 6m de largura. A decisão de qual a melhor geometria depende da qualidade do maciço que esse plano vai atravessar e dos equipamentos e sistema de escavação. Qualquer uma das possibilidades é aplicável e seu custo não deve diferenciar entre eles, para este projeto foi considerado um plano inclinado único com 10 metros de largura.

Como mostra a figura 64, o plano inclinado terá duas partes, onde em uma parte será instalada a correia transportadora e na segunda parte será uma pista para descida e subida de equipamentos e saída de emergência.

Figura 64 - Seção lateral do plano inclinado e uma seção do plano inclinado.



Fonte: Autoria própria

O suporte de teto será por meio de tirantes de 3m de comprimento e concreto projetado. Uma linha de perfil H será instalada em 3,8m para suporte passivo e separação da correia transportadora do restante do poço.

O plano inclinado será para entrada de ar limpo na mina, juntamente com o poço.

O poço ainda não possui projeto de sustentação específico, mas podemos considerar o uso de concreto projetado e tirantes para ancoragem.

A correia transportadora deve ser de 72 polegadas (1,8 m) para transporte de 4 Mtpa.

#### 4.2.6 Equipamentos

A frente de *Longwall* é basicamente formada por um equipamento de escavação em fatias (*shearer*), uma calha de arraste (*AFC*) para transporte do carvão da face até o sistema de transporte para a superfície (sistema de correia transportadora) e uma sequência de suportes de teto hidráulicos (*shields*) dispostos lado a lado fazendo o suporte da frente de lavra do painel de *Longwall* e dos equipamentos de escavação e transporte.

Para desenvolvimento:

- Um *miner bolter*
- Dois *shuttle car* para transporte do carvão até a correia transportadora
- Um *roof bolter* (perfuratriz de teto) para instalação de parafusos de teto
- Um *feeder breaker* instalado no local de descarregamento da correia transportadora

Para produção:

- Uma frente de *Longwall* completa, incluindo *shearer*, *shields* em número suficiente dependendo da largura do painel de lavra, calha de arraste na face do *Longwall*, alimentador de transferência da calha para a correia transportadora, sistemas elétricos e hidráulicos, sistema de transporte por correia transportadora, equipamentos auxiliares para mudança de painel e instalação da frente de *Longwall*

Devido à baixa qualidade de teto da camada, o que acarreta a necessidade de um rápido e eficiente escoramento de teto, se optou pela utilização de *miner bolter*, equipamento este capaz de realizar desenvolvimento e escoramento de teto, assim aumentando produtividade no desenvolvimento, requisito fundamental no método de *Longwall*.

Para a mina Triunfo, a produção estimada é de 4 milhões de toneladas com produção de uma frente de *Longwall* e três conjuntos de mineradores contínuos (*miner bolter*) para o desenvolvimento da mina e preparação dos painéis de produção. Para isso, foram definidos os equipamentos listados abaixo.

Tabela 12 - Frente de *Longwall* para 400m de largura.

Descrição	Número
Suporte de teto hidráulico ( <i>face shield</i> ) com 1.75m de largura e <i>two legs system</i>	229
AFC ( <i>Armored Face Conveyor</i> ) calha de arraste para transporte de carvão (400m)	1
<i>Shearer</i> de dois tambores ( <i>double ended shearer</i> )	1
<i>Stageloader</i> para transferência do carvão do AFC para o alimentador da correia transportadora	1
Britador ( <i>feeder breaker</i> ) para redução de tamanho dos blocos e alimentador de correia	1
Alimentador de correia	1
Trator para transporte de equipamentos ( <i>shields</i> e <i>shearer</i> )	2
<i>Scoop</i> para transporte de suprimentos	1

Sistema de bombeamento de óleo para os equipamentos de suporte e <i>shearer</i>	1
Sistema de trilhos para movimento dos equipamentos no painel	1
Sistema de comunicação	1
Gerador de energia	1

Fonte: Autoria própria

Tabela 13 - Conjunto para desenvolvimento de galerias (3 conjuntos).

Descrição	Número
Minerador contínuo com perfuratriz de teto ( <i>miner bolter</i> )	1
<i>Shuttle car</i> para transporte de carvão até o alimentador	2
<i>Roof bolter</i> (para colocação de tirantes de teto)	1
<i>Feeder breaker</i> (britador e alimentador de correia)	1
<i>Scoop</i> para auxílio de limpeza e transporte de suprimentos	1
Gerador de energia	1

Fonte: Autoria própria

Deve-se incluir nos equipamentos todos o sistema de transporte de carvão por meio de correia transportadora, sistema de transporte de pessoal e suprimentos (por meio de trilho) e sistema de ventilação.

#### 4.2.7 Transporte do Carvão

O sistema de transporte de carvão da frente de lavra até a planta de beneficiamento será por meio de sistema de calha de arraste e correia transportadora.

Na face da frente de *Longwall*, o transporte ocorre por meio da calha de arraste ou panzer ou AFC (*armored chain conveyor*). É uma calha de arraste com corrente e aletas de aço para arrastar o carvão desmontado pelo *Shearer* até o equipamento de transferência e o alimentador da correia transportadora. Todo esse conjunto faz parte do equipamento da frente de *Longwall* e entra nos custos de investimento da frente de *Longwall*.

A correia transportadora inicia na frente de *Longwall* e se estende até a superfície. O sistema de correia dentro do painel de *Longwall*, no *headgate*, pode ser reutilizado nos painéis subsequentes. Entretanto, a correia no eixo da mina deve ser estendida à medida que o eixo é desenvolvido. A correia transportadora deve ter entre 50-70 polegadas (1,27-1,78 m) de largura.

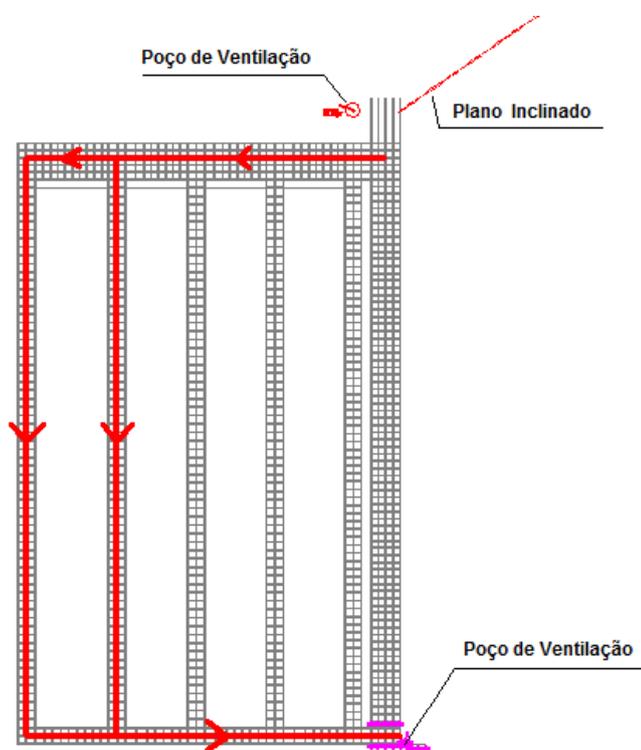
#### 4.2.8 Ventilação

O projeto de ventilação tem como objetivo controlar a temperatura e umidade do ambiente, diluir gases tóxicos, suprir a demanda de oxigênio para homens e máquinas e reduzir custos desnecessários de ventilação como superdimensionamento.

A ventilação será feita por exaustão, o ar entrará pelo plano inclinado e poço, sendo puxado através dos painéis de lavra e galerias até o poço de saída, onde serão instalados os ventiladores responsáveis pela exaustão do ar.

O sistema de ventilação foi dimensionado para que possa suprir as necessidades de ar na pior situação possível de mina (figura 65), a qual seria um circuito com quatro painéis de *Longwall*, alinhados lado a lado cada um com dimensões de 2226 metros por 400 metros. A vazão adotada foi baseada em um estudo de 14 minas de *Longwall* australianas (MAYES; GILLIES, 2001), visto que não existe norma brasileira de ventilação para o método utilizado. Partindo desses dados, foram calculadas as perdas de carga para a mina, ou seja, a pressão necessária que os ventiladores devem exercer para que a ventilação funcione de forma adequada.

Figura 65 - Circuito simplificado de ventilação.

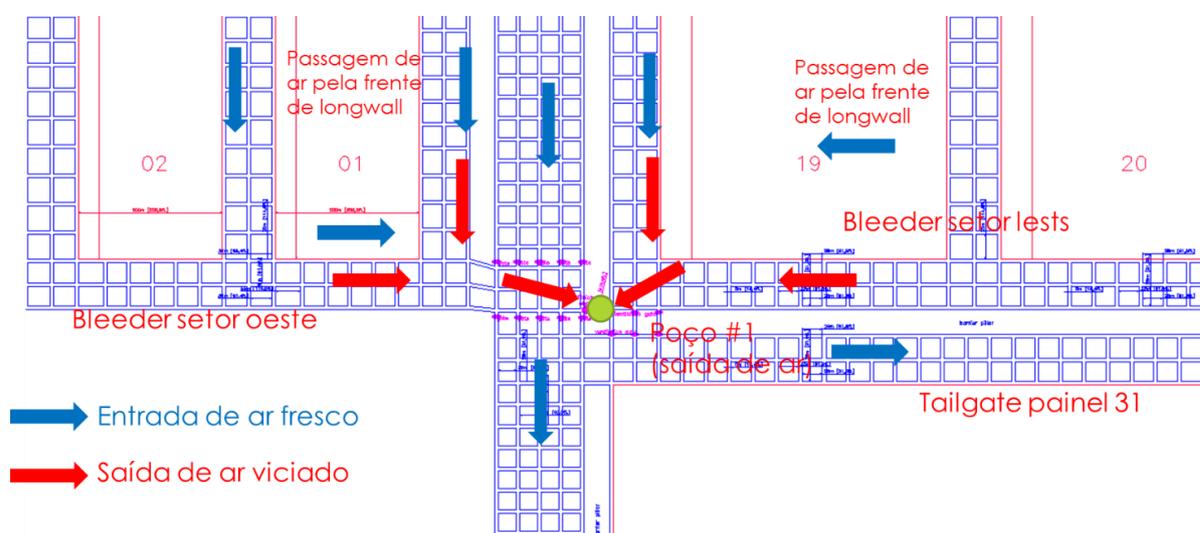


Fonte: Autoria própria

A vazão de ar requerida estimada foi de  $66,6 \text{ m}^3/\text{s}$ , e a perda de carga do circuito foi de  $1584 \text{ Pa}$ . Inicialmente sem considerar as fugas do circuito. Dessa forma foi possível escolher os ventiladores a serem usados. Devido à baixa pressão necessária e alta vazão, a melhor escolha foi a utilização dois ventiladores em paralelo, isso se mostra vantajoso pois um ventilador serve como reserva para o outro em casos de manutenção.

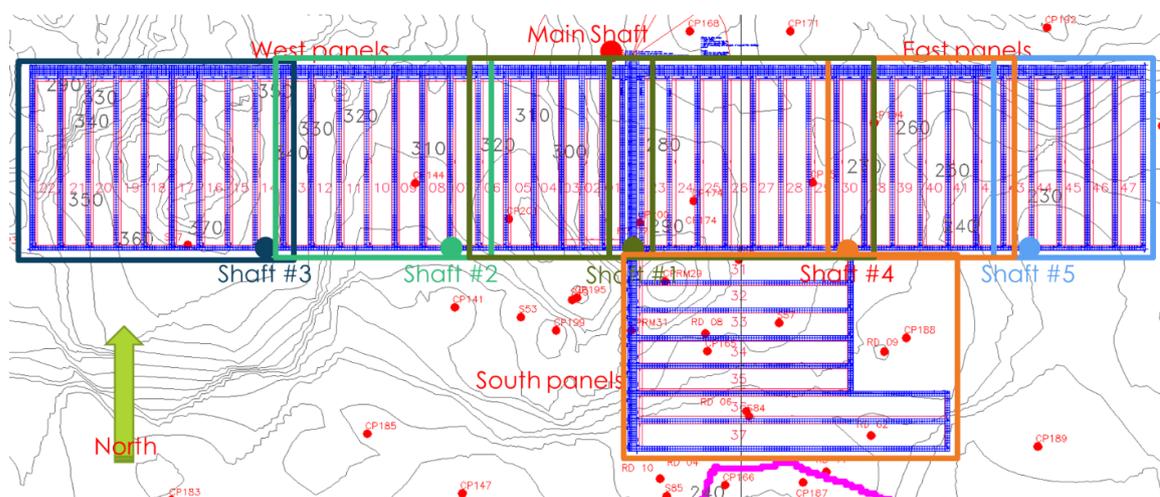
Os ventiladores escolhidos tem uma vazão unitária de  $33,35 \text{ m}^3/\text{s}$  e pressão de  $1700 \text{ Pa}$ , cada equipamento possui diâmetro de  $72''$  ( $1,83 \text{ m}$ ) e motor com potência de  $100 \text{ KWatts}$ .

Figura 66 - Esquema do circuito de ar fresco e viciado dentro do painel de lavra e bleeder para o painel 1 e para os demais painéis do setor oeste da mina.



Fonte: Autoria própria

Figura 67 - Localização dos poços de ventilação e setores de abrangência de cada poço.



Fonte: Autoria própria

A figura 67 mostra os setores de ventilação da mina. A mina foi dividida em setores de ventilação com objetivo de facilitar o fluxo de ar e evitar grandes caminhos do ar que provoquem perdas de carga. Cada setor de ventilação deve contar com seu próprio *shaft* para exaustão de ar. Cabe destacar que após ser lavrado um setor completo este será inteiramente lacrado e isolado, o mesmo será feito individualmente nos painéis já lavrados assim que as estruturas auxiliares deixarem de serem utilizadas.

#### 4.2.9 Suporte de teto

O teto imediato das galerias é formado por siltito maciço com baixa resistência e com alta sensibilidade a umidade, apesar de possuir poucas fraturas. O RMR calculado para a camada do teto imediato foi de 50, apesar da baixa resistência e sensibilidade. Outro fator importante é que não há camada forte ou resistente dentro da região de ancoragem ou logo acima da zona ancorada.

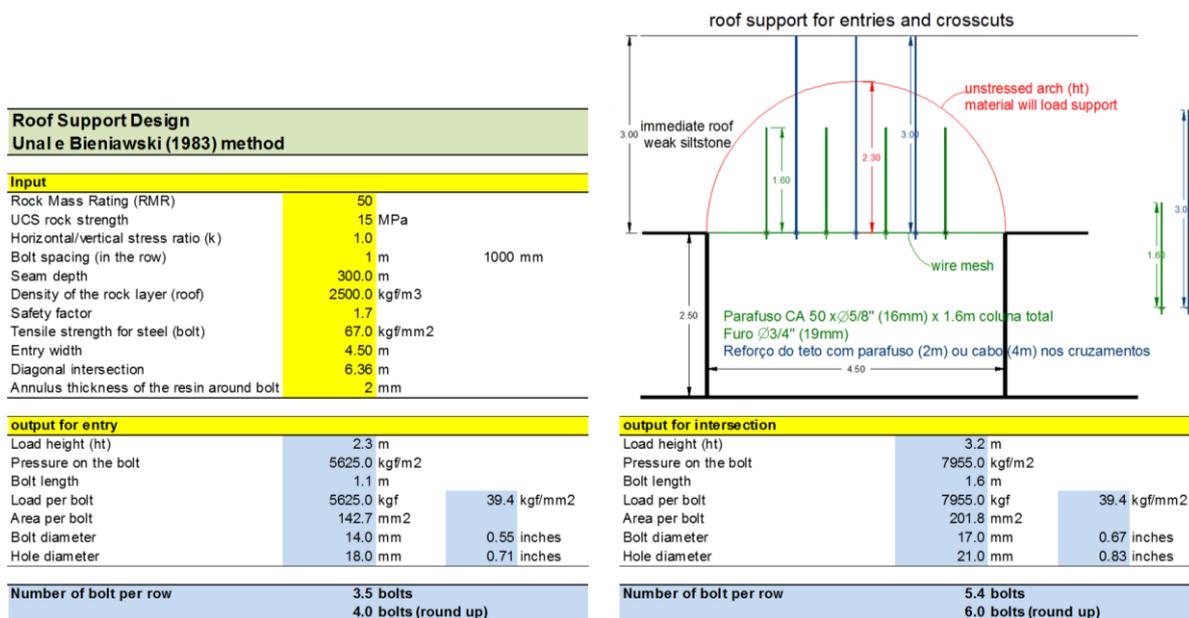
As experiências de lavra nesse ambiente geológico, como na mina de Charqueadas, mina do Leão I e Mina do Leão II e em galerias que foram escavadas na década de 1950 observadas na mina do Calombo e mina B3, mostraram que esse tipo de teto tem baixa capacidade e tempo de auto suporte. Outra observação é que nas galerias observadas na mina do Calombo e B3 foi deixado uma pequena camada de carvão (5-10cm) para isolar o siltito da umidade do ar, o que viria a contribuir para a degradação do teto, caso este isolamento não tivesse sido feito.

Em função da qualidade do teto imediato e dessa experiência adquirida em outras lavras, foram projetadas galerias de 5 m de largura e deixadas camadas de carvão de 10 cm no teto imediato para isolar o siltito da umidade. Essa camada de carvão deve ser isolada por meio de cal ou pó de rocha para não sofrer efeito de umidade também. Tela no teto presa pelos parafusos de teto deve ser instalada para evitar o caimento de placas.

O suporte de teto foi dimensionado por meio da metodologia proposta por Bieniawski (1969) e, também, por meio do *software* da NIOSH chamado ARBS (*analysis of roof bolt system*).

O suporte de teto será por meio de parafuso de teto com 2,3m de comprimento e  $\frac{3}{4}$ " (19mm). de diâmetro. Quatro parafusos por linha devem ser instalados com espaçamento de 0,8m entre linha. Junto com a instalação dos parafusos, a tela deve ser instalada. Como suporte secundário e reforço, cabos com comprimento de 3m e diâmetro de  $\frac{3}{4}$ " (19mm). A planilha apresentada na figura 68 abaixo mostra o cálculo do suporte de teto.

Figura 68 - Cálculo do suporte de teto.



Fonte: Autoria própria

#### 4.2.10 Pilares e Pilares Barreiras

Os pilares foram dimensionados utilizando o método de Bieniawski, por meio do *software* da NIOSH ALPS (*analysis of Longwall pillar stability*). Dois tipos de pilares foram considerados: (i) pilares dos eixos e (ii) pilares dos acessos dos painéis (*gateroads*).

Para o dimensionamento dos pilares foram considerados os seguintes parâmetros:

- Resistência da camada de 3,5 MPa
- Largura da galeria de 4m
- Altura do pilar de 2,5m
- Profundidade da camada de 300m

Nos eixos, os pilares quadrados foram dimensionados com 25m de lado.

Nos acessos dos painéis de *Longwall* os pilares foram dimensionados com 30m de lados. Isso devido às tensões de abatimento que ocorrem quando do movimento de escavação da frente de *Longwall*.

A revisão dos pilares deve ocorrer quando for obtido maior detalhamento da jazida e do comportamento das camadas que formam o sistema teto, camada e piso.

O piso é um dos desafios nesse ambiente geológico por ser fraco mecanicamente e altamente sensível à água. Ocorrência esta já observada nas minerações antes executadas pelo método de C&P no Rio Grande do Sul (Charqueadas; Leão I e II).

O pilar barreira entre o final do painel de *Longwall* e eixo é importante para que as tensões de abatimento na face do *Longwall* não atinjam os pilares do eixo. A consequência dessa sobrepressão seria a ruptura dos pilares e fechamento da mina.

Os pilares barreira foram dimensionados utilizando a metodologia sugerida pelo estado da Pensilvânia para pilares barreira, onde a largura do pilar é 10% da profundidade mais 45 pés (13m). Os pilares foram dimensionados entre 35 e 45m, dependendo do painel. Para efeitos de projeto, os pilares barreira foram estabelecidos em 35m.

#### **4.2.11 Plano e sequência de lavra**

O planejamento de lavra foi realizado primariamente objetivando o requisito de se ter uma produção de ROM de 4 Mtpa, somando produção no painel de *Longwall* e desenvolvimento, o qual se dá na camada de carvão, portanto se soma o desenvolvimento do painel de *Longwall*. Inicialmente foi feito o sequenciamento da mina especificamente para os primeiros cinco anos, para tanto foram levadas em consideração as taxas de produção semelhantes às usuais de outros empreendimentos, além de se ter levado em consideração o conhecimento referente à mineração subterrânea de carvão no estado de Santa Catarina, o que nos fornece alguns parâmetros quanto ao desenvolvimento analogamente pelo método C&P.

Foram projetados diferentes cenários de produção: simulando o desenvolvimento, com diferentes números de equipamentos e diferentes frentes, além de diferentes tempos de pré desenvolvimento (anterior ao início da produção nos painéis).

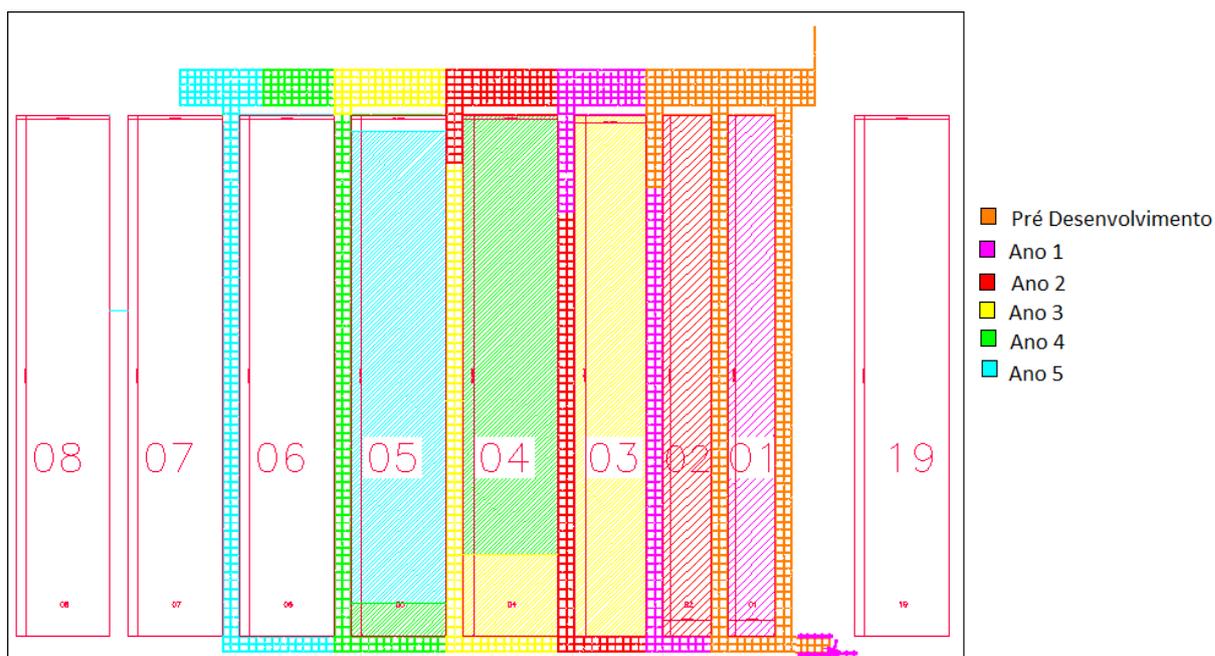
Como requisito mínimo de pré desenvolvimento foi tomado o princípio de que ao final do pré desenvolvimento seja possível iniciar a produção do primeiro painel de *Longwall*. Para encontrar a melhor combinação entre tempo de pré desenvolvimento e número de equipamentos foram feitas simulações combinando estes fatores, o que permitiu concluir que para mantermos a produção em 4 Mton nos anos iniciais seriam necessários no mínimo três anos de pré desenvolvimento, o que foi considerado ligeiramente excessivo, além do fato de os primeiros dois painéis serem metade em largura que os demais, o que acarretaria na necessidade de uma produtividade mais elevada da frente de *Longwall*, ou seja, nos primeiros anos haveria a necessidade da produção andar mais rápido, por isso, assume-se que a produção de carvão é crescente nos três primeiros anos até que seja atingida a produção plena da mina.

Visto esses fatores, se considerou arriscado contar com uma porcentagem de produção elevada, mesmo estando abaixo da capacidade da frente, alheio à necessidade de diminuir o tempo de pré desenvolvimento. Concluiu-se que a melhor combinação seria com dois anos de pré desenvolvimento e limitando nos dois primeiros anos a produção de um painel por ano, o que do ponto de vista operacional também é muito interessante, visto que se trata de um período de adaptação ao método, este pouco conhecido no Brasil, além de ser um período de capacitação da mão de obra.

Para a configuração final do planejamento foi considerada a utilização de três *miner bolter's*, assumindo uma produtividade de cerca de 15 metros de galeria por dia para cada frente de desenvolvimento, valor esse assumido em função de conhecimentos da utilização internacional do equipamento. A frente de *Longwall* foi estimada em avançar 10m por dia com cortes aproximados de 1m. Nesse caso, é indiferente uma frente de 200 ou 400m de largura, para efeitos de projeto e contando que os três primeiros painéis serão de adaptação e treinamento de pessoal ao método de lavra.

O desenvolvimento na mina foi no eixo da direção oeste onde está localizado o painel 1 de 200m de largura. Os eixos leste e sul serão desenvolvidos quando o primeiro painel de lavra estiver em produção. Um dos conjuntos de desenvolvimento será deslocado para o setor do eixo sul.

Figura 69 - Sequência de produção para os primeiros 5 anos de desenvolvimento da mina Triunfo.



Fonte: Autoria própria

Tabela 14 - Dados de desenvolvimento

Prod. = <i>Longwall</i> + Desenvolvimento	4	Mton/ANO
Largura das galerias	5	m
Altura Galerias	2,5	m
Densidade Camada de Carvão	1,8	(ton/m <sup>3</sup> )
Número de Frentes de Desenvolvimento	3	

PRÉ DESENVOLVIMENTO	
Desenvolvimento painel (Mton)	1,11
Desenvolvimento painel (Mm <sup>3</sup> )	0,62
Comprimento total de galeria (m)	49.275,0
AVANÇO DIA (m)	45

Ano 1, 2, 3, 4 e 5	
DESENVOLVIMENTO	
Desenvolvimento painel (Mton)	0,37
Desenvolvimento painel (Mm <sup>3</sup> )	0,21
Comprimento total de galeria (m)	16.425,0
AVANÇO DIA (m)	45

Fonte: Autoria própria

A tabela abaixo mostra a produção estimada por dia, mês e ano para o conjunto desenvolvimento mais painéis de *Longwall* em função da largura dos painéis.

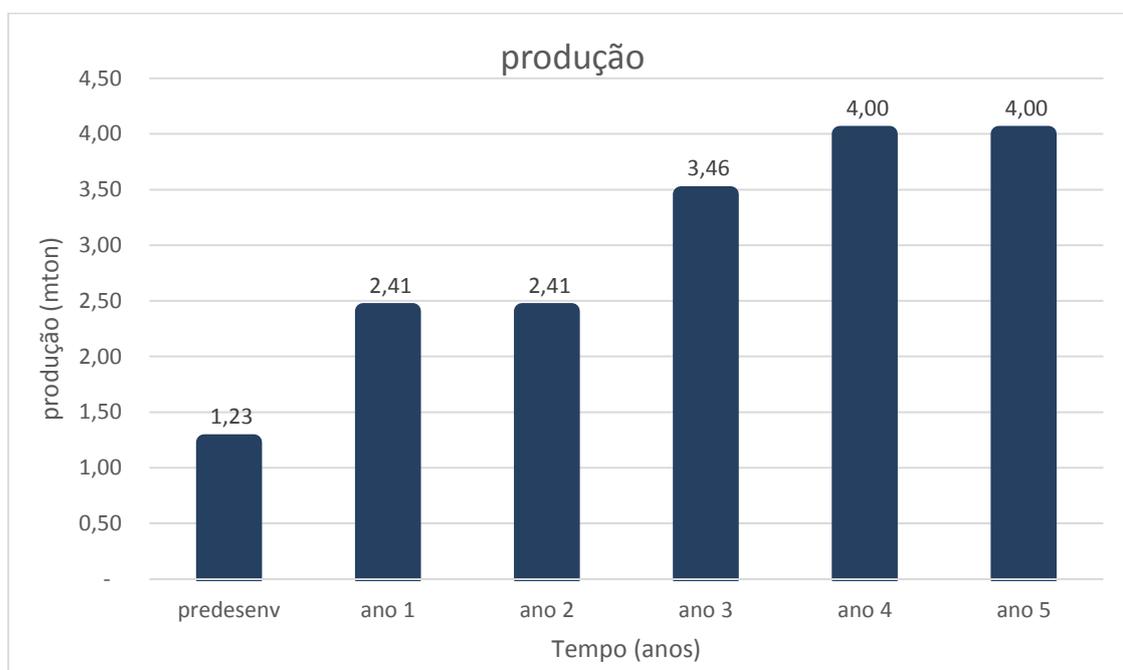
Tabela 15 - Produção por dia, mês e ano em função da largura do painel.

Desenvolvimento		Painel de <i>Longwall</i>			
avanço (m)	45,00	largura (m)	200,00	300,00	400,00
altura (m)	2,50	altura corte (m)	2,50	2,50	2,50
largura (m)	5,00	avanço dia (m)	8,00	8,00	8,00
volume dia (m3)	562,50	volume dia (m3)	4.000,00	6.000,00	8.000,00
tonelada dia	1.125,00	tonelada dia	8.000,00	12.000,00	16.000,00
Produção de carvão por dia (desenv.+ <i>Longwall</i> )			9.125,00	13.125,00	17.125,00
Produção de carvão por mês (desenv.+ <i>Longwall</i> )			200.750,00	288.750,00	376.750,00
Produção de carvão por ano (desenv.+ <i>Longwall</i> )			2.409.000,00	3.465.000,00	4.521.000,00

Fonte: Autoria própria

O primeiro e segundo ano de mina serão apenas desenvolvimento com escavação das galerias até o momento de instalação dos equipamentos da frente de *Longwall*. Este é o pré desenvolvimento. O total de galerias a ser desenvolvido nessa fase é de 49275m, fazendo um total de 1,23 milhões de toneladas. No primeiro e segundo ano de produção é estimado fazer a lavra dos dois painéis de 200m de largura fazendo total de 2,41 milhões de toneladas por ano. No terceiro ano de produção será lavrado o painel de 300m, com total de 3,46 Mton, e a partir do quarto e quinto ano serão lavrados os painéis de 400m, atingindo a capacidade máxima prevista de produção, 4 Mtpa. O gráfico abaixo mostra a progressão da produção desde o início da mina.

Figura 70 - Sequência de produção nos primeiros anos de desenvolvimento da mina.



Fonte: Autoria própria

#### 4.2.12 CAPEX e OPEX

O CAPEX, *capital expenditure*, se refere as despesas de capital, ou em outras palavras, o investimento a ser feito para colocar o empreendimento em operação, no caso da Mina Triunfo o CAPEX será composto com os custos de aquisição de equipamentos e obras necessárias ao início da operação. Resumindo:

- Frente de *LW*
- 3 frentes de desenvolvimento

- Plano inclinado
- Poço (ventilação)
- Pré-desenvolvimento
- Ventilador e motor
- Correia transportadora
- Contingencias

Considerando estes pontos o CAPEX foi estimado num valor final de cerca de 295 MUS\$, estimativas baseadas em tomada de preço com fabricantes e empresas.

O OPEX, *operational expenditure*, se refere às despesas operacionais do empreendimento. Para o estudo apresentado, se estimou o OPEX em 27 US\$ por tonelada.

Para OPEX, foram considerados custos de:

- Energia elétrica
- Desenvolvimento
- Produção
- Reinvestimentos
- *Royalties* e Indenizações
- Contingencias

## 4.3 ESTUDO II (APLICAÇÃO ALTERNATIVA)

### 4.3.1 Conceito

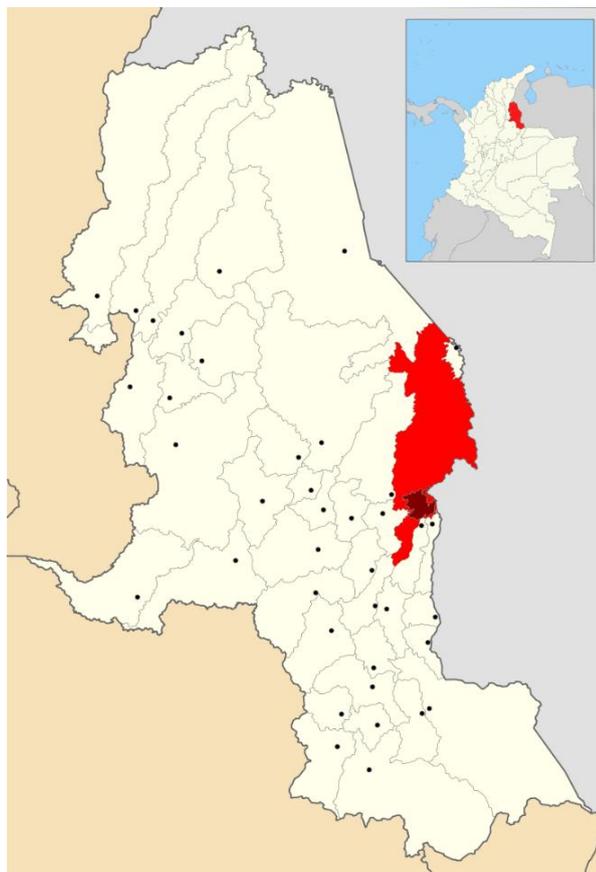
Este estudo refere-se ao estudo conceitual de viabilidade técnica e possíveis alternativas de mineração e mecanização de um depósito de Carvão Mineral, localizado próximo a Cúcuta, Colômbia.

A avaliação de possibilidades de método alternativo de lavra e possíveis alternativas de mecanização de operação foram trabalhadas em referência a duas minerações existentes na região:

Cia Minera de Cerro Tasajero (CMCT) – Mina Cerro Tasajero

Consorcio Minero de Cúcuta (CMC) –Mina San Jose

Figura 71 - Localização de Cúcuta no estado de Santander/Colômbia.



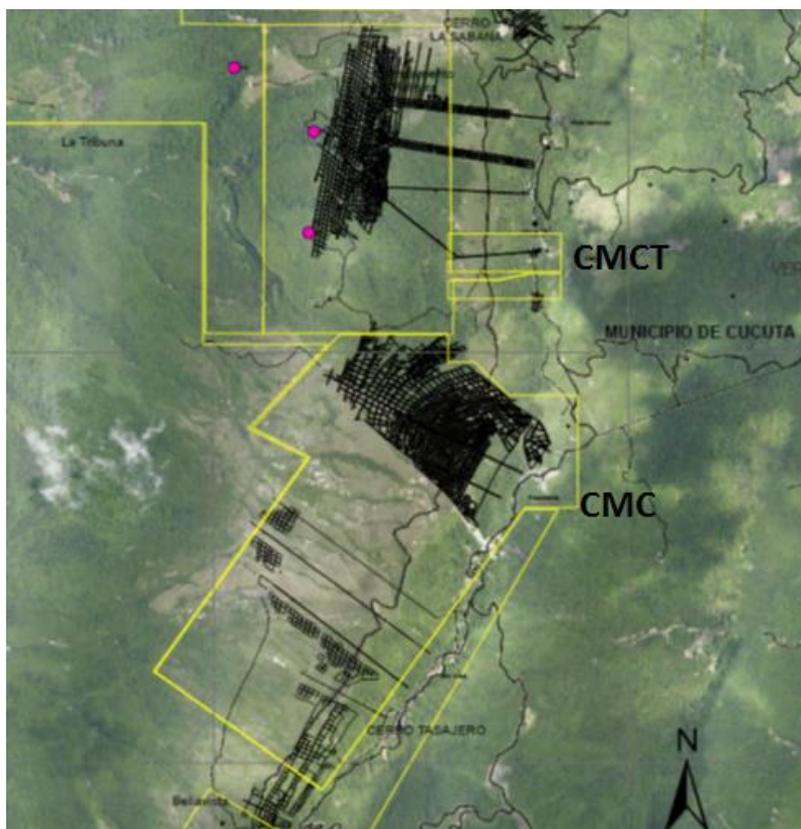
Fonte: Wikipédia<sup>16</sup>

As duas são relativamente próximas, apresentam e mineram camadas de carvão com características extremamente semelhantes, porém com uma característica destoante: a camada CMC apresenta uma intercalação na camada de carvão e contrária da camada CMCT (camada única de carvão) o que pode vir a diferenciar a estratégia de mecanização.

---

<sup>16</sup> Disponível em < [https://es.wikipedia.org/wiki/Geograf%C3%ADa\\_de\\_C%C3%BAcuta](https://es.wikipedia.org/wiki/Geograf%C3%ADa_de_C%C3%BAcuta) > Acesso em Ago. 2015.

Figura 72 - Minas existentes na região.



Fonte: Acervo LPM/UFRGS

Com base nos dados disponíveis foi realizado um estudo visando a melhor alternativa de otimização de lavra e aproveitamento econômico de jazida com base nos dados das minas CMC ou CMCT, levando-se em consideração: mínimo impacto ambiental e social, rentabilidade do empreendimento, facilidade de operação, maior produtividade na lavra e recuperação da jazida.

## 4.3.2 Geologia e Avaliação da Jazida

### 4.3.2.1 Caracterização Geomecânica

Sem estar de posse de amostras para caracterização do maciço, ele foi trabalhado de forma intuitiva, considerando o conhecimento da geologia da região e relatos da qualidade geomecânica das camadas (ZINGANO, 2015), considerando se um teto de boa a ótima qualidade, baseado em relatos de sua ótima competência.

Características da estratigrafia da região são conhecidas:

- Corpo de minério tabular com espessura de 1.8 m em média
- Mergulho do corpo de cerca de 15 graus
- Encaixante de boa qualidade

Figura 73 - Camada de carvão aflorando.



Fonte: Cortesia prof.º André Zingano

Para inferirmos a qualidade geomecânica das litologias da região, podemos tomar como base as inspeções realizadas em três furos, em áreas próximas sendo estes:

- Furo P2

As amostras das encaixantes da camada no furo P2 foram submetidas a ensaios de compressão pontual, e por isso estão fraturadas. A camada de carvão do manto 20 está entre as manobras 436,85 e 439,85. A parte removida corresponde a um trecho maior que uma calha e meia, o que indica camada com espessura da ordem de 1,8 m. A presença de intercalações poderá ser constatada com a inspeção das fotos dos testemunhos.

Estima-se que as resistências das rochas encaixantes estão entre 50 e 100 MPa, e que o RMR (*Rock Mass Rating*) situa-se nas classes III (mediana) a IV (pobre). A seguir foto de testemunhos do furo P2 na zona carbonífera do manto 20.

Figura 74 - Testemunho de sondagem furo P2.



Fonte: acervo LPM/UFRGS

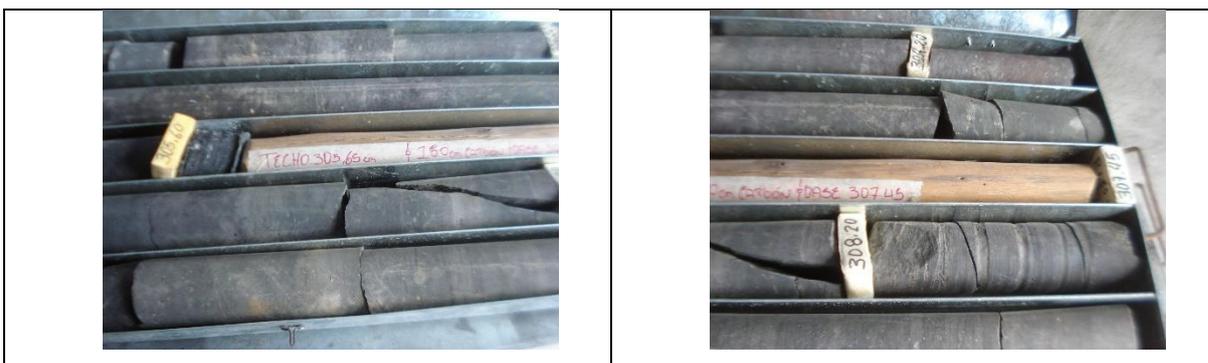
- Furo P5

A camada de carvão do manto 20 está entre as manobras 305,65 a 307,45, resultando em uma espessura de 1,80 m (considerando recuperação de 100% sem expansão longitudinal dos testemunhos).

Estima-se que as resistências das rochas encaixantes estão entre 50 e 100 MPa e que o RMR (*Rock Mass Rating*) situa-se nas classes III (mediana) e IV (pobre).

A seguir fotos de testemunhos do furo P5 na zona carbonífera do manto 20.

Figura 75 - Testemunho de sondagem furo P5.



Fonte: acervo LPM/UFRGS

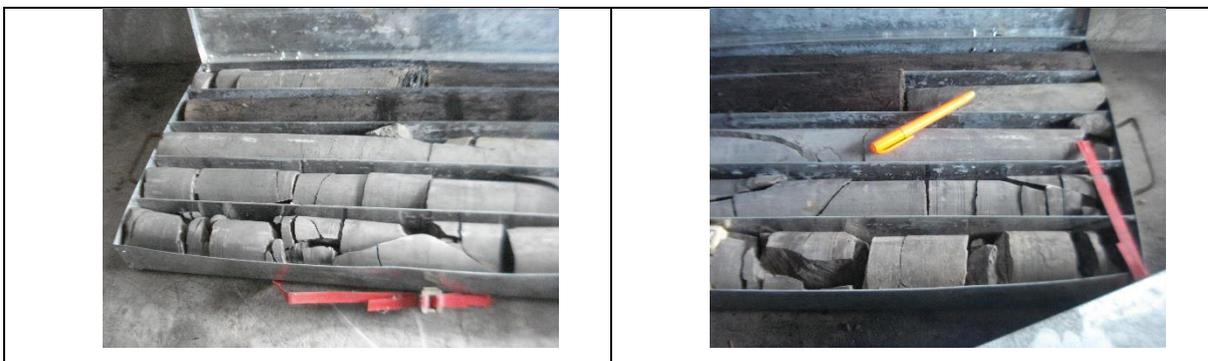
### Furo P6

A camada de carvão do manto 20 está em torno de 2 m acima da manobra 104,15 m. Foi medida uma espessura de 1,80 m entre o teto e o piso.

Estima-se que a resistência da rocha do teto está entre 50 e 100 MPa e a resistência da rocha no piso está entre 25 e 50 MPa. Para o teto estima-se maciço classe III (mediano) a IV

(pobre) e para o piso, maciço classe IV (pobre). A seguir fotos de testemunhos do furo P6 na zona carbonífera do manto 20.

Figura 76 - Testemunho de sondagem furo P6.



Fonte: acervo LPM/UFRGS

#### 4.3.2.2 *Lavra realizada na região*

Atualmente a lavra realizada na camada de carvão a ser explorada é realizada de forma rudimentar, semi manual, sendo que várias empresas fazem a exploração do carvão e todas operam semelhantemente em método de C&P com recuperação de pilares, porém, de forma geral rudimentar, onde são utilizadas vagonetas com tração humana para transporte do minério, o desmonte é realizado ou com martetele hidráulico de porte manual ou com uso de picareta, além da estabilização ser feita empiricamente com uso de prumos de madeira.

Figura 77 - Transporte manual de carvão em vagonetas.



Fonte: Cortesia prof.º André Zingano

Porém, é de conhecimento a boa qualidade carbonífera e metalúrgica do carvão presente na camada, o que viabiliza as atuais minerações na região e respaldam o estudo conceitual de otimização de lavra por *Longwall* não tradicional. Esta otimização tem por objetivo aumentar a atual recuperação da jazida, além de fornecer uma condição de trabalho mais segura

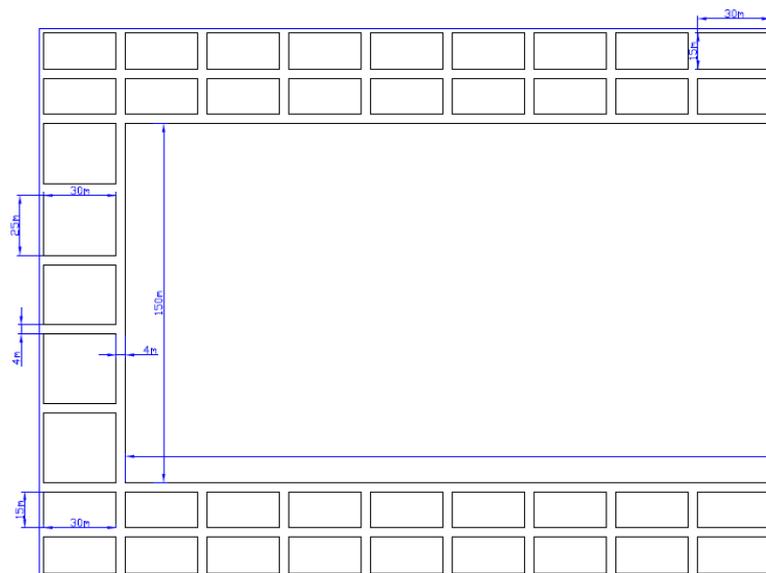
### **4.3.3 Desenho de Mina (*Layout*)**

Considerando a necessidade de um bom aproveitamento das reservas existentes, é compatível para tanto a utilização de método de lavra em recuo, como o utilizado atualmente (Câmaras e Pilares, com recuperação de pilares em recuo), porém, como em conceito, o método adotado atualmente se assemelha consideravelmente ao método de lavra em recuo tal como *Longwall*. Para esse estudo se optou por trabalhar com uma adaptação do método de *Longwall* tradicional, o qual originalmente é um método de alta recuperação (superior a 70%), alto nível de mecanização e altas produções (cerca de 4 Mtpa).

Entretanto, como não se tem, neste caso, por objetivo elevada taxa de produção e alto investimento em mecanização (investimento requerido para pequena frente de *Longwall*, em torno de 100 MUS\$), propõe-se uma simplificação do método tradicional, com painéis de tamanho reduzidos (1500m x 150m) e uma mecanização mais enxuta compatível com uma boa operacionalidade e com a produção almejada. Equipamentos de menor porte, porém que confeririam ganho de produtividade em relação ao realizado inicialmente e em minerações nas cercanias (mecanização quase inexistente).

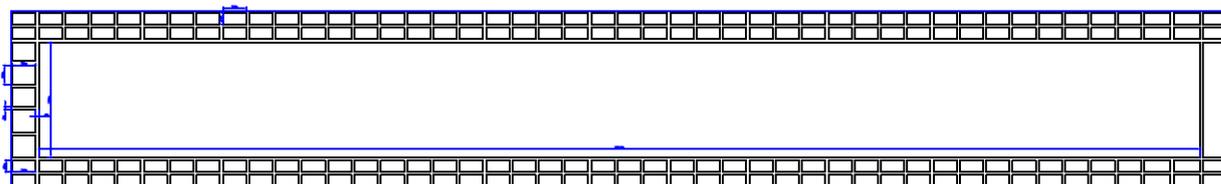
Propõem-se a adaptação para total desmonte mecânico, com adaptação dos equipamentos a serem selecionados para utilização, com rompedores hidráulicos ou frisador. Para camadas de carvão sem intercalação entende-se ser mais produtiva a utilização de frisador, e para a camada com intercalação a utilização de rompedor, isto devido à possível dificuldade de operação do frisador na intercalação da camada (possivelmente apresenta maior resistência mecânica). Cabe salientar que para uma escolha com maior respaldo faz-se necessária conhecer as características geomecânicas do material a ser trabalhado (camada e intercalação).

Figura 78 - Detalhe painel (fundo).



Fonte: Autoria própria

Figura 79 - Painel modelo 1500m por 150m.



Fonte: Autoria própria

Baseando-se no painel conceitual (figuras 78 e 79) com frente de 1500m x 150m e pilares de 25x30 e 15x30 predominantemente e pilar barreira ao fundo, podemos aferir recuperação da reserva por painel e a participação do desenvolvimento e da lavra na produção total (como apresentado nos gráficos abaixo). Podemos obter uma recuperação de 74% por painel e contribuição de 17% do desenvolvimento e 83% da lavra em recuo. Este dado tem relevância à medida que o desenvolvimento se caracteriza por ser uma etapa de maior dificuldade operacional, uma vez que requer maior atenção em diversos pontos, tais como suporte de maciço e ventilação, uma vez que deseja-se que estas galerias sejam de boa qualidade pela necessidade de maior vida útil.

Já no recuo, a necessidade de acabamento é diminuta, visto que a possibilidade de *caving* ou abatimento do teto é um tanto esperada, como desejada para alívio de tensões.

Figura 80 - Participação na Lavra.



Fonte: Autoria própria

Figura 81 - Participação na Mina.



Fonte: Autoria própria

Tabela 16 - Produção por painel em massa e volume.

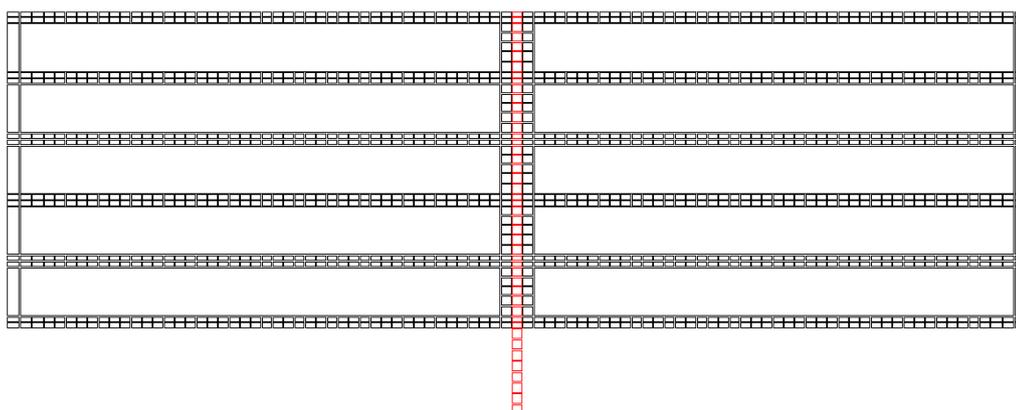
PAINEL BASE		
LAVRA DESENVOLVIMENTO	44890	m <sup>2</sup>
LAVRA DESENVOLVIMENTO	89780	m <sup>3</sup>
LAVRA DESENVOLVIMENTO	152626	ton
LAVRA DESENVOLVIMENTO	152.626	Kton
LAVRA RECUO LONGWALL	225000	m <sup>2</sup>
LAVRA RECUO LONGWALL	450000	m <sup>3</sup>
LAVRA RECUO LONGWALL	765000	ton
LAVRA RECUO LONGWALL	765	Kton

Fonte: Autoria própria

A figura 82 mostra a distribuição hipotética de painéis para efeitos de *layout* e escala de recuperação de jazida, considerando que se propõe a locação dos painéis perpendiculares ao mergulho da camada. (Em vermelho eixo principal).

Ao analisarmos a provável recuperação para um conjunto de painéis, temos um aumento da recuperação da jazida, visto que parcelas de galerias de desenvolvimento são compartilhadas por mais de um painel.

Figura 82 - Conceito de conjunto de painéis



Fonte: Autoria própria

Temos assim um aumento na participação dos recuos na produção, correspondendo agora a 87% da produção (tabela 16).

Com isto também nossa recuperação chega a 77%.

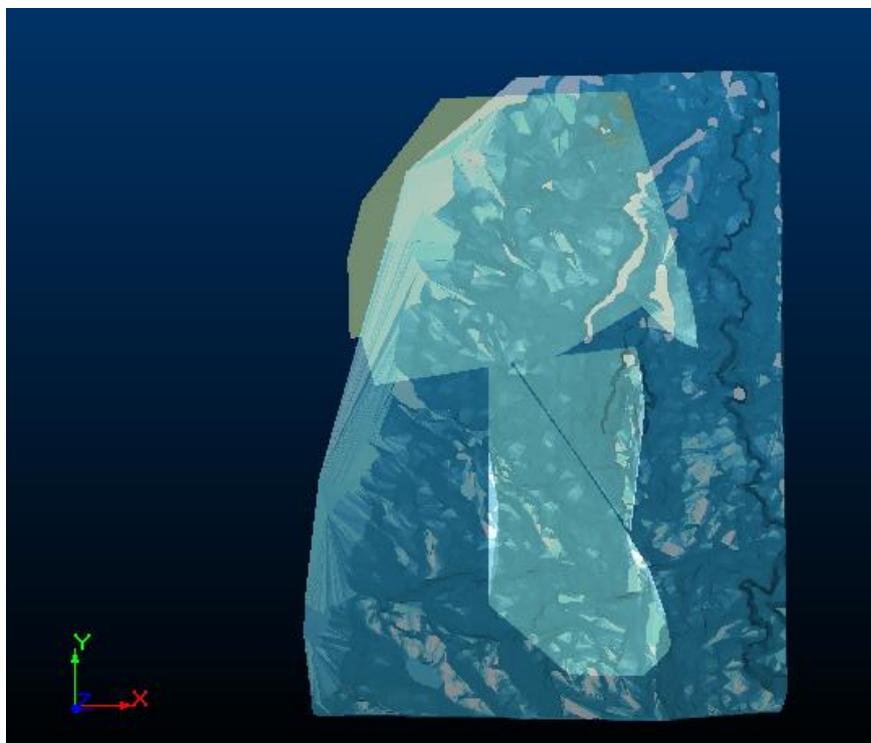
#### 4.3.4 Topografia e encaixe dos painéis

Para uma melhor compreensão foram geradas *wireframes* da topografia e das camadas de carvão já mapeadas, bem como inseridos painéis para fins de ideia de escala e de localização dentro da zona a ser trabalhada.

Vale salientar a notável continuidade da camada, o que favorece o método proposto. Observa-se também o mergulho da camada, cerca de  $15^\circ$ , o que dificultaria a operação por frentes de *Longwall* tradicionais, devido ao acentuado mergulho.

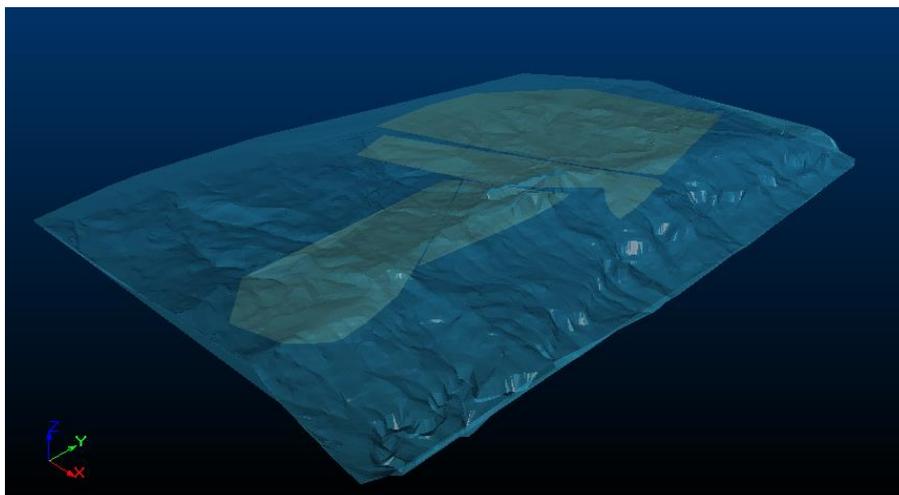
Propõe-se que se trabalhe os eixos dos painéis perpendiculares ao mergulho da camada (semelhante ao processo em prática na região), assim evitando operações excessivas em aclives e declives. (nas figuras abaixo o eixo Y corresponde à direção Norte e eixo X direção Leste)

Figura 83 - Vista superior da topografia e camadas de carvão.



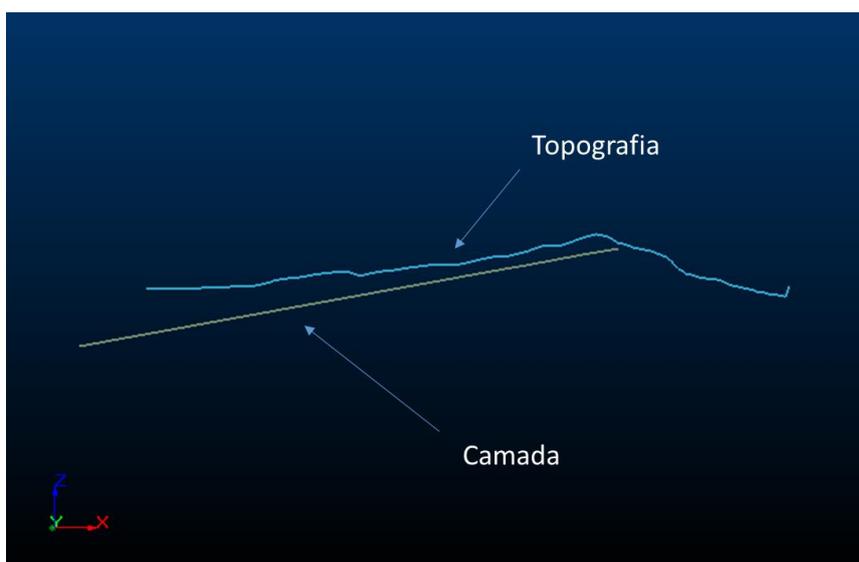
Fonte: Autoria própria

Figura 84 - Vista perspectiva da topografia e camada.



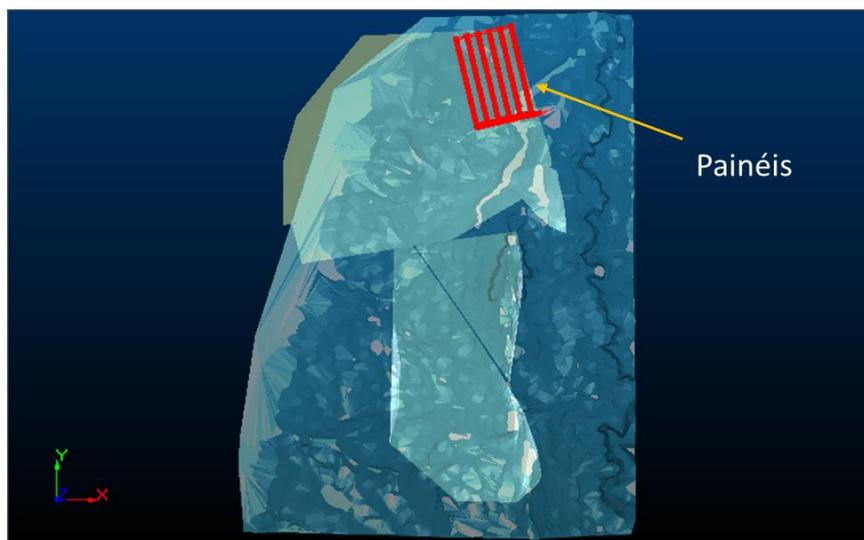
Fonte: Autoria própria

Figura 85 - Corte da topografia e camada.



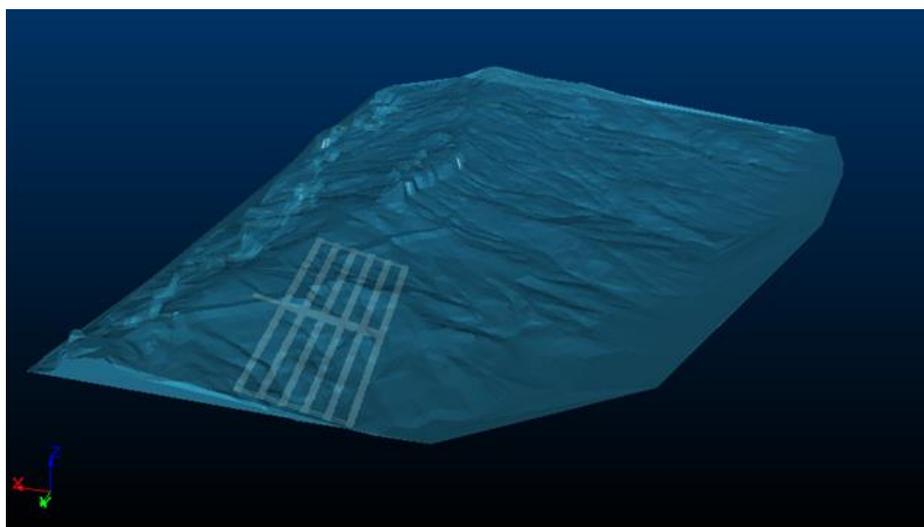
Fonte: Autoria própria

Figura 86 - Possível encaixe de painéis (1500m x 150m) na camada.



Fonte: Autoria própria

Figura 87 - Possível conjunto de painéis.



Fonte: Autoria própria

#### 4.3.5 Equipamentos

A mineração na camada em estudo possui limitações, sendo que o teto baixo (2m), as galerias relativamente estreitas (4m, aproximadamente) e principalmente o elevado gradiente de cerca de 15° requerem atenção especial. Com a dificuldade de mobilidade e a necessidade de realizar-se as operações em espaços reduzidos, faz-se necessário equipamentos que se

adequem a este cenário. Além de serem compatíveis com a produção estimada, onde uma frente tradicional de *LW* seria extremamente subutilizada.

Desta forma, sugere-se o uso de equipamentos compatíveis com o supracitado:

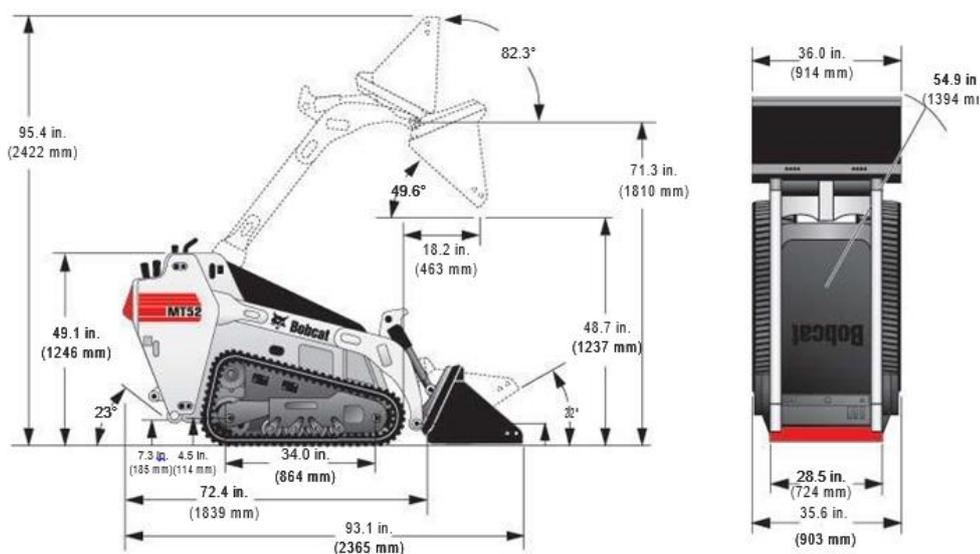
- *Mini Tracker Loader*

Modelo de referência Bobcat (MT52)

Possui especificações compatíveis com as desejadas, pode ser utilizado como equipamento de carga e descarga do minério no percurso até correia transportadora e também como minerador, ao se acoplar a um frisador adaptável.

Requer um operador direto.

Figura 88 - *Mini Tracker Loader*.



Fonte: Bobcat

### Rompedor hidráulico de controle remoto

Modelo de referência: Brokk (260)

Também compatível com as exigências de operação, equipamento voltado especificamente ao desmonte mecânico do minério, tem grande operacionalidade. Por ser possível de ser controlado a distância, não expõe o operador diretamente à frente de lavra, sendo

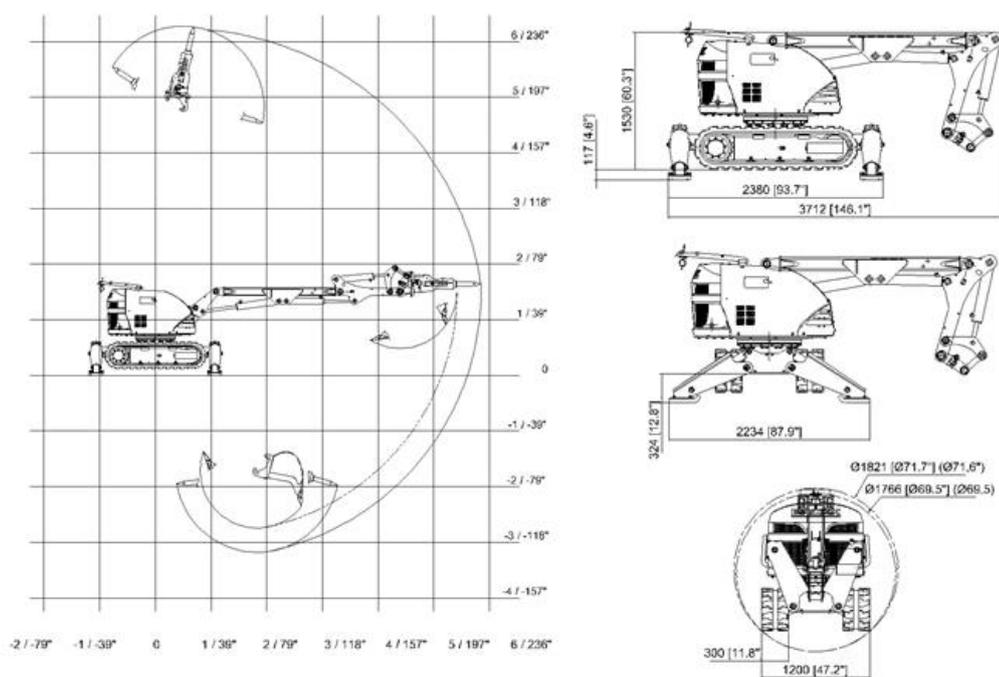
esta uma situação de maior segurança em comparação com equipamentos que requerem operação direta.

Figura 89 - Rompedor hidráulico de controle remoto Brokk 260.



Fonte: Brokk

Figura 90 - Dimensões Brokk 260.



Fonte: Brokk

Estes modelos de equipamentos apresentados e seus respectivos fabricantes são sugestões, sendo que diversos fabricantes apresentam linhas de equipamentos semelhantes e normalmente também apresentam opção de adaptar equipamentos para as necessidades do comprador. As próprias fabricantes dos equipamentos supracitados apresentam linhas completas de equipamentos semelhantes.

#### **4.3.6 Transporte do Carvão**

O transporte de carvão se dará desde a frente de lavra até a saída de mina por correia transportadora, a correia será alimentada por um alimentador que deve ser mantido próximo a frente de lavra.

Prevê-se que seja reservado um plano inclinado exclusivo para a correia transportadora e outro exclusivo para acesso de trabalhadores e equipamentos, isto devido ao fato de no caso em estudo se considerar mais fácil a execução de dois planos paralelos em virtude de um que comporte a correia e acesso de trabalhadores e equipamentos.

#### **4.3.7 Ventilação**

A ventilação é idealizada para operar em circuito tradicional para minas de *LW*, com entrada de ar pelos planos inclinadas e exaustão por *shaft*, que deve atender a demanda dos primeiros painéis minerados.

#### **4.3.8 Suporte de teto**

O suporte das minerações vizinhas é feito basicamente com prumos de madeira, medida considerada de baixa eficiência, porém para o caso da geologia e requerimento local, apresenta bons resultados, isto devido à boa qualidade de teto imediato.

Para tanto se recomenda a utilização de estabilizações de maior qualidade, para aumentar a segurança quanto às galerias principais (eixos), do tipo parafuso de teto, ou onde é possível utilizar perfis duplo T de aço, ao invés de escoras de madeira, isso devido a maior resistência mecânica de perfis duplo T.

Uma revisão da metodologia de utilização dos prumos também é de fundamental importância, visto a ineficiência do padrão de utilização de prumos.

Devido à qualidade do teto, um risco na implantação da lavra por *LW* seria a possibilidade de serem deixados grandes vãos expostos, como já citado, que ocasionaria eventuais problemas de excesso de tensões, rupturas generalizadas e *windblast*. Para prevenir estes efeitos recomenda-se o abatimento de teto forçado, com uso de explosivos, para que ocorra o alívio das tensões; outra alternativa é o enchimento periódico da área lavrada para também acomodamento de tensões. Quanto à segurança como um todo, cabe salientar que a proposta de lavra apresenta inferioridade no quesito segurança frente a uma frente tradicional de *LW*, seja pela velocidade de lavra ou pela inexistência de um sistema de suporte tal como os sistemas de *shields*.

#### **4.3.9 Pilares e Pilares Barreiras**

Foram considerados para fins de projeto conceitual pilares de 25x30 e 15x30 metros, pois, ao não se conhecer as camadas a serem trabalhadas e as propriedades geomecânicas do maciço, se considerou prudente trabalhar com estas dimensões de pilar, para fins de projeto conceitual.

A considerar também que estas dimensões de pilares representam um isolamento das tensões de um painel nos demais, assim prevenindo rupturas generalizadas.

Foram considerados também pilares barreiras de 30 metros separando os painéis de *LW* das galerias eixos.

Cabe salientar que estas dimensões estão superdimensionadas e muito provavelmente há de se investir em estudos geotécnicos, sendo que eles devem respaldar dimensões reduzidas de pilares, isto devido a cobertura de relativa pequena espessura e qualidade geomecânica da camada.

## 5. CAPÍTULO V

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base no levantamento do histórico da implementação do método de *LW* no Rio Grande do Sul e com o estudo conceitual apresentado para este estado, fica nítido o potencial de suas jazidas para implementação de lavra por frente de *LW*, este potencial respaldou o presente estudo que teve por objetivo de lançar luz acerca deste método de lavra até o momento preterido no Brasil.

Foram abordados os mais amplos aspectos do método, desde seu histórico de implementação, *layout* de mina, equipamentos até seus aspectos geomecânicos.

Justamente os aspectos geomecânicos se mostraram como pontos de fundamental importância à aplicabilidade do método, assim como em todos os casos de lavra subterrânea, pois o conhecimento geomecânico como um todo se mostra com fator determinante para o sucesso de uma operação de lavra, por ser responsável por respaldar a confiabilidade das estruturas (escavações) e garantir a correta aplicação do método de lavra.

No quesito implementação do método, este estudo validou próximos passos para aplicação do método na lavra de carvão mineral no Brasil; tanto para abordagem tradicional do método, demonstrado no primeiro estudo, quanto para uma abordagem alternativa do método, demonstrado no segundo estudo exposto. No que tange a abordagem tradicional, o Rio Grande do Sul mostra potencial para *LW* de acordo com o estudo conceitual apresentado. Já aplicações em outros cenários também podem ser estudadas, a exemplo do segundo estudo conceitual apresentado, não limitando o método a um cenário tão restrito quanto o estigmatizado.

Cabe salientar também as restrições de mercado para a aplicação no Brasil, por ser este um método de alta produção a necessidade de um mercado que suporte as altas taxas de produção, atualmente inexistente no Brasil. Uma alternativa de mercado seria a possibilidade de gaseificação do carvão para o uso industrial. Alternativa em estudo no país.

Além das restrições de mercado uma limitação para a aplicação do método é a existência de falhamentos em excessos, devido a impossibilidade da frente de lavra passar pelos mesmos, o que refletiria na necessidade de remobilização de toda a frente de lavra. Devido a isso estudos geoestruturais extensivos são de fundamental importância para aplicação do método. Por exemplo, sabidamente temos no estado de Santa Catarina, jazidas com a ocorrência de vários falhamentos, o que dificulta a utilização de frente por *LW*. Além destas jazidas apresentarem teto de boa qualidade o que se reflete em um problema para a ocorrência de *caving*. Já as jazidas

do estado do Rio Grande do Sul, não apresentam grande ocorrência de falhamentos e a apresentam teto de média a baixa qualidade. Condições ideais para a aplicação de *Longwall*.

Por fim, conforme os estudos realizados, podemos enumerar pontos determinantes do método, aqueles que se mostraram merecedores de grande desprendimento de energia de trabalho, sendo os seguintes fundamentais para sucesso na implementação.

- i. Geomecânica
- ii. Escolha de equipamentos
- iii. Adequação de desenvolvimento com produção

## 5.2 TRABALHOS FUTUROS

Devido ao caráter pioneiro dos estudos realizados, tanto referente a levantamento bibliográfico de características das operações por *Longwall*, quanto aos estudos conceituais em operações de *LW*, a grande maioria dos pontos são passíveis de estudos mais aprofundados.

No que se refere às características e operação do método, os pontos específicos referentes à geomecânica de painéis de *LW*, no quesito dimensionamento de pilares, estudos mais aprofundados são necessários, uma vez que até o presente momento até mesmo o dimensionamento tradicional de pilares aplicado ao método de C&P não desfruta de consenso de especialistas da área. Então no caso específico da lavra por *LW* a carência de estudos é grande.

Outro quesito de maior importância referente a área de geomecânica é o fator subsidência, ponto ainda de tratamento empírico mundo afora, e de conhecimento praticamente nulo no Brasil que merece atenção.

Quanto à proposta conceitual de operação por *LW* no Rio Grande de Sul, a jazida demonstra aptidão para a lavra pelo método, e conceitualmente a viabilidade técnica foi especificada, fica válido, então, um aprofundamento nas pesquisas, sobretudo a necessidade de campanhas de sondagem mais extensivas que respaldem estudos de pré viabilidade e viabilidade.

Estudo comparativo entre a aplicação de *LW* e C&P com recuperação de pilares para o Brasil, sobretudo para o estado de Santa Catarina, que hoje operam com suas lavras perto do limite econômico, para a lavra sem recuperação de pilares.

## REFERÊNCIA

Brasil, Ministério do Trabalho e do Emprego; **Norma Reguladora Nº 22: Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração**, Portaria MTE nº 2037. 1999.

ASSAN, A. E. **Método dos elementos finitos: primeiros passos**. 2 ed. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2003.

BAUER, R. A. **Mine Subsidence in Illinois: Facts for Homeowners**, Circular 560, ILLINOIS STATE GEOLOGICAL SURVEY. 2006.

Barczak, Thomas M. **A Retrospective Assessment of Longwall Roof Support with a Focus on Challenging Accepted Roof Support Concepts and Design Premises**. 25th International Conference on Ground Control in Mining, August 1-3, 2006, Morgantown, West Virginia. 2006.

BESSINGER, Stephen L.. Longwall Mining. In: PETER DARLING (Org.). **SME Mining Engineering Handbook**. 3. ed. Usa: SME, 2011. Cap. 13. p. 1399-1415.

BIENIAWSKI, Z. T. 1973. **Engineering Classification of Jointed Rock Masses**, **Transactions of South Africa Institute of Civil Engineers**, Vol. 15, p. 335-344.

BIENIAWSKI, Z. T. 1989. **Engineering Rock Mass Classification**, John Wiley & Sons, EUA, 251 p.

BIENIAWSKI, Z.T., 1969, **In-situ large scale testing of coal**, Proceedings of Conference on In-Situ Investigations in Soil and Rocks, British Geotechnical Society, pág. 67-74, Londres.

BISE, Christopher J.. Underground Mine Development and Room-and-Pillar Mining. In: CHRISTOPHER J. BISE (Usa) (Ed.). **Modern American Coal Mining: Methods and Applications**. Usa: SME, 2013. Cap. 8. p. 283-307.

BRADY, B.H.G. BROWN, E.T. **Rock Mechanics For underground mining**, Chapman & Hall, 2º ed, 572 pag, 1995

CABRAL, J. S. P. SANTOS, S. M. FILHO, I. **Bombeamento Intensivo de Água Subterrânea e Riscos de Subsidência de Solos**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 11 n.3 Jul/Set 2006

CHEKAN, G. & LISTAK, J. **Design Practices for Multiple-Seam Longwall Mines**, Information Circular 9360 , U. S. Bureau of Mines, Pittsburgh, PA, 35 pp., 1993.

DEERE, D. U. 1963. **Technical Description of Rock Cores for Engineering Proposes, Rock Mechanics of Engineer Geologists**, Vol. 1, p. 16-22.

Demichiei, J. Beck, K. **Continuous Miner vs Longwall Productivity Measures**. Proceedings of Longwall USA Conference and Exhibits, Pittsburgh, p. 39-49. June 2001

EDWARDS, J.L. **Seismic monitoring for wind blast prediction, Seminar on Mine Seismicity and Rockburst Management in Underground Mines, Australian Centre for Geomechanics**, 3–4 September 1998, Section 12, 1998. pp. 1–4.

Energy Information Administration. *Longwall mining*. DOE/EIA-TR-0588. Washington, DC, March 1995.

Energy Information Administration. *Annual coal report*. DOE/EIA-TR-20585. Washington, DC, April 2015.

FIORI, A. P. CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. 2. ed. rev. e ampl. – Curitiba: Ed. UFPR, 2009. 604p.

GOBBI, F. **Estudo do comportamento geomecânico de rochas efusivas da Formação Serra Geral e sua aplicação na modelagem numérica de túneis**. UFRGS, 2011. 246 p. Teses de Doutorado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

GOMES, Aramis Pereira et al . **Carvão fóssil**. Estud. av., São Paulo , v. 12, n. 33, p. 89-106, ago. 1998. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S010340141998000200006&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010340141998000200006&lng=pt&nrm=iso)>. Acesso em 25 ago. 2015.

HARRISON, John P. Mine Subsidence. In: PETER DARLING (Ed.). **SME Mining Engineering Handbook**. 3. ed. Usa: SME, 2011. Cap. 8. p. 627-644.

HUMPHRIES P.; POULSEN B., "**Geological and Geotechnical Influences on the Caveability and Drawability of Top Coal in Longwalls**". Underground Coal Operators' Conference. Paper 4, 2008.

HEASLEY, Keith A. Ground Control. In: CHRISTOPHER J. BISE (Usa) (Ed.). **Modern American Coal Mining: Methods and Applications**. USA: SME, 2013. Cap. 3. p. 51-84.

LUO, Yi; ZHOU, Lihong. Coal Mine Ventilation. In: CHRISTOPHER J. BISE (Usa) (Ed.). **Modern American Coal Mining: Methods and Applications**. USA: SME, 2013. Cap. 4. p. 85-155.

LINEBERRY, G. T.; PAOLINI, A. P. Equipment Seleccion and Sizing. In: HARTMAN, Howard L. (Ed.). **SME Mining Engineering Handbook**. 2. ed. USA: SME, 1992. Cap. 17. p. 1550-1571.

MARK, C. 1990. **Pillar Design Methods for Longwall Mining**. Information Circular IC 9247. Washington, DC: U. S. Bureau of Mines.

MARK, C. 2000. **Design of roof bolt systems**. In Proceedings: New Technology for Coal Mine Roof Suport. Information Circular IC 9453. Pittsburgh: National Institute for Occupational Safety and Health. pp. 111-131.

MAYES, T.I. GILLIES, A.D.S G. **An Analysis of Current Australian Longwall Ventilation Methods, Proceedings**, Seventh International Mine Ventilation Congress, Editor, S Wasilewski, Krakow, Polish Academy of Sciences,793-800 June 2001.

MISHRA, Brijes. Longwall Mining. In: CHRISTOPHER J. BISE (Usa) (Ed.). **Modern American Coal Mining: Methods and Applications**. USA: SME, 2013. Cap. 9. p. 309-333.

NIETO, Antonio. Selection Process for Underground Soft-Rock Mining. In: PETER DARLING (Ed.). **SME Mining Engineering Handbook**. 3. ed. USA: SME, 2011. Cap. 6. p. 377-384.

Obert, L. e Duvall, W.J. (1967) **Rock mechanics and design of structures in rock**, John Wiley & Sons, 650 pág., Nova York, EUA.

PALMSTROM, A. 1982. **The Volumetric Joint Count – A Useful and Simple Measure of the Degree of Rock Joint**, in: Proceedings, 4 Internacional Congress of Internacional Associate of Engineer Geologists, Delhi, Índia, Vol. 31, nº 3, p. 279-284.

PENG, S.S., **Coal Mining Ground Control**, Morgantown Printer, 600 pag, 2008.

PENG, S. S. **Surface Subsidence Engineering**, Morgantown Printer, 161 pag, 1992.

PENG, S. S. **Longwall Mining**, Morgantown Printer, 2º ed, 621 pag, 2006.

PENG, S. S.; CHIANG, H. S. Longwall Mining. In: HARTMAN, Howard L. (Ed.). **SME Mining Engineering Handbook**. 2. ed. Usa: SME, 1992. Cap. 20. p. 1780-1788.

PRIEST, S. D; HUDSON, J. A. **Estimation discontinuity spacing and trace length using scanline survey**, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 18, p. 183-197, 1981.

PRIEST, S. D. **Discontinuity analysis for rock Engineering**, Chapman & Hall Pub, 473p. Londres. 1993.

SALAMON, M.D.G. e MUNRO, A.H.A., **A study of the strength of coal pillar**. J. S. African Institute of Mining and Metallurgy, vol.68, pp.55-67, Johannesburg, África do Sul, 1967.

SALAMON, M. D. G. ORAVECZ. K. I. **Rock mechanics in coal mining**, Chamber of Mines of South Africa, 119 pg. África do Sul. 1976.

SECCATORE, J. MARIN, T. TOMI, G. **Aplicabilidade de lavra “longwall top coal caving” nas jazidas de carvão na região sul do brasil**. Disponível em <[http://www.ufrgs.br/rede-carvao/Sess%C3%B5es\\_A1\\_A2\\_A3/A3\\_ARTIGO\\_02.pdf](http://www.ufrgs.br/rede-carvao/Sess%C3%B5es_A1_A2_A3/A3_ARTIGO_02.pdf)> Acesso em Jul. 2015.

STACE, Rod. Soft-Rock Ground Control. In: PETER DARLING (Ed.). **SME Mining Engineering Handbook**. 3. ed. Usa: SME, 2011. Cap. 8. p. 595-610.

TIEN, Jerry C. Room-and-Pillar Mining in Coal. In: PETER DARLING (Ed.). **SME Mining Engineering Handbook**. 3. ed. Usa: SME, 2011. Cap. 13. p. 1339-1346.

Vakili, A.; Hebblewhite B.K. **A New Cavability AssesSMent Criterion for Longwall Top Coal Caving**, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, n.47, pp. 1317-1329, 2010

VERMEER, PA (2001). **ON a smart use or 3D-FEM in tunnel-**. ling. Bulletin of the PLAXIS Users Association (NL), N° 11,. Delf.

WISCHUSEN, R. **Strategy leads to caving on demand, Australia’s Longwalls**, September, 1999. p. 28.

WEST VIRGINIA GEOLOGY AND ECONOMIC SURVEY. HOMEOWNER'S GUIDE TO GEOLOGIC HAZARDS. 2007. Acessado em: <http://www.wvgs.wvnet.edu/www/geohaz/geohaz3.htm>

ZINGANO, A. C. **Modelamento Geomecânico para o Dimensionamento de Pilares de Carvão**. UFRGS, 2002. 201 p. Tese de Doutorado – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

ZINGANO, A, STEIN, M, KARAS, R., **Estimativa do comportamento mecânico das camadas que formam o sistema piso-camada-teto em minas de carvão**, VI Congresso brasileiro de Mina Subterrânea e VI Congresso Brasileiro de Mina Céu-aberto – IBRAM, Belo Horizonte, setembro de 2010.

ZINGANO, KOPPE E COSTA, **Pilar-barreira entre painéis de lavra para a mina de carvão**, REM – Revista da Escola de Minas, Vol. 60, Serie 2, PP 219-226, UFOP – MG, 2007.

ZINGANO, A. CARVALHO, A. CANTINI, F. **Projeto de Lavra Subterrânea de Carvão, Jazida Triunfo: Fase de Pré-Viabilidade**, Boletim técnico da Fundação Luiz Englert, Porto Alegre, 2015. Não publicado.

Zorzi, L., Agostini, I. M. e Gonzatti, C., 1991, **Metodologia para dimensionamento de pilares em minas de carvão do sul do Brasil**, Boletim Técnico nº23, CIENTEC, Porto Alegre, Brasil.