

Aplicação do Método dos Elementos de Contorno na Determinação do Arranjo Bidimensional para Desagregação de Rochas com Argamassa Expansiva

Amanda Jarek

Institutos Lactec, Curitiba, Brasil, amanda@ufpr.br

Marcelo Buras

Institutos Lactec, Curitiba, Brasil, marcelo.buras@lactec.org.br

Samuel Soares de Souza

Energisa, João Pessoa, Brasil, samuels@energisa.com.br

Luiz Alkimin de Lacerda

Institutos Lactec, Curitiba, Brasil, alkimin@lactec.org.br

RESUMO: O presente trabalho visa apresentar modelagens numéricas do campo de danificação potencial de um maciço rochoso decorrente da aplicação de argamassa expansiva. Este estudo foi motivado pela necessidade de avaliação da eficácia e uso racional da argamassa expansiva como elemento de desagregação de rochas para execução de fundações de postes de distribuição. Na prática, furos de sondagem são executados e preenchidos com argamassa, que ao se expandir, geram campos de tensões que conduzem à desagregação da rocha. Tais furos podem ser executados em diferentes arranjos. A condição mais eficaz decorre de um furo executado paralelamente e próximo à superfície livre. Contudo, neste trabalho, avalia-se a eficácia de furos executados com orientação quase vertical em um domínio semi-infinito. Nesse contexto, apresentam-se análises paramétricas com diferentes arranjos ou malhas para execução dos furos para preenchimento de argamassa, com a finalidade de maximizar a desagregação levando-se em consideração a distância entre furos. O modelo de expansão é definido a partir de ensaios experimentais em corpos de provas (CP) de rocha, com diâmetro de 10cm e altura de 20cm, que foram executados visando a determinação da pressão provocada pela expansão da argamassa sobre as paredes internas do CP. Estes ensaios foram executados para efeito de confirmação da pressão atuante, que é fundamental para complementar o estudo, de forma a compará-los com dados existentes na literatura. A modelagem computacional se justifica, pois o problema envolve uma série de equações matemáticas de elevada complexidade, o que inviabiliza qualquer cálculo manual. Nesse contexto, utilizou-se um código computacional, baseado no Método dos Elementos de Contorno (MEC), por meio da linguagem de programação Fortran para análise de problemas de elasticidade sob o estado plano de deformações considerando o material como isotrópico. A escolha deste método numérico deu-se por ser apropriado às análises de problemas em meios semi-infinito e infinito como é o caso de maciços rochosos. Cabe salientar que os maciços rochosos são heterogêneos e as condições de campo são muito variadas. Portanto, o trabalho desenvolvido limita-se a definir de maneira qualitativa indicadores para a montagem de arranjos para desagregação de rocha com argamassa expansiva. Para determinação da zona de ruptura potencial, será utilizado o critério de ruptura de Hoek-Brown por ser mais abrangente quando comparado a outros métodos como, por exemplo, o de Mohr Coloumb. Os resultados deste estudo almejam a determinação de um indicador preliminar para o um arranjo a ser aplicado em campo.

PALAVRAS-CHAVE: Método dos Elementos de Contorno, Fundação, Rocha, Argamassa Expansiva.

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho visa apresentar um estudo numérico-teórico sobre o emprego racional de argamassa expansiva como elemento de desagregação de rochas para execução de fundações para postes.

A ideia principal é avaliar diferentes arranjos para as perfurações cuja finalidade é maximizar a desagregação da rocha levando em consideração parâmetros característicos básicos da rocha.

A modelagem computacional se justifica, pois o problema envolve uma série de equações matemáticas de elevada complexidade, o que inviabiliza qualquer cálculo manual. Nesse contexto, utilizou-se um algoritmo ‘caseiro’ baseado em linguagem de programação Fortran e no Método dos Elementos de Contorno. A escolha deste método foi realizada com base na característica do problema que envolve meios infinitos ou semi-infinitos.

Cabe salientar que os maciços rochosos são heterogêneos e as condições de campo são muito variadas. Portanto, o trabalho desenvolvido limita-se a definir de maneira qualitativa indicadores para a montagem de arranjos para desagregação de rocha com argamassa expansiva.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O programa computacional utilizado no presente estudo é um desenvolvimento interno (não comercial) baseado no método numérico de elementos de contorno para problemas de elasticidade bidimensionais, considerando o material isotrópico e/ou anisotrópico, sob estado plano de deformações (ALIABADI, 2002). O código foi desenvolvido por meio da linguagem de programação Fortran.

Toda a formulação matemática partiu da teoria da elasticidade que trata o estudo das tensões, deformações e deslocamentos num corpo elástico submetido a forças externas (TIMOSHENKO e GOODIER, 1968). As equações diferenciais foram obtidas por meio dos deslocamentos previamente definidos e das seguintes relações:

- Equações diferenciais das tensões;
- Leis de Hooke que trata da relação tensão deformação;
- Equações das deformações-deslocamentos.

Considerando-se uma área diferencial pequena, de dimensões ∂x e ∂y é possível chegar às seguintes relações:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + b_x = 0 \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + b_y = 0 \quad (1)$$

onde b_x e b_y são as forças de corpo, σ_x e σ_y são as tensões nas direções x e y e τ_{xy} é a tensão cisalhante.

As relações entre deformações e deslocamentos são dadas por:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y} \quad \gamma_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \quad (1)$$

onde ε_{xx} e ε_{yy} são as deformações nas direções x e y e γ_{xy} é a deformação cisalhante.

As relações entre tensões e deformações, para o estado plano de deformações, de acordo com a Lei de Hooke são dadas por:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \left(\frac{1-\nu^2}{E} \right) \sigma_{xx} + \left[\frac{-\nu(1+\nu)}{E} \right] \sigma_{yy} \\ \varepsilon_{yy} &= \left[\frac{-\nu(1+\nu)}{E} \right] \sigma_{xx} + \left(\frac{1-\nu^2}{E} \right) \sigma_{yy} \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2\mu} \tau_{xy} \end{aligned} \quad (3)$$

onde E é o módulo de deformabilidade, ν é o coeficiente de Poisson e μ é o módulo de cisalhamento.

2.1 Critério de Ruptura de Hoek-Brown

Para análise do critério de ruptura utilizou-se Hoek-Brown que descreve o aumento não-linear na resistência de pico de uma rocha com o aumento da tensão confinante.

A equação geral do critério de Hoek-Brown Generalizado (HOEK et al., 2000) é expressa por:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (4)$$

onde: σ'_1, σ'_3 : são as tensões principais maior e menor, respectivamente; m_b é o valor da constante m para maciços rochosos fraturados; σ_c : é a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta; m_i constante do material para a rocha intacta; s e a são constantes dependentes das características do maciço rochoso.

Os parâmetros a , s e m_b são obtidos por meio das relações:

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} + e^{-\frac{20}{3}} \right)$$

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad (5)$$

O fator de dano (D) e o índice de resistência geológica (GSI) presentes nas equações (5) objetivam incluir o efeito das descontinuidades e a perturbação devido ao fogo no maciço rochoso (EBERHARDT, 2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O modelo numérico teórico adotado para as análises possui furo para preenchimento da argamassa expansiva com diâmetro (ϕ) de 40mm. O conceito qualitativo básico para definição do arranjo geométrico mais adequado para execução dos furos foi o da maximização da área de ruptura (ou dano) com base no modelo de Hoek-Brown.

O dano estimado sobre o material (rocha) é decorrente do campo de deformações gerado a partir da pressão interna exercida pela argamassa expansiva nas paredes do furo. Tal pressão (ver Figura 1) corresponde à força que a argamassa expansiva pode exercer num intervalo de 1,5 a 3 horas sob temperatura de 20°C conforme descrito na ficha técnica do fabricante (CHIMICA, 2016).

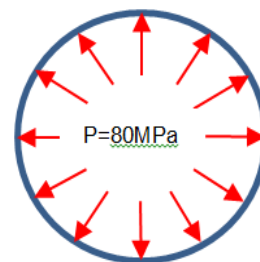


Figura 1. Pressão teórica exercida pela argamassa no furo de 40mm de diâmetro.

Contudo, com a danificação da rocha e consequente redução do seu módulo de deformabilidade, tem-se uma redução da pressão interna máxima que pode ser exercida pela argamassa. A implementação de um módulo de deformabilidade variável com o tempo exigiria maior esforço computacional dada a natureza não-linear do problema. Para simplificar a análise, haja vista que os resultados almejados são de natureza qualitativa, considerou-se uma redução de 2/3 da pressão interna, baseada nas deformações atingidas nos ensaios em corpos de prova realizados em laboratório (RET DVPE 4848/2015). Assim, os testes numéricos foram realizados utilizando-se pressão interna máxima de 26MPa.

Nesse contexto, os testes iniciais foram realizados com dois furos sob pressão interna da argamassa expansiva, em diferentes distanciamentos, entre 2 ϕ e 24 ϕ , conforme pode ser visualizado na Figura 2.

O segundo conjunto de testes modelados (ver Figura 3) é constituído por três furos, onde se avalia a efetividade de execução de um furo central vazio (sem aplicação da argamassa) como um potencializador da formação da área de danificação.

O terceiro conjunto de testes foi realizado dobrando-se o número de furos e variando a distância entre os mesmos, entre 2 ϕ e 16 ϕ , conforme ilustra a Figura 4.

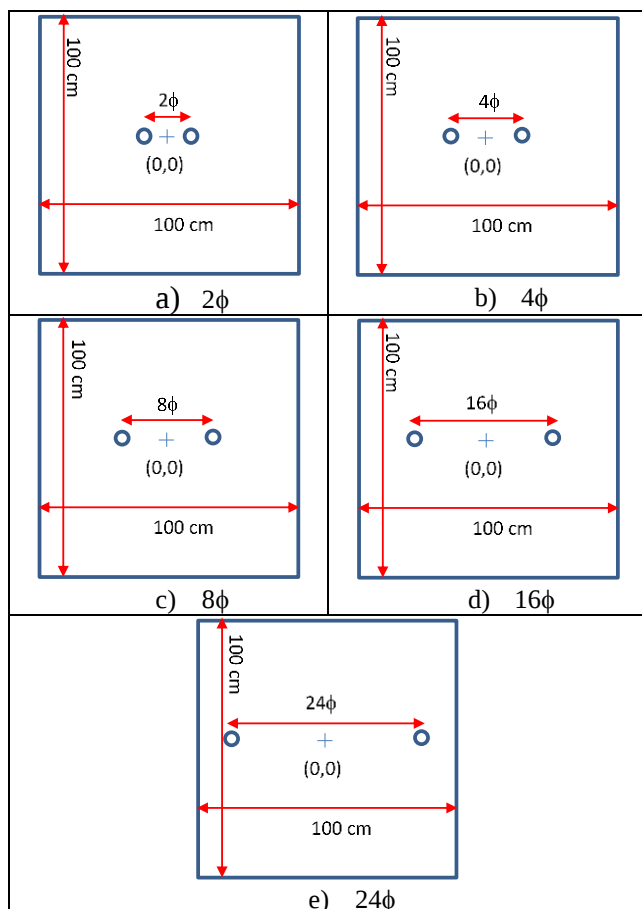


Figura 2. Primeiro conjunto de arranjos testados com dois furos.

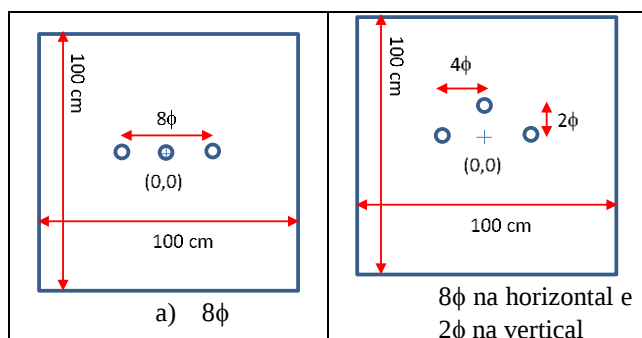


Figura 3. Segundo conjunto de arranjos testados com três furos.

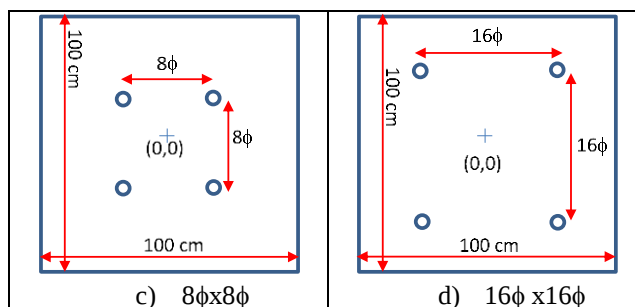
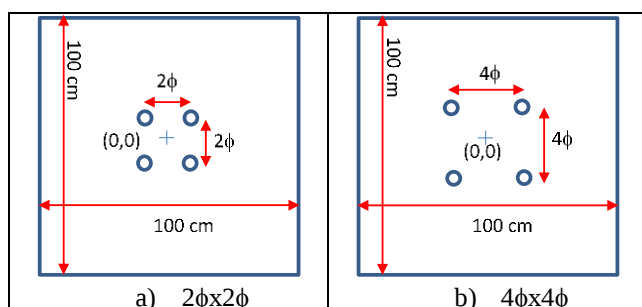


Figura 4. Terceiro conjunto de arranjos testados com quatro furos.

No último teste, conforme será abordado na sequência, buscou-se um arranjo de furos para preenchimento com argamassa que garantisse uma área de ruptura potencial suficiente para cobrir 1m² de área de escavação.

Na Tabela 1 têm-se os dados de entrada adotados para o modelo teórico para rocha calcária.

Tabela 1. Parâmetros de entrada do programa.

E (GPa)	ν	GSI	m_i	σ_c (MPa)
70	0,20	50	12	175

Para cada modelo apresentado anteriormente, adotou-se uma malha de elementos para as análises numéricas conforme pode ser visto na Figura 5.

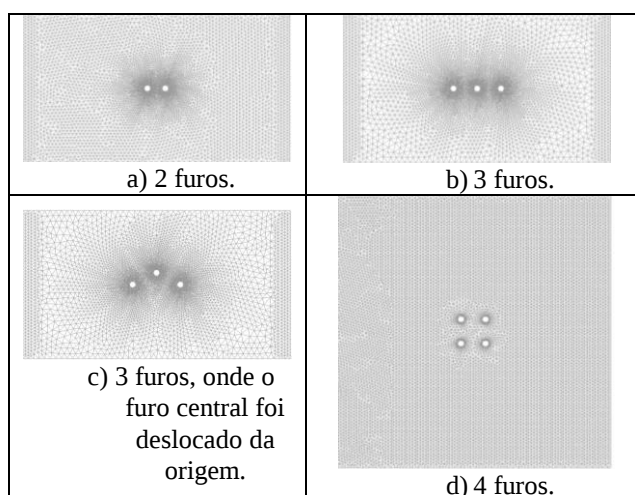


Figura 5. Malha de elementos adotadas nas análises.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados de área potencial de ruptura obtida em cada condição de análise. Enfatizando que os

modelos são bidimensionais e representam um comportamento de estado plano de deformações no plano horizontal que “corta” os furos para preenchimento com argamassa expansiva. Essa idealização bidimensional conduz a uma avaliação qualitativa dos resultados. Mesmo porque os arranjos reais de perfuração não seguem linhas verticais, para induzir deformações no sentido da menor resistência, em virtude da face livre horizontal (superfície).

4.1 Distância “Adequada” entre Dois Furos com Argamassa

Ao se buscar a definição de um arranjo de perfurações para preenchimento com argamassa, tem-se o primeiro questionamento: Qual o espaçamento adequado entre furos? Por meio de análises de deformação em um meio com dois furos preenchidos com argamassa, busca-se a distância que produz a maior área potencial de ruptura contínua.

A Figura 6 ilustra as regiões de ruptura resultantes para o modelo teórico com dois furos preenchidos com argamassa expansiva.

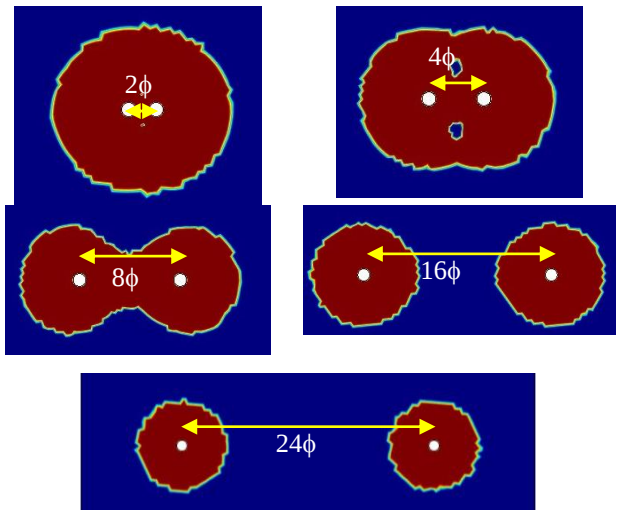


Figura 6. Regiões de ruptura resultantes para o conjunto com dois furos.

A Tabela 2 apresenta as áreas potenciais de ruptura resultantes dos modelos presentes na Figura 6.

Tabela 2. Área potencial de ruptura resultante para os modelos com dois furos.

	24φ	16φ	8φ	4φ	2φ
Área (cm ²)	1.734,05	1.774,84	1.705,82	1.731,42	1.804,38

Distâncias entre furos acima de 8φ apresentam áreas de dano isoladas e potencialmente de menor resultado final na desagregação, apesar das áreas resultantes finais serem próximas do maior valor obtido.

4.2 Influência do Furo Vazio entre Dois Furos com Argamassa

A Figura 7 apresenta os resultados para os modelos com três furos em que o furo central foi inserido, porém sem pressão aplicada.

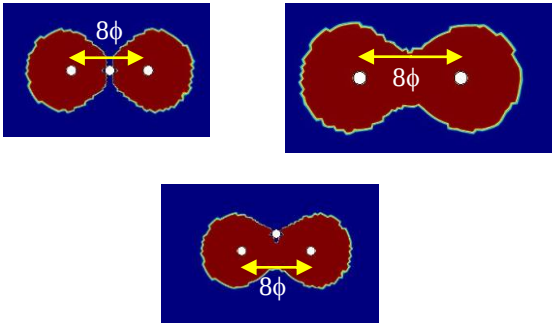


Figura 7. Regiões de ruptura resultantes para o conjunto com três furos.

A Tabela 3 apresenta as áreas de ruptura resultantes dos modelos presentes na Figura 7.

Tabela 3. Área de ruptura resultante para os modelos com três furos.

	8φ	8φ c/furo	8φ com furo deslocado 2φ
Área (cm ²)	1.705,82	1.572,70	1.689,32

Com estes modelos foi possível concluir de que a inserção de um furo central, sem preenchimento de argamassa, não gerou ganhos nas áreas potenciais de ruptura apresentados na Tabela 3. Portanto, para argamassa expansiva, a inserção de um furo central, teoricamente, não traz benefícios.

4.3 Arranjo Matricial de Furos com Argamassa

Na Figura 8 são apresentadas as regiões de ruptura decorrentes de quatro furos equidistantes entre si.

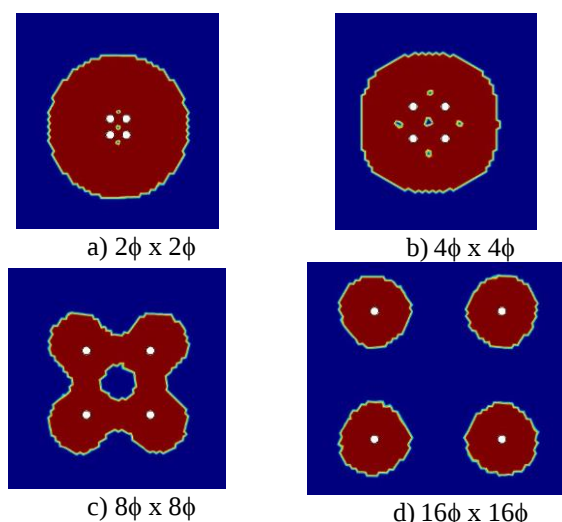


Figura 8. Regiões de ruptura resultantes para o conjunto com quatro furos.

A Tabela 4 apresenta as áreas de ruptura resultantes dos modelos presentes na Figura 8.

Tabela 4. Área de ruptura potencial resultante para os modelos com quatro furos.

	16φx16φ	8φx8φ*	4φx4φ	2φx2φ
Área (cm ²)	3.431,62	3.440,81	3.608,65	3.645,70

*inclui área central.

Neste caso, a maior área foi obtida para o caso em que os furos estão equidistantes de 2ϕ , seguindo o mesmo resultado obtido nas análises com dois furos. Entretanto, a diferença é pequena em relação ao caso equidistante de 8ϕ , que “consome” um menor volume de argamassa. Adotou-se, portanto, esta distância para o arranjo teste da fundação tendo em vista a menor quantidade de furos.

4.4 Arranjo teórico para uma fundação de 1mx1m

Após realizadas as análises para verificar qual o arranjo a ser adotado, definiu-se uma malha objetivando a execução de uma possível fundação com área de 1m². O arranjo teórico adotado possui 16 furos, com diâmetro de 40mm, equidistantes de 8ϕ e pode ser visualizado na Figura 9.

A área potencial de ruptura resultante (ver Figura 10) foi de 56.528,20cm².

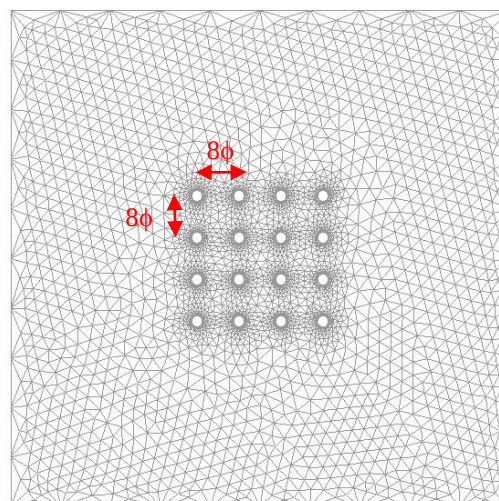


Figura 9. Malha de furos teórica adotada.

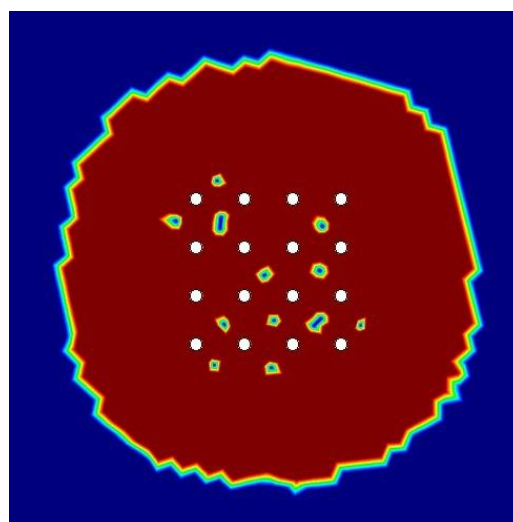


Figura 10. Área potencial de ruptura resultante.

A área potencial é bem superior à área de escavação desejada, sugerindo que um espaçamento ainda maior seria possível.

CONCLUSÕES

O estudo apresentado possibilitou uma visão teórica aproximada para o arranjo necessário para desagregação de 1m² de rocha para execução de valas para fundações de postes. De acordo com dados técnicos da argamassa expansiva (CHIMICA, 2016), para desagregação da rocha é necessário efetuar uma face livre para que haja expansão do material e consequente ruptura da rocha. Portanto, cabe ressaltar que o resultado é qualitativo e apenas fornece um indicador preliminar para o processo executivo necessário tendo em vista

que, na prática, o uso de argamassa possui algumas restrições. Apesar das restrições, ela é indicada para este tipo de trabalho devido à preservação da integridade físico-mecânica da rocha. Os resultados foram definidos com base no critério de Hoek-Brown e foram gerados para um tipo de rocha calcária com parâmetros mecânicos e de ruptura teóricos médios. Outros tipos de rocha podem resultar em arranjos com diferentes espaçamentos entre furos para preenchimento com argamassa.

AGRADECIMENTOS

À Energisa pelo apoio financeiro para realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Aliabadi, M. H. (2002). *The Boundary Element Method: Applications in Solids and Structure*. [S.l.]: John Wiley & Sons.
- Chimica Edile do Brasil Ltda: *O Emprego da Argamassa Expansiva Fract.Ag na Extração de Rochas Ornamentais*. Disponível em: http://chimicaedile.com.br/arquivos/pedreira/estudo_garanito%20.pdf. Acesso em: 17/02/2016.
- Eberhardt, E. (2012). The Hoek-Brown Failure Criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Springer. Pages: 981-988.
- Hoek, E.; Kaiser, P.K. and Bawden, W. F. (2000). *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. Taylor & Francis Group.
- RET DVPE 4848/2015, Ensaios de Laboratório – Compressão uniaxial, módulo estático de elasticidade análise da microscopia eletrônica de varredura da rocha, 2015.
- Timoshenko, S.; Goodier, J. N. (1968) *Teoria de La Elasticidad*. España: Urmo.