

Avaliação de propriedades elásticas de rochas carbonáticas a partir de análise microestrutural

Gustavo H. O. Sobreira

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil,
gustavo.sobreira@gmail.com

Sergio A. B. da Fontoura

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, fontoura@puc-rio.br

RESUMO:

Reservatórios carbonáticos contêm entre 50 e 60% de petróleo e gás do mundo. O estudo dessas rochas representa um grande desafio devido à sua heterogeneidade e anisotropia. Os carbonatos apresentam um sistema de poros complexo e, até agora, de difícil mapeamento de sua ocorrência e previsibilidade sendo afetado por processos como a diagênese, reprecipitação, dolomitização e fraturamento, originando poros de diferente forma e tamanho, os quais podem variar de alguns micrometros a vários metros. Na indústria do petróleo, as propriedades mecânicas são obtidas através de ensaios indiretos, sísmica e perfilagem; e em ensaios diretos, ensaios de laboratório e ensaios no próprio poço. A proposta deste trabalho integra o processamento e análises de imagens digitais, elaboração de malhas de elementos finitos e simulação numérica de forma a prever propriedades elásticas, com o objetivo de correlacionar a microestrutura e o módulo de Young. Foram utilizadas imagens digitais de amostras de afloramento (travertinos) considerados como possíveis análogos a rochas carbonáticas de reservatório. A metodologia implementada permitiu obter subamostras que incluem uma gama de microestruturas e porosidades numa única amostra para assim simular numericamente o módulo de Young. Conclui-se neste estudo que os poros maiores (vuggys) são os principais responsáveis pelo comportamento do material quando o mesmo é carregado, e também a influência da estrutura porosa nos resultados, foi possível observar que a posição dos poros afeta o módulo de elasticidade do corpo de prova.

PALAVRAS-CHAVE: Microestrutura, Rochas Carbonáticas, Microtomografia de Raios-X, Propriedades elásticas.

1 INTRODUÇÃO

As rochas carbonáticas contêm mais de 60% das reservas de mundiais de petróleo e 40% das reservas de gás. Após a descoberta dos reservatórios carbonáticos do pré-sal essas rochas ganharam maior destaque no Brasil. Na indústria do petróleo, as propriedades mecânicas são obtidas através de ensaios indiretos, sísmica e perfilagem; e em ensaios diretos, ensaios de laboratório e ensaios no próprio poço. Para os ensaios de laboratório são confeccionados corpos de provas extraídos de testemunhos e possuem alto custo operacional.

Além de testemunhos são retirados do poço amostras laterais e amostras de calha.

Com a técnica descrita nesse texto, pretende-se guardar os testemunhos, amostras laterais e amostras de calha como imagens digitais para futuros ensaios mecânicos e extração de valores como porosidade e permeabilidade que podem ser comparados com outras técnicas. A vantagem desta técnica é que os ensaios podem ser repetidos várias vezes variando as condições e dados de entrada, podendo ser escolhida qualquer parte do material em qualquer orientação. Como contrapartida, a iniciativa requer o imageamento

dos testemunhos em microtomógrafo, o arquivamento deste material de forma rastreável e a necessidade de manipulação de arquivos e sistemas de dados de grandes proporções.

O objetivo deste trabalho é entender o comportamento mecânico das rochas carbonáticas a partir de imagens digitais obtidas por microtomografia, dando prosseguimento aos trabalhos iniciados por Pilotto (2011) e Pico (2013) na análise de travertinos seguindo a metodologia apresentada na figura 1. O contínuo desenvolvimento da indústria do petróleo incita a realização de pesquisas, as quais envolvem áreas multidisciplinares. Dentre elas o processamento de imagens e mecânicas das rochas por meio de resultados numéricos, que associados às informações de geologia da rocha, permitem a melhor compreensão do comportamento do material.

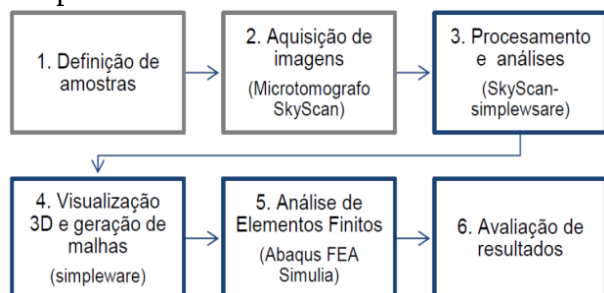


Figura 1. Metodologia de trabalho.

Os travertinos podem ser empregados como rochas análogas aos carbonatos do Pré-Sal, ao menos as fácies mais porosas, conforme apresenta Pilotto (2011) em seu trabalho, considerando características como: textura, composição mineralógica, agentes formadores e resistência. A mesma autora coletou e realizou a microtomografia nas rochas, assim como a realização de diversos ensaios.

As imagens obtidas por microtomografia foram processadas e analisadas por softwares de que fornecem porosidade, distribuição, tamanho de poros e arquitetura da estrutura do arcabouço. Isso permite uma melhor caracterização do comportamento do material através de simulação numérica onde também podemos obter propriedades elásticas dessas rochas microtomografadas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os

materiais usados nessa pesquisa e a metodologia utilizada para tirar as propriedades das amostras microtomografada.

2.1 Materiais

Para a realização desse trabalho foram utilizados nove corpos de prova retirados de três travertinos de origens diferentes, Travertino de Itaboraí, Travertino Romano e Travertino Turco, mostrados nas figuras 2, 3 e 4.

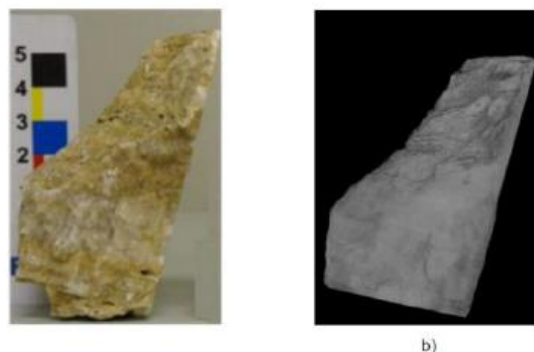


Figura 2 Travertino de Itaboraí. a) Real b) imagem.

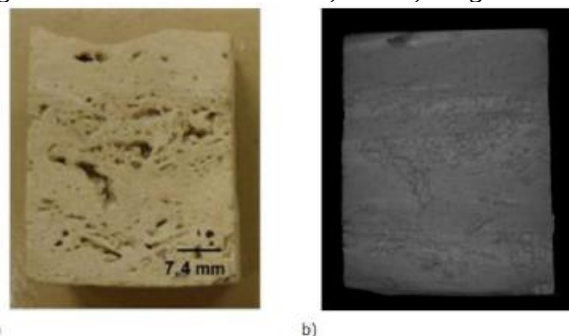


Figura 3 Travertino Romano. a) Real b) imagem.

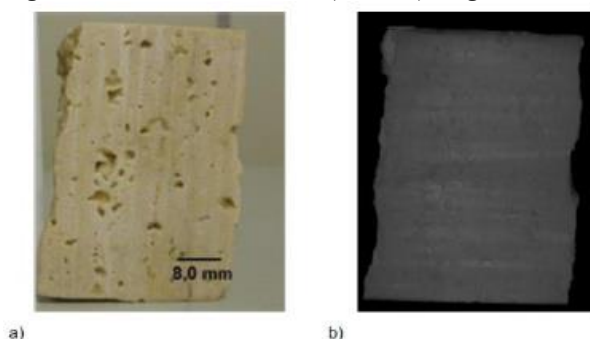


Figura 4 Travertino Turco. a) Real b) imagem.

A subamostragem dos nove corpos de prova cilíndricos realizados por Pico (2013) seguiram a relação diâmetro/altura recomendadas pelas normas da International Society for Rock Mechanics (ISRM). Como mostra a figura 5.

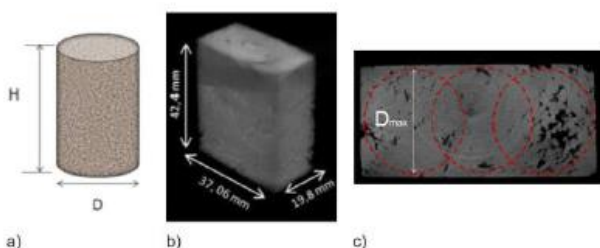


Figura 5 Sub amostragem digital: a) Amostra para ensaio de compressão simples. b) Análise digital da geometria da amostra e c) Subamostragem.

A técnica utilizada permite a extração de várias subamostras a partir de uma amostra microtomografada, em qualquer direção. Diferente da realização de corpos de provas reais, os corpos de provas digitais permitem a simulação de vários ensaios e não passam por processos de extração ou corte. As dimensões das subamostras assim como a nomenclatura utilizada estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 Dimensões e resolução das subamostras.

Travertino	Subamostra	d(mm)	H(mm)	Resolução
Travertino Itaborai	TI-1	12,15	24,3	33,84
Travertino Romano	TR-1,2,3	19,03	38,06	26,08
Travertino Turco	TT-1,2	19,03	38,06	26,08
Travertino Turco	TT-3,4,5	10,1	20,2	26,08

Para o pré-processamento utilizou-se o software *Fiji*, para analisar a porosidade, classificar os tipos de poros e para geração de malhas utilizou-se o software *Scan IP* e para a realização de ensaios virtuais utilizou-se o software *ABAQUS* versão 6.9, ano 2009.

2.2 Métodos

O foco desse trabalho é entender como a estrutura porosa dos travertinos influencia nas propriedades elásticas seguindo o fluxograma com as etapas de processamento, extração de atributos, geração de malhas, análise de elementos finitos e resultados (Figura 6).

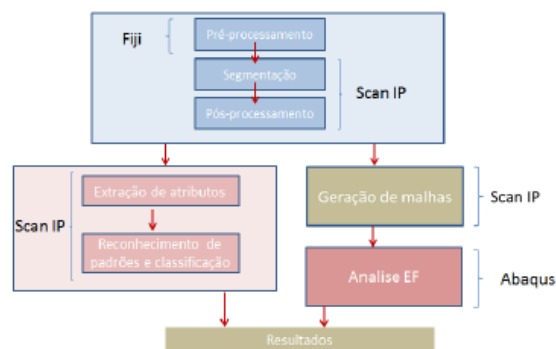


Figura 6 Fluxo de trabalho.

3 PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Nesta etapa iremos abordar as técnicas de processamento de imagem usadas para realização desse trabalho. Essas técnicas permitem que as imagens sejam preparadas para a obtenção da porosidade e geração de malhas de elementos finitos.

O programa *Fiji* apresenta uma série de filtros para se trabalhar com imagens. O presente trabalho utilizou o filtro *Sigma* que realiza uma suavização usando o domínio e uma faixa da sua vizinhança, o resultado é uma imagem que é suavizada nas regiões homogêneas e as bordas são preservadas. O filtro *Sigma* apresenta menor redução da intensidade nas bordas, o resultado disso é uma menor interferência na medição da porosidade e por isso foi a técnica escolhida para retirar os ruídos da microtomografia.

Após o filtro a imagem com 256 cores é transformada em uma imagem binária com a técnica de limiarização. O programa *Fiji* permite que o usuário opte por três tipos de limiarização: manual, automática ou por programas de redes neurais. O *Scan IP* permite apenas a limiarização manual, fazendo com que esta técnica seja usada no decorrer deste trabalho uma vez que a geração de malhas será gerada a partir do módulo de elementos finitos do *Scan IP*. O limiar escolhido foi o de 60, o mais correto é que seja analisado caso a caso, porém, para isto, é necessária experiência do operador e comparação com medidas físicas reais, tais como porosidade total, por exemplo. O valor único permite uma homogeneização da técnica (figura 7).

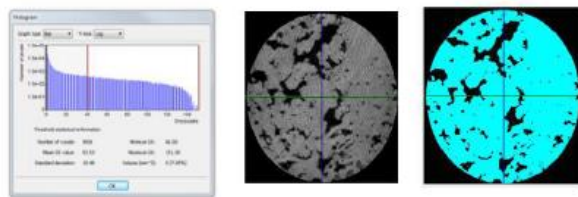


Figura 7 Linearização manual.

Caso a imagem gerada fosse para o programa de geração de malhas com 100% de sua resolução original, o número de elementos gerados pelo programa de geração de malhas seria enorme, em torno de cem milhões de elementos. A versão do programa de elementos finitos disponível não consegue calcular essa quantidade de elementos. Para resolver esse problema usamos a ferramenta de Reamostragem que é uma operação geométrica que mantém a escala do objeto e diminui a resolução.

Como preparação para geração de malhas, usamos a ferramenta *floodfill* para retirar partes sólidas não conectadas, essas partes não conectadas não atendem o princípio da continuidade em elementos finitos, por isso precisa ser tratada. Caso essa ferramenta não seja utilizada, podemos ter um material “flutuando” dentro do poro,

Após a imagem segmentada o programa *Scan IP* fornece uma máscara que sobrepõe à faixa tonal escolhida na segmentação. Conforme mostra a figura 8. Essa máscara é renomeada como material. O próximo passo é a geração da máscara poros, que são os *voxels* de intensidade abaixo do limiar escolhido para o material. A geração das malhas tridimensionais é feita no software *Scan IP* no módulo elementos finitos. As imagens segmentadas são usadas para a aplicação de algoritmos de geração de malhas.

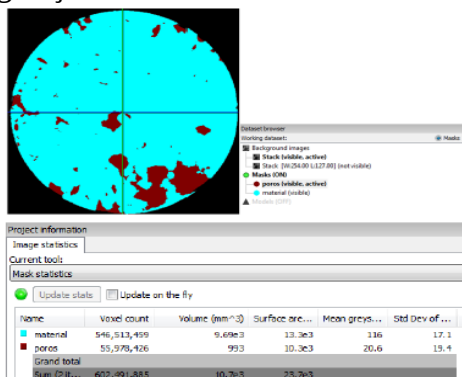


Figura 8 Extração da porosidade.

A geração de modelos tridimensionais é constituída a partir de uma grade cartesiana de dados em escala de cinza que representam a intensidade relativa do sinal digitalizado em todo o volume da imagem. O módulo elementos finitos do *Scan IP* fornece dois métodos ou algoritmos para geração de malhas, os algoritmos *FE Grid* e o *FE Free*. O algoritmo *FE Grid* dispõe de dois tipos de malhas a do tipo “voxel” e do tipo suavizado.

Após a criação da malha, o programa permite ao usuário a opção de inspecionar a qualidade da malha em parâmetros que descrevem a forma e qualidade dos elementos tetraédricos. Para escolher qual tipo de malha usar, os parâmetros avaliados foram o número de elementos e as medidas dos ângulos do diedro. O *FE Grid Voxel* apresentou melhor métrica dos elementos. Ângulos grandes ou pequenos distorcem a malha e podem gerar problemas de execução no programa de elementos finitos. Por apresentar melhores métrica, o algoritmo escolhido foi o *FE Grid* (1*1*1).

Após a escolha do algoritmo de geração de malhas o programa usa a máscara gerada na segmentação para obtenção do número de materiais que serão utilizados e a definição de contatos e nós. Cada material é definido por uma faixa de tonalidade no histograma. Na figura 9 o primeiro material irá ser os de voxels com faixa tonal entre 60 e 80 (na escala de cinza) e o segundo material entre 80 e 255. Na faixa tonal de 60- 80 foram observadas a intensidade dos voxels nos contornos dos poros e do corpo de prova.

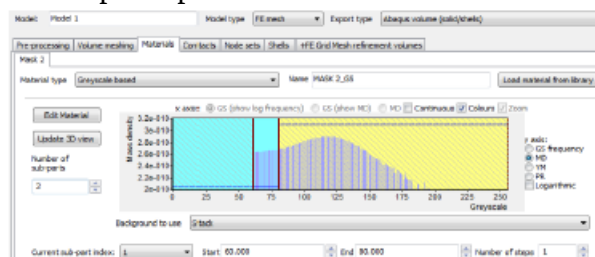


Figura 9 Definição de materiais.

Com o intuito de simular as propriedades elásticas e obter o módulo de elasticidade do sistema poroso foi usado o método dos deslocamentos que propõe simular a aplicação de deslocamentos uniformes

gerando tensões locais. As simulações foram feitas no programa *ABAQUS*. O *Scan IP* forneceu a geometria do problema, os elementos, nós e superfícies, no *ABAQUS* inserimos as condições de contorno, propriedades do material e o deslocamento. No fluxograma da figura 10 são apresentadas as etapas para a simulação.

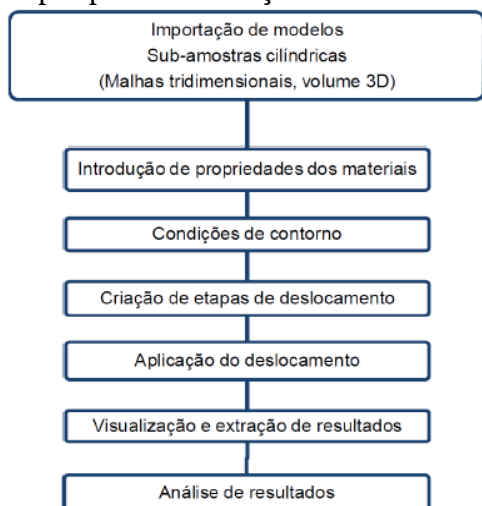


Figura 10 Fluxo de trabalho MEF.

Para os elementos com apenas um material foi usados os valores médios da calcita retirados da literatura. Para as mesmas amostras foram realizados testes com dois materiais e quatro materiais. Conforme mostra a tabela 3.

Tabela 2 Dados de entrada em relação à intensidade do material.

Amostras	Materiais	Módulo de elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson
Todas	1 material	85000	0,3
TT1,2,3,4,5 e TR1,2,3	2 materiais (a)	Intensidade (60-80)-78000 Intensidade (80-255)-85000	0,3
TT1,2,3,4,5 e TR1,2,3	2 materiais (b)	Intensidade (60-80)-70000 Intensidade (80-255)-85000	0,3
TT1,2,3,4,5 e TR1,2,3	2 materiais (c)	Intensidade (60-120)-78000 Intensidade (120-255)-85000	0,3

TT1,2,3,4,5 e TR1,2,3	4 materiais	Intensidade (60-90)-65000 Intensidade (90-110)-70000 Intensidade (110-150)-78000 Intensidade (150-255)-85000	0,3
-----------------------	-------------	---	-----

Os valores foram atribuídos de acordo com a intensidade do *voxel*, para intensidades de cores mais claras foi atribuído o valor médio da calcita pura (85GPa) e para intensidades mais escuras o valor do módulo de Young de entrada foi diminuído com o objetivo de simular um material alterado. A faixa tonal (60 -80) representa o contorno dos poros e do corpo de prova e os valores de 78.000 MPa e 70.000 MPa representam o material alterado próximo ao poro. Os valores usados para a simulação com quatro materiais e com dois materiais (c) foram usados como representação de diferentes situações para comparação dos resultados.

As condições de contorno aplicadas nas amostras foram usadas para simular um ensaio de compressão simples. Assim a base da amostra foi fixada de forma a restringir deslocamento na direção z, ficando livre nas direções x e y. No topo da amostra foi aplicado deslocamento na direção vertical para a amostra atingir uma deformação de aproximadamente 0,5% e deixando livre o deslocamento horizontal.

4 RESULTADOS

Este capítulo contém os resultados obtidos nos ensaios virtuais e análises efetuadas em cada uma das etapas do desenvolvimento.

4.1 Porosidade

A Figura 11 apresenta as subamostras cilíndricas de cada um dos três travertinos, pode se observar a diferença da estrutura das três apesar serem rochas carbonáticas, sua estrutura apresenta diferenças. É importante destacar que a subamostra do Travertino de Itaboraí é bem

sólida sem a presença de poros. Pode se notar também a diferença da distribuição de poros nas subamostras do Travertino Romano e Turco, respectivamente.

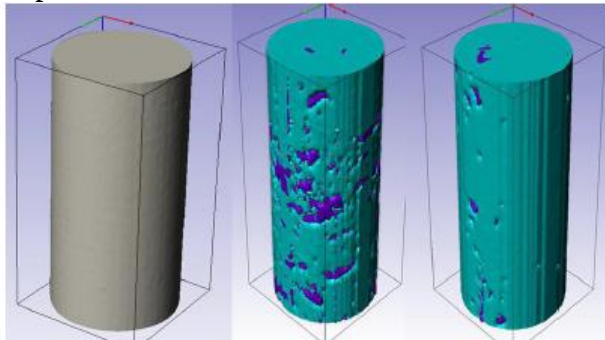


Figura 11 Travertino de Itaboraí. Travertino Romano e Travertino Turco.

Na figura 12 são apresentados os modelos 3D pertencentes aos Travertinos Romanos mostrando a visualização externa da rocha e o sistema poroso interno.

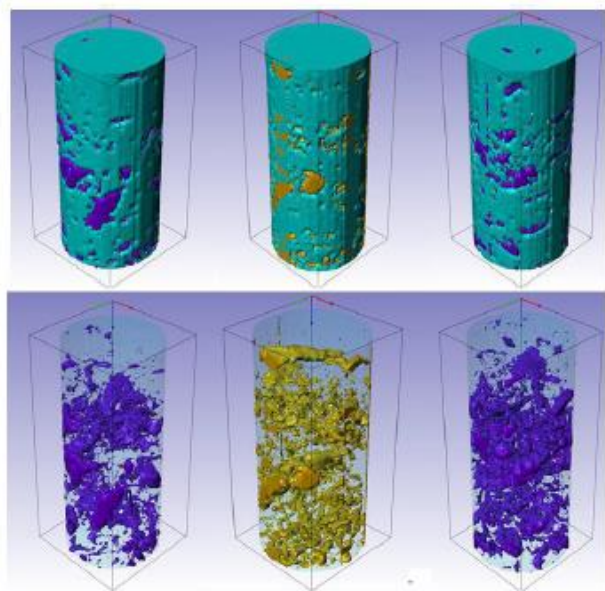


Figura 12 Travertinos Romanos.

Knackstedt (2006) sugeriu uma classificação com três tipos de poros, porém a resolução da imagem só nos permite classificar em Vugular- Fenestral e intergranular. A figura 13 mostra a quantidade de cada tipo de poro por subamostra. As porosidades encontram-se na tabela 4. O travertino de Itaboraí não apresenta poros. A porosidade dos travertinos Turcos é entre 1 e 3% e dos travertinos Romanos entre 10 e 15%.

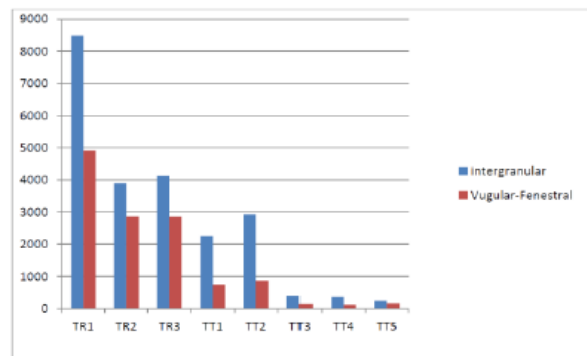


Figura 13 Classificação de Knackstedt.

Tabela 3 Porosidades obtidas.

Sub amostras Cilíndrica	Porosidade Total (%)	Porosidade após reamostragem (%)
TI	0	0
TR-1	13,50	10,11
TR-2	9,42	10,85
TR-3	12,81	14,13
TT-1	3,44	2,82
TT-2	3,45	2,02
TT-3	1,51	1,72
TT-4	1,34	2,18
TT-5	2,36	2,04

4.2 Malhas geradas

As figuras 14, 15, 16 e 17 mostram as malhas geradas para um material, dois materiais (a) e (b), dois materiais (c) e quatro materiais. Cabe destacar aqui que os materiais em verde representam a faixa tonal mais baixa e os mesmos se encontram nas bordas das subamostras e nas bordas dos poros, para isso pode haver duas explicações. A primeira estaria relacionada à aquisição da imagem e a segunda na aplicação dos filtros.

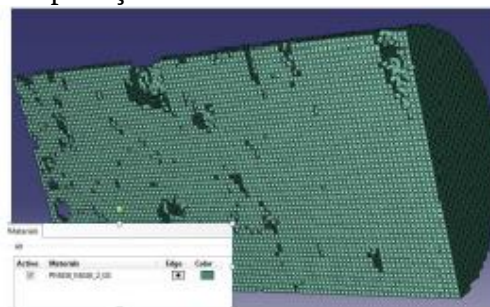


Figura 14 Malha para um material.

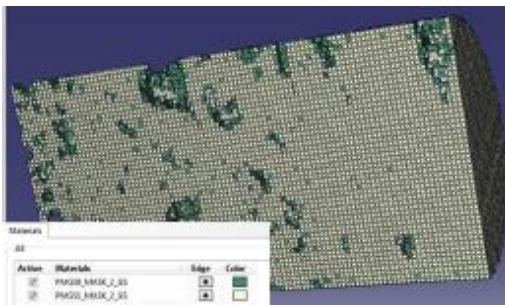


Figura 15 Malha para dois materiais (a) e (b).

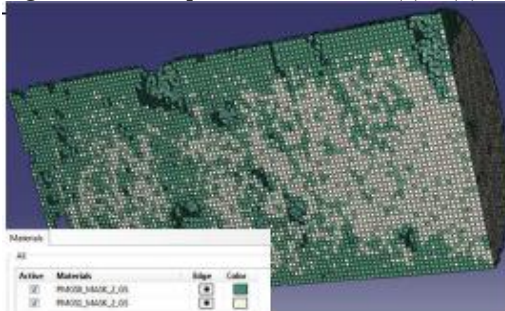


Figura 16 Malha para dois materiais (c).

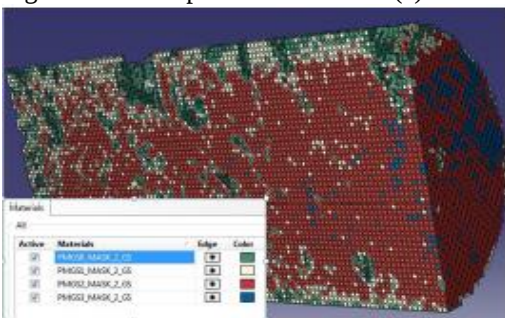


Figura 17 Malha para quatro materiais.

4.3 Resultados da Simulação.

A figura 18 mostra os valores dos módulos de elasticidade encontrados para cada subamostra. Podemos notar que há um padrão seguido nas simulações.

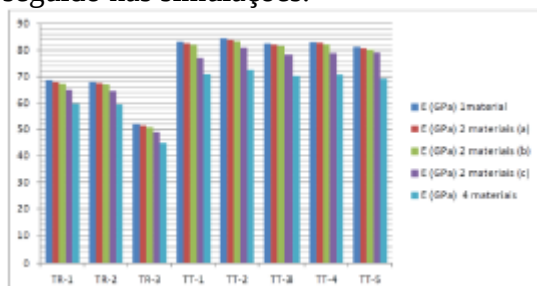


Figura 18 Gráfico do módulo de elasticidade de todas as amostras.

Os gráficos das figuras 19 e 20 comparam valores obtidos pelo presente trabalho com valores encontrados por outros autores: Palchik(2010), Pilloto(2011) e Gader(2010). Os valores gerados em simulação numérica neste trabalho aparentam estar alinhados às

tendências dos valores da literatura apesar de serem rochas carbonáticas diferentes e de localidades distintas.

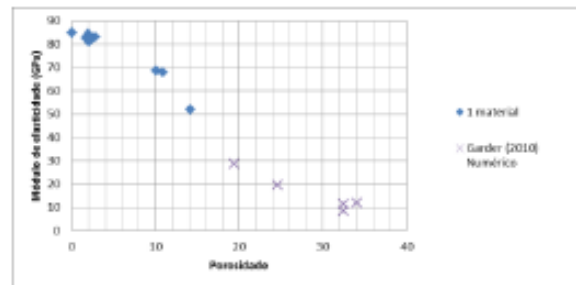


Figura 19 Gráfico com os valores encontrados no presente trabalho e trabalho de Garder (2010).

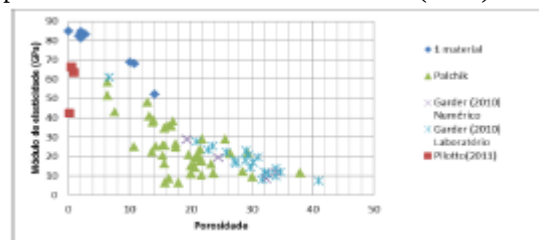


Figura 20 Gráfico com valores encontrados em ensaios numéricos e laboratório.

3.5 Influência da estrutura porosa no módulo de elasticidade.

Para o mesmo material e para a mesma porosidade, amostras testadas em ensaios apresentam módulos de elasticidade diferentes. Nos Travertinos Turcos na faixa de porosidade de 2,0-2,2 temos três Travertinos Turcos com um range de aproximadamente 3,3GPa, conforme mostra a figura 21.

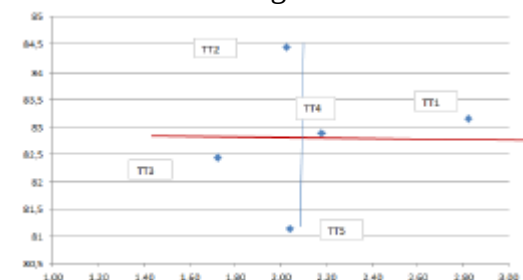


Figura 21 Valores do módulo de elasticidade para uma faixa de porosidade.

A figura 22 mostra a visualização 3D, que traz para o usuário a vantagem de observar o arranjo estrutural, note que a amostra TT-5 tem a porosidade concentrada (maiores poros) em apenas um lado da amostra, já o TT4 apresenta uma distribuição mais homogênea enquanto o TT-2 apresenta maior concentração distribuída na parte inferior da amostra e apenas um grande poro na parte superior da amostra.

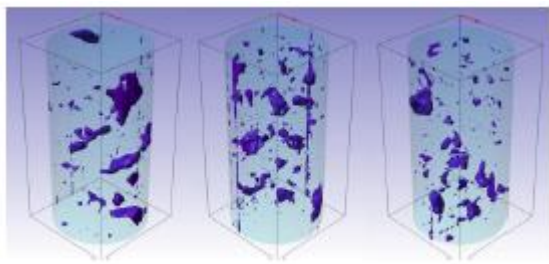


Figura 22 Travertino Turco 5 Travertino Turco 4 Travertino Turco 2.

5 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi analisar a influência da estrutura porosa nas propriedades elásticas das rochas carbonáticas a partir de imagens digitais obtidas de microtomografia. Para tal foi requerido um estudo multidisciplinar, desde a geologia, microtomografia, processamento de imagens, mecânica das rochas, entre outras para o entendimento do problema e encontrar as possíveis alternativas que permitissem a validação da metodologia.

Para realizar este trabalho foram utilizadas tecnologias de ponta e pacotes de software comerciais como *Scan IP* e *ABAQUS*. Durante todo o processo se pode concluir que é possível o estudo de propriedades mecânicas a partir da estrutura porosa de rochas carbonáticas, integrando microtomografia e análises numéricas.

Em relação à obtenção da porosidade através de imagens conclui-se que:

Em todo o processo apareceram algumas limitações. A primeira delas é a aquisição da imagem, uma imagem com boa resolução permite melhor compreensão da estrutura porosa, neste trabalho a melhor resolução era de 26 micras, o que não permitia observar a porosidade intrapartícula e possivelmente alguma porosidade interpartícula. Assim existe um erro, pequeno, nas medições de porosidade. Apesar disto, a técnica de microtomografia e processamento de imagem apresentaram-se como uma boa alternativa para medição de porosidade, sua maior vantagem é a possibilidade da visualização da estrutura porosa em 3D. Um ponto que se mostrou crítico na técnica é a limiarização da imagem, separar poros e materiais, este valor pode variar

dependendo do operador, gerando diferenças no resultado final. A decisão do limiar exige conhecimento e experiência multidisciplinar em geologia e processamento de imagens.

Em relação à obtenção de propriedades elásticas com o uso de simulação numérica conclui-se que:

Foi possível observar ao longo do trabalho que os poros maiores (vuggys) são os principais responsáveis pelo comportamento do material quando o mesmo é carregado, também cabe destacar a influência da estrutura porosa nos resultados e observar que a posição dos poros afeta o módulo de elasticidade da amostra.

Os dados de entradas dos materiais na análise de elementos finitos, que são retirados da intensidade da imagem, exigem o conhecimento da geologia e aquisição de imagens. Neste trabalho alguns valores foram arbitrados com o objetivo de testar a técnica nas simulações com mais de um material.

O programa de geração de malhas se provou bastante útil. Na etapa de geração de malhas foi utilizada uma abordagem baseada em construção de elementos a partir de “voxels” gerando tetraedros. Uma abordagem simples, robusta que fornece malhas de boa qualidade.

REFERÊNCIAS

- Grader, A., Kalam, M., Toelke, J., Mu, Y., Derzhi, C., Baldwin, M., et al. (4-7 de Outubro de 2010). A COMPARATIVE STUDY OF DIGITAL ROCK PHYSICS AND LABORATORY SCAL EVALUATIONS OF CARBONATE CORES. International Symposium of the Society of Core.
- KNACKSTEDT, M. A., ARN C, H., GHOU, A., SAKELLARIOU, A., SENDEN, T. J., SHEPPARD, A. P., et al. (2006). 3D imaging and characterization of the pore space of carbonate core; implications to single and two phase flow properties. SPWLA 47th annual logging symposium, p.15.
- Palchik, V. (2010). Technical note: On the Ratios between Elastic Modulus and Uniaxial Compressive Strength of Heterogeneous Carbonate Rocks. Rock. Mech. Rock. Eng. Springer, v. 44, p. 121 – 128.
- Pico, R. L. H. (2013). Influência da microestrutura nas propriedades mecânicas de rochas carbonáticas usando imagens 3D de microtomografia de raios-X. Rio de Janeiro.
- Pilotto, D. (2011). Caracterização Geológica e Geomecânica de Travertinos. Rio de Janeiro: (0921913/CB)