

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
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Contribuições Recentes ao Modelo Lattice RMCR em Aplicações nas Áreas de Engenharia e Mecânica de Rochas

Leandro Lima Rasmussen

Professor Adjunto, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, leandro.lima.ra@gmail.com

RESUMO: Neste trabalho, contribuições recentes ao Modelo Lattice Rede de Molas e Corpos Rígidos (RMCR) são apresentadas, as quais permitem a utilização do método em análises de estabilidade probabilística 3D de escavações de túneis rochosos e em simulações dos processos de ruptura de rochas quase-frágeis observados em ensaios laboratoriais convencionais. Pela primeira vez, o novo código numérico estado-da-arte UnBlocks baseado no Método RMCR e desenvolvido para a simulação de rochas e de maciços rochosos fraturados pela técnica do maciço rochoso sintético será apresentado e suas principais características discutidas. Com o objetivo de demonstrar a potencial aplicação do novo programa com o Método RMCR aprimorado pelas contribuições nas áreas de engenharia e mecânica das rochas, os resultados de uma análise de estabilidade probabilística de um trecho intensamente fraturado de um túnel brasileiro conhecido como Túnel Monte Seco e os resultados de simulações de ruptura de um granito canadense em ensaios laboratoriais convencionais são apresentados.

PALAVRAS-CHAVE: Lattice, RMCR, Túnel Monte Seco, Granito Lac du Bonnet, Análise Probabilística, Tensões Características.

ABSTRACT: In this work, recent contributions to the Rigid Body Spring Network Method (RBSN) are presented, which allow the use of the method in 3D probabilistic stability analyses of rock tunnel excavations and in simulations of rupture processes of quasi-brittle rocks as observed in conventional laboratory tests. For the first time, the new state-of-the-art numerical code UnBlocks based on the RBSN Method and developed for the simulation of rocks and rock masses by means of the synthetic rock mass technique will be presented and its main characteristics discussed. In order to demonstrate the potential application of the new program with the improved RBSN Method in the areas of rock engineering and rock mechanics, the results of a probabilistic stability analysis of a Brazilian tunnel known as the Monte Seco Tunnel and the results of numerical simulations of a Canadian granite in conventional laboratory tests are shown.

KEYWORDS: Lattice, RBSN, Monte Seco Tunnel, Lac du Bonnet Granite, Probabilistic Analysis, Characteristic Stress Levels.

1 Introdução

Diferentes formulações numéricas foram investigadas para a simulação da condição de estabilidade de maciços rochosos fraturados e dos processos de fraturamento de rochas intactas. Entre elas, uma classe de métodos discretos conhecidos como modelos Lattice vem sendo recentemente aplicada com sucesso em análises de mecânica das rochas.

A principal hipótese dos modelos Lattice é de que um meio contínuo pode ser representado por massas nodais interligadas por molas. Até este momento, os modelos Lattice já foram aplicados ao estudo dos processos de fraturamento de rochas em ensaios laboratoriais (Rasmussen et al., 2018) e em problemas complexos de engenharia envolvendo fraturamento hidráulico (Damjanac & Cundall, 2016) e estabilidade de taludes (Lian et al., 2017).

Nesse trabalho são apresentados alguns desenvolvimentos recentes realizados pelo autor a um modelo Lattice conhecido como Rede de Molas e Corpos Rígidos ou RMCR (Rasmussen et al. 2018, 2019). O RMCR foi implementado em um código computacional chamado UnBlocks e aplicado com êxito em uma análise probabilística de um trecho do túnel Monte Seco e em análises de ruptura em ensaios laboratoriais do granito Lac du Bonnet. Pela primeira vez, as principais características do programa são apresentadas.

Primeiramente, será feita uma revisão da formulação do modelo Lattice RMCR. Na sequência, o programa UnBlocks e suas principais características são apresentados. Os resultados da análise probabilística do Túnel Monte Seco e das análises de ruptura em ensaios laboratoriais do granito Lac du Bonnet serão então mostrados. As conclusões seguem ao final do artigo.

2 O Modelo Lattice Rede de Molas e Corpos Rígidos (RMCR)

No modelo Lattice RMCR proposto por Bolander et al. (1998), um meio contínuo é discretizado em uma malha de células de Voronoi interconectadas. No centróide de cada interface entre duas células, um sistema de coordenadas local n-s-t é definido de acordo com as direções principais de inércia das faces. Nesse mesmo ponto, uma interação representada por um conjunto de seis molas é definida, a qual permite a transferência de forças e momentos entre as células. A Figura 1 mostra uma representação visual da interface entre duas células de Voronoi i e j , o sistema de coordenadas global em cada célula, e as seis molas orientadas de acordo com o sistema de coordenadas local. A rigidez de cada mola é calculada com base na geometria da interface e na distância entre os núcleos de ambas as células de Voronoi, de acordo com as equações da figura.

Células de Voronoi Conectadas no Método RMCR

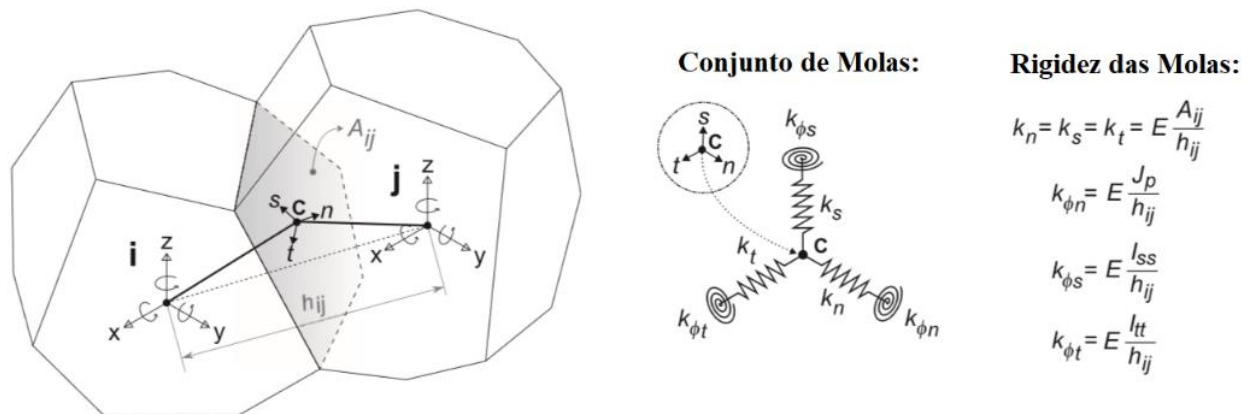


Figura 1. Células de Voronoi conectadas no Método RMCR e o cálculo da rigidez das molas de interação. E é o módulo de Young do material; A_{ij} é a área da interface entre as células de Voronoi i e j ; h_{ij} é a distância entre os núcleos das células; J_p , I_{ss} e I_{tt} são o momento polar e os dois principais momentos de inércia do polígono da interface em relação ao seu centróide.

3 O Programa UnBlocks

O programa Blocks foi escrito em linguagem C++ utilizando o KDevelop Integrated Development Environment, e compilado pelo GNU Compiler Collection (GCC) em ambiente UNIX. Para aumentar a velocidade das simulações, o código foi paralelizado por meio da interface de programação Open Multi-Processing, ou OpenMP. O UnBlocks disponibiliza aos usuários dezenas de comandos, que fornecem liberdade quanto a forma como a geometria da simulação, a malha, as condições de contorno e as etapas da simulação devem ser executadas. O UnBlocks faz uso do formato VTK e do programa Paraview para a realização das tarefas de pós-processamento.

O UnBlocks possui um módulo gerador de Redes de Fraturas Discretas independente, que permite por meio da formulação do modelo de junta lisa proposta por Ivars et al. (2011) a aplicação da técnica do maciço rochoso sintético. A Figura 2 apresenta os passos da aplicação da técnica em um modelo Lattice no programa UnBlocks.

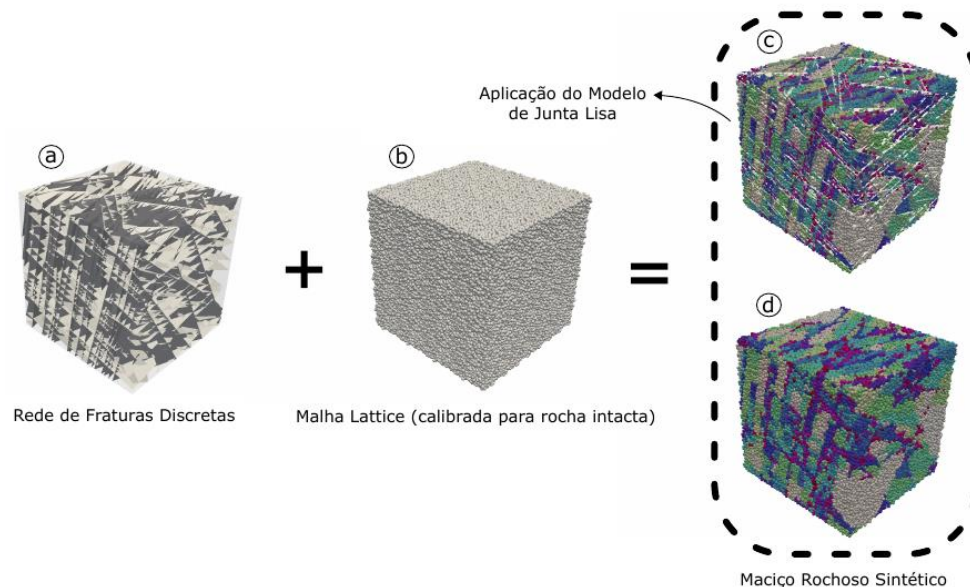


Figura 2. Aplicação da Técnica do Maciço Rochoso Sintético em modelo Lattice no programa UnBlocks. (a) Geração da Rede de Fraturas Discretas; (b) calibração da Malha Lattice; (c) união da rede de fraturas discretas com a malha Lattice pelo Modelo de Junta Lisa; e (d) maciço rochoso sintético finalizado.

Uma etapa fundamental da simulação numérica trata-se do pré-processamento, a qual inclui todas as configurações do modelo. O programa UnBlocks faz uso da linguagem Python para a definição dos parâmetros de cenário da simulação, do modelo de Rede de Fraturas Discretas, da malha de células Voronoi, dos materiais e das condições de contorno. A Figura 3 apresenta o esquema básico de elaboração de um roteiro Python de simulação do programa UnBlocks, onde em cada etapa da fase de pré-processamento, exemplos de comandos relevantes são apresentados.

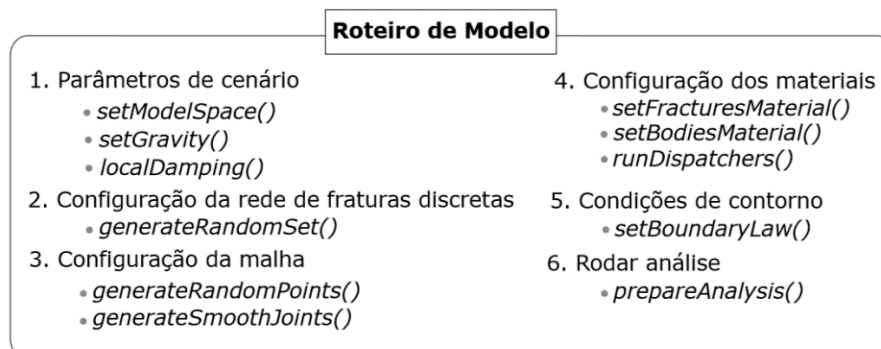


Figura 3. Exemplo básico de um roteiro Python para a realização de uma simulação no programa UnBlocks.

4 Análise de Estabilidade Probabilística do Túnel Monte Seco

Nesta seção, será apresentada a aplicação combinada do UnBlocks e a técnica de simulação Monte Carlo na análise de estabilidade probabilística da escavação de um trecho de 8 m de comprimento de um túnel raso sem suporte conhecido como túnel Monte Seco. O objetivo principal consistiu em desenvolver uma metodologia probabilística que pudesse ser aplicada de forma prática em projetos de pesquisa e engenharia. Nesse sentido, três contribuições foram propostas ao modelo Lattice no programa UnBlocks:

1. Programação do modelo constitutivo Barton & Bandis para a representação da resistência e deformabilidade das discontinuidades de maciços rochosos;
2. Conectividade a um serviço de computação em nuvem para a execução de simulações Monte Carlo.

3. Apresentação dos resultados na forma de mapa de probabilidades posicionais. Onde a seção transversal do túnel e isolinhas que representam igual valor de probabilidade de ruptura são mostradas.

A sequência de aplicação da metodologia segue na Figura 4. Será visto um panorama dos principais resultados obtido nesta pesquisa, sendo que os detalhes podem ser encontrados em Rasmussen et al. (2019).

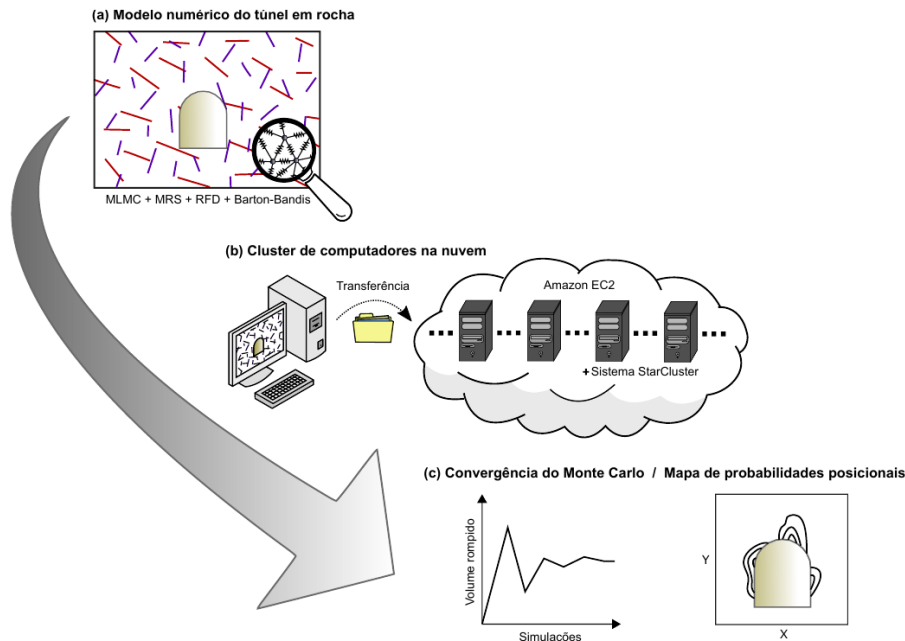


Figura 4. Metodologia de análise: a) Modelo Lattice do túnel; b) cluster de computadores em nuvem para a realização de simulações de Monte Carlo; e c) verificação da convergência da simulação Monte Carlo e elaboração do mapa de probabilidades posicionais (modificado de Rasmussen et al., 2019).

O Túnel Monte Seco faz parte da Estrada de Ferro Vitória-Minas, atualmente operada pela mineradora Vale SA e localizada no Estado do Espírito Santo, Brasil. O túnel mede aproximadamente 970 m de comprimento e foi escavado em rochas gnáissicas fraturadas do complexo Paraíba do Sul, parte do cinturão orogênico Paleoproterozóico de Araçuaí.

Na pesquisa realizada por Cacciari (2014), o mapeamento das discontinuidades presentes no trecho estudado do túnel foi realizado por escaneamento Lidar. A partir desse mapeamento, a orientação das fraturas, suas posições e o comprimento dos traços das discontinuidades foram analisados estatisticamente. Com base nos dados, foi possível construir um modelo do sistema de discontinuidades do túnel para a realização de análise de estabilidade probabilística mediante a nova metodologia proposta. A Figura 5 apresenta um exemplo de Rede de Fraturas Discretas do trecho estudado do túnel gerada pelo novo programa UnBlocks.

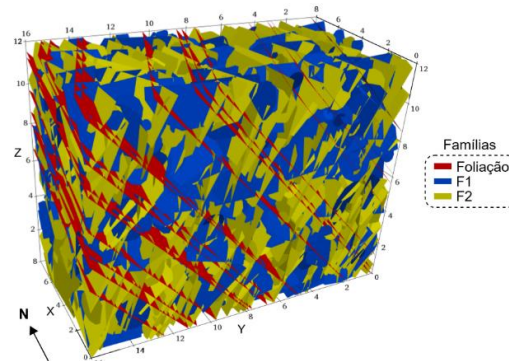


Figura 5. Rede de Fraturas Discretas 3D do trecho estudado do túnel Monte Seco.

O modelo numérico do túnel Monte Seco possui 50 m de largura, 61 m de altura e 8 m de profundidade. A seção do túnel tem 5,4 m de largura e 6 m de altura, com um perfil em forma de ferradura.

A análise de estabilidade probabilística foi realizada por um cluster de computação em nuvem utilizando o serviço da Amazon EC2 composto por 40 instâncias virtuais e 200 simulações foram realizadas em menos de um dia a um custo razoável. A convergência da simulação foi analisada pelo valor médio do volume total de blocos rompidos em todas as simulações. A Figura 6 mostra três cenários de estabilidade obtidos das análises: o melhor, o esperado e o mais crítico ou pior. Na imagem, nota-se que o volume total de blocos rompidos apresentou uma variação maior que 3000% entre os diferentes cenários.

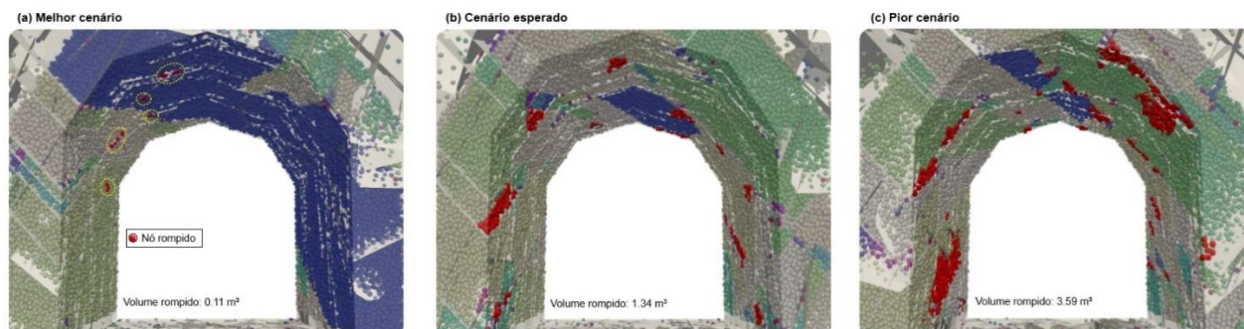


Figura 6. Três cenários de estabilidade das 200 simulações realizadas: a) o melhor cenário, com o volume mínimo de blocos rompidos; b) o cenário esperado, em que o volume de blocos rompidos é aproximadamente o médio; e c) o pior cenário, em que o volume máximo foi obtido (modificado de Rasmussen et al., 2019).

A Figura 7 apresenta o mapa de probabilidades posicionais obtido das análises. De forma geral, a figura indicou que a seção analisada é bastante estável e capaz de resistir sem sistema de suporte. Apenas uma porção do teto e da parede oeste apresentou regiões com probabilidade de ruptura em torno de 1%. Esta conclusão é condizente com o comportamento in-situ observado do trecho do túnel estudado, o qual permaneceu estável por mais de 78 anos sem qualquer sistema de suporte.

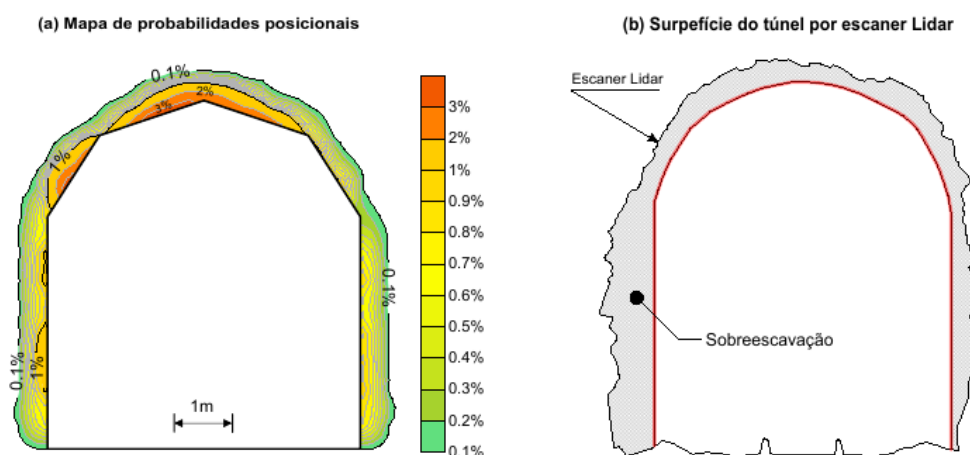


Figura 7. Mapa de probabilidades posicionais do trecho estudado do túnel Monte Seco e a superfície interna real do túnel obtida por escaner Lidar (modificado de Rasmussen et al., 2019).

Como conclusão, a metodologia de estabilidade probabilística com Modelo Lattice e computação em nuvem trouxe diversas melhorias em comparação com os métodos usualmente utilizados: assimilação de sistemas de descontinuidades complexos que podem conter fraturas não-persistentes e não-terminantes; ausência de restrição quanto ao modelo constitutivo adotado para as descontinuidades; e a matriz rochosa numérica é deformável e capaz de propagar fraturas à tração no modo-I. Assim, os resultados dessa pesquisa destacam o potencial uso dos Modelos Lattice em análises práticas de estabilidade probabilísticas de túneis.

5 Análise Numérica de Ruptura de Granito em Ensaio Laboratorial

Com o objetivo de modelar os processos complexos de fraturamento exibidos por rochas quase-frágeis, o RMCR foi estendido. Como objetivo principal, os cinco níveis de tensões características durante o processo de fraturamento de rochas quase-frágeis sob compressão não-confinado (Bieniawski, 1967; Eberhardt et al., 1998) devem ser bem representados: a tensão de fechamento de micro-fraturas pré-existent, a tensão de início de fraturamento estável, a tensão de dano e a resistência de pico da rocha. Na tentativa de alcançar esse objetivo, três novas contribuições foram fornecidas ao RMCR:

1. Um Modelo de Zona Coesiva modificado (MZC) baseado no trabalho de Camanho & Davila (2002), que fornece o efeito do confinamento no comportamento de fraturamento no fraturamento no modo-II.
2. Uma representação da heterogeneidade na meso-escala da rocha por meio da função de distribuição de probabilidade normal e de um valor de coeficiente de variação.
3. A possível atribuição de micro-fraturas preexistentes e do valor inicial de suas aberturas por meio da metodologia da Micro Rede de Fraturas Discretas (μ RFD) (Hamdi et al., 2015).

A Figura 8 apresenta um esquema das contribuições apresentadas ao RMCR clássico e o desenvolvimento do RMCR estendido. No sentido de testar as novas contribuições, foi realizado por Rasmussen et al. (2018) um estudo numérico do granito Lac du Bonnet, encontrado no sudeste de Manitoba no Canadá. A metodologia numérica proposta foi utilizada de forma a reproduzir o complexo comportamento de fraturamento da rocha e suas propriedades de resistência e de deformabilidade, conforme observados nos seguintes ensaios laboratoriais: compressão não-confinado, triaxial, tração direta e ensaio brasileiro. Nesta seção, são mostrados os resultados obtidos para o caso da análise do ensaio de compressão não-confinado.

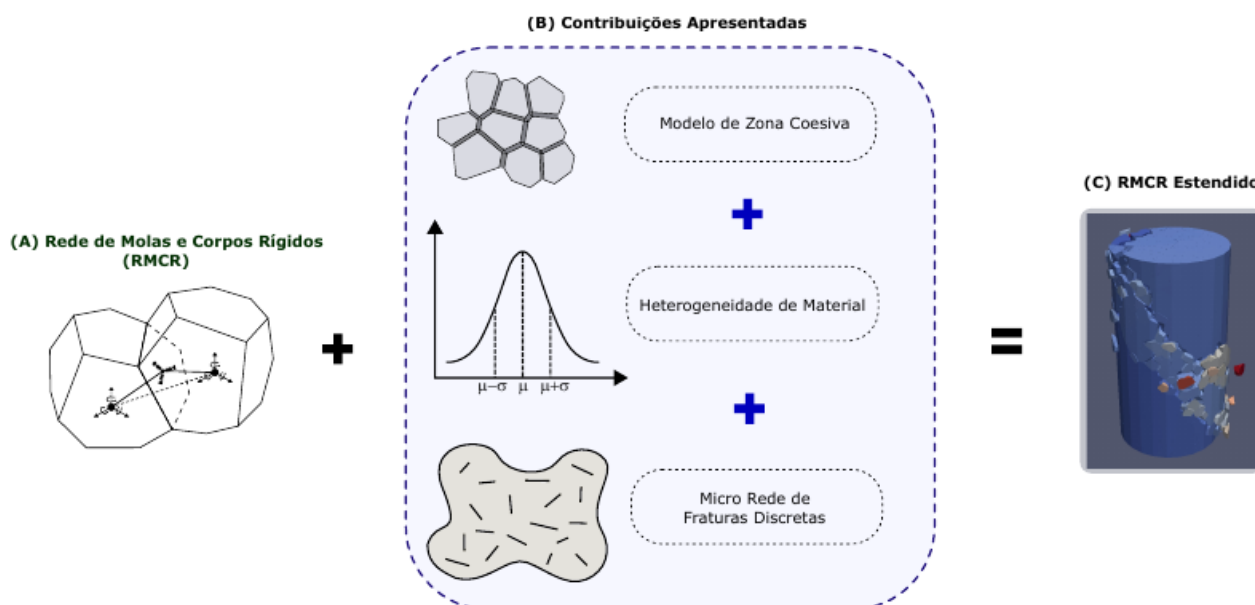


Figura 8. Metodologia de desenvolvimento do RMCR estendido: a) método RMCR original; b) três contribuições apresentadas na pesquisa; e c) método RMCR estendido, o qual é capaz de simular os processos de fraturamento de rochas quase-frágeis (modificado de Rasmussen et al., 2018).

Um único ensaio de compressão não-confinado foi realizado numericamente a fim de verificar se a amostra numérica no Modelo RMCR Estendido consegue representar todos os cinco estágios de fraturamento indicados por Bieniawski (1967). No modelo numérico, um tamanho médio para as células de Voronoi de 2 mm foi adotado, no sentido de representar numericamente de forma apropriada a zona de processo de fraturamento da rocha real.

Os resultados do ensaio numérico estão apresentados na Figura 9. Quatro gráficos foram derivados do ensaio de compressão não-confinado: tensão vertical - deformação específica vertical, tensão vertical -

deformação específica lateral, deformação específica volumétrica total – deformação específica vertical e deformação específica volumétrica das fraturas - deformação específica vertical. Essas curvas seguem plotadas juntas com as apresentadas por Martin & Chandler (1994) para um ensaio real do granito Lac du Bonnet.

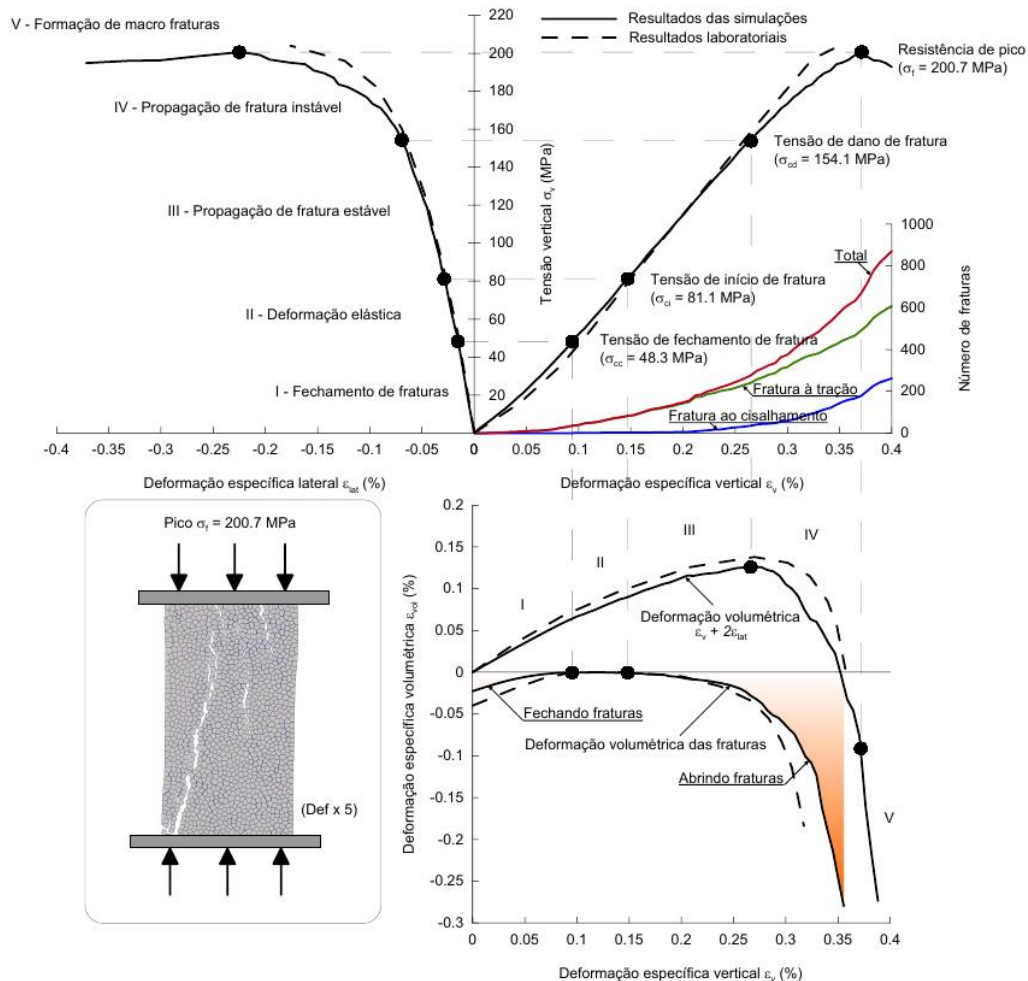


Figura 9. Resultado numérico e laboratorial do ensaio de compressão não-confinado do granito Lac du Bonnet e amostra numérica rompida (modificado de Rasmussen et al. 2018).

Na Figura 9, os cinco estágios de fraturamento são observados. Inicialmente, há uma resposta não-linear de tensão-deformação devido ao fechamento de micro-fraturas preexistentes orientadas perpendicularmente à direção da tensão vertical. Em seguida, tem-se um comportamento elástico-linear, onde não ocorre variação na deformação específica volumétrica das fraturas. Posteriormente, há o início de um comportamento não-linear caracterizado por fraturamento estável do material, sem interação entre as fraturas. Na sequência, ocorre uma inversão na curva de deformação específica volumétrica total e o fraturamento instável se inicia devido à interações entre as fraturas. Concluindo, ocorre a formação de macro-fraturas e a ruptura por separação axial.

Os resultados mostram que uma correspondência muito boa entre o comportamento do modelo numérico e o da rocha real foi alcançada. O RMCR estendido foi capaz de representar os níveis de tensões característicos associados ao complexo fenômeno de fraturamento de rochas quase-frágeis solicitadas a compressão: tensão de fechamento de fraturas, tensão de início de fraturamento estável, tensão de dano e resistência de pico.

6 Conclusão

O modelo Lattice Rede de Molas e Corpos Rígidos (RMCR) foi recentemente aprimorado com novas contribuições que o tornaram capaz de analisar a ruptura de rochas quase-frágeis em ensaios laboratoriais e de analisar probabilisticamente a estabilidade de túneis em maciços rochosos fraturados. Um programa de



computador foi elaborado com base na formulação do RMCR e nas contribuições propostas, o qual recebeu o nome de UnBlocks. O programa e suas principais características foram aqui apresentados pela primeira vez. A solidez das contribuições ao RMCR foi verificada por meio de análise de ruptura em ensaio de compressão do granito Lac du Bonnet e de análise probabilística de estabilidade do tunel Monte Seco. Um panorama geral dos resultados obtidos foi mostrado. Concluindo, o programa UnBlocks e o Modelo Lattice RMCR estendido possuem grande potencial na resolução de problemas complexos nas áreas de engenharia e mecânica de rochas, porém novos estudos são necessários no sentido de melhor validar o método e compreender as suas limitações.

AGRADECIMENTOS

Agradeço os professores André Pacheco de Assis e Márcio Muniz de Farias da Universidade de Brasília pela orientação concedida no decorrer da pesquisa de doutorado do autor. Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bieniawski, Z. T. (1967) Mechanism of brittle fracture of rock; Part I-theory of the fracture process. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 4, p.395-406.
- Bolander, J. & Saito, S. (1998) Fracture analyses using spring networks with random geometry. *Engineering Fracture Mechanics*, 61(5), p.569- 591.
- Cacciari, P. P. (2014). *Estudo de um túnel em maciço rochoso fraturado por investigação geológico geotécnica e análises pelo método dos elementos distintos*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.
- Camanho, P. & Davila, C. (2002) Mixed-Mode Decohesion Finite Elements for the Simulation of Delamination in Composite Materials. Nasa, TM-2002-21(June), p.1-37.
- Damjanac, B., Detournay, C. & Cundall, P. A. (2016) Application of particle and lattice codes to simulation of hydraulic fracturing. *Computational Particle Mechanics*, 3(2), p.249–261.
- Eberhardt, E., Stead, D., Stimpson, B. & Read, R. S. (1998) Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(2), p.222–233.
- Hamdi, P., Stead, D. & Elmo, D. (2015) Characterizing the influence of stress-induced microcracks on the laboratory strength and fracture development in brittle rocks using a finitediscrete element method-micro discrete fracture network FDEM-DFN approach. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(6), p.609–625.
- Ivars, D. M., Pierce, M. E., Darcel, C., Reyes-Montes, J., Potyondy, D. O., Young, R. P. & Cundall, P. A. (2011) The synthetic rock mass approach for jointed rock mass modelling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(2), p.219 – 244.
- Lian, J.-J., Li, Q., Deng, X.-F., Zhao, G.-F. & Chen, Z.-Y. (2017) A numerical study on toppling failure of a jointed rock slope by using the distinct lattice spring model. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(2), p.513–530.
- Martin, C. D. & Chandler, N. A. (1994). The progressive fracture of Lac du Bonnet granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 31(6), p.643–659.
- Rasmussen, L. L., Farias, M. M. & Assis, A. P. (2018) Extended rigid body spring network method for the simulation of brittle rocks. *Computers and Geotechnics*, 99, p.31 – 41.
- Rasmussen, L. L., Cacciari, P., Futai, M. M., Farias, M. M. & Assis, A. P. (2019) Efficient 3D probabilistic stability analysis of rock tunnels using a Lattice Model and cloud computing. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 85, p.282-293.