

5

Considerações finais

5.1.

Conclusões

O objetivo principal desta dissertação foi analisar a influência da microestrutura nas propriedades mecânicas das rochas carbonáticas a partir de imagens digitais de microtomografia. Para tal tarefa, foi requerido um estudo multidisciplinar, partindo desde a geologia, geofísica, tomografia, microtomografia, biomedicina, computação gráfica, processamento e análise de imagens, ciências dos materiais, mecânica das rochas, entre outras para o entendimento do problema e encontrar as possíveis alternativas que permitiram desenvolver e implementar uma metodologia utilizando as tecnologias de ponta existentes e pacotes de software comerciais como CTAN, ScanIP e ABAQUS. Durante todo o processo pode-se concluir que é possível o estudo da microestrutura de rochas carbonáticas integrando microtomografia e análises numéricas. Além disso, foram observadas algumas variações nas propriedades mecânicas (módulo de Young) em função da microestrutura. Embora, a resolução das imagens e as limitações da teoria elástico-linear não permitiram capturar apropriadamente a influência dos componentes mineralógicos e a interação entre os contatos.

Apesar da existência de uma gama de técnicas para geração de malhas, deve-se ter em mente que estas, em sua maioria, não foram desenvolvidas para geração a partir de imagens tridimensionais e as que foram inicialmente, tendo sido desenvolvida para aplicações principalmente na área médica. A geração de malhas tridimensionais a partir de microtomografia em rochas com estrutura complexa ainda apresenta inúmeros desafios. No entanto, abre uma janela de possibilidades únicas para pesquisas e o entendimento das rochas. Neste trabalho, uma vez realizada a segmentação das fases presentes das imagens, na etapa de geração de malhas foi utilizada uma abordagem baseada em construção de elementos a partir de “voxels”, uma abordagem simples, robusta com intuito de fornecer malhas de boa qualidade, mas que conta com algumas limitações, especialmente no controle do número de elementos gerados. Neste

contexto, uma abordagem simples, que deve ser empregada cautelosamente, para a redução do número de elementos foi aplicada. A técnica mostrou-se confiável nos estudos de representatividade realizados.

Os resultados deste estudo proveem um entendimento fundamental do comportamento mecânico das rochas carbonáticas a partir de análise e processamento de imagens digitais de amostras de rochas carbonáticas.

É possível obter um grande número de amostras a partir de uma imagem tomográfica única o que permite que medidas das propriedades elásticas sejam extraídas ao longo de uma variada gama de porosidade.

Investigação detalhada dos diferentes elementos microestruturais e sua influência para as três rochas análogas de carbonatos deixam as seguintes conclusões principais:

- As sub-amostras extraídas para os três tipos de travertinos estudados abrangem valores de porosidades na faixa de 0 a 6,5%. Nas análises de porosidade, encontrou-se maior porosidade nas sub-amostras de travertino Romano que nas do travertino Turco. Assim como porosidade inexistente na sub-amostra do travertino de Itaboraí.
- Quanto à porosidade conectada, encontrou-se uma contribuição maior deste tipo de porosidade, na porosidade total, nas sub-amostras do travertino Romano (82%) que nas as sub-amostras do travertino Turco (45%).
- Por meio da visualização tridimensional comprovou-se a complexidade e heterogeneidade deste tipo de rochas. Pode-se apreciar a distribuição espacial aleatória e heterogênea dos poros dentro da rocha, assim como a vasta geometria irregular dos poros existentes. Ditas apreciações, não seriam possíveis no laboratório, sem implicar na destruição da amostra. Ratificou-se a presença de porosidade intergranular e “vuggy” em todas as sub-amostras. A presença de porosidade vuggy confirma a existência de padrões de crescimento biológico durante a formação destes tipos de travertinos, assim como de processos de diagênese por dissolução. Além disso, constatou-se a presença de estruturas não seletivas devido à presença de porosidade em forma de cavidades de tamanhos variados atravessando a estrutura da rocha.
- Nas análises de tamanho de poros, tanto nos travertinos Romanos como nos Turcos, comprovou-se a presença de porosidade vulgar

e intergranular. Encontraram-se contribuições entre 77 e 86 % de porosidade intergranular e entre 14 e 23 % de porosidade vugular e macroporos, para os dois tipos de travertinos respectivamente. Além disso, foram encontrados diâmetros máximos de poro de 8 mm e 4 mm para as sub-amostras dos travertinos Romanos e Turcos, respectivamente.

- Embora fatores como a resolução das imagens, manipulação durante o processamento, geração das malhas e hipóteses assumidas durante a simulação, resultem possivelmente em diminuição das variações das propriedades elásticas. As maiores variações do módulo de Young (81,84 e 84,84 GPa) para os travertinos Romanos e turcos, foram encontradas nas sub-amostras TRR-2 e TRT-3 que apresentam maiores porcentagens de porosidade não conectada ou fechada (19 e 72 %) e porosidade intergranular (79 e 86 %), apesar de não serem as sub-amostras com maior porosidade total (5,2 e 1,4 %) dentro das estudadas. Desta forma, conclui-se que para este tipo de rocha, as propriedades mecânicas, especificamente no Módulo de Young, podem estar influenciadas mais pelos tipos, distribuição espacial e conectividade dos poros do que pelo valor da porosidade total. Portanto, conclui-se que as propriedades elásticas, especificamente o módulo de Young, são influenciadas pela microestrutura e a distribuição do sistema poroso, contido de porosidade intergranular e porosidade fechada mais do que por o valor total da porosidade.
- Os tipos de poros das rochas têm um papel importante nas propriedades físicas, uma vez que diferentes tipos de poros têm diferentes compressibilidades, que por sua vez, afetam as propriedades mecânicas do material.
- Os resultados também corroboram a literatura com relação á influencia dos poros vugulares na resposta mecânica do travertino, uma vez que estes apresentaram uma menor influência quando comparados com a microporosidade. A maior variação do módulo para o travertino turco deu-se na sub-amostra com menor porosidade vugular (14 %).

De maneira geral, a utilização de imagens digitais a partir de microtomografia requer a utilização de diferentes softwares computacionais que,

por sua vez, envolvem a utilização de equipamentos computacionais robustos e o emprego de técnicas de otimização computacional, de forma a tornar as análises operacionalmente viáveis.

5.2. Recomendações

Recomenda-se para os trabalhos futuros baseados em microtomografia, utilizar as mesmas sobre amostras que serão testadas em laboratório para poder obter uma validação mais precisa dos resultados da simulação numérica. Recomenda-se seguir a metodologia desenvolvida na Figura 4-35. Um estudo mais abrangente que inclui diversas amostras com vários tipos de poros precisa ser realizado para melhorar e enriquecer os resultados apresentados neste trabalho.

Recomenda-se a obtenção de microtomografias com a melhor qualidade possível, assim como a utilização de técnicas de aquisição de imagens tais como a microscopia eletrônica de varredura e outras técnicas emergentes, com o intuito de aumentar a resolução e identificar os complexos contatos entre partículas (grãos e cimento), além de microporos que são muito comuns e influentes nas rochas carbonáticas. Isto conduzirá a predições melhores, já que permitirá a atribuição explícita de diferentes módulos de elasticidade tanto aos grãos como ao cimento, em vez da atribuição de um módulo na fase sólida. Além disso, recomenda-se o estudo do efeito da escala na medição das propriedades mecânicas.

Recomenda-se, também, a exploração das capacidades dos algoritmos de segmentação e de geração de malhas que não foram totalmente exploradas no presente trabalho. Isto se torna fundamental para a ampliação do estudo da relação da microestrutura e as propriedades mecânicas, para o estudo do comportamento poro-elástico e inclusive para estudos de fluxo.