

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Utilização do Desvio Padrão Médio das Tensões e Deformações na Calibração de Modelos de Compressão Uniaxial FEM-DEM 2D

Michel Melo Oliveira

Professor Adjunto, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, michelmelo@demin.ufmg.br

Douglas Batista Mazzinghy

Professor Adjunto, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, dmazzinghy@demin.ufmg.br

Cláudio Lúcio Lopes Pinto

Professor Titular, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, cpinto@ufmg.br

RESUMO: O algoritmo híbrido de elementos finitos e discretos (FDEM) permite analisar a transição do comportamento mecânico contínuo para o descontínuo. Tatone e Grasselli (2015) propõem a utilização de uma campanha de ensaios mecânicos em rochas como: Determinação da Resistência à Compressão Uniaxial (R.C.U), Determinação da Resistência à Compressão Diametral e ensaios de Determinação da Resistência à compressão triaxial para a calibração de rochas. A calibração é realizada simulando os ensaios de laboratório utilizando como objetivo a sua resistência máxima e o seu padrão de fraturamento. O software utiliza um algoritmo em Python para obter a tensão de ruptura baseado na reação dos pratos de aplicação de força em um corpo de prova. A proposta deste artigo é investigar o comportamento mecânico da amostra em seu terço médio, onde são medidas as deformações nos ensaios laboratoriais. Avaliando o desvio padrão médio das tensões e deformações principais em conjunto com o número de elementos utilizados para esta avaliação. Os resultados apresentam convergência para números de elementos maiores que 3000 elementos.

PALAVRAS-CHAVE: FDEM, FEM-DEM, R.C.U, Desvio Padrão Médio, Elementos.

ABSTRACT: The hybrid finite and discrete element algorithm (FDEM) allows analyzing the transition from continuous to discontinuous mechanical behavior. Tatone and Grasselli (2015) propose the use of a mechanical testing campaign on rocks such as: Determination of the Uniaxial (U.C.S), Diametral and Triaxial compression strength, for rock calibration. The calibration is performed by simulating laboratory tests using its maximum strength and fracture pattern as its objective. The software uses an algorithm in Python to obtain the rupture strength based on the reaction of the hydraulic press platens over the rock specimens. The purpose of this article is to investigate the mechanical behavior of the sample in its middle third, where strains are measured in lab tests. Evaluating the mean standard deviation of both, principal stresses and strains varying the number of elements used for this evaluation. The results show convergence for numbers of elements greater than 3000 elements.

KEYWORDS: FDEM, FEM-DEM, UCS. Average Standard Deviation, Elements

1 Introdução

O presente trabalho reproduziu a modelagem numérica FDEM de uma campanha de ensaios de compressão uniaxial. Oliveira et al. (2020) basearam-se no desvio padrão médio das tensões obtido pela seleção de aproximadamente 3000 elementos do terço médio das amostras para a calibração do modelo. Para avançar nos estudos, o presente trabalho propõe a avaliação da seleção dos números de elementos e o desvio padrão médio das tensões e deformações para estimar a resistência à compressão uniaxial dos modelos bidimensionais FDEM.

As campanhas de ensaios mecânicos de rochas são a forma mais utilizada para caracterização mecânica das rochas e maciços rochosos. Para definição de um critério de ruptura de um dado litotipo são necessários três ensaios principais, o ensaio de Determinação da Resistência à Compressão Uniaxial, o ensaio de



Determinação da Resistência à Compressão Diametral e o ensaio de Determinação da Resistência à Compressão Triaxial.

Segundo Mardalizad et al. (2018), a resistência à compressão uniaxial é realizada aplicando um carregamento axial em uma amostra cilíndrica com uma relação altura diâmetro determinada por uma norma específica. As sugestões da ISRM (International Society of Rock Mechanics), presente em Ulusay (2015), foram utilizadas nos ensaios de Determinação da Resistência à Compressão Uniaxial deste trabalho.

Simulações numéricas dos ensaios de caracterização mecânica de rochas foram realizadas nos trabalhos de Oliveira et al. (2021), Oliveira et al. (2020), Fukuda et al. (2019), Mardalizad et al. (2018), Mahabadi et al. (2014), Kazerani et al. (2012), Kazerani e Zhao (2010), Stefanizzi et al. (2009) entre outros. JING (2003) discute os métodos numéricos mais comuns aplicados nas simulações de tensão-deformação em mecânica das rochas. Os métodos contínuos, Os métodos descontínuos e o métodos híbridos. O método híbrido FDEM foi proposto inicialmente por Munjiza et al. (1995) e modificado por Mahabadi et al. (2012) para aplicações em geomecânica. Fukuda et al. (2020) desenvolveu um código baseado no trabalho de Munjiza (2004) que também permite a aplicação do método em geomecânica.

2 Materiais e Métodos

Em seu trabalho, Oliveira et al. (2020) utiliza o software Irazu da Geomechanica para realizar a simulação bidimensional do ensaio de compressão uniaxial. O software Irazu é um sistema baseado na proposição do método híbrido de elementos finitos e elementos discretos de Munjiza et al. (1995). O algoritmo permite a simulação dinâmica da interação de múltiplos elementos. Segundo o manual do software (Irazu, 2018) a simulação FDEM permite que os elementos possam se deformar elasticamente, transladarem, rotacionarem, interagirem e se fraturar segundo o critério de ruptura de Mohr Coulomb. O software emprega uma combinação entre elementos finitos, para calcular as deformações e avaliar as possíveis rupturas nos elementos, e elementos discretos, para detectar novos contatos e lidar com as interações entre os elementos assim como sua rotação e translação.

Ainda segundo o manual (Irazu, 2018) cada corpo intacto é discretizado em uma malha de elementos triangulares de 3 nós. A equação de movimento generalizada pode ser expressa como:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + f_{int}(x) - f_{ext}(x) - f_c(x) - f_{fl}(x) = 0 \quad (1)$$

Onde: M é a matriz de massa nodal, C a matriz de *viscous damping*, x o vetor nodal de deslocamentos, f_{int} vetor de forças resistivas internas, f_{ext} vetor de forças externas aplicadas, f_c vetor de forças de contato entre os elementos e f_{fl} vetor das forças de poro pressão.

Segundo Tatone e Grasselli (2015) a utilização de uma matriz de viscous damping é necessária para considerar a energia de dissipação devido ao comportamento não linear do material e o fenômeno quasi-estático do modelo causado pela relaxação dinâmica.

Graselli et al. (2014) comentam que a metodologia básica do FDEM inclui: a deformação elástica dos elementos finitos; o movimento dos elementos discretos; a detecção de contato e interação entre os elementos discretos; e a análise de ruptura.

Entre estas etapas do FDEM a detecção de contato é a que apresenta o maior gasto computacional. Para resolver o problema Munjiza e Andrews (1998) propõem o algoritmo de detecção de contato NBS (Non-Binary Search). O algoritmo calcula as forças de reação entre os pares de elementos. As forças repulsivas de contato são calculadas utilizando o método da penalidade de contato. Portanto, as penalidades de contato: normal, tangencial e de fratura são variáveis de entrada do modelo.

Graselli et al. (2014) discutem que a transição do contínuo para o descontínuo é realizada por processos de fragmentação e fratura e que se propagam entre as interfaces dos elementos finitos adjacentes. A fratura ocorre somente nos elementos de quebra que são inseridos entre os elementos finitos triangulares adjacentes. Portanto a fratura depende da topologia da malha de elementos finitos. O software define 3 modos de energia de fratura: Modo I para ruptura em tração, o Modo II para ruptura em cisalhamento e o Modo III quando ambos os fenômenos ocorrem. A resposta de cada elemento de quebra na tração depende do tipo de fratura (Modo I - Tração), a taxa de liberação da energia de fratura G_{Ic} e da resistência a tração. Já no cisalhamento esta resposta



depende o tipo de fratura (Modo II - Cisalhamento), a energia de fratura G_{IIc} e da resistência ao cisalhamento (Oliveira, 2020).

O processo de calibração das variáveis mecânicas de litotipos em modelagem FDEM é proposto por Tatone e Graselli (2015). A proposição segue os passos: (a) definição do domínio; (b) definição do tamanho dos elementos e discretização; (c) determinação da velocidade dos pratos de aplicação de força; (d) seleção do viscous damping, (e) seleção das penalidades de contato; e, (f) definição das energias de fraturas. Oliveira et al. (2020) utilizaram estes passos para calibrar uma rocha de metaandesito. O software Irazu não dispõe de uma ferramenta robusta para pós processamento das simulações. Para essa análise é utilizada o programa Paraview, que permite visualizar os resultados e implementar rotinas em Python para a extração dos dados obtidos nas simulações.

2.1 Reprodução do Modelo e Metodologia

Tatone e Grasselli (2015) propõem a calibração de todos os passos utilizando a resistência à compressão uniaxial, a curva tensão/deformação e o padrão de ruptura. Para tal utilizam um algoritmo em Python presente em seus tutoriais para extrair os dados e construir a curva tensão deformação, assim como calcular a resistência à compressão uniaxial. Oliveira et al. (2020) propuseram utilizar os elementos do terço médio do corpo de prova simulado, para obter as tensões e deformações na região de maior grau de liberdade das deformações. A proposta tem origem na própria medição de deformação com extensômetros nos ensaios de Determinação da Resistência à Compressão Uniaxial.

Quando há a seleção de vários elementos o arquivo de resultados do Irazu/Paraview fornece o desvio padrão das tensões e deformações presentes. Oliveira et al. (2020) propuseram a seleção de, arbitariamente, aproximadamente 3000 elementos e a utilização do menor desvio padrão das tensões para a calibração de cada passo proposto por Tatone e Graselli (2015).

O método de calibração baseado no desvio padrão das tensões se mostrou satisfatório em Oliveira et al. (2020). A simulação final atingiu a resistência à compressão uniaxial média dos ensaios de laboratório e também reproduziu bidimensionalmente o padrão de ruptura dos corpos de prova.

O presente trabalho apresenta o resultado final obtido por Oliveira et al. (2020) afim de avaliar a resposta da seleção do número de elementos na simulação da resistência à compressão uniaxial conjugada ao desvio padrão das tensões e deformações, para verificar se a seleção arbitrária de 3000 elementos pode ter afetado a calibração.

Os parâmetros utilizados para a reprodução do modelo de Oliveira (2020) são apresentados na Tabela 1. Para o software Irazu, quando todos os nós de todos os elementos de uma estrutura tem a mesma velocidade, esta estrutura é considerada infinitamente rígida, não destrutível, independente das suas propriedades mecânicas (IRAZU, 2018). Por isso, os parâmetros dos Pratos da prensa não precisam ser calibrados.

Tabela 1. Parâmetros utilizados para a reprodução da simulação de Oliveira et. al (2020)



Parâmetros	Rocha	Pratos
Altura	107,38 mm	12 mm
Diâmetro	35,88 mm	37,5 mm
Densidade	2865 kg/m ³	7000 kg/m ³
Módulo de Young	92,2 GPa	200 GPa
Razão de Poisson	0,19	0,30
Coesão	30,96 MPa	200 MPa
Ângulo de atrito	38.23°	0°
Resistência a tração	8,59 MPa	200 MPa
Tamanho do elemento	0,75 mm	
Velocidade dos Pratos	Não se aplica	0.06 m/s
Viscous Damping	1	Não se aplica
Penalidade Normal	9,22x10 ¹² Pa.mm	Não se aplica
Penalidade Tangencial	9,22x10 ¹² Pa/mm	Não se aplica
Penalidade de Fratura	9,22x10 ¹² Pa	Não se aplica
Energia de fratura Modo I	16000 µN/mm	Não se aplica
Energia de Fratura Modo II	40000 µN/mm	Não se aplica

A Figura 1 mostra o modelo utilizado realizar o presente trabalho.

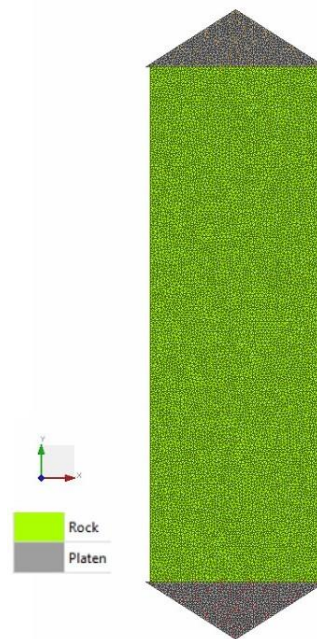


Figura 1 – Modelo bidimensional do ensaios de Determinação da Resistência à Compressão Uniaxial

Os resultados obtidos no modelo de Oliveira et al. (2020) são: a resistência à compressão uniaxial de 134,17 MPa e o desvio padrão das tensões dos elementos na ruptura de 0,416 MPa.

Utilizando o Paraview foram selecionados 18 conjuntos de elementos para a avaliação da resistência à compressão e os desvios padrão das tensões e deformações principais. A primeira seleção possui 3 elementos e a última 14992. O modelo do corpo de prova tem aproximadamente 65000 elementos.



3 Resultados e Discussão

A tabela 2 mostra os resultados obtidos nas 18 seleções de números de elementos realizadas utilizando o software Paraview. Os resultados sugerem uma convergência dos valores encontrados de desvio padrão e dos valores de tensão na ruptura (Oliveira et al., 2020). Os valores de desvio padrão médio das tensões quando se utiliza um modelo com poucos elementos foram baixos. Isso se deve provavelmente a própria teoria dos elementos finitos. Elementos próximos tendem a ter valores de tensão semelhantes pois o cálculo das tensões nos elementos dependem dos elementos vizinhos. O método dos elementos finitos não permite variações bruscas de tensões entre nós consecutivos dentro de um mesmo material. O mesmo acontece com os desvio padrão das deformações já que a relação entre tensão e deformação é regida pelo módulo de elasticidade e pela razão de Poisson.

As resistências a compressão uniaxial apresentam valores que variam de 133.24 a 133.31 MPa. Esse valor difere até 0,7% do encontrado por Oliveira et al. (2020). O valor de resistência a compressão uniaxial dos ensaios de laboratório é igual a 134, 02 Mpa, apresentando uma diferença máxima de 0,5%, um erro aceitável para o trabalho proposto.

A diferença observada entre os resultados obtidos por Oliveira et. al. (2020) e os resultados obtidos na simulação proposta pode ser explicada pela versão do software. O Irazu é muito dependente da estruturação da malha, e a versão utilizada para esse trabalho apresenta novas opções para discretização dos domínios. Outra explicação possível para essa diferença pode estar relacionada aos passos de tempo de integração escolhidos. Estudos adicionais sobre essas duas possíveis explicações devem ser realizados.

Tabela 2. Resultados de resistência a compressão uniaxial (R.C.U), desvio padrão das tensões e desvio padrão das deformações por seleção de número de elementos

Números de Elementos	R.C.U	Desvio Padrão Tensão (MPa)	Desvio Padrão Deformação (mm/mm)
3	133.36	0.0497	2.90E-07
16	133.37	0.0892	9.09E-07
31	133.33	0.2043	2.12E-06
79	133.24	0.4229	4.52E-06
285	133.28	0.4925	5.09E-06
759	133.27	0.4540	4.70E-06
1341	133.28	0.4202	4.35E-06
2165	133.29	0.4162	4.31E-06
3175	133.29	0.4094	4.25E-06
3975	133.31	0.4068	4.22E-06
4163	133.3	0.4243	4.40E-06
7006	133.3	0.4459	4.64E-06
8330	133.31	0.4803	4.99E-06
10409	133.31	0.4810	5.00E-06
11929	133.31	0.4855	5.04E-06
12844	133.31	0.4796	4.98E-06
13884	133.31	0.4799	4.99E-06
14992	133.31	0.4699	4.88E-06

O figura 2 mostra o gráfico do desvio padrão das tensões e deformações principais com a mudança do número de elementos selecionados. Pode-se observar que há uma convergência dos valores de desvio padrão das tensões e deformações principais para número de elementos maiores que 8000. Porém, o valor converge para o pico inicial do gráfico que corresponde a 285 elementos. Os menores desvios padrões estão entre 2000 e 4000 elementos. A diferença percentual do maior valor e menor valor, desconsiderando os pontos iniciais, é de 17,4%. Apesar da diferença ser relativamente alta o desvio padrão permanece baixo independentemente do número de elementos utilizado na seleção.

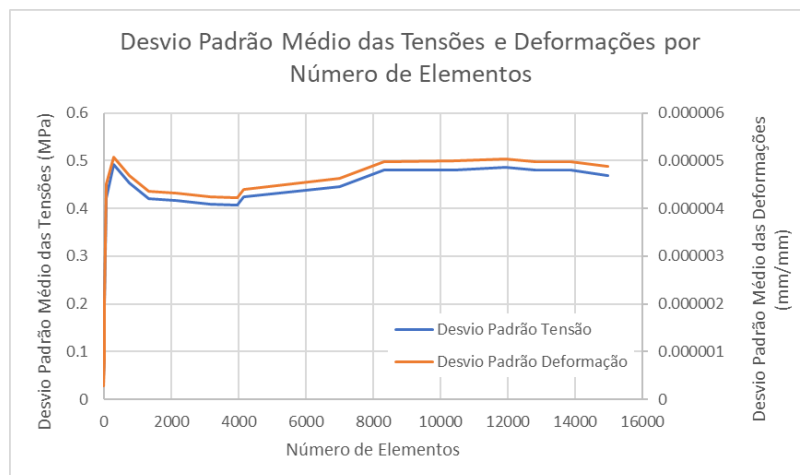


Figura 2- Gráfico dos desvios padrões das tensões e deformações principais por número de elementos avaliados.

A figura 3 mostra o gráfico da resistência à compressão uniaxial em função do número de elementos selecionados. A partir dos 4000 elementos o valor da resistência a compressão é praticamente o mesmo, variando apenas na segunda casa decimal. Entre 2000 e 4000 elementos, a maior diferença percentual é de 0,015%, muito menor do que a diferença encontrada pela reprodução do modelo de Oliveira et al. (2020) que foi de 0,7%.

Os resultados mostram que a escolha arbitrária de Oliveira et al (2020) de aproximadamente 3000 elementos tem pouco impacto sobre o resultado da resistência a compressão uniaxial calculada pelo modelo. Portanto a escolha de aproximadamente 3000 elementos pode ser utilizada para efeitos de calibração dos modelos bidimensionais.

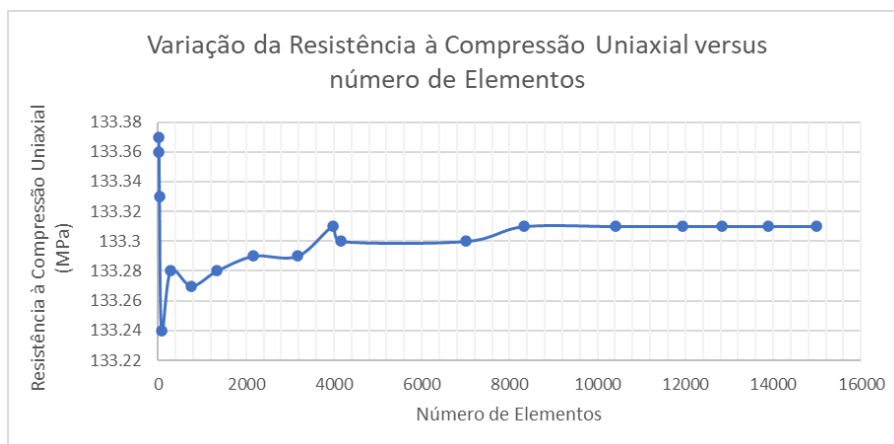


Figura 3 – Resistência à compressão uniaxial em função do número de elementos selecionados.

4 Conclusões

A reprodução do modelo proposto por Oliveira et al. (2020) mostrou resultados congruentes. As diferenças encontradas na resistência à compressão uniaxial foi de 0,7%. Essa diferença pode ser considerada baixa.

A avaliação dos desvios padrões das tensões e deformações principais foram coerentes com os encontrados por Oliveira et al. (2020). As diferenças percentual dos desvios padrão foram de 17,4 %. Um erro



percentual grande, porém, a ordem de grandeza desse desvio é a mesma. Como a calibração proposta por Oliveira et al (2020) parte do desvio padrão mínimo essa diferença não será impactante.

Os resultados mostram que outras variáveis podem ser mais importantes para a calibração do problema como a estruturação da malha e os passos de tempo de integração. Esses pontos devem ser melhor estudados em trabalhos adicionais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradem a empresa Geomechanica pelo fornecimento de uma licença gratuita para realização do trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fukuda, D., Mohammadnejad, M., Lui, H., Zhang, Q., Zhao, J., Dehkoda, S., Chan, A., Kodama, J. Fujii, Y. (2020) Development of 3D hybrid finite-discrete element simulator based on GPGPU- parallelized computation for modelling rock fracturing under quasi-static and dynamic loading conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. V.53 p. 1079-1112.
- Geomechanica. (2018) Irazu 2d Theory Manual. [S.l.: s. n.], p. 1-172.
- Grasselli, G., Lisjak, A., Mahabadi, O., Tatone, B. S. A. (2014) Influence of pre-existing discontinuities and bedding planes on hydraulic fracturing initiation. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, v.19, n5, p.580-597.
- Jing, L. (2003) A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining*, v. 40, n. 3, p. 283-353.
- Kazerani, T., Yang, Z.Y., Zhao, J. (2012) A discrete element model for predicting shear strength and degradation of rock joint by using compressive and tensile data. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. V.45 p. 695-709.
- Kazerani, T., Zhao, J. (2010) Micromechanical parameters in bonded particle method for modelling of brittle material failure. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 34 p.1877-1895.
- Mahabadi, O., Kaifosh, P., Marschall, P., Vietor, T. (2014) Tree-dimensional FDEM numerical simulation of failure processes observed in Opalinus clay laboratory samples. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v6, n.6, p1-16.
- Mahabadi, O. K, Lisjak, A., Munjiza, A., Grasselli, G. (2012) Y-Geo: new combined finite-discrete element numerical code for geomechanical applications. *International Journal of Geomechanics*, v. 12, n.6, Mar.
- Mardalizad, A., Scazzosi, R. Mantes, A., Giglio, M. (2018) Testing and numerical simulation of medium strength rock material under unconfined compression loading. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v.10 p. 197-211.
- Munjiza, A. (2004) The combined finite-discrete element method. London: Jon Wiley & Sons.
- Munjiza, A., & Andrews, K. R. F. (1998). NBS contact detection algorithm for bodies of similar size. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v.43, 131–149.
- Munjiza, A.; Owen, D. R. J.; Bicanic, N. (1995) A combined finite-discrete element method in transient dynamics of fracturing solids. *Engineering Computations*, v.12, n.2, p. 145-174, 1995.
- Oliveira, M. M., Pinto, C.L.L., Mazzinghy, D.B. (2020) FEM-DEM simulation of Brazilian tensile strength (UCS) laboratory tests. *Revista Escola de Minas* v.74 p.503-509

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
 23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
 23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
 COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

- Oliveira, M. M., Pinto, C.L.L., Mazzinghy, D.B. (2020) FEM-DEM simulation of uniaxial compressive strength (BTS) laboratory tests. *Revista Escola de Minas* v.73 p.561-569
- Stefanizzi, S., Barla, G., Grasselli, G. (2009) Numerical modeling of standard rock mechanics laboratory tests using a finite/discrete element approach In: *Canada-Us Rock Mechanics Symposium*, Toronto, Canada.
- Tatone, B. S. A.; Grasselli, G. (2015) A calibration procedure for two-dimensional laboratory-scale hybrid finite-discrete element simulations. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, v. 75, p. 56-72.
- Ulusay, R., (ed) (2015) *ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014*. Springer International Publishing.