

Estudo Paramétrico do Formato das Zonas Plastificadas em Torno de Escavações Subterrâneas.

Bruno César Ribeiro da Silva

Professor no Instituto Federal de Minas Gerais – IFMG - Campus Congonhas - Brasil

e-mail: bcminas@yahoo.com.br

Rodrigo Peluci de Figueiredo

Professor Associado ao Departamento de Engenharia de Minas, UFOP.

Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP - Brasil

e-mail: rpfigueiredo@yahoo.com.br

RESUMO: O Método de Convergência-Confinamento (MCC) é um método simplificado que analisa analiticamente a interação rocha/suporte, usando a hipótese de simetria axial, o que proporciona um conhecimento simplificado do processo de interação rocha-suporte que ocorre em túneis de formato real e perto da face da escavação. A rigor, a análise do MCC é bidimensional, mas os resultados da análise podem ser aplicados aos problemas tridimensionais que surgem na face da escavação, Panet (1995). O presente trabalho vem contribuir para um melhor entendimento da Zona Plástica formada em torno das escavações subterrâneas, tanto para o formato Circular quanto para outros 8 formatos ou seções de escavações diferentes, utilizados em obras civis, de mineração ou outras áreas afins, variando através de simulações numéricas a razão que há entre a tensão horizontal e a tensão vertical, K , e a profundidade, z . Tal análise irá verificar o comportamento da Zona Plástica em torno das escavações e a dispersão do Raio Plástico entre a solução analítica de Duncan Fama (1993) e as soluções computacionais realizadas através do software *Phase2 versão 8.0* e o software *RocSupport versão 3.0* ambos da Rocscience Inc., para um maciço rochoso hipotético, considerado, relativamente, como brando.

PALAVRAS-CHAVE: Convergência-Confinamento, Curva de Reação do Maciço, Curva Característica do Suporte, Raio Plástico, Zona Plástica, Escavações Subterrâneas, Simulações Computacionais.

1 INTRODUÇÃO

O método de “Convergência-Confinamento” é uma ferramenta analítica que permite descrever a mecânica da interação rocha-suporte para escavações subterrâneas. Embora o termo tenha sido desenvolvido nas décadas de 1960 e 70 (ver, por exemplo, *AFTES* - Associação Francesa de Obras Subterrâneas 1978), o método é conhecido pelo menos desde a publicação de Fenner (1938), (Carranza-Torres & Fairhurst, 2000a).

A este respeito, o Método de Convergência-Confinamento (MCC) é um método simplificado que analisa a interação rocha/suporte, usando a hipótese de simetria axial, o que proporciona um conhecimento simplificado do processo de interação rocha-suporte que ocorre em túneis de formato real e perto da face da escavação. A rigor, a análise do MCC é bidimensional, mas os resultados da análise podem ser aplicados aos problemas tridimensionais que surgem na face da escavação, (Panet, 1995).

O pressuposto do MCC é embasado nas

seguintes condições, segundo Schurch & Anagnostou, (2012):

- Simetria axial (abertura circular);
- Tensão *in situ* hidrostática;
- Maciço rochoso homogêneo e isotrópico;
- Distribuição da pressão de suporte uniforme.

Entre suas aplicações, como estimativa inicial para projetos, há a utilização do método para o desenvolvimento de túneis na construção civil, mineração e na utilização de suportes naturais (pilares) no método de lavra de câmaras e pilares para a mineração.

2 MÉTODOS E MATERIAIS

A metodologia foi realizada de forma sistemática, estando a mesma fundamentada em estudos anteriores realizados por renomados autores, como por exemplo Prager (1959), Obert & Durval (1967), Timoshenko & Goodier (1970), Hoek & Brown (1980), Hutchinson & Diederichs, (1996), Brady & Brown, (2004), Vlachopoulos & Diederichs (2009), Schurch & Anagnostou (2012), Hoek (2014).

Primeiramente, com a utilização do software *RocData 4.0 (Rocscience)* definiram-se os parâmetros do maciço rochoso, sendo o mesmo classificado como um maciço relativamente brando, ou seja, de resistência baixa.

Em seguida foram escolhidos 9 formatos distintos de escavação, considerando-se a relação entre a largura e altura (W/H), com valores de 1, $\frac{1}{2}$ e 2, os quais foram utilizados por Hoek & Brown (1980) para definição das tensões do teto e nas paredes dos mesmos formatos de escavações, numa análise elástica.

Esses 9 formatos foram simulados através do software *Phase2 versão 8.0 (Rocscience)*, variando-se a razão entre as tensões horizontais e verticais (K) com a profundidade, (z), numa análise elastoplástica. Os valores de K escolhidos têm os limites inferior e superior de 0,30 e 3,5, respectivamente, sendo os mesmos distribuídos em 13 intervalos. O primeiro, diferentemente dos demais, é acrescido de 0,2,

passando de 0,30 para 0,5 e os demais são acrescidos de 0,25. Assim, temos os valores de K iguais a: 0,30; 0,5; 0,75; 1,00; 1,25; 1,50; 1,75; 2,00; 2,25; 2,5; 2,75; 3,00; 3,25 e 3,50. Cada valor de K foi simulado com os seguintes valores de profundidades: 50, 100, 200, 300, 400, 500 e 1000 metros.

A combinação das análises entre K e profundidade, z , gerou um total de 765 simulações, sendo 85 valores obtidos de raio plástico por formato, conforme a Tabela 1, através do software *Phase2 versão 8.0 (Rocscience)*, as quais foram analisadas de forma a verificar a influência de cada um desses parâmetros sobre o comportamento da zona plástica em torno das escavações.

Ainda, foi utilizada a Solução Analítica de Duncan Fama (1993) para efeito de comparação com os dados acima obtidos, a qual considera uma abertura circular, campo de tensão hidrostático analisado no estado plano de deformação.

3 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS PARA SIMULAÇÃO

O presente trabalho faz uso da simulação computacional para que se obtenha a zona plastificada formada em torno de aberturas/escavações com 9 formatos distintos, analisadas em estado plano de deformação, para valores de profundidade, z , variando de 50 a 1000 metros e para razão entre a tensão horizontal e tensão vertical, K , variando de 0,3 a 3,5, de acordo com o gráfico apresentado na Figura 1. Dessa forma, na Tabela 1, foram inseridos os valores dos raios plásticos obtidos nas simulações. Os valores da tensão *in situ* vertical são definidos como o produto do peso específico médio das rochas pela profundidade, z . As tensões horizontais foram consideradas iguais, Figura 1, sendo assim, a razão entre as soma das tensões horizontais e o dobro da tensão vertical, pode ser simplificado como a razão entre a tensão horizontal e a tensão vertical, K .

Tabela 1 - Definição dos valores a serem utilizados na simulação para obtenção da zona plastificada (Modelo para os 85 dados dos raios plásticos obtidos, por formato, através das simulações).

Formatos															
Prof. (m)	Tensão Vertical (MPa)	Raio Plástico (m)													
		Phase2													
		K = 0,30	K = 0,50	K = 0,75	K = 1,00	K = 1,25	K = 1,50	K = 1,75	K = 2,00	K = 2,25	K = 2,5	K = 2,75	K = 3,00	K = 3,25	K = 3,50
50	1,35														
100	2,70														
200	5,40														
300	8,10														-
400	10,80											-	-	-	-
500	13,50											-	-	-	-
1000	27,00											-	-	-	-

- Valores não analisados

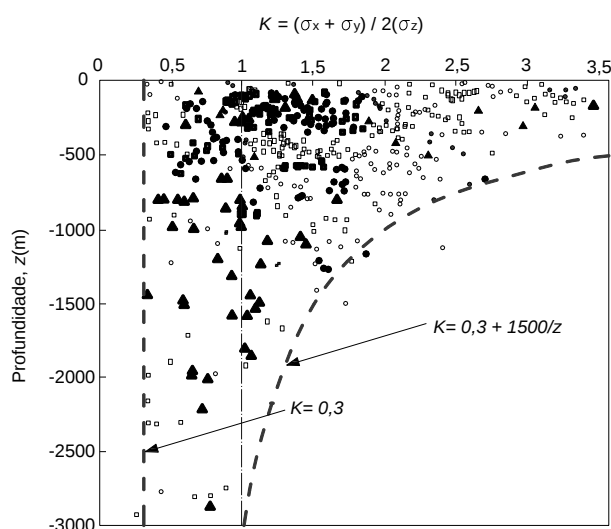


Figura 1 - Variação da razão entre a média das tensões horizontais e a tensão vertical (K) em função da profundidade, z , modificado – (Brady & Brown, 2004).

A análise computacional foi implementada através do software *Phase2 8.0 (Rocscience)*, que se trata de um programa de elementos finitos (*MEF*) para a análise de tensão e deformação bidimensional.

Os dados de entrada iniciais são hipotéticos (para a rocha intacta e qualidade do maciço rochoso). Contudo, utilizou-se o software *RocData 4.0 (Rocscience)*, para gerar os demais parâmetros de definição das propriedades de resistência e deformabilidade do maciço rochoso.

3.1 Dados de entrada referentes ao critério de ruptura de *Hoek & Brown*

Com os dados de entrada, conforme a Tabela 2, buscaram-se parâmetros de um maciço rochoso relativamente brando. Usou-se no *RocData 4.0*, a teoria geral do critério de ruptura de *Hoek & Brown* para se obter os parâmetros equivalentes de *Mohr-Coulomb*. As tabelas 3 e 4 se referem aos dados de saída no *RocData 4.0*.

Tabela 2 - Dados de entrada para o software *RocData 4.0 (Rocscience)*

σ_{ci} (MPa)	GSI	m_i	D
52,00	22,50	20	0

3.2 Dados de saída do software *RocData 4.0*

Tabela 3 - Parâmetros para o critério de ruptura de *Hoek & Brown* para o maciço rochoso.

m_b	s	a
1,256	0,0002	0,54

Tabela 4 - Dados de saída referentes às propriedades do maciço rochoso.

σ_{cm} (MPa)	σ_{tp} (MPa)	E (MPa)
6,65	-0,01	840,00

3.3 Dados de entrada do software *Phase2 8.0*

Para a análise no *Phase2 8.0* optou-se pela utilização do critério de ruptura de *Mohr-Coulomb*. Sendo assim, os dados ou parâmetros de entrada de pico e residuais para a caracterização geotécnica do maciço rochoso a

serem simulados são os mostrados na Tabela 5. Nota-se que o maciço simulado tem comportamento elastoplástico perfeito com relação a compressão/cisalhamento e totalmente elastofrágil em tração.

Tabela 5 - Parâmetros de entrada para a caracterização geotécnica do maciço rochoso: valores de pico e residuais.

$E(MPa)$	ν	$c_p(MPa)$	$\phi_p(^{\circ})$	$\sigma_{tp}(MPa)$	$c_r(MPa)$	$\phi_r(^{\circ})$	$\sigma_{tr}(MPa)$
840,00	0,3	2,00	28	-0,01	2,00	28	0

4 CONCEPÇÃO DO MODELO

Neste estudo foram simuladas 9 seções de escavações subterrâneas considerando a zona de influência segundo Hoek & Brown (1980). No modelo proposto, considera-se que o maciço rochoso é isotrópico, sendo analisado numa condição de deformação plana, com o

comportamento elasto-plástico, sujeito a um campo de tensões não-hidroestático. A malha de elementos finitos utilizada é a triangular quadrática, com elementos de 6 nós. Os 9 diferentes formatos são mostrados na Figura 2, e a geometria e as condições de contorno típicas dos modelos na Figura 3.

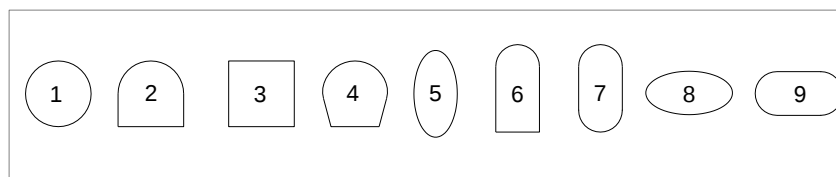


Figura 2 - Formatos utilizados para as simulações.

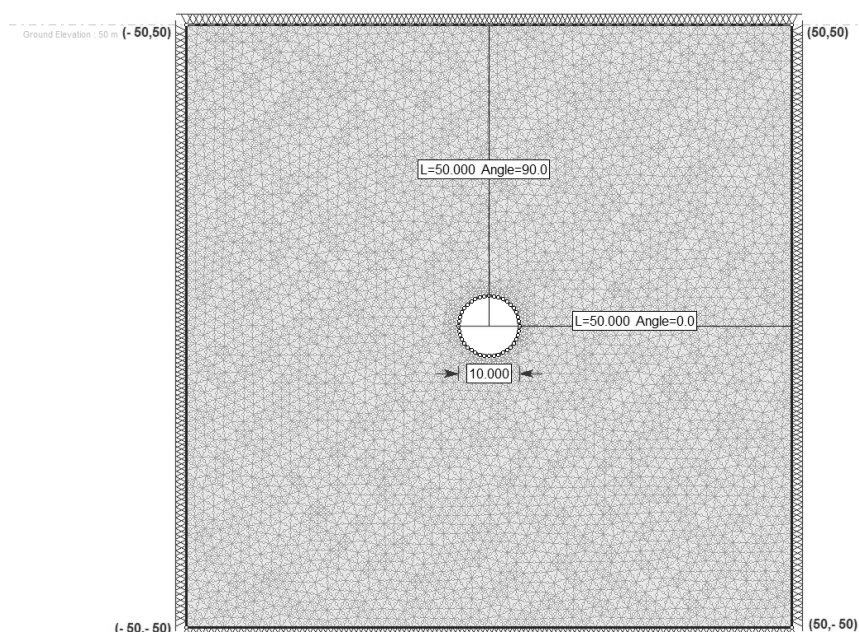


Figura 3 - Condições de contorno e geometria para as simulações, valores de comprimento em metros.

5 DISCUSSÃO E RESULTADOS

5.1 Influência da dispersão da Zona Plástica do Fator de Segurança das Escavações

De acordo com os resultados obtidos, os maiores valores de dispersão nos valores dos raios plásticos médios, para todos os formatos, ocorreram no intervalo de 300 a 400 metros de profundidade, sendo assim, de forma a analisar a influência de tal dispersão na Curva Característica do Maciço Rochoso (GRC) e na Curva Característica do Suporte (SSC), utilizou-se os dados da profundidade de 300 metros, pois nesta profundidade ocorreram dispersões positivas e negativas para $K = 1$, campo de tensão hidrostático. Assim, os valores referentes ao deslocamento máximo e ao raio plástico ou raio da Zona Plástica para profundidade de 300 metros e $K = 1$, obtidos através do software

RocSupport 3.0 foram de 0,8289 metros e 6,690 metros, respectivamente, sem a instalação do sistema de suporte. A dispersão da solução analítica de Duncan Fama (1993) foi de 0,1%, ou seja, baixa dispersão. Os resultados obtidos da dispersão no raio plástico podem ser analisados na Figura 4, na qual é inserida a Curva Característica do Suporte (SCC), em verde, a qual se comporta como um material elasto-plástico perfeito sendo a tensão de pico igual à tensão residual, a pressão máxima do suporte ($p_s^{máx.}$) sendo igual a 1,416 MPa. A aplicação do sistema de suporte irá interromper o deslocamento da escavação alcançando o ponto de equilíbrio no sistema, o qual para o caso da solução analítica corresponde ao valor de 1,130 MPa, em consequência disso haverá também uma redução no raio da Zona Plástica, passando a mesma para o valor de 5,77 metros.

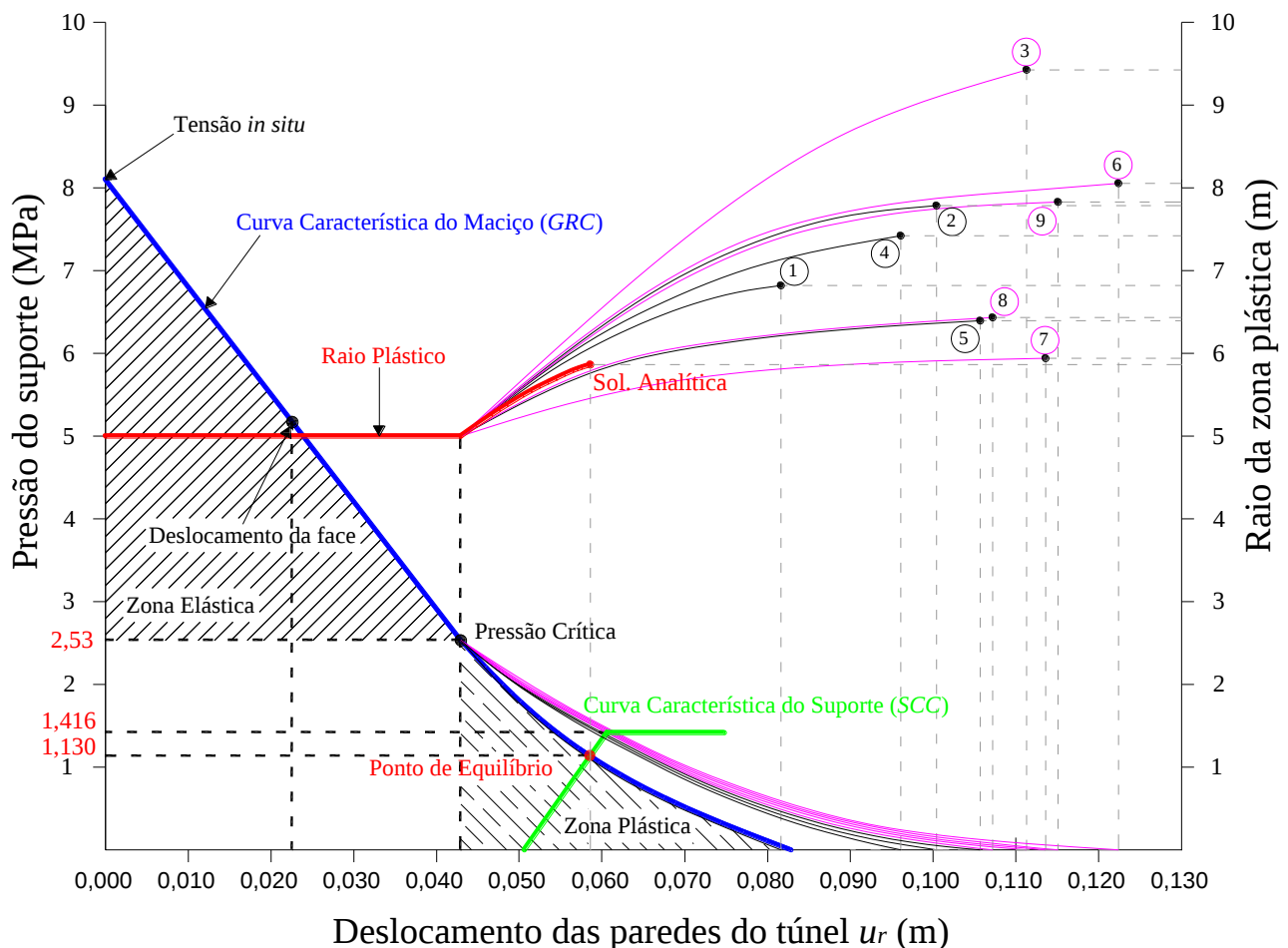


Figura 4 - Deslocamento das paredes do túnel versus Pressão de Suporte e Raio da Zona Plástica para a solução analítica e as soluções numéricas para os 9 formatos de escavações, com as respectivas curvas GRC e SCC, considerando-se um campo de tensões hidrostático.

Diante dos valores da pressão máxima do suporte ($p_s^{máx.}$) e da pressão do suporte no ponto de equilíbrio ($p_s^{eq.}$), é possível obter o valor do Fator de Segurança (FS) para a solução analítica de Duncan Fama (1993), contudo vale salientar que a obtenção do mesmo ocorre na interseção entre as curvas GRC e SCC (na parte inclinada da curva, não sendo considerado o FS na interseção com o Patamar da curva), assim temos:

$$FS = \frac{p_s^{máx.}}{p_s^{eq.}} = \frac{1,416MPa}{1,130MPa} \cong 1,25 \quad (1)$$

Entretanto, ao se analisar a margem de segurança indicada pela solução analítica e pelas soluções computacionais, verificou-se que, para a solução analítica, o valor do fator de segurança foi de 1,25, aproximadamente, ou seja, $FS > 1$, sendo o suporte adequado. Já para os formatos 4 e 5, o fator de segurança é maior do que 1, $FS > 1$, mas, muito próximo de 1, ou seja, o suporte está trabalhando próximo da capacidade máxima, podendo o equilíbrio ser instável. Contudo, para os formatos 3, 6, 7, 8 e 9, o fator de segurança foi menor que 1, $FS < 1$, pois não há interseção entre as curvas GRC e SCC . Assim, para esses formatos o suporte/reforço instalado seria inadequado. Para o formato 1 simulado, o resultado é semelhante ao da solução analítica de Duncan Fama (1993).

5.2 Influência da Dispersão da Zona Plástica do Fator de Segurança das Escavações

Conforme os resultados obtidos, onde foram apresentadas as zonas plásticas para cada formato, há uma faixa de K e z , na qual ocorre o aparecimento do formato “borboleta” ou *epitrocoidal*. Contudo, pode-se observar também que à medida que K se afasta do valor 1, ou seja, de um campo de tensões hidrostático, o formato da zona plastificada passa gradativamente de circular para elíptico e depois para o formato borboleta, de acordo com os valores de K e z .

Essa mudança pode gerar sérios problemas de instabilidade em escavações subterrâneas onde se pretenda utilizar reforços para manter a sua integridade/estabilidade. Na Figura 5 tem-se uma escavação circular hipotética simulada, numa profundidade de 300 metros submetida a valores de K diferentes, $K = 1$, $K = 1,75$ e $K = 2,75$, que, como dito anteriormente, geram formatos distintos da zona plastificada: circular, elíptico e borboleta, respectivamente. Para essa análise, considerou-se também a instalação de um sistema de reforço distribuído uniformemente. Observa-se que na Zona Plástica com formato Circular, todo o sistema de reforço está sendo solicitado e ancorado na Zona Elástica, sendo efetiva a ação do sistema.

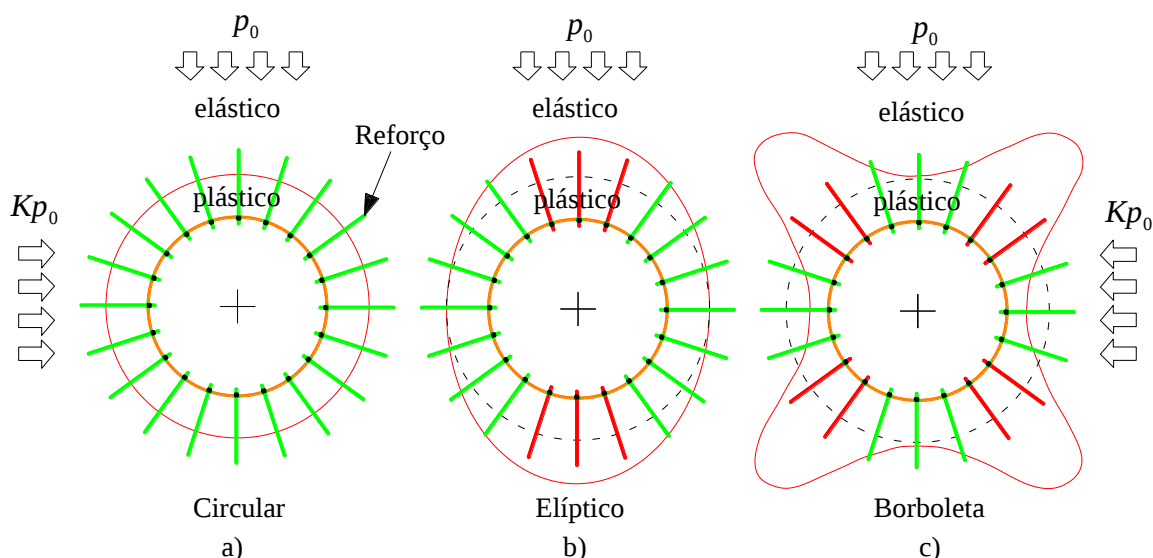


Figura 5 - Mudança no formato da Zona Plástica em torno de uma escavação circular, passando de a) circular, b) elíptico e c) borboleta ou *epitrocoidal*, à medida que se varia o valor de K e z .

6 CONCLUSÕES

Ao simular um maciço rochoso específico, variando-se a razão entre tensão horizontal e tensão vertical, K , a profundidade, z , e os 9 formatos das escavações, conclui-se:

- Para o formato 1, circular, a dispersão do Raio Plástico entre a solução analítica e as soluções computacionais foram mais expressivas nas profundidades de 300, 500 e 1000 metros, não ultrapassando uma dispersão máxima de 2,0%, ao se calibrar o modelo simulado;
- Os intervalos utilizados para K e z mostraram, para todos os 9 formatos, uma mudança no formato da Zona Plástica, primeiramente do formato Circular para o formato Elíptico e depois do formato Elíptico para o formato Borboleta;
- O aparecimento do formato borboleta depende do formato da escavação, ocorrendo em todos os formatos simulados em faixas de valores diferentes de K e z ;
- A exemplificação para $K = 1$ e $z = 300$ metros demonstrou o quanto há de dispersão no Raio Plástico entre a solução analítica e a solução numérica para os 9 formatos e o quanto isso pode interferir no sistema de reforço, reduzindo a segurança da escavação, $FS < 1$, ao se considerar o Método da Convergência-Confinamento para os formatos diferentes do Circular;
- A consideração atual, em projetos conceituais ou preliminares em escavações subterrâneas em rocha de que a zona plástica seja concêntrica, pode trazer alguns problemas de instabilidade, pois como vimos, quando a zona plástica adquire o formato elíptico há instabilidade no sistema de

reforço no Teto e no Piso e quando a zona plástica adquire o formato borboleta há instabilidade nas diagonais das escavações, Figura 5.

Enfim, no Método da Convergência-Confinamento tem-se uma abordagem interessante e útil, contudo, para escavações com formato Circular e $K = 1$. Já para os outros formatos simulados e valores diferentes de $K = 1$, é preciso ter cuidado ao aplicá-lo, pois foi visto que há uma dispersão considerável dos valores dos Raios Plásticos obtidos e dos formatos das zonas plásticas encontradas.

REFERÊNCIAS

- AFTES, French Association for Underground Works. (1978). *Analysis of tunnel stability by the Convergence-Confinement Method*. *Underground Space* 4 (4), 221--223.
- Brady, B. H. G. & Brown, E. T. (2004) - *Rock mechanics for underground mining*. 3rd ed. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers; 527p.
- Carranza-Torres, C. e Fairhurst, C. (2000a). *Application of the Convergence-Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses That Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion*, *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 15, n. 2, pp. 187-213.
- Duncan Fama, M.E. (1993). *Numerical modelling of yield zones in weak rocks*. In *Comprehensive rock engineering*, (ed. J.A. Hudson) 2, 49-75. Pergamon, Oxford.
- Fenner, R. (1938): *Untersuchungen zur erkenntnis des Gebirgsdruckes*. *Gluckauf*, 74, 681-695 and 705-715.
- Goodman, R. E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics*, 2nd edn. John Wiley, Chichester, 562pp.
- Hoek, E. & Brown, E. T. (1980). *Underground Excavations in Rock*. Institution of Mining and Metallurgy, London, 527pp.
- Hoek, E. (2014). *Rock Support Interaction Analysis for Tunnels in weak rock masses*. *Geotechnical Tunnel Engineering – Ground – Structure Interaction*. site :<http://geotechnical.com/Publication/Show/3951/Rock-Support-Interaction-Analysis-For-Tunnels-In-Weak-Rock-Masses>. Visualizado em 26/08/2014, 15:00h.
- Hutchinson, D. J. & M. S. Diederichs - (1996) - *Cablebolting in underground mines - Richmond (BC): BiTech Publishers Ltd*. 406 p.
- Obert, L., Duvall, W. I. (1967). *Rock mechanics and the design of structures in rock*. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 1967.
- Panet, M. (1995). *Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement*, Presses de L'école Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- Prager, W. (1959). *An Introduction to Plasticity*.

Addison-Wesley: Reading, Mass.

- Schurch, R. & Anagnostou, G. (2012). *The Applicability of the Ground Response Curve to Tunnelling Problems that Violate Rotational Symmetry*. *Rock Mech Rock Eng* 45:1–10.
- Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N. (1970). *Theory of Elasticity*, 3rd edn. Wiley: New York.
- Vlachopoulos, N. and Diederichs, M.S. 2009a. *Improved longitudinal displacement profiles for convergence-confinement analysis of deep tunnels*. *Rock Mech Rock Eng* 42:131–146.