

Geomecânica para a Lavra de Carvão por *Longwall*

Fernando Alves Cantini Cardozo

UFRGS, Porto Alegre, Brasil, fernando.cantini3@hotmail.com

André Cezar Zingano

UFRGS, Porto Alegre, Brasil, andrezin@ufrgs.com

Diogo Peixoto Cordova

UFRGS, Porto Alegre, Brasil, diogocordova@me.com

Maurício Zampiron

UFRGS, Porto Alegre, Brasil, mauriciozpn@gmail.com

RESUMO: Atualmente a mineração de carvão mineral no Brasil se dá por dois métodos de lavra: a céu aberto no estado do Rio Grande do Sul e principalmente subterrânea, pelo método de Câmaras e Pilares, em Santa Catarina e no estado do Paraná. Este segundo método apresenta uma baixa recuperação de reservas e altos custos produtivos, o que a vários anos respalda a busca por um método de lavra mais eficiente. O método de *longwall* é considerado mundialmente o mais eficiente método de lavra subterrânea de carvão e já foi utilizado no século passado no estado do Rio Grande do Sul. Por ser este um método de lavra que se baseia em alta mecanização e que admite o posterior colapso de teto das áreas já mineradas, as condições geomecânicas da jazida são pontos condicionantes para aplicação e eficiência do mesmo. Este trabalho se propôs a elencar os principais pontos referentes a geomecânica no método de lavra por *longwall*, de modo a lançar luz acerca do tema e respaldar futuros estudos de aplicação do mesmo no Brasil. Foram elencadas e discutidas as características tidas como ideais para a ocorrência do caving, ocorrência em que se baseia o método; o dimensionamento de pilares para as galerias auxiliares aos painéis de lavra; estimativa de carga suportes do tipo shield para a frente de lavra; e método de estimativa de subsidência em superfície em virtude da geometria da lavra subterrânea. Quanto as características tidas como ideais para aplicação do método temos a necessidade de um teto imediato de média a baixa resistência para que ocorra o *caving* o qual previne o acúmulo excessivo de tensões oriundas das escavações da extensa frente de lavra característica do método. Porém este colapso se refletirá em subsidência na superfície a qual é estimada por métodos empíricos, gráficos e ajuste de funções. Isto se faz necessário para estimativa de possíveis áreas e magnitude de danos em superfície. No quesito dimensionamento de pilares verificou-se a necessidade de superdimensionamento em relação ao dimensionamento de pilares para o método de Câmaras e Pilares, este superdimensionamento é necessário devido a redistribuição das tensões da área colapsada sobre os pilares das galerias auxiliares. Este dimensionamento de pilares para *longwall* é feito por método empírico baseado em casos de sucesso de minas que utilizam o método.

PALAVRAS-CHAVE: Geomecânica, lavra subterrânea, carvão, *longwall*.

1 INTRODUÇÃO

O método de lavra por *longwall* é tradicionalmente um método aplicado a lavra subterrânea de carvão, onde não é mantida a

integridade do teto imediato acima do carvão já minerado (BRADY; BROWN, 1995). A intenção de permitir que ocorra o deslocamento deste teto é para que ocorra o alívio de tensões atuantes sobre a tradicionalmente extensa frente

de lava, está altamente mecanizada. Na figura 1 temos uma perspectiva da operação de uma frente de *longwall*.

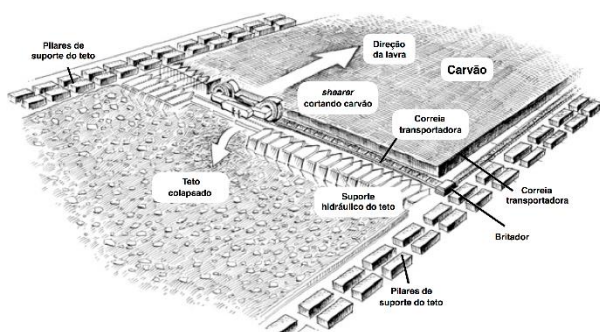


Figura 1. Perspectiva de uma frente de *longwall*
Fonte: Adaptado de Peng, 2006

Atualmente o método de lava por *longwall* é conhecido mundialmente por ser o de maior produtividade, quanto a lava subterrânea de carvão. Em 2013 os Estados Unidos produziram 189,2 Mton de carvão por *longwall*, neste mesmo período 53% da produção em minas subterrâneas dos EUA correspondia ao *longwall*. 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).

1.1 Histórico no Brasil

Não é recente a intenção de aplicação de lava pelo método de *longwall* no Brasil. Dentre as jazidas de carvão brasileiras é de conhecimento que as jazidas do Rio Grande do Sul são as que mais se identificam com as exigências de aplicação do método de *longwall* tradicional. Isto por apresentarem continuidade e espessura próprias para a aplicação e poucas falhas geoestruturais, ponto determinante para aplicação do método. Tendo em vista isso, o único caso de operação por *longwall* no Brasil se deu neste estado, nos anos 70, na Mina do Leão I, no município de Minas do Leão. O cenário para esta implementação, foi de busca por uma lava que apresentasse maior recuperação de jazida, uma produção mais elevada, além de uma intenção desbravadora da CRM (Companhia Rio-grandense de Mineração) em implementar o método e abrir portas no Brasil para o mesmo. (CARDOZO, 2015).

O *longwall* na mina do Leão I operou por 5 anos minerando um total de 5 painéis de 70 metros de largura em uma camada de 1,75 metros. Curiosamente as características geomecânicas que embasaram a opção pela lava por *longwall* foram fatores responsáveis pela paralização da lava. Devido à baixa competência do teto imediato, fragmentos de rocha danificavam componentes da frente de lava, os quais eram de difícil reposição. Isto devido ao tipo de suporte adotado na época composto pelos hoje obsoletos *chocks* ao invés dos suportes do tipo *shield*.

2 GEOMECÂNICA PARA LONGWALL

Para a aplicação de *longwall* pelo método tradicional algumas condições geomecânicas devem ser atendidas, para que a operação de lava seja exitosa. Resumidamente a jazida deve apresentar um carvão de média a baixa resistência permitindo o desmonte mecânico pelos equipamentos *shearer*, na frente de produção, e *continuous miner* ou *miner bolter*, nas frentes de desenvolvimentos (PENG, 2006). Já o teto imediato deve apresentar também uma baixa resistência para que após a passagem da frente de lava ocorra o *caving*, colapso de teto, sob a área já minerada. Este é o ponto principal em que o método se baseia, pela necessidade do mesmo prover um alívio de tensões sobre a frente de lava, que de modo contrário sofreria com a ocorrência de colapsos bruscos e altamente danosos. Devido à necessidade de um teto de baixa resistência, para ocorrência de *caving*, surge outro desafio ao método, a necessidade de estabilização das galerias auxiliares.

2.1 Caving

Humphries e 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. Na figura 2 temos uma seção de uma frente de *longwall* onde o suporte *shield* protege o *shearer* do material colapsado (*caving*).

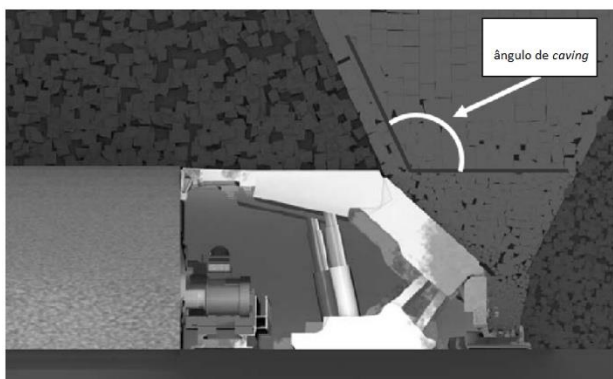


Figura 2. Seção de uma frente de *longwall* mostrando o ângulo de *caving*.

Fonte: Adaptado de Seccatore, 2012.

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 e 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.

Devido 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*.

$$CI = -2,64 + 0,0395 H - 0,72 UCS + 0,191 h \quad (1)$$

Seccatore *et al* (2012) diz que uma rocha com resistência abaixo de 25 MPa (UCS) e de profundidade superior a 150 metros oferece 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 de carvão, além de requererem suportes mais robustos para a frente de lavra e gerando 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 (AL) (figura 3).

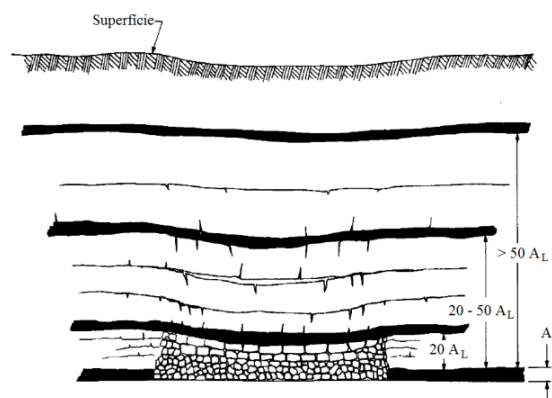


Figura 3. Delimitação de zonas perturbadas devido à altura de lavra (AL).

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

Segundo Chekan *et al* (1993) as zonas de perturbação apresentam as seguintes características (Tabela 1):

Tabela 1. Características das zonas perturbadas em escavações de *longwall*.

ZONAS	INTERVALO	CARACTERÍSTICAS
Zona Colapsada	Região de Colapso completo	3 -6 AL
	Região de Colapso parcial	6 -12 AL
	Limite superior da zona de colapso	12 -20 AL
Zona Fraturada	20 -50 AL	
Zona Flexionada	50 AL- superfície	

Fonte: Adaptado de Cheken *et al*, 1993

2.2 Dimensionamento de Pilares

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 proposto por Bieniawski para dimensionamento de pilares. Para a resistência do pilar é considerada a metodologia de Bieniawski.

$$\sigma_p = \sigma_1(0,64 + 0,36 \frac{w}{h}) \quad (2)$$

Onde σ_1 corresponde à resistência da camada e σ_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:

$$B_p = \frac{\sigma_p w l_p}{l_p + w_e} \quad (3)$$

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:

$$B = \sum_i^n B_{pi} \quad (4)$$

Carga sobre o *headgate*:

$$L_H = L_d + L_s F_h R \quad (5)$$

Carga sobre o *bleeder*:

$$L_B = L_d + L_s R \quad (6)$$

Carga sobre o *tailgate*:

$$L_r = L_d + (1 + F_t) L_s \quad (7)$$

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:

$$R = 1 - \left[\frac{D - w_t}{D} \right]^3 \quad (8)$$

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

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

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).

$$FS = \frac{B}{L} \quad (10)$$

2.3 Análise de subsidência

No método de lavra de Câmaras e Pilares, os pilares têm a função de sustentação do maciço

rochoso evitando a subsidência na superfície e garantindo a estabilidade das galerias abertas. 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 consequentemente permitindo a subsidência na 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, a ocorrência de subsidência 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 (PENG, 1992 e 2006), tais 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 4 mostra a dinâmica típica da subsidência proveniente da lavra por LW.

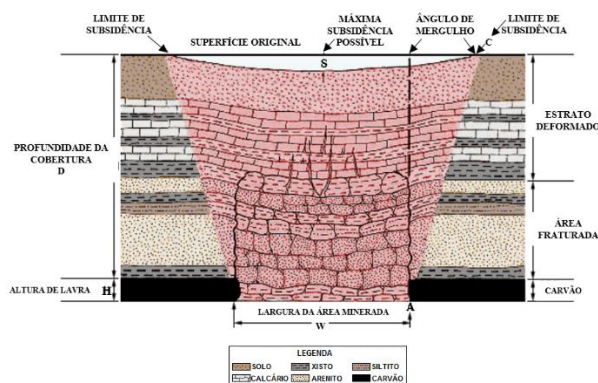


Figura 4. Efeitos do abatimento de teto na lavra por *longwall* e subsidência na superfície. Fonte: Adaptado de West Virginia Geological and Economic Survey¹

Verificada a possível ocorrência de danos causados pela subsidência, uma melhor compreensão da mesma se faz necessária; de maneira que uma área de abrangência seja mensurada, assim como um possível perfil dela.

¹ Disponível em <
<http://www.wvgs.wvnet.edu/www/geohaz/geohaz3.htm>>
Acesso em ago. 2015

Dessa forma, podem ser tomadas previamente medidas preventivas ou mitigadoras. Como ferramentas para o estudo de subsidência em carvão, podemos fazer uso de diversos métodos empíricos apresentados em bibliografias, 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 5 são apresentados perfis de subsidência em função da largura do painel a ser lavrado no método de LW.

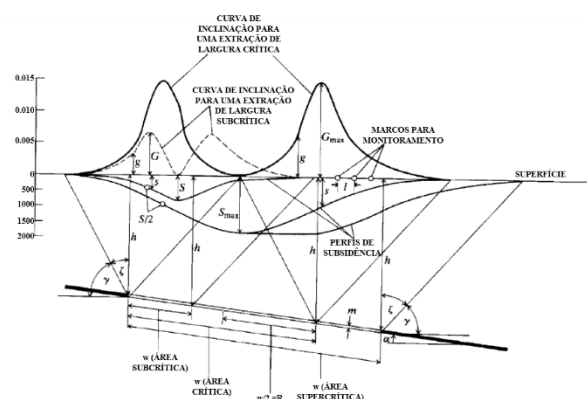


Figura 5. Distribuição empírica para a subsidência em função do tamanho do painel.

Fonte: Adaptado de NCB, 1975 *apud* Brady e Brown, 1995²

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.

Luo e Peng (1997) *apud* Peng (2006), apresentam uma fórmula empírica para estimar a largura crítica relacionada com a máxima subsidência.

$$W_c = 100 + 1,048h \quad (11)$$

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

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

Peng (2006 e 1992) e diversos autores citam que a máxima subsidência sempre irá se concentrar no centro do painel explorado (figura 6), o que também irá ocorrer durante o avanço da lavra, ou seja, a máxima subsidência sempre estará no centro da área já colapsada (lavrada).

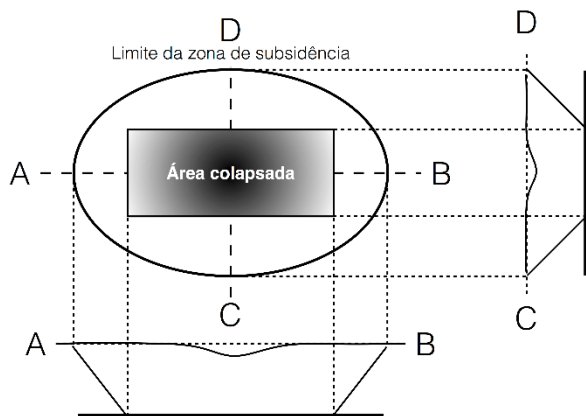


Figura 6. Forma básica da subsidência em superfície.
Fonte: Adaptado de Peng, 1992

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).

$$S_{max} = a * m \quad (12)$$

Onde (a) é ainda em função de P , um coeficiente das propriedades estratigráficas.

$$a = 0,5(0,9 + P) \quad (13)$$

Peng (1992) apresenta diferentes maneiras de determinação do coeficiente P : desde maneira direta e simplificada (Tabela 2) a métodos de maior complexidade com outros fatores ponderadores.

Tabela 2. Coeficientes 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

³ National Coal Board (1975) **Subsidence Engineers Handbook**, 2nd (ver.) edn, National Coal Board Mining Dept, London. *apud* PENG, 1992.

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

$$S_0 = a * m * \sqrt{\frac{w_1}{w_c} * \frac{w_2}{w_c}} \quad (14)$$

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.

$$S(x) = 1/2 * S_0 * (\tanh \frac{cx}{H}) \quad (15)$$

No modelo de tangente hiperbólica (equação 15) 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 medida a partir do centro da subsidência.

Outra opção para a estimativa de subsidência é a solução gráfica (NCB, 1975 *apud* PENG, 1992³), está mais prática para estimativas iniciais, porém sem considerar as características geomecânicas dos estratos.

Primeiramente utiliza-se o gráfico da figura 7 para determinar a subsidência máxima (S) em função da largura do painel (w), da profundidade (h) e da espessura da camada (m).

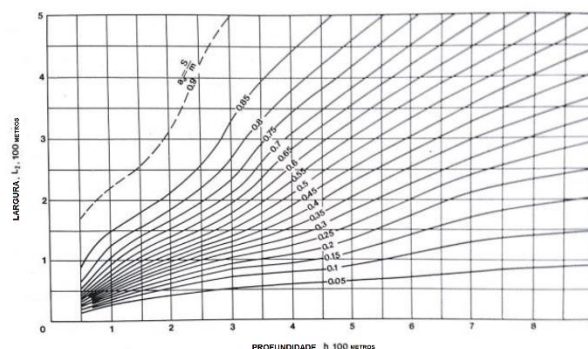


Figura 7. Determinação de subsidência máxima.
Fonte: Adaptado de NCB, 1975 *apud* Peng, 1992³

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

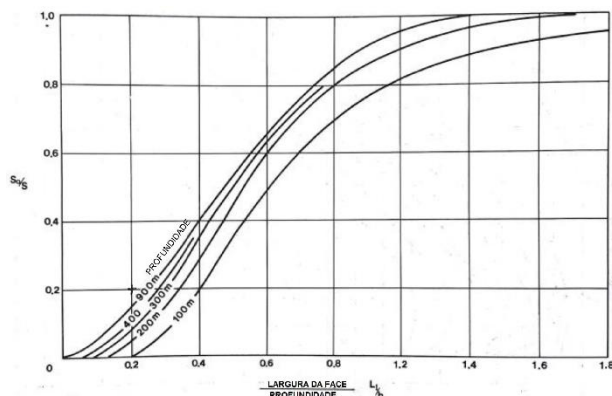


Figura 8. Correção da subsidência para máxima.
Fonte: Adaptado de NCB, 1975 *apud* Peng, 1992⁴

Por fim utiliza-se o gráfico da figura 9 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 obtermos a profundidade encontramos a posição.

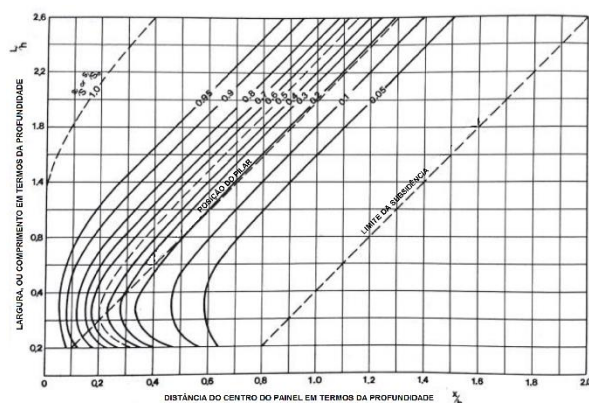


Figura 9. Relações para determinação de perfil de subsidência.
Fonte: Adaptado de NCB, 1975 *apud* Peng, 1992²

Abaixo (Tabela 3) é apresentada a máxima

subsidência estimada pelo método gráfico para diferentes profundidades (NCB, 1975 *apud* PENG, 1992²).

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

Subsidência				
Profundidade (m)	Largura do painel (m)			Máxima
	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

3 CONCLUSÕES

O levantamento realizado na bibliografia específica ao tema; juntamente com a consulta a profissionais com experiência, nos permite concluir que os pontos citados referentes a geomecânica são fundamentais para que haja uma operação exitosa de lavra.

Todos os aspectos devem ser amplamente considerados e estudados, permitindo uma evolução dos estudos técnicos conceituais de implantação até estudos de pré-viabilidade e viabilidade.

A utilização de métodos numéricos no método de lavra por *longwall* se mostra pouco evoluída, isto se deve em parte ao fato das elevadas dimensões geométricas (CARDOZO, 2015), fator que leva a geração de grandes modelos que por sua vez requerem grandes capacidades computacionais. Assim o uso dos métodos empíricos ainda se faz muito presente, como guia inicial dos projetos, já que este é baseado em estudos de casos de sucesso e até mesmo de fracassos mundo afora.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao LPM/UFRGS pela oportunidade de realização deste trabalho, ao professor Jorge Gavronski pelas informações acerca do *longwall* do Leão I, aos organizadores do evento pela possibilidade de divulgação do

⁴ National Coal Board (1975) **Subsidence Engineers Handbook**, 2nd (ver.) edn, National Coal Board Mining Dept, London. *apud* PENG, 1992.

conhecimento e aos demais profissionais que contribuiram para que este trabalho fosse realizado.

REFERÊNCIAS

- Brady, B. H. G. e Brown, E. T. (1995) *Rock Mechanics For underground mining*, Chapman & Hall, 2nd ed, 572 p.
- Cardozo, F. A. C. (2015) *Longwall: Estado da Arte, Geomecânica, Planejamento e Aplicação*. Dissertação de mestrado, PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 133 p.
- Chekan, G. e Listak, J. (1993) *Design Practices for Multiple-Seam Longwall Mines*, Information Circular 9360, U. S. Bureau of Mines, Pittsburgh, PA, 35 p.
- Energy Information Administration (2015) *Annual coal report*. DOE/EIA-TR-20585. Washington, DC.
- Hartman, H. L. (1992). *SME Mining Engineering Handbook*. 2nd ed. USA: SME, 2 v. 2394 p.
- Humphries P. e Poulsen B. (2008) Geological and Geotechnical Influences on the Cavability and Drawability of Top Coal in Longwalls. *Underground Coal Operators' Conference*. p. 56-66.
- Mark, C. (1990) Pillar Design Methods for Longwall Mining. *Information Circular IC 9247*, U. S. Bureau of Mines, Washington, DC.
- Peng, S. S. (1992) *Surface Subsidence Engineering*, Morgantown Printer, 161 p.
- Peng, S. S. (2006) *Longwall Mining*, Morgantown Printer, 2nd ed, 621 p.
- Seccatore, J. Marin, T. e Tomi, G. (2012) *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> Acesso em Jul. 2015.