

4

Resultados

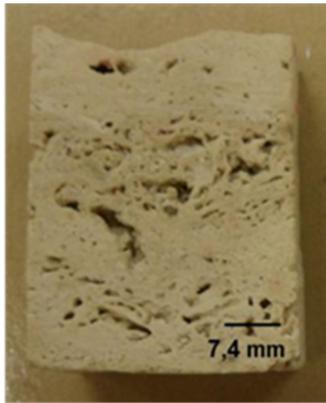
4.1.

Aquisição das amostras

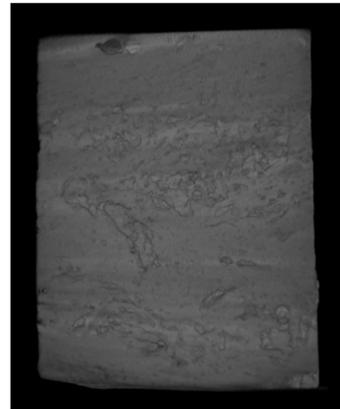
A capacidade da imagem obtida da microestrutura descrever a geometria do espaço de poro de forma confiável depende de vários fatores, entre eles a resolução da imagem.

Segundo Knackstedt, et al., (2009), a resolução de aquisição de imagem é uma questão fundamental para se obter uma descrição confiável do espaço poroso. De fato, amostras de carbonato, geralmente de três centímetros de diâmetro e comprimento de 4 centímetros, podem revelar poros altamente complexos em várias escalas, de micrômetros a centímetros. Estas variações são um desafio para o processo de aquisição e representatividade, uma vez que apenas pequenas amostras podem ser usadas para capturar a maior quantidade de poros na escala micrométrica.

Assim a primeira abordagem para os travertinos estudados por (Pilotto, 2011) foi digitalizar amostras irregulares com resoluções entre 26 a 34 micrometros. Nas Figura 4-1, 4.2 e 4.3 observa-se ao lado esquerdo as amostras reais e ao lado direito a pilha de imagens compiladas provenientes do microtomógrafo. Entre 1000 a 2000 imagens em 2D, formando uma visualização 3D de cada uma das amostras de travertino como foi mencionado no capítulo anterior.

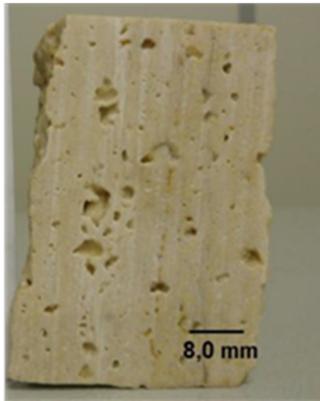


a)

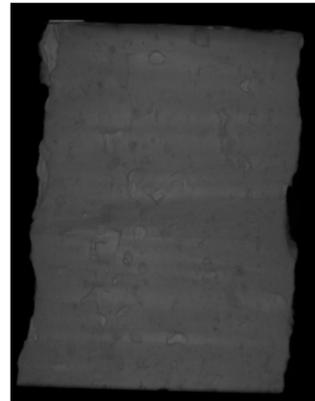


b)

Figura 4-1. Amostra irregular Travertino Romano. a) Fotografia da amostra. b) Imagem 3D da amostra microtomografada.



a)

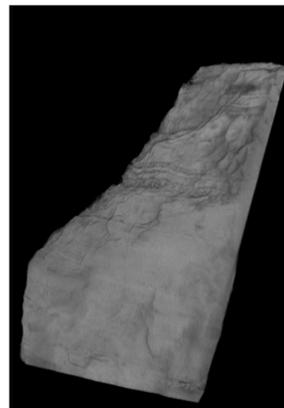


b)

Figura 4-2. Amostra irregular Travertino Turco. a) Fotografia da amostra. b) Imagem 3D da amostra microfotografada.



a)



b)

Figura 4-3. Amostra irregular Travertino de Itaboraí. a) Fotografia da amostra. b) Imagem 3D da amostra microfotografada.

4.2. Processamento e análises de imagens

4.2.1. Sub - amostragem em imagens digitais

Com o intuito de simular um ensaio mais próximo da realidade, procura-se obter amostras cilíndricas com uma relação diâmetro/altura segundo o recomendado pelas normas da International Society for Rock Mechanics (ISRM), (ISRM, 2007).

Uma vantagem importante, de trabalhar com imagens digitais é a possibilidade de obter a partir de uma única amostra microtomografada, um grande conjunto de sub-amostras digitais que permitem o estudo das propriedades mecânicas serem executados inúmeras vezes considerando uma ampla gama de porosidades e de tamanhos. Isto faz possível analisar o comportamento da rocha, a influência da estrutura porosa e de parâmetros como a geometria, forma dos poros e distribuição, o que não pode ser levado a cabo no laboratório a partir de uma única amostra real. Além disso, esta técnica permite obter amostras pouco perturbadas por processo de extração ou corte real.

Na Figura 4-4, apresenta-se o esquema desenvolvido para realizar a sub-amostragem nas imagens digitais das amostras microtomografadas dos travertinos. Cabe ressaltar que a microtomografia corresponde ao travertino Romano.

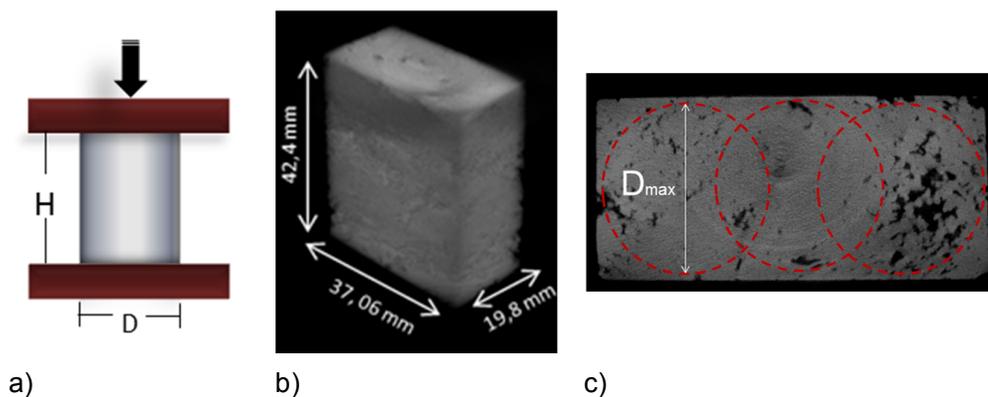


Figura 4-4. Sub-amostragem digital: a) Amostra para ensaio de compressão simples. Normas ISRM (2007), b) Análise digital da geometria da amostra e c) Sub-amostragem.

Decidiu-se nomear cada sub-amostra cilíndrica com a sigla que representa a cada amostra de travertino microtomografado seguido de um número. Assim:

TRI: Travertino de Itaboraí

TRI- #: Sub-amostra cilíndrica número () do Travertino de Itaboraí.

TRR: Travertino Romano

TRR- #: Sub-amostra cilíndrica número () do Travertino de Romano.

TRT: Travertino Turco

TRT- #: Sub-amostra cilíndrica número () do Travertino de Turco.

Na Tabela 4.1 apresenta-se as dimensões das sub-amostras cilíndricas obtidas de cada amostra de travertino.

Tabela 4.1. Dimensões das sub-amostras cilíndricas para os travertinos.

Travertino	Sub-amostra Cilíndrica	D (mm)	H (mm)
Travertino de Itaboraí	TRT-1	12,15	24,3
Travertino Romano	TRR-1, 2, 3	19,03	38,06
Travertino Turco	TRT-1, 2	19,03	38,06
	TRT-3, 4,5	10,1	20,2

Para o caso do travertino turco foi necessário optar por realizar dois grupos de sub-amostras cilíndricas, devido à identificação de uma fissura que a amostra original tem ao longo de quase todo o comprimento, como pode ser apreciado nas imagens digitais, apresentadas na Figura 4-5. Para evitar essa fissura nas sub-amostras optou-se por extrair um grupo de sub-amostras maiores à direita da fissura e um segundo grupo de sub - amostras de diâmetro menor a diferentes profundidades da amostra à esquerda da fissura (lado esquerdo), tendo em consideração que as bordas, as superfícies de topo e base destas amostras ficaram com a mínima presença de poros, de forma a distribuir uniformemente as tensões nas análises numéricas.

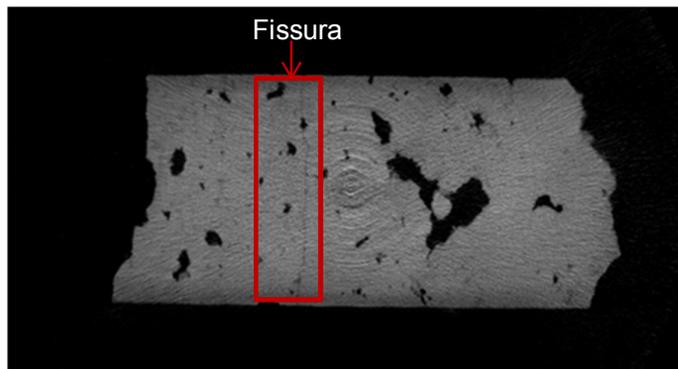


Figura 4-5. Fissura presente na amostra de travertino turco microtomografada. Imagem 2D.

Na Figura 4-6, apresenta-se a amostra do travertino Romano estudado, junto com as sub-amostras cilíndricas removidas respectivamente na etapa de sub - amostragem.

No Apêndice I encontra-se as figuras correspondentes das amostras e sub-amostras dos travertinos de Itaboraí e Turco obtidas nesta etapa.

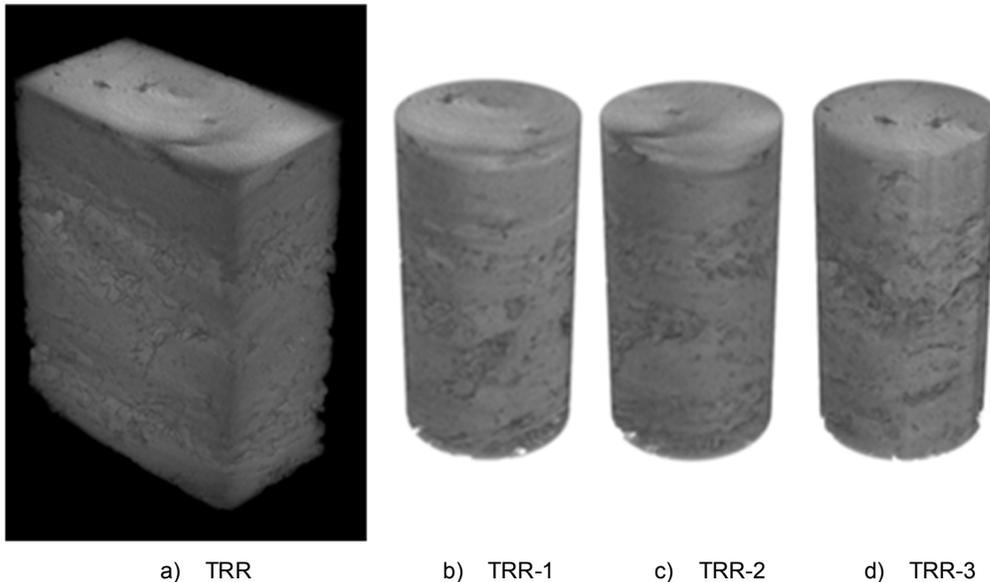


Figura 4-6. Sub-amostragem: a) Imagem 3D da amostra irregular do travertino Romano microtomografado. b) Sub-amostra TRR-1. C) Sub-amostra TRR-2. d) Sub-amostra a TRR-3.

4.2.2.

Pré-processamento, processamento, análise e visualização no CTAN

A seguir realizaram-se as etapas de pré-processamento, segmentação das imagens e análises da porosidade utilizando a metodologia geral de processamento e análise digital de imagens (PDI) junto com a metodologia proposta por Pilotto, (2011).

Pré-processamento e segmentação foram realizadas tanto nas amostras irregulares como nas sub-amostras cilíndricas digitais no programa CTAN com auxílio dos processos e ferramentas expostas na Figura 2.24.

Na Figura 4-7 são apresentados os resultados das etapas de filtragem e segmentação para uma sub-amostra circular do travertino Turco, (TRT-3). Na figura, no tópico a) apresenta-se a imagem antes da aplicação do filtro, no tópico b) apresenta-se a imagem pós-aplicação. Nos tópicos (c e d) apresenta-se os resultados das etapas de segmentação manual a partir do histograma de cinzas.

O histograma é compreendido entre os limites de 0 a 255, onde 0 representa a cor preta, mínima intensidade, intensidade zero, e o 255 indica a cor branca, intensidade máxima. Dois modelos são gerados a partir do histograma. No primeiro modelo, definindo os “pixels” compreendidos entre 50 a 255 como rocha, são realizadas as análises 3D de porosidade. No segundo modelo, os pixels compreendidos entre 0 a 50 são definidos como poros e são analisados parâmetros como a geometria e tamanho dos poros.

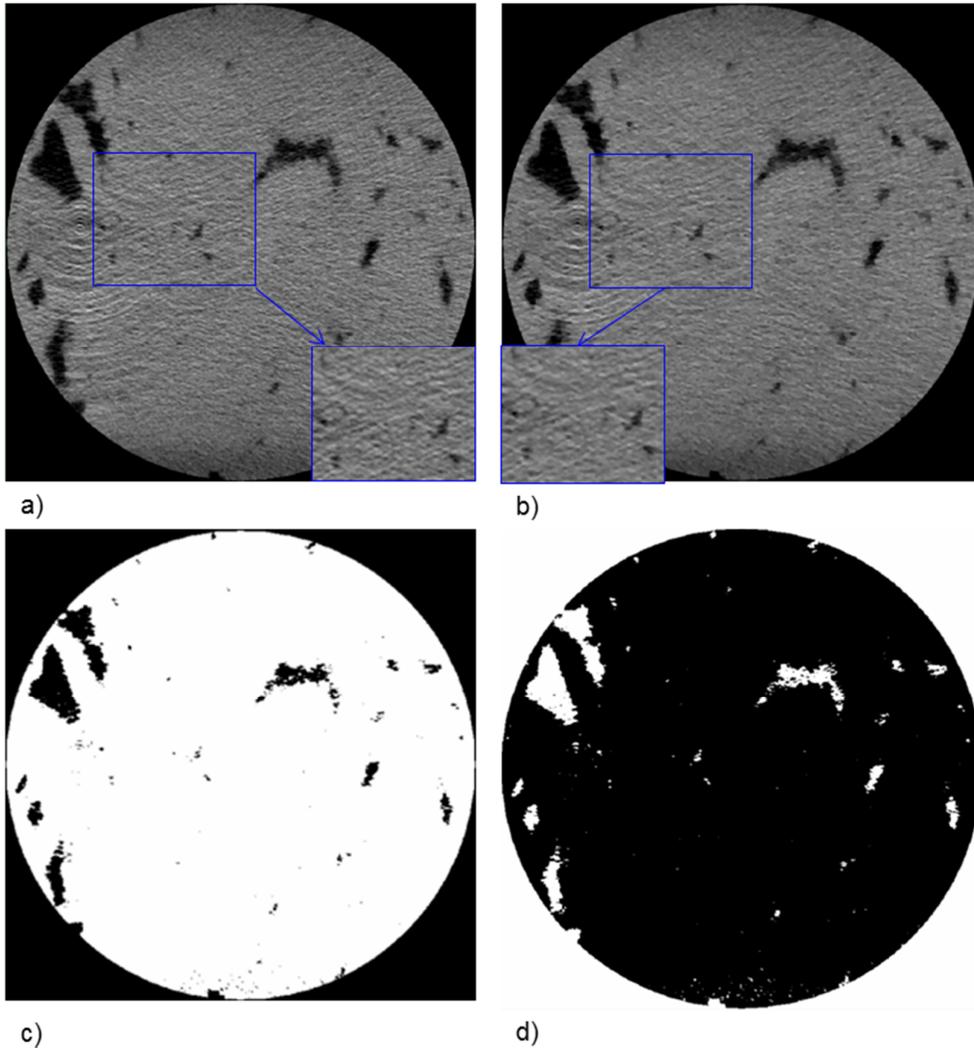


Figura 4-7. Pré-processamento, sub-amostra de travertino turco: a) Imagem circular 2D antes do filtro, b) Imagem circular 2D depois do filtro , c) segmentação (50 – 255) modelo da rocha, d) segmentação (0-50) modelo dos poros.

A etapa de pós-processamento (aplicação de filtros morfológicos) foi obviada por recomendação pessoal de Pilotto, (2011). Decidiu-se fazer uma comparação dos resultados obtidos neste trabalho e os obtidos no trabalho da

autora supracitada. Os processos da análise computacional de cada pilha de imagens foram realizados em tempos entre 7 minutos a 2 horas aproximadamente. A Tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos por Pilotto, (2011), e na Tabela 4.2 estão apresentados os resultados de porosidade obtidos neste trabalho.

Tabela 4.2. Análises de porosidade no programa CTAN para imagens digitais das amostras de travertinos. (Fonte: Pilotto, 2011)

Amostra	Porosidade Total (%)	Porosidade aberta (conectada) (%)	Porosidade fechada (não conectada) (%)
TRI-09	0,24	0,16	0,08
TRR-01	6,49	5,38	1,11
TRT-01	4,26	2,33	1,93

Tabela 4.3. Análises de porosidade no programa CTAN para imagens digitais das amostras de travertinos.

Amostra	Porosidade Total (%)	Porosidade aberta (conectada) (%)	Porosidade fechada (não conectada) (%)
TRI-09	0,24	0,15	0,09
TRR-01	6,47	5,35	1,12
TRT-01	4,65	2,36	2,29

Apreciou-se uma pequena variação dos resultados, um aumento da porosidade fechada ou não conectada. Esta variação foi possivelmente causada pela remoção dos filtros morfológicos, pelo tanto se conclui que o filtro morfológico influencia a porosidade podendo alterar alguns poros e porem os resultados na análise. As porosidades totais encontradas aqui permanecem dentro dos faixas de porosidade encontradas por Piloto, (2011) tanto nas análises digitais das amostras microtomografadas como nas análises de laboratório de amostras dos mesmos blocos dos travertinos.

É importante ter em conta que as amostras utilizadas para os ensaios de laboratório não são as mesmas amostras que foram microtomografadas. Todas as amostras utilizadas tanto para ensaios de laboratório como para microtomografia foram extraídas a partir de um único bloco de cada travertino, no entanto isto não garante amostragem similar, dada a heterogeneidade das rochas carbonáticas.

Finalmente, de todas as sub-amostras, a estrutura de poros foi analisada utilizando a metodologia de análises digital de imagens (PDI) no programa CTAN. Na Tabela 4.4 apresenta-se os resultados de porosidade.

Tabela 4.4. Análise de porosidade no programa CTAN para sub-amostras cilíndricas.

Travertino	Sub-amostra Cilíndrica	Porosidad e Total (%)	Porosidade conectada (%)	Porosidade Não conectada (%)
Itaboraí	TRI-1	0,000	0,000	0,000
Romano	TRR-1	5,637	4,639	0,998
	TRR-2	5,244	4,263	0,981
	TRR-3	6,148	5,125	1,023
Turco	TRT-1	3,036	1,763	1,273
	TRT-2	2,522	1,225	1,297
	TRT-3	1,366	0,376	0,990
	TRT-4	1,266	0,458	0,808
	TRT-5	1,087	0,575	0,512

Foram obtidas assim, sub-amostras que cobrem uma faixa de porosidade de 0 a 6 % aproximadamente. Sendo a sub-amostra do travertino de Itaboraí uma amostra maciça com 0 % de porosidade. Pode ser notado que as sub-amostras de travertino Romano são mais porosas que as sub-amostras do travertino Turco. Além disso, é possível apreciar que para as sub-amostras do travertino Romano cerca de 80% da porosidade total corresponde à porosidade conectada e para o caso do travertino Turco a contribuição dessa porosidade diminui para aproximadamente 50%. Observa-se também uma variação considerável de porosidade entre as sub-amostras do travertino Turco com a variação do tamanho total da sub-amostra, indicando a complexidade e heterogeneidade da rocha.

4.2.3.

Pré-processamento, processamento, análises e visualização no ScanIP.

A geração das malhas tridimensionais é feita no software ScanIP no módulo elementos finitos. No entanto, os arquivos de saída dos modelos 3D gerados pelo programa CTvol não são compatíveis como arquivos de entrada no ScanIP. Razão pela qual, decidiu-se exportar as imagens 2D circulares obtidas como ROI do programa CTAN para ScanIP. Estas imagens foram então importadas para ScanIP, filtradas, segmentadas, analisadas e visualizadas num

volume 3D. As imagens binárias segmentadas serão posteriormente usadas para a aplicação de algoritmos de geração de malhas.

Para a etapa de pré-processamento foram testados especificamente três algoritmos de filtros com base nos estudado no capítulo 2. Os filtros: bilateral “Bilateral Filter”, media “Mean filter” e Mediana “Median Filter” foram aplicados nas imagens.

A comparação entre o desempenho dos filtros nomeados anteriormente e aplicados nos dados deste trabalho é mostrada de forma geral na Figura 4-8 e na Figura 4-9 são apresentados os desempenhos numa seção ampliada da imagem 2D. Ao olho nu pode ser percebido que o algoritmo bilateral diminui o ruído, porém desfoca, apresentando uma perda de nitidez e “embaçando”, por outro lado, os filtros media e mediana, mostram boa eliminação de ruídos preservando as características mais importantes.

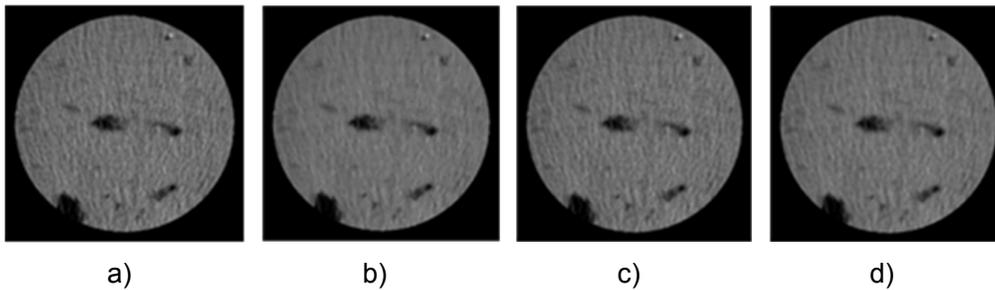


Figura 4-8. Comparação dos filtros de ScanIP, TRT, imagem 2D: a) Imagem original, b) Bilateral Filter, c) Mean Filter, d) Median Filter

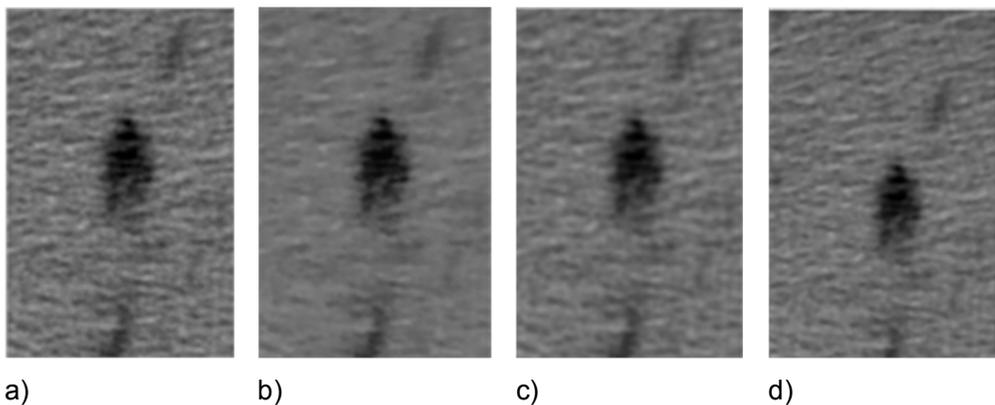


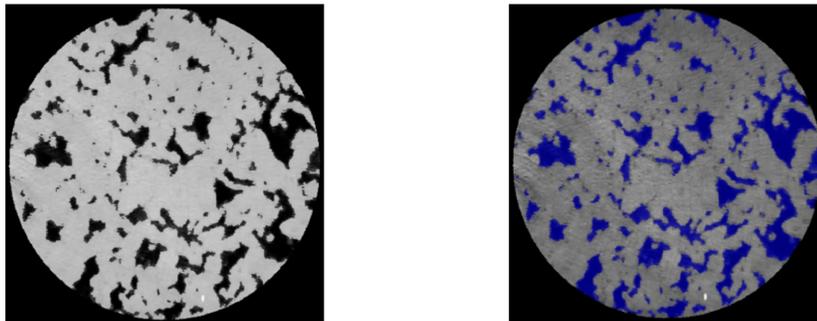
Figura 4-9. Comparação dos filtros de ScanIP, seção ampliada TRT, imagem 2D: a) Imagem original, b) Bilateral Filter, c) Mean Filter, d) Median Filter.

A segmentação no ScanIP foi realizada da mesma forma como foi feita no CTAN, realizando uma segmentação manual, definindo como rocha os pixels

compreendidos entre 50 a 255 e como espaço vazio, poros, os pixels compreendidos entre 0 e 50.

O software dispõe de ferramentas que permitem fazer a segmentação mediante uma vista semitransparente, facilitando a análise e o ajuste das faixas de pixels que serão assinalados como rocha ou como poro, como se pode observar na Figura 4-10. Nesta figura a cor branca translúcida cobre os tons de cinza claro considerados como rocha (“pixels” entre 50 a 255) e deixa vazia, em preto, os poros, o qual indica que a segmentação representa a rocha de forma adequada. Após, é feita a segmentação dos poros, “pixels” entre 0 a 50, representados pela cor azul.

O resultado final da segmentação é uma imagem binária, também chamada imagem da microestrutura.

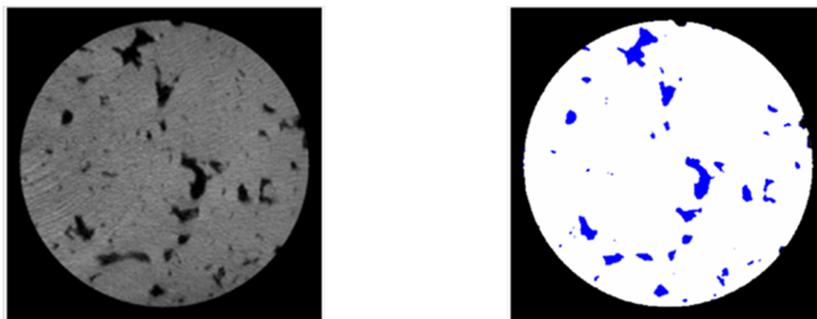


a)

b)

Figura 4-10. Segmentação da microestrutura no programa ScanIP. TRR-2. Vista semitransparente: a) segmentação da rocha, b) segmentação dos poros.

Assim, a Figura 4-11 apresenta uma imagem binária 2D antes e depois da segmentada, onde a cor branca representara o material sólido (rocha) e a cor azul denota os espaços porosos daqui para a frente.



a)

b)

Figura 4-11. Segmentação da microestrutura no programa ScanIP. TRT-3: a) Imagem original. b) Imagem binária ressaltando poros e rocha.

Optou-se pela configuração do pré-processamento utilizando o filtro mediana, descartou-se a utilização dos outros dois filtros, para as análises quantitativas e a geração das malhas para as sub-amostras cilíndricas restantes. Cave salientar que a escolha do filtro é muito dependente da experiência e análises do usuário.

Assumindo como hipóteses o valor da porosidade obtida na análise no programa CTAN (Tabela 4.4) como correto, calculou-se o erro relativo (Er) para os valores de porosidade encontrados no ScanIP.

Os resultados das análises quantitativas da porosidade no programa ScanIP, para o total de sub-amostras cilíndricas junto com o porcentagem de erro relativo são apresentadas na Tabela 4.15.

Tabela 4.5. Análises de porosidade no programa ScanIP para sub-amostras cilíndricas.

Travertino	Sub-amostra Cilíndrica	Porosidade Total (%)		Erro Relativo (%)
		CTAN	ScanIP	
Travertino de Itaboraí	TRI-1	0	0,000	--
Travertino Romano	TRR-1	5,637	5,683	0,8
	TRR-2	5,244	5,400	2,9
	TRR-3	6,148	5,691	7,4
Travertino Turco	TRT-1	3,036	3,117	2,6
	TRT-2	2,522	2,515	0,3
	TRT-3	1,366	1,263	7,6
	TRT-4	1,266	1,217	3,9
	TRT-5	1,087	1,101	1,3

Observe-se que porcentagem de erro relativo é inferior a 10%, uma boa concordância entre as análises feitas nos dos programas.

Após a etapa de segmentação, a diferenciação da fase sólida (rocha) e da fase de espaços vazios (poros), visualizações 3D foram geradas. Foram gerados modelos tanto das amostras irregulares microtomografadas como das amostras cilíndricas obtidas no processo de sub-amostragem.

Na Figura 4-12, apresenta-se o modelo da amostra de travertino de Itaboraí junto a uma fotografia da amostra real microtomografada. Observa-se uma boa representatividade das características reais da amostra microtomografadas em relação à amostra real.

A Figura 4-13 apresenta as sub-amostras cilíndricas de maior tamanho de cada um dos três travertinos. Observe-se a diferença da estrutura dos três embora sejam rochas carbonáticas da mesma origem. É importante ressaltar que no caso da sub-amostra do travertino de Itaboraí, o cilindro é bem sólido,

isto é, sem presença de porosidade. Aprecia-se também a diferença da distribuição do espaço poroso nas sub-amostras do travertino Romano e Turco, respectivamente.

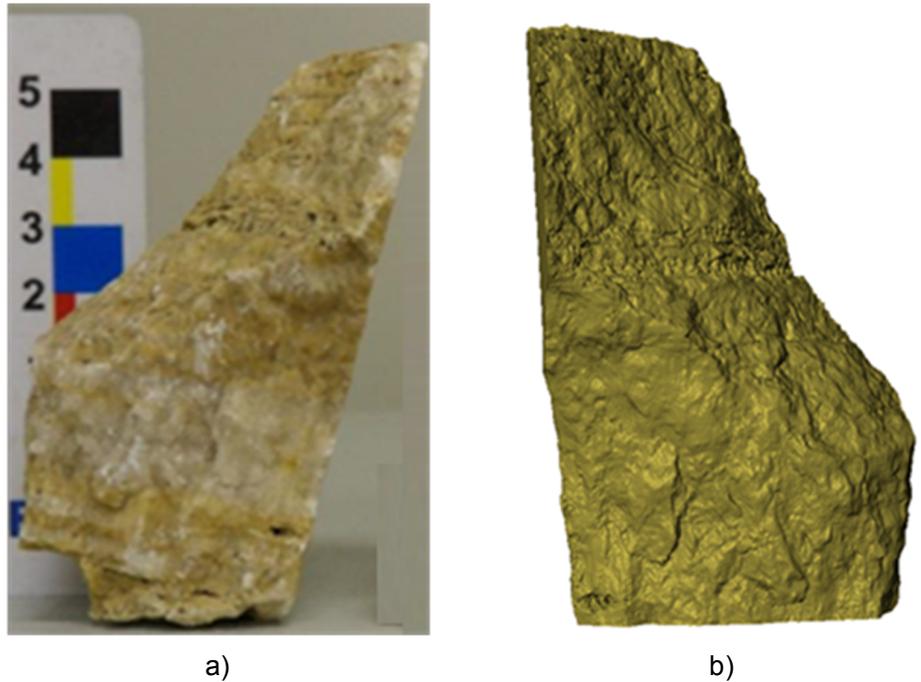


Figura 4-12. Modelo da amostra do travertino de Itaboraí no programa ScanIP . a) Fotografia de amostra real. b) Modelo da amostra, em 3D.

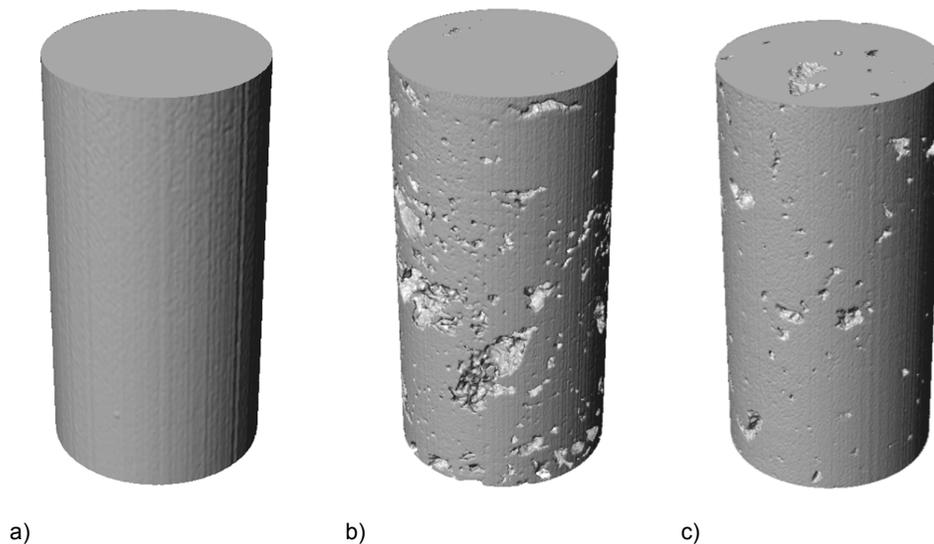


Figura 4-13. Volumes 3D de sub-amostra dos três travertinos: a) TRI-1, b) TRR-1, c) TRT-1.

Na Figura 4-14, apresentam-se os modelos dos volumes 3D pertencentes às sub-amostras cilíndricas extraídas da amostra irregular do travertino Romano. Embora elas pertençam a uma mesma amostra, a distribuição do espaço poroso

denota a complexidade destas rochas e o alto grão de heterogeneidade. No Apêndice I, podem ser encontrados os volumes 3D das sub-amostras cilíndricas para o travertino Turco.

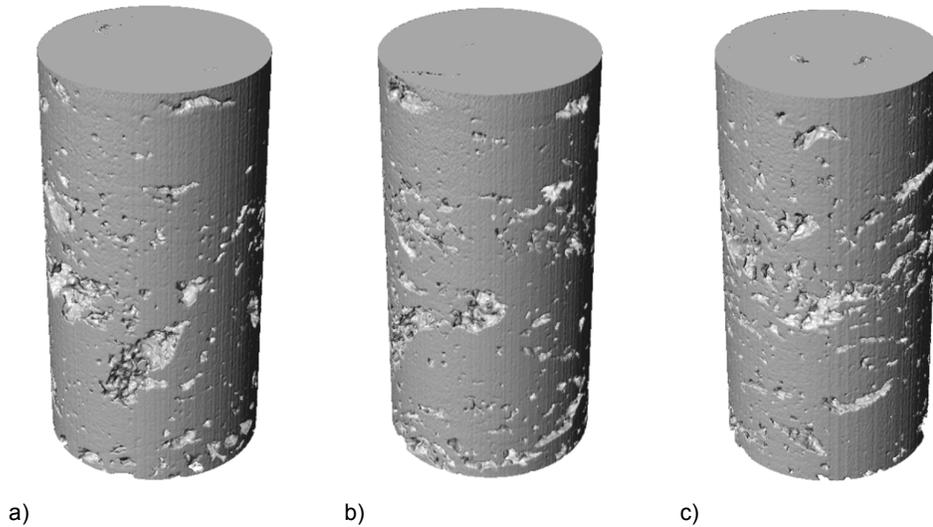
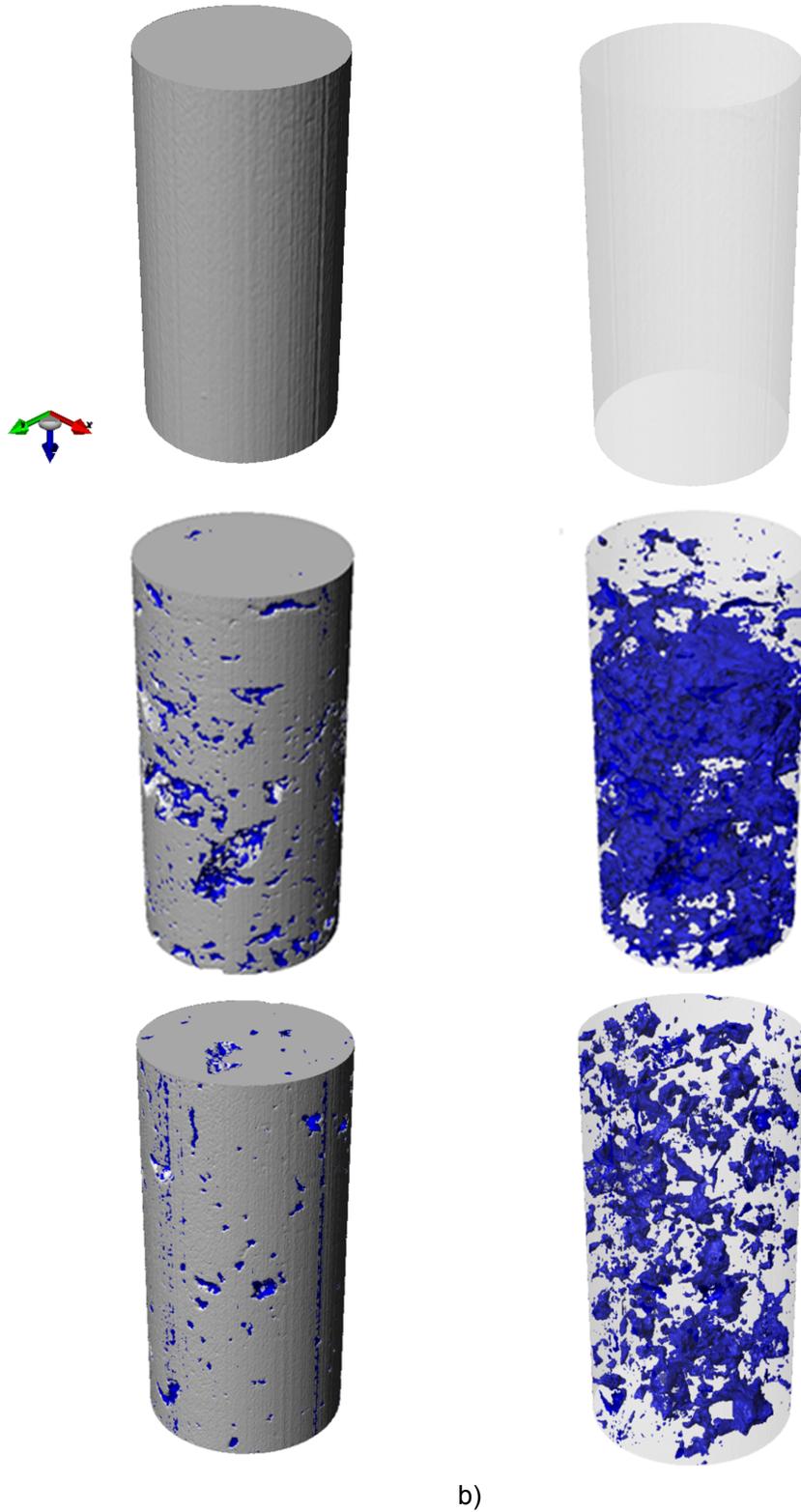


Figura 4-14. Volumes 3D das sub-amostras: a) TRI-1, b) TRR-1, c) TRT-1.

Ainda nesta etapa é possível criar um segundo modelo 3D, baseado numa segmentação definida a partir do histograma de tons de cinza, definindo como espaço poroso, os pixels compreendidos entre 0 e 50. O modelo 3D dos poros permite visualizar e analisar os poros, distribuição e conectividade dentro da rocha.

A Figura 4-15 permite divisar a distribuição dos poros dentro da rocha, as interconexões, além da forma dos poros para as sub-amostras de maior tamanho extraídas das imagens de cada tipo de travertino. As sub-amostras para cada tipo de travertino (Itaboraí, Romano e Turco) são apresentadas em ordem descendente, respectivamente. No tópico a) apresenta-se a visualização externa de rocha e poros e no tópico b) apresenta-se o sistema poroso interno da rocha.

Por meio deste tipo de visualização, é possível perceber com facilidade a aparente inexistente de porosidade da sub-amostra do travertino de Itaboraí, além de poder apreciar a alta complexidade dos sistemas porosos dos travertinos Romano e Turco, apresentando este último, uma distribuição de poros mais homogênea (mais uniforme ao longo do volume) que a sub-amostra do travertino Romano. As sub-amostras dos dois tipos de travertino (Romano e Turco) apresentam poros vulgares.



a)

b)

Figura 4-15. Visualização 3D, sub-amostras TRI-1, TRR-1, TRT-1 a) Visualização externa modelos rocha e poros, b) visualização do sistema poroso interno.

Aparentemente na sub-amostra de travertino Romano os poros estão mais ligados macroscopicamente coincidindo com as análises de porosidade obtidas no programa CTAN, no qual, para o travertino Romano, os poros conectados correspondem a 80 % da porosidade total. No caso do travertino Turco os poros conectados correspondem a 50 % somente. Observa-se também que as sub-amostras dos dois tipos de travertinos apresentam uma ampla distribuição de tamanhos de poros.

Foi realizada uma medição do tamanho dos poros para todas as sub-amostras. Pode-se definir uma distribuição de diâmetros, como pode ser observado nas Figura 4-16 e 4.17.

A distribuição dos diâmetros de poros é ampla, apresentando variação entre 65 μm e 250 μm . A existência de poros menores não foi constatada, uma vez que a resolução das imagens não permite tal detalhamento. Para o caso dos travertinos Romanos foram encontrados diâmetros de poro acima dos 250 μm , maiores que para as sub-amostras do travertino Turco. Para os travertinos Romanos foram encontrados poros com diâmetros máximos de até 8 mm (TRR-1). Já no caso das sub-amostras dos travertinos Turcos os diâmetros máximos encontrados foram de 4 mm aproximadamente.

Como foi mencionado no capítulo 2, Arns, et al., (2005) descreve três diferentes contribuintes de porosidade podem ser definidos, em função do raio do poro encontrado e excluindo as fraturas.

Assim, para as sub-amostras dos travertinos Romanos e Turcos foram encontradas contribuições entre 79 e 81% de porosidade intergranular na porosidade total e o porcentagem restante correspondem à presença de poros “vugulares”. Nestas análises não foram encontradas contribuições de porosidade intragranular, devido à limitação da resolução.

Nesta etapa é possível agrupar tamanhos de poro como pode ser apreciado na Figura 4-18. Com isto é possível analisar a influência dos tamanhos e de sua distribuição sobre as propriedades mecânicas das rochas carbonáticas.

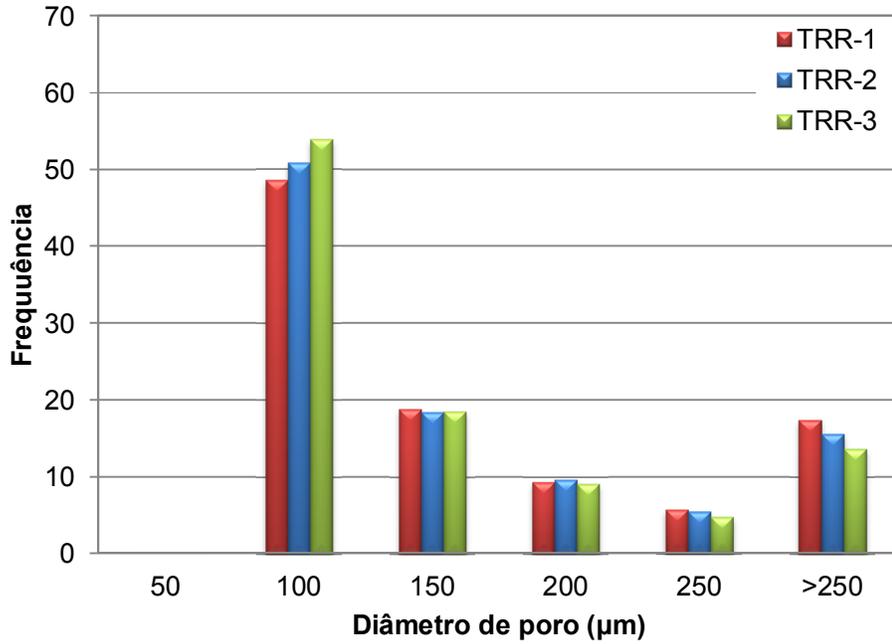


Figura 4-16. Histograma de frequência de diâmetros de poros das sub-amostras de travertino Romano.

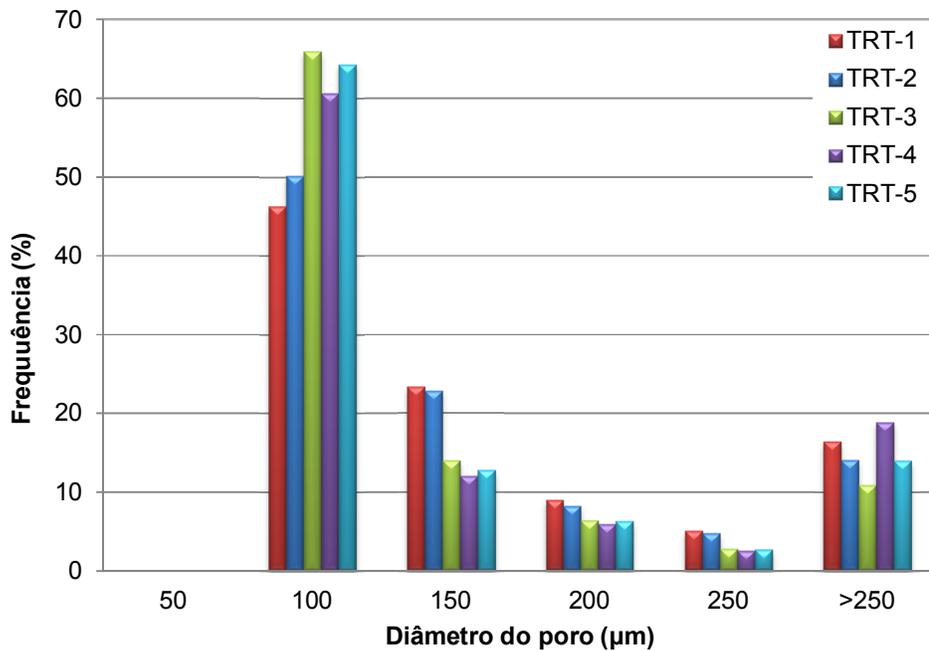


Figura 4-17. Histograma de frequência de diâmetros de poros das sub-amostras de travertino Turco.

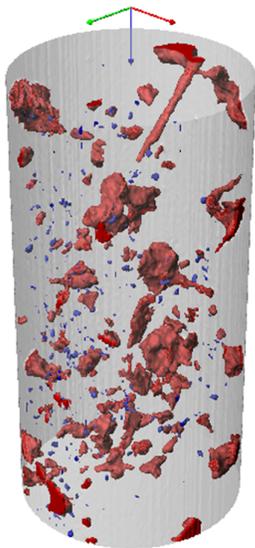


Figura 4-18. Visualização 3D sub-amostra TRT-3. Em vermelho, poros vugulares, em azul, poros tipo intergranular.

Analisando a visualização 3D dos poros para as sub-amostras dos três tipos de travertinos, observou-se porosidade vugular, poros de tamanho e forma muito irregular, nas sub-amostras dos travertinos Romanos e Turcos. De acordo com o descrito por Ahr, (2008), tal fato indica padrões de crescimento biológico durante os processos de formação da rocha, processos de diagênese por dissolução.

Na Figura 4-18, por exemplo, observa-se em particular um poro vugular alargado no topo que se estende até atravessar as duas superfícies da amostra. Este tipo de estrutura é provavelmente resultado de crescimento de raízes de plantas ou organismos que foram soterrados durante os processos de formação e dissolução. A maior parte dos poros vugulares apresenta pobre conectividade.

4.3. Geração das malhas no volume 3D

A fim de executar a simulação de elementos finitos, uma malha de elementos finitos precisa ser construída. Até aqui as microtomografias foram segmentadas em duas fases gerando um volume 3D (rocha porosa) que chamaremos modelo, e agora será submetida ao processo de geração da malha.

O modelo contém informações binárias das imagens segmentadas indicando se “voxels” estão dentro ou fora de um objeto (rocha porosa), mas também contém componentes que podem ser suavizados. Assim o programa dispõe de uma etapa de pré-processamento como passo preliminar, para a

aplicação dos algoritmos de geração de malhas. Como foi mencionado no capítulo anterior, o módulo elementos finitos do software ScanIP fornece dois métodos ou algoritmos para a elaboração das malhas, o algoritmo chamado FEGrid e o algoritmo FEFree. O algoritmo FEGrid dispõe de dois tipos de malhas a ser criadas, um tipo “voxel” e um tipo suavizado.

Os dois métodos foram testadas no presente trabalho. Optou-se em primeira instância, por trabalhar com as sub-amostras de menor tamanho com o intuito de otimizar tempo computacional. Foi desenvolvido um estudo comparativo com parâmetros de qualidade dos elementos tetraédricos obtidos para as malhas.

Na Figura 4-19 podem ser observadas malhas de elementos finitos tetraédricas geradas mediante os dois algoritmos, FEGrid e FEFree. No algoritmo FEGrid foram geradas duas malhas, o tópico a) da figura corresponde ao “grid” gerado a partir dos “voxels” segmentados, e o b) apresenta a malha gerada utilizando a ferramenta de suavização. Observa-se, na imagem (a), a fidelidade da malha em relação aos “voxels” segmentados, uma vez que as bordas do cilindro ficam irregulares de igual forma dos contornos dos poros, marcando as bordas de cada “voxel”. Observe-se a boa discretização, maior densidade da malha nas regiões complexas como nas bordas e nos poros. No caso da malha suavizada observa-se a definição mais regular das bordas do cilindro, assim como uma melhor definição dos contornos dos poros. Para o caso da malha gerada a partir do algoritmo FEFree, ver imagem (c), nota-se uma distribuição uniforme dos elementos.

A Figura 4-20 apresenta imagens correspondentes a uma visualização 3D do volume total para a sub-amostra TRT-3. Notam-se as diferenças nos três modelos. Nestas imagens não foram ressaltados os elementos devido ao grande refinamento impedindo, assim, observar detalhes de suavização. Os elementos e números de nós variaram entre 8 a 13 milhões e entre 1 a 3 milhões, respectivamente.

A Figura 4-21 corresponde a uma visualização interna do volume 3D, discretizado por elementos tetraédricos ressaltando a forma em que são gerados os elementos ao redor dos poros. Os tempos computacionais consumidos para a geração da malha variam entre 4 minutos a 2 horas aproximadamente.

Embora as malhas tipo “smoothed” e as geradas com o algoritmo FEFree visualmente pareçam melhores, os parâmetros de qualidade obtidos de cada uma delas indicam melhores resultados para as malhas tipo “voxel” geradas a partir do algoritmo FEGrid. Assim, foram geradas as malhas e comparados os

parâmetros de qualidade para os dois tipos de algoritmos nas amostras de menor tamanho como pode se ver na Tabela 4.6.

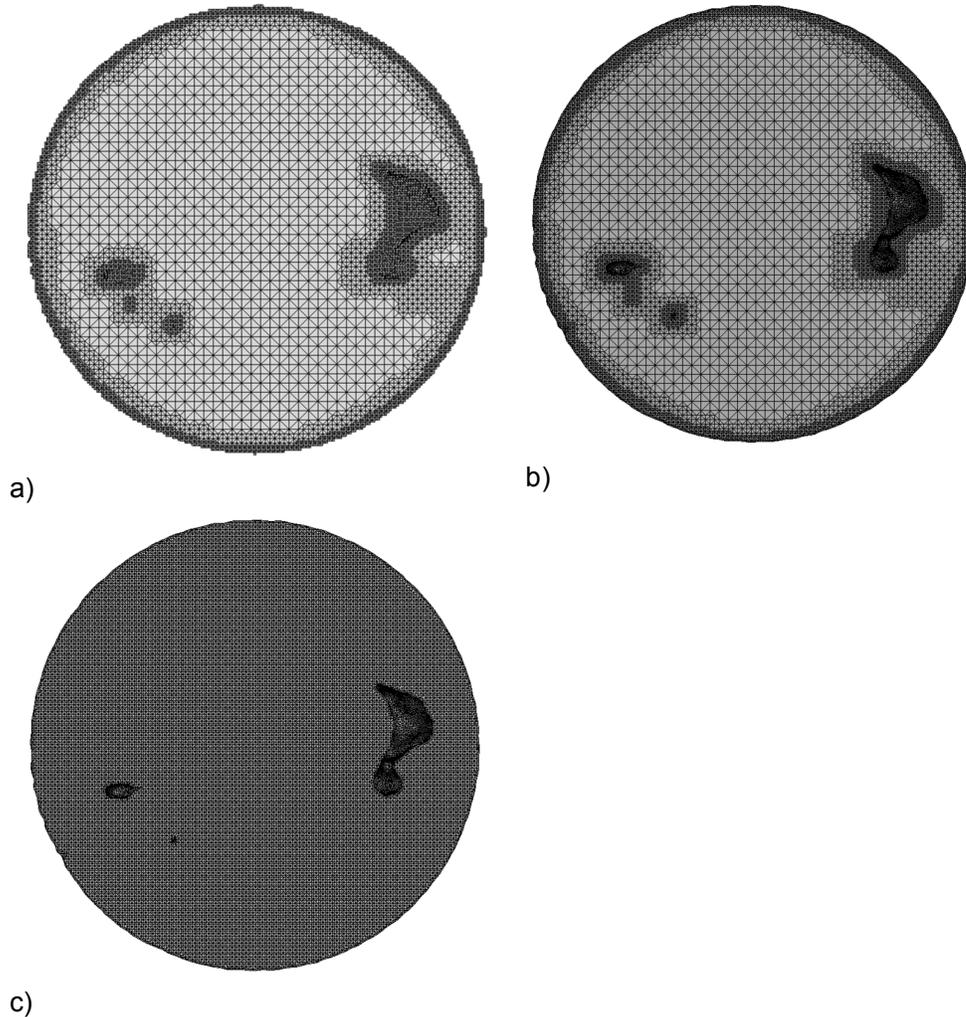


Figura 4-19. Vista superior da sub-amostra TRT-3. Malha gerada no algoritmo FEGrid: a) Malha tipo “voxels”. b) Malha tipo suavizado e c) Malha gerada com algoritmo FEFree.

No caso, concluiu-se que as malhas criadas com o algoritmo FEGrid apresentam métricas de boa qualidade e o tempo de geração das malhas é relativamente curto. Não obstante, as malhas apresentam um maior número de elementos e sua densidade não é muito controlável embora sejam realizadas mudanças na configuração, o algoritmo somente é capaz de reduzir o número de nós dentro da malha.

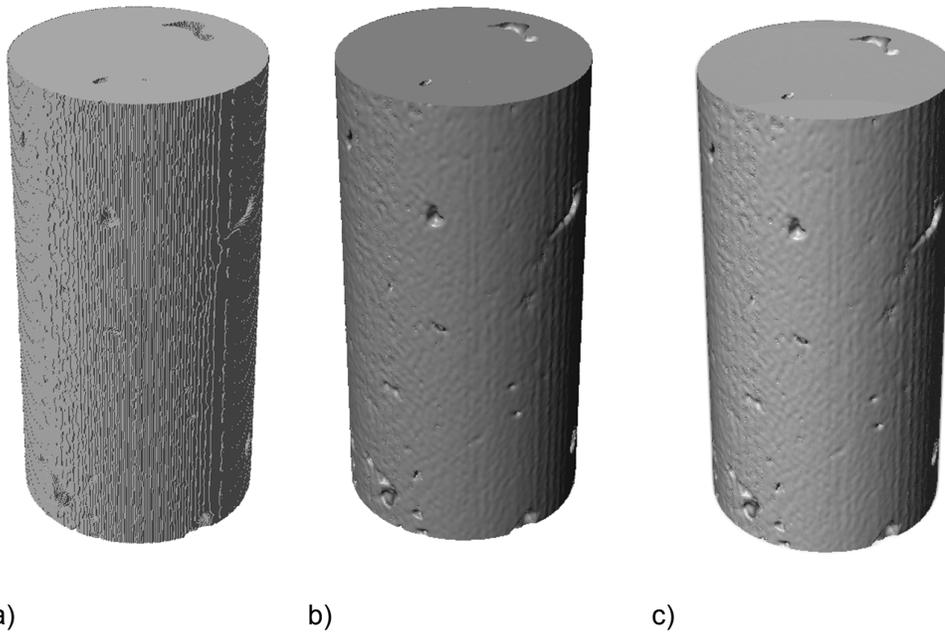
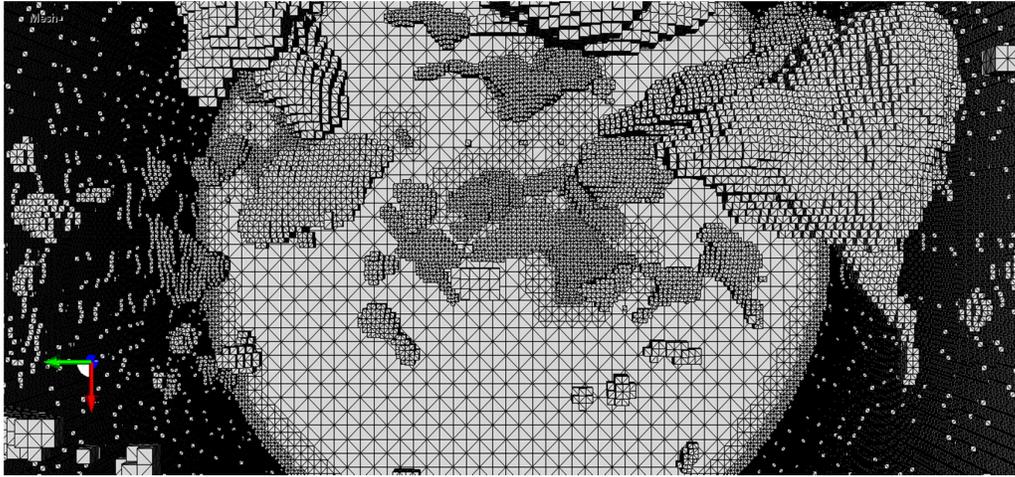


Figura 4-20. Visualização 3D do volume total para a sub-amostra TRT-3. Malha gerada no algoritmo FEGrid: a) Malha tipo “voxels”, 8.8e6 elementos, b) Malha tipo suavizado, 1.3e7 elementos e c) Malha gerada no algoritmo FEFree, 9.1e6 elementos.

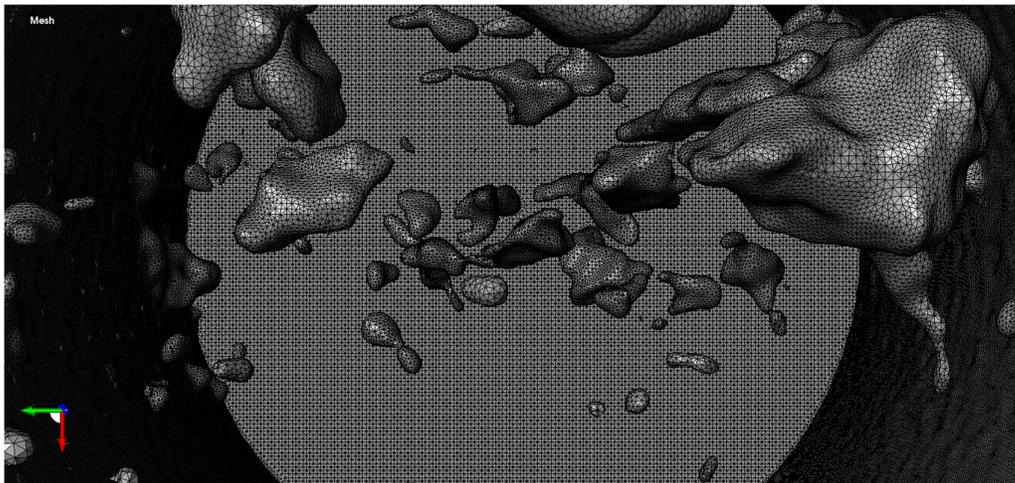
Por outro lado, para o algoritmo FEFree, o tempo de geração das malhas é aproximadamente de 4 a 20 vezes maior do que o tempo consumido pelo algoritmo FEGrid em um computador com as propriedades descritas anteriormente. O algoritmo apresenta versatilidade ao momento de controlar o número de elementos gerados, no entanto a qualidade pode ser comprometida. Neste algoritmo os elementos se adaptam melhor à forma real do cilindro, adaptando os elementos nas partes curvas e nas bordas do volume.

Em todas as malhas geradas com o algoritmo FEFree foram obtidas melhores relações de aspecto, mas por outro lado apresentam um considerável número de elementos com ângulos diedros menores que 10 o que implica elementos muito distorcidos que resultam em uma baixa qualidade das malhas. Nota-se na Tabela 4.6 para o caso das malhas tipo “suavizadas” no algoritmo FEGrid características similares.

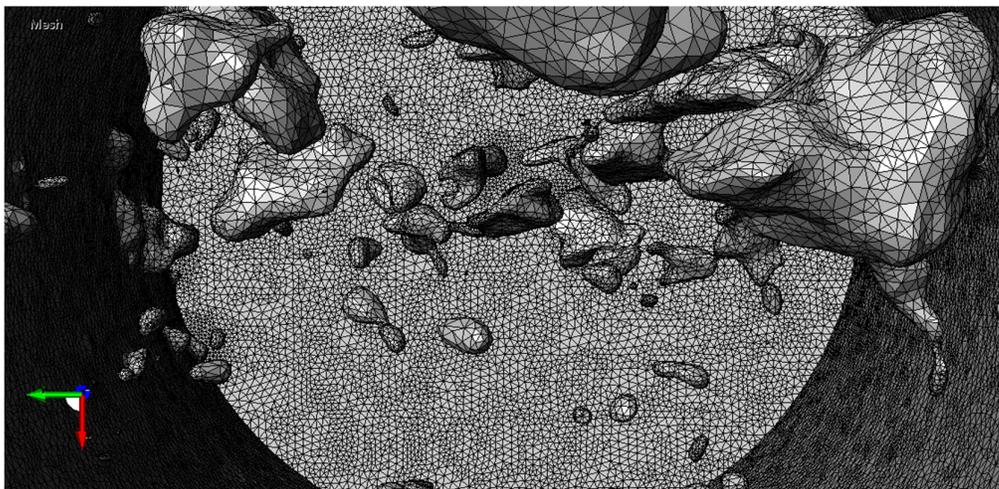
Finalmente, optou-se por gerar e exportar malhas de tipo “voxel” no algoritmo FEGrid. No entanto, o número de elementos gerados é uma limitante no momento de exportação para os softwares de simulação.



a)



b)



c)

Figura 4-21. Visualização 3D interna do volume total para a sub-amostra TRT-3. Malha gerada no algoritmo FE Grid: a) Malha tipo “voxels” b) Malha tipo suavizado “smoothed” e c) Malha gerada no algoritmo FEFree.

Tabela 4.6. Informação de parâmetros de malhas geradas para os sub-amostras a partir de algoritmos FEGrid e FEFree.

TR	Algoritmo		NE	NN	t	RA	NE com RA < 0,10	NE RC >10	Média AI	Média IVT	NE FF < 0,02	NE AD <10
TR1-1	FEG	S	7933957	1493220	7 min	0,747	0	14	0,304	0,444	145	390
		V	495507	1103621	3 min	0,766	0	0	0,247	0,429	0	0
	FEF	Auto	9045278	1588043	1 h	0,756	246	16	0,374	0,387	1475	1876
TR1-3	FEG	S	12727996	2643484	6 min	0,749	0	30	0,300	0,444	1	615
		V	8848486	1931320	4 min	0,763	0	0	0,252	0,43	0	0
	FEF	Auto	9059970	1788351	1 h 20 min	0,786	1829	195	0,349	0,34	6188	3537
TR1-4	FEG	S	12527307	2595524	10 min	0,748	0	5	0,303	0,444	4	363
		V	9342851	2041150	9 min	0,767	0	0	0,257	0,427	0	0
	FEF	Auto	7594371	1532798	1 h 40 min	0,841	0	9	0,314	0,272	20	38
TR1-5	FEG	S	11899133	2469114	11 min	0,746	0	315	0,305	0,446	1762	3727
		V	8898390	1952789	5 min	0,764	0	0	0,249	0,431	0	0
	FEF	Auto	7443182	1503057	1 h 30 min	0,842	21	171	0,320	0,27	80	485
TRR-1	FEF	S	35019525	7193273	2h 20 min	0,749	869	4599	0,305	0,443	5245	9212

NE: Número de Elementos; NN: Número de Nós; t: Tempo para geração; RA: Relação de aspecto; AI: Ângulo de inclinação; IVT: Inclinação do volume do tetraedro; AD: Ângulo Diedro; FF: Fator de Forma; Auto: Parâmetros automáticos; S: Suavizado; V: Voxel.

É importante mencionar, neste ponto, que é possível obter malhas de melhor qualidade que as obtidas neste trabalho com o algoritmo FEFree, a partir da manipulação das opções de parâmetros avançados fornecidos pelo software. No entanto, para chegar a esse objetivo são necessários estudos mais profundos.

O número de elementos para as sub-amostras menores mostraram-se elevados e era de se esperar que para as sub-amostras maiores o número tanto de elementos como de nós aumentaria ainda mais. O algoritmo constrói as malhas em função do tamanho do “voxel” definido pela resolução das imagens (entre 26 a 34 micras para as amostras estudadas aqui). Assim, foi realizado um teste com o algoritmo FEFree, manipulando parâmetros dos elementos de forma a reduzir a densidade da malha, para a sub-amostra TRR_1; os resultados apresentados ao final da Tabela 4.6 confirmaram a hipótese. O número de elementos para as amostras maiores é consideravelmente alto, e a capacidade do programa escolhido para realizar as simulações foi incapaz de importar tais malhas.

Optou-se, então, por manipular a resolução das imagens, realizando uma reamostragem, que pode ser entendido como uma redução da resolução, que conseqüentemente leva a uma diminuição da densidade das malhas. Assim foi realizado um “resample” nas imagens das sub-amostras, com um fator de 20% para as amostras maiores e com um fator de 50% para as amostras menores, para posteriormente gerar malhas tipo “voxel” com o algoritmo FEGrid.

A Tabela 4.7 apresenta os resultados da aplicação do processo, “resample”, para todas as sub-amostras.

Tabela 4.7. Informação de parâmetros de malhas geradas para as sub-amostras a partir do algoritmo FEGrid com manipulação da resolução.

TR	Resample	NE	NN	t	RA	NE com RA	NE RC	Média AI	Média	NE FF	NE AD
						< 0,10	>10		IVT	< 0,02	<10
TRI-1	0	4495507	1103621	7min	0,766	0	0	0,247	0,429	0	0
TRR-1	20	2279320	502017	43s	0,777	0	0	0,219	0,412	0	0
TRR-2	20	2318286	509284	1 min	0,777	0	0	0,219	0,412	0	0
TRR-3	20	2353431	524475	45s	0,778	0	0	0,216	0,410	0	0
TRT-1	20	1906395	409357	55s	0,771	0	0	0,233	0,420	0	0
TRT-2	20	1870717	399743	39s	0,771	0	0	0,235	0,422	0	0
TRT-3	50	1926098	423757	1min	0,766	0	0	0,245	0,428	0	0
TRT-4	50	2167301	678342	1min	0,765	0	0	0,247	0,429	0	0
TRT-5	50	2141507	510926	55s	0,765	0	0	0,249	0,430	0	0

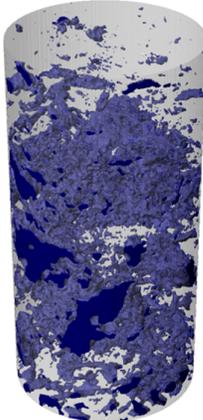
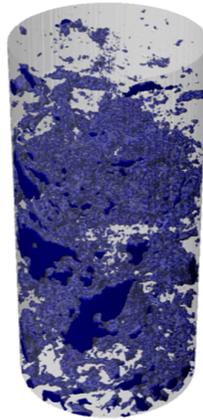
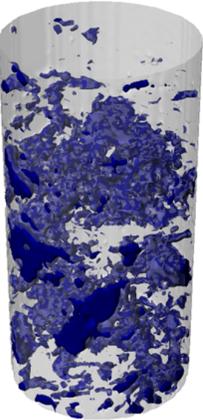
Observe-se que o valor da relação de aspecto dos elementos se encontra no intervalo de 0,70 a 0,80 o qual é aceitável tomando em consideração que um valor de 0 indicaria uma relação de aspecto péssima e um valor de 1 uma relação de aspecto perfeita. Nenhuma malha apresentou elementos com parâmetros abaixo dos parâmetros mínimos, os quais resultariam em elementos com baixa qualidade. Nota-se também o curto tempo no qual é gerada a malha.

Deve-se ter em mente que a diminuição da densidade das malhas mediante a manipulação da resolução, também implica uma perda de detalhes nos modelos, o qual deve ser evitado sempre que for possível. Na Tabela 4.8 é apresentado o efeito dessa operação no reconhecimento de detalhes tais como microporos para a sub-amostra TRR-1.

Observa-se, também o número de nós e elementos gerados em cada caso. Os “resamples” de 0 e 50 % detectam detalhes finos na amostra, no entanto, a densidade das malhas é extremamente alta. Já um modelo com “resample” de 20%, a densidade de malha é adequada para o software de simulação numérica, aliás, pode-se apreciar a perda de características nos mesmos.

A fim de e garantir a representatividade das malhas decidiu-se realizar uma análise comparativa da influência do “resample” na relação da estrutura porosa em relação ao módulo de Young. As imagens de microtomografia do TRT-3 foram remostadas para produzir uma série de diferentes modelos. “Resamples” com fatores de 0, 80, 60 e 50 % foram aplicados para obter modelos com diferentes densidades de malha. Os resultados serão apresentados mais adiante.

Tabela 4.8. Manipulação da resolução: aplicação de “Resample” para TRR-1.

Travertino	Sem “resample”	Resample (50 %)	Resample (20 %)
TRR-1			
			
NE	84456105	24248616	2279320
NN	18277144	5190268	502017
t	26 min	5min	43s

Após a definição e aplicação da técnica mais adequada de geração de malha, um arquivo de entrada para o software de análise de tensões (ABAQUS) é gerado a partir de ScanIP.

4.4. Modelo computacional e método de elementos finitos

Até aqui a discretização digital 3D foi usada para definir os elementos e nós para análise em elementos finitos. Nesta etapa, essas malhas de elementos finitos serão usadas para estimar propriedades elásticas mediante simulação de ensaios de carga com o intuito de explorar a influência de fatores intrínsecos como a microestrutura, especialmente o sistema poroso nas propriedades elásticas das rochas carbonáticas.

Os modelos de malhas para cada sub-amostra cilíndrica são então importados como arquivos “*. INP” para o programa de análises de elementos finitos, ABAQUS.

Com base nos estudos mineralógicos realizados por Pilotto, (2011), para o presente trabalho foram atribuídos valores de propriedades elásticas do principal mineral constituinte da rocha, a calcita. Estas propriedades foram dadas por um valor médio dos dados apresentados por Mavko, et al.(1998) e por Zhao, et al. (2009). Na Tabela 4.9 apresentassem os dados usados.

As condições de contorno aplicadas para os travertinos visam simular um ensaio de compressão simples. Assim, a base da amostra foi fixada de forma a restringir o movimento na direção normal e a aplicação do deslocamento vertical no topo do modelo foi estabelecida. As direções perpendiculares ficaram livres. O deslocamento foi calculado para atingir uma deformação ($\epsilon = 0,5\%$) em cada sub-amostra, como é apresentado na Tabela 4.10.

Tabela 4.9. Propriedades do principal componente mineralógico: Calcita.

Propriedade	Unidade	Valor médio	Referência
Densidade	g/cc	2,708	Mavko, et al.(1998)
Coefficiente de Poisson (ν)	-----	0,31	Mavko, et al.(1998) e Zhao, et al. (2009)
Módulo de Young (E)	GPa	85,06	Zhao, et al. (2009)

Tabela 4.10. Deslocamentos calculados para as sub-amostras.

Travertino	Sub-amostra Cilíndrica	H (mm)	$\Delta\delta$ (mm)
Travertino de Itaboraí	TRT-1	24,3	0,1215
Travertino Romano	TRR-1,2,3	38,06	0,1903
Travertino Turco	TRT-1,2	38,06	0,1903
	TRT-3,4,5	20,2	0,101

A aplicação de deslocamentos no volume da microestrutura gera tensões locais nos elementos através de todo o volume. A tensão vertical média resultante permite estimar as propriedades elásticas, dessa forma é obtida uma curva tensão - deformação na qual é possível obter o módulo de Young do material poroso.

O tempo de simulação para as sub-amostras utilizadas foi entre 10 de 40 minutos no computador que permite usar 12 processadores paralelos para cada simulação.

No caso da sub-amostra cilíndrica do travertino de Itaboraí, como foi apreciado nas análises quantitativas nas Tabela 4.4, Tabela 4.5 e Figura 4-15 não possui poros, é um cilindro completamente composto de grãos e cimento e segundo os estudos de lâminas delgadas, este tipo de travertino é composto basicamente de calcita.

Portanto, decidiu-se fazer uma primeira simulação assumindo toda a sub-amostra composta somente por grãos de calcita, considerando as propriedades apresentadas na Tabela 4.9. Dados de tensão – deformação foram plotados em diagramas tensão (σ) – deformação (ϵ).

Na Figura 4-22 apresenta-se os resultados da simulação para a sub-amostra cilíndrica do travertino de Itaboraí. O regime elástico linear na curva é descrito por uma linha reta com certa inclinação, que indica a proporcionalidade entre os dois parâmetros. O módulo de Young que corresponde ao coeficiente angular da parte linear do diagrama obtido, para o caso de 85,06 GPa.

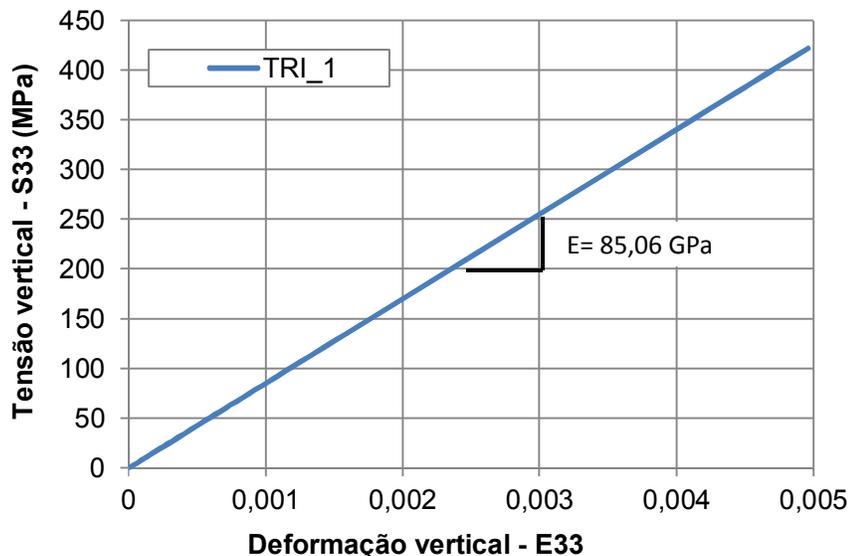


Figura 4-22. Curva tensão-deformação: TRI-1.

O valor do coeficiente angular da curva mostra o resultado esperado, o módulo obtido como resposta da sub-amostra não porosa a um deslocamento sob condições lineares é igual ao módulo do mineral. Por esta razão se pode concluir que o processo de aplicação de deslocamento foi realizado adequadamente e a resposta das malhas é adequada.

Para o estudo de representatividade das malhas mencionado na seção anterior, foram feitas simulações numéricas para o TRT-3 nos diferentes modelos gerados. Não foi possível realizar a simulação numérica no modelo com

“resample” de 0, devido ao elevado grau de refinamento da malha. As curvas tensão-deformação são apresentadas a seguir, nas Figura 4-23- 4.25.

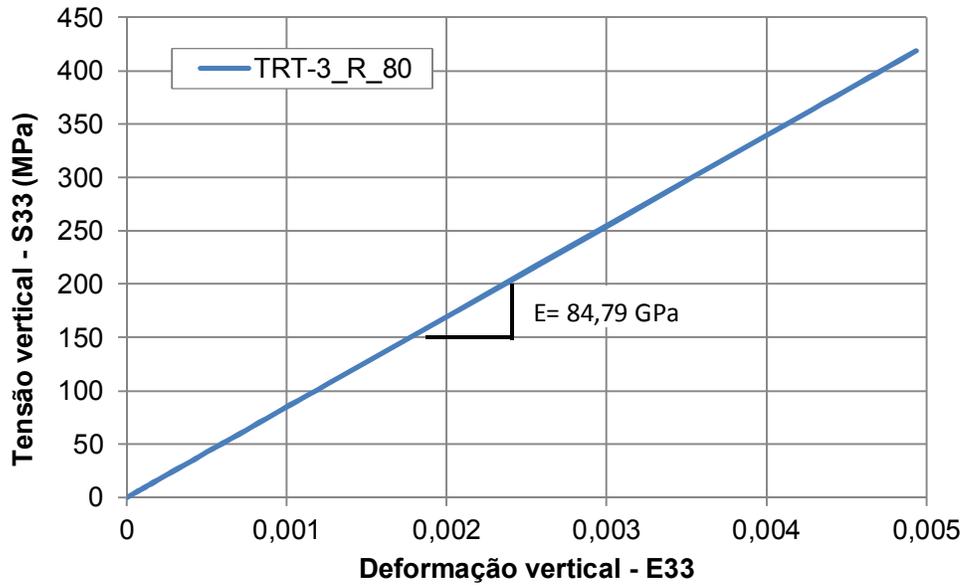


Figura 4-23. Curva tensão-deformação: TRT-3, “resample” 80.

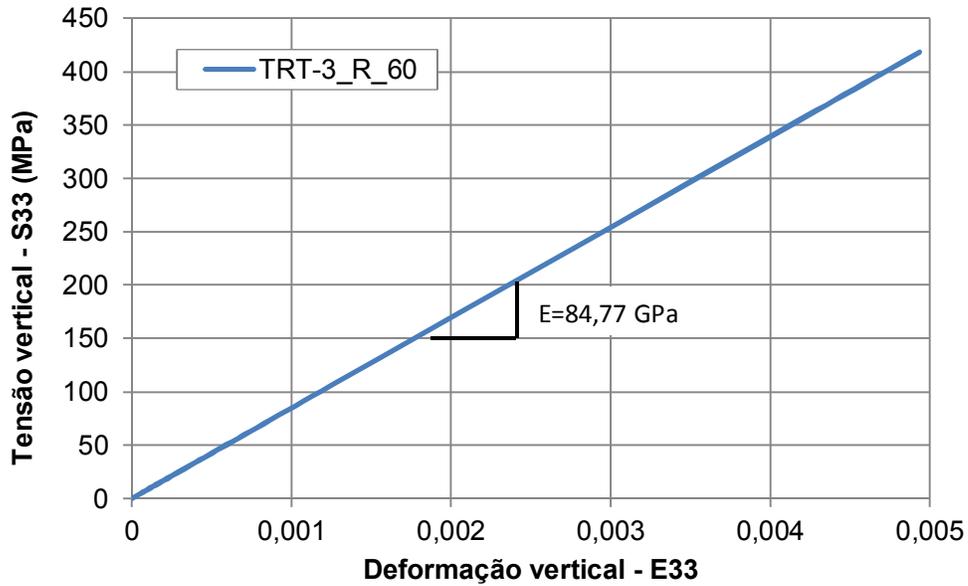


Figura 4-24. Curva tensão-deformação: TRI-3, “resample” 60.

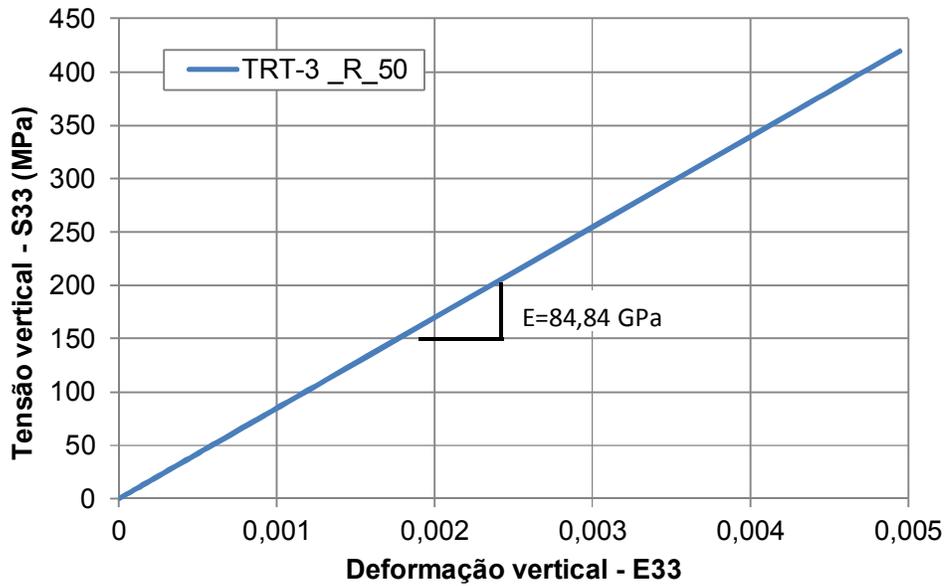


Figura 4-25. Curva tensão-deformação: TRI-3, “resample” 50.

Seguidamente foram realizadas as simulações para os demais travertinos.

Nas Figura 4-26- 4.28 apresentam-se as curvas tensão (σ) – deformação (ϵ) para as sub-amostras do travertino Romano.

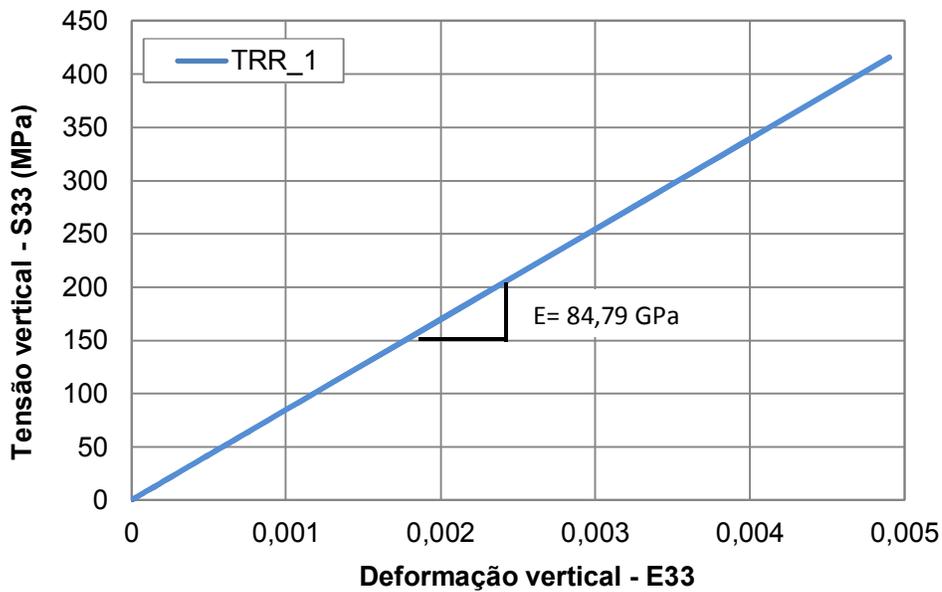


Figura 4-26. Curva tensão-deformação: TRR-1.

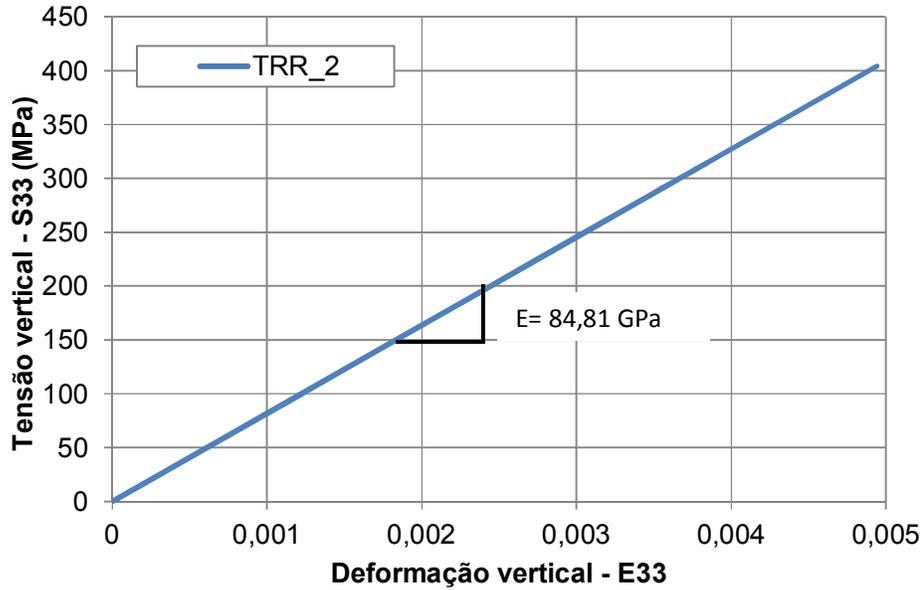


Figura 4-27. Curva tensão-deformação: TRR-2

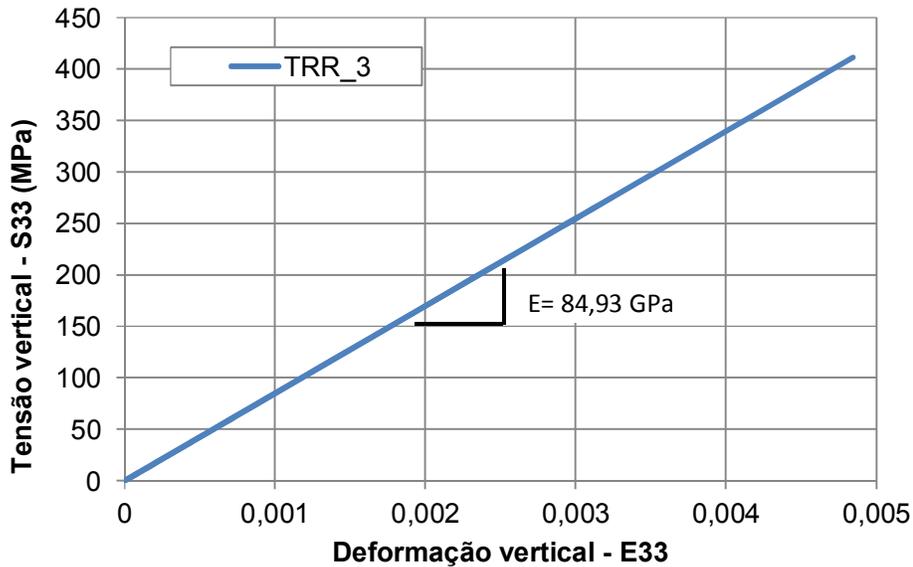


Figura 4-28. Curva tensão-deformação: TRR-3.

Observe-se que uma variação do módulo de Young entre as sub-amostras, apesar inclusive de pertencerem a uma mesma amostra de travertino. O valor mais baixo de Módulo de Young, 81,84 GPa, é do TRR-2.

As Figura 4-29-4.33 apresentam as curvas tensão (σ) – deformação (ϵ) para as sub-amostras do travertino Turco obtidas da simulação do comportamento elástico.

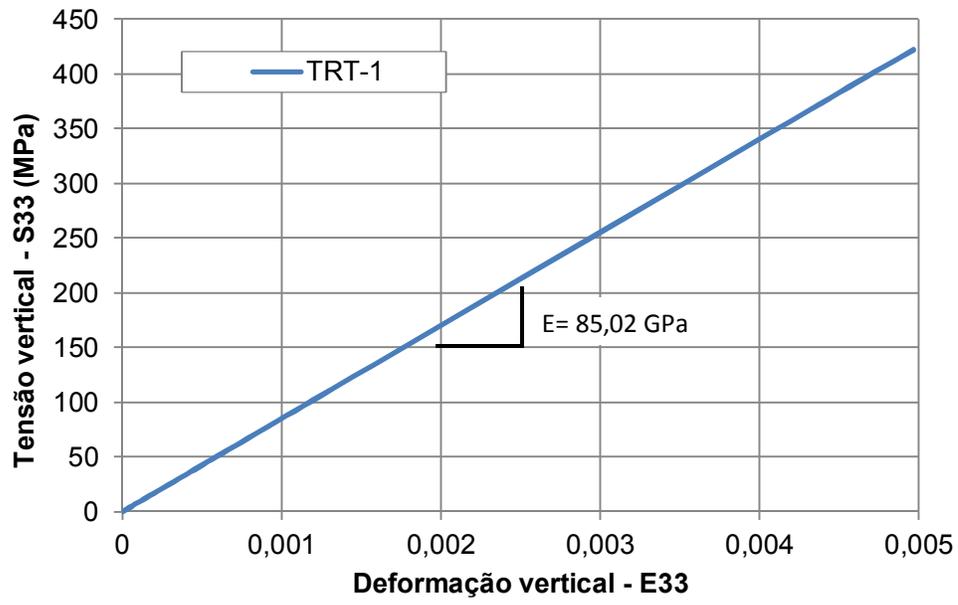


Figura 4-29. Curva tensão-deformação: TRT-1.

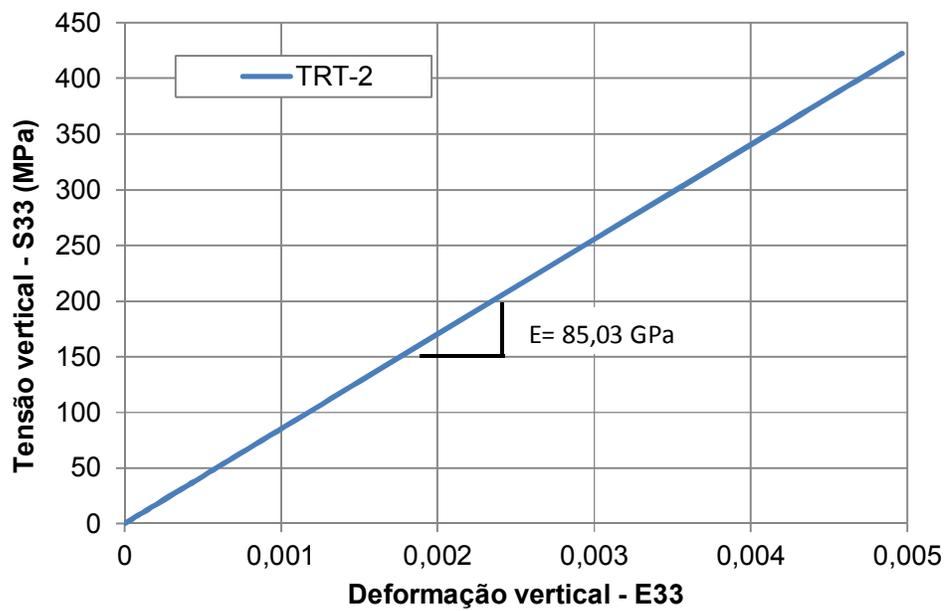


Figura 4-30. Curva tensão-deformação: TRT-2.

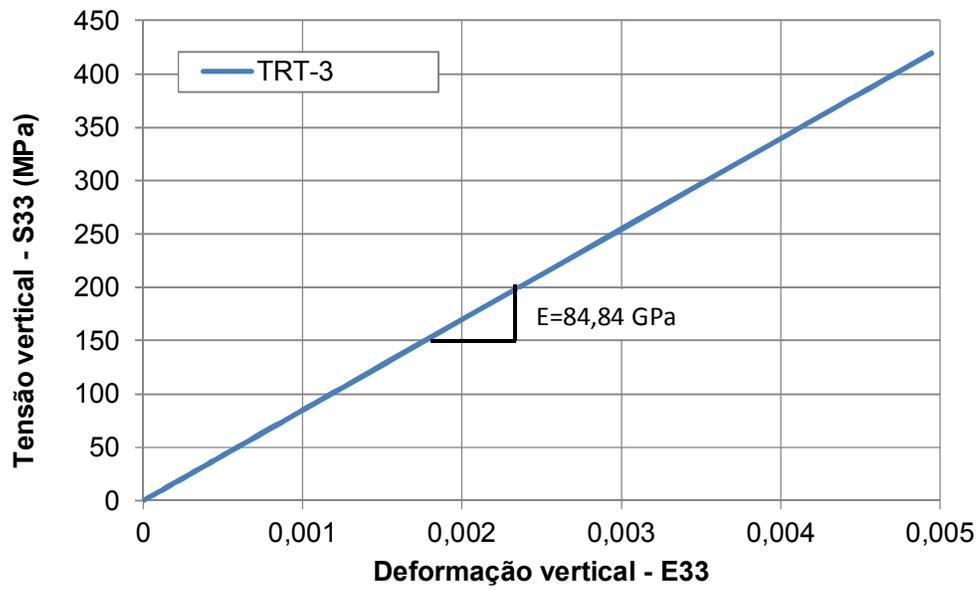


Figura 4-31. Curva tensão-deformação: TRT-3.

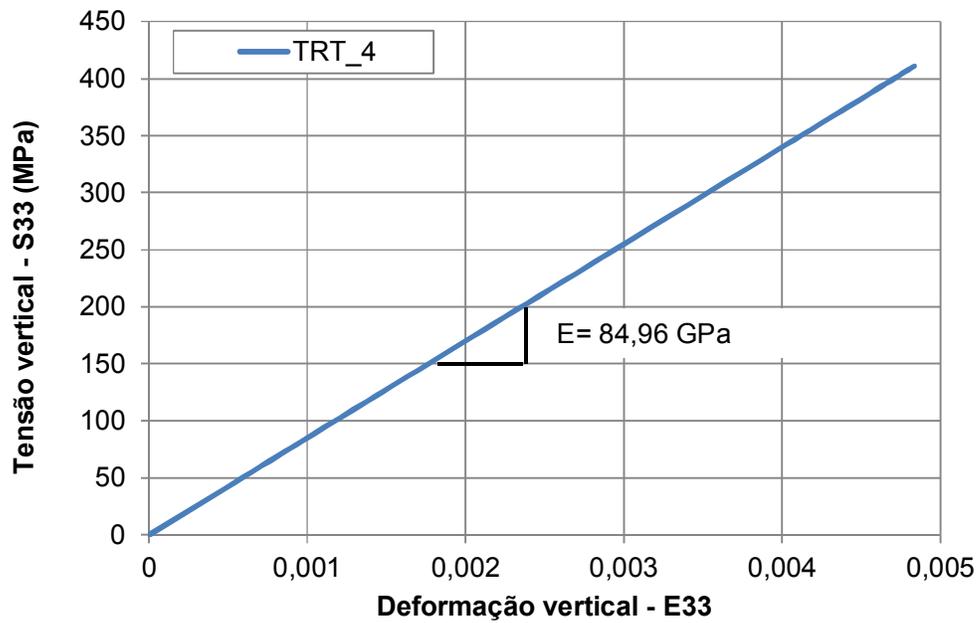


Figura 4-32. Curva tensão-deformação: TRT-4.

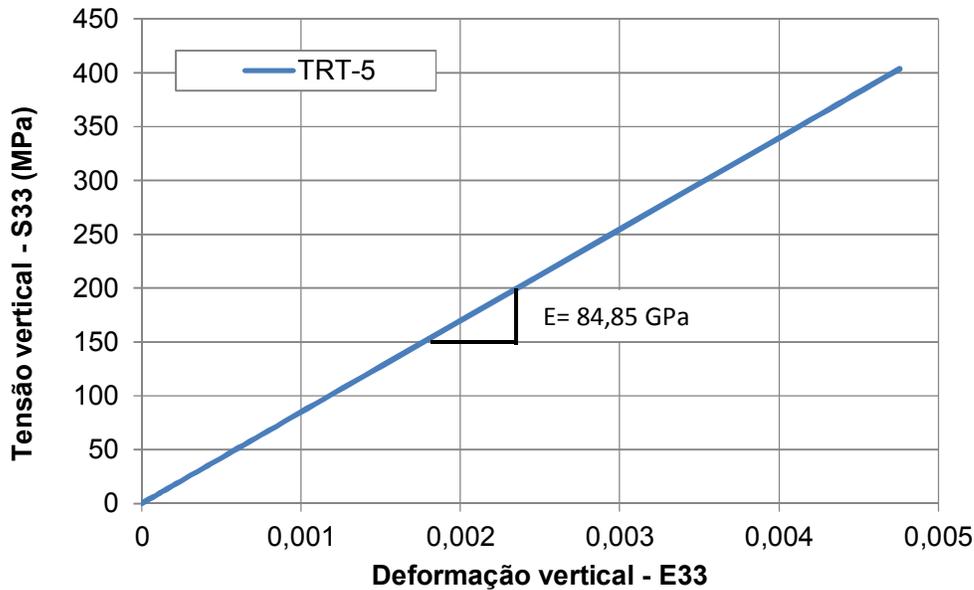


Figura 4-33. Curva tensão-deformação: TRT-5.

Nestes travertinos a menor resposta em quanto ao módulo de Young foi dado pela sub-amostra TRT-3.

4.5. Análise e avaliação de resultados

Nesta seção, são comparadas as previsões numéricas obtidas neste trabalho com dados experimentais e teóricos encontrados na literatura e discutidos nos capítulos anteriores.

Foram comparados em primeira instância os resultados das simulações com dados experimentais.

Na Figura 4-34 apresentam-se as curvas tensão – deformação para o travertino de Itaboraí. A curva vermelha, indica os resultados da simulação na sub-amostra TRI-1 e a curva azul apresenta os dados obtidos de ensaios de compressão simples para amostras porosas do mesmo travertino, realizados por Pilotto, (2011).

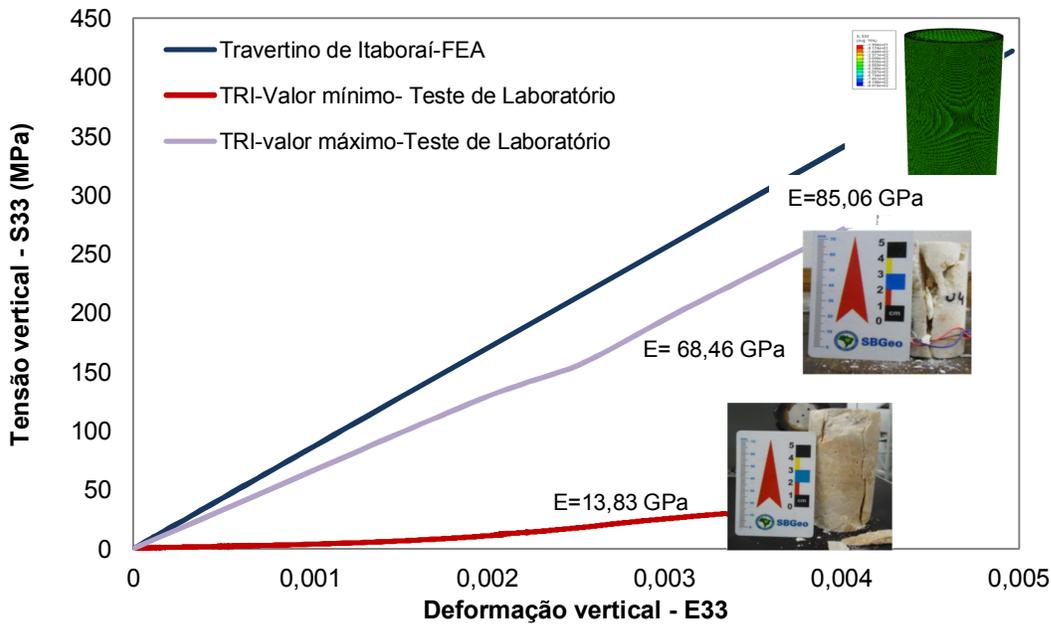


Figura 4-34. Comparativo: curvas tensão-deformação: TRI-1. Curvas vermelha e lilás obtidas em laboratório, curva azul obtida em simulação numérica.

Destes resultados é visto que o módulo de Young obtido da simulação é maior quando comparado com dados experimentais.

Esta discrepância pode ser devida a vários fatores. Em primeiro lugar, pode estar relacionada ao fato das amostras microtomografadas não são às amostras ensaiadas no trabalho de Pilotto, (2011) e apesar de ser dos mesmos blocos estudados, o comportamento entre uma locação e outra dentro de amostras tão complexas podem ser uma fonte dessas discrepâncias. No caso, as amostras do TRI testadas no laboratório (TRI-4 e 5) ainda sendo do mesmo bloco apresentam porosidades diferentes e repostas mecânicas diferentes, para o caso do módulo de Young 13 GPa e 68 GPa, respectivamente. No caso da sub-amostra digital, do mesmo travertino, submetida à simulação, apresenta porosidade zero e sua resposta elástica foi de 85,06 GPa. Este comparativo (amostra com porosidade zero versus amostras porosas) pode indicar a influência de parâmetros tais como a porosidade, microfraturas e as fases (grão-cimento) nas propriedades mecânicas da rocha. No entanto, para chegar a conclusões mais concretas que confirmem as conclusões preliminares expostas aqui, recomenda-se, para os trabalhos futuros baseados em microtomografia, utilizar imagens das mesmas amostras testadas em laboratório para poder obter uma validação mais precisa dos resultados da simulação numérica. Neste contexto, desenvolveu-se um fluxo de trabalho, Figura 4-35, para a aplicação da metodologia, incluindo a recomendação exposta.

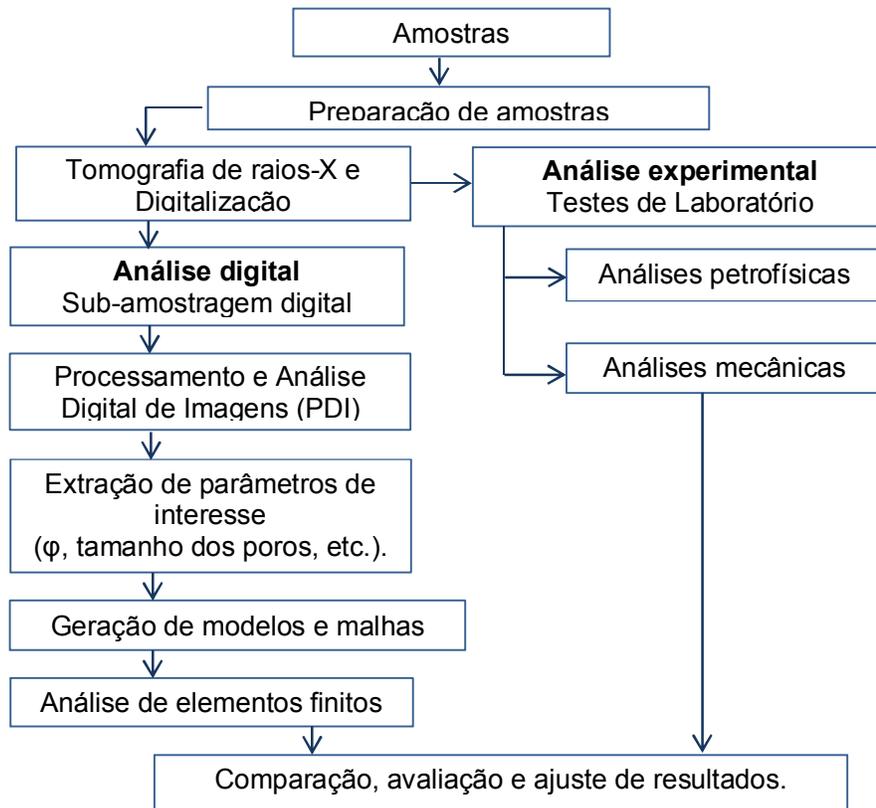


Figura 4-35. Metodologia proposta para trabalhos futuros.

Outro fator de discrepância são as inúmeras microfissuras e micro poros que podem não ter sido captadas pela resolução das microtomografias.

Em terceira instância devem ser tidos em conta, os erros provenientes das considerações feitas para as análises numéricas, devido às limitações da resolução das imagens. Para o caso das sub-amostras, foram consideradas compostas por um único mineral (calcita) em seu estado puro (desconsiderando as porcentagens de grãos e cimentos que tem a rocha real) e inalterado, desconsiderando, também, a influência dos processos de sedimentação e diagênese tanto no mineral puro e no material cimentante. Tanto a composição da rocha (porcentagens grão- cimento) como os processos de sedimentação e diagênese poderiam alterar significativamente as propriedades refletindo nos resultados dos ensaios de laboratório. Portanto, os resultados obtidos na análise numérica devem ser considerados como limite superior deste tipo de rocha.

Conforme discutido no item anterior, o elevado número de elementos gerados a partir das imagens digitais torna, em alguns casos, inviável a sua importação pelo ABAQUS. Assim, fez-se necessária a utilização do resample com objetivo de diminuir o número de elementos. Essa modificação implica em uma alteração porcentual na resolução da imagem definida como “fator” neste

trabalho. Assim, a sub-amostra TRT-3 foi testada gerando três modelos a partir de fatores de alteração da resolução de 80, 60 e 50 %, respectivamente. Desta forma, por exemplo, o modelo com um fator de 80 %, passa de 423x423x776 pixels para 338x338x621 pixels e de 0,026 mm para 0,0325 mm por pixel. Após a redução, os modelos foram submetidos à análise numérica e seus resultados comparados.

Na Figura 4-36 apresentam-se quatro modelos tridimensionais semitransparentes, com fator de alteração de 0, 80, 60 e 50 %. Em azul é ressaltada a estrutura porosa. Pode se apreciar uma alteração das características do sistema poroso com a alteração da resolução e, por conseguinte alterações nos valores de porosidade. No entanto, a discrepância entre eles é menor que 3%. Observa-se que pequenos microporos se perdem e que a geometria de outros é modificada a medida que a resolução é alterada, perde-se poros pequenos que pouco somam na porosidade total, mas que podem ter grande impacto em outras propriedades.

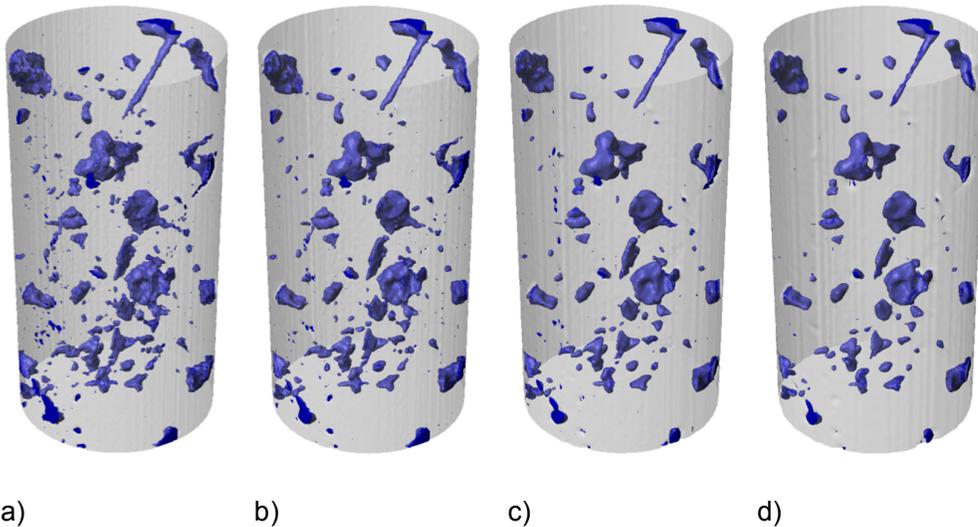


Figura 4-36. Visualização 3D da rocha e o sistema poroso com aplicação de “Resample”: a) fator 0, b) fator 80, c) fator 60 e d) fator 50.

Na Figura 4-37 apresenta-se a diminuição da densidade da malha para cada modelo com a alteração da resolução. O modelo sem alteração da resolução, fator de 0 %, atinge densidade ainda acima da capacidade do software de análise numérica, ABAQUS. No entanto, os resultados das análises numéricas para os demais modelos, Figura 4-38, produzem uma convergência no parâmetro de interesse, módulo de Young. Um nível aceitável de convergência entre os modelos é demonstrado com uma média de diferença de

0,047% no módulo. Na Tabela 4.11 é apresentado um resumo dos resultados dos diferentes modelos para o TRT-3, onde estão apresentados valores da variação de porosidade, número de elementos, número de nós, tempo de execução e módulo de Young, obtidos. Na

Tabela 4.12 são apresentados os valores de discrepância máximos, mínimos e médios, para os valores de porosidade e para os módulos de Young, assim como sua respectiva porcentagem.

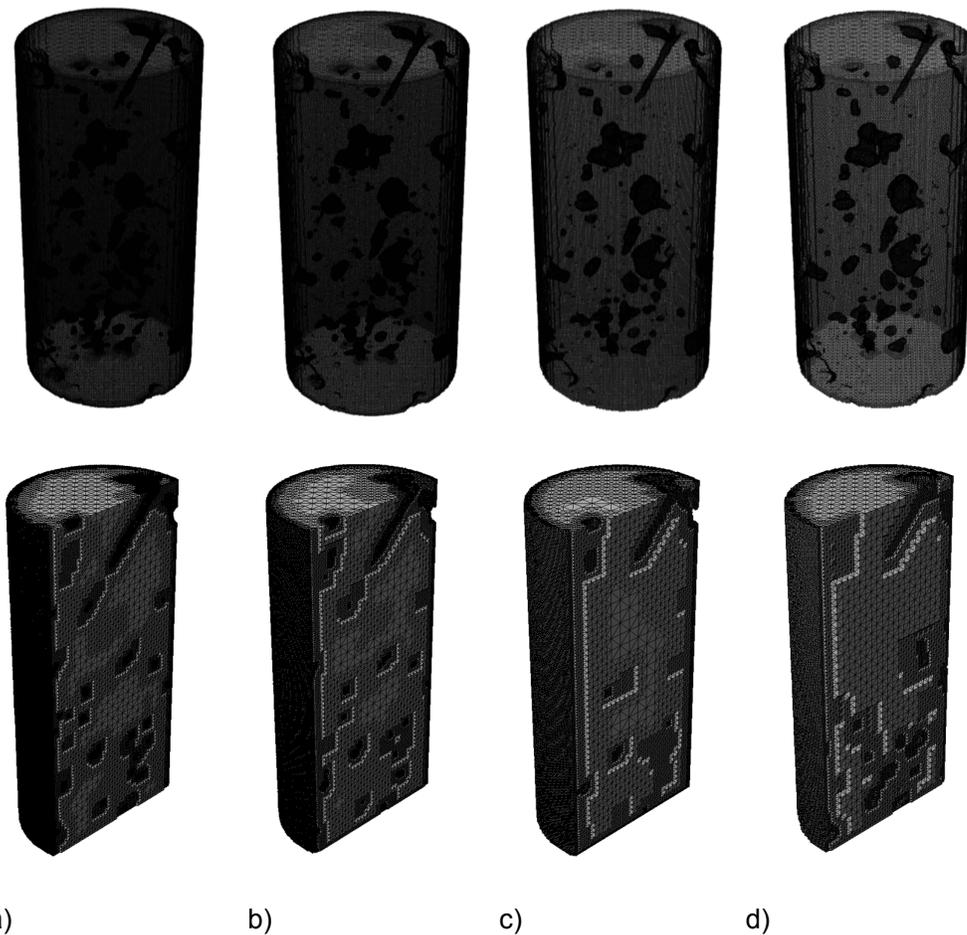


Figura 4-37. Diferença na densidade das malhas com aplicação de “Resample”: a) fator 0, b) fator 80, c) fator 60 e d) fator 50.

Com base nestas análises conclui-se que é possível obter resultados com convergência aceitável, manipulando a resolução da imagem com o intuito de reduzir densidade dos modelos. Os resultados numéricos são praticamente insensíveis à densidade da malha, no entanto, esta manipulação da resolução deve ser evitada quanto possível, segundo o encontrado por Arns, et al., (2002).

Assim, os resultados obtidos para as sub-amostras com manipulação da resolução podem ser então considerados aceitáveis e analisados com um bom grau de confiança.

Realizando uma análise comparativa dos resultados numéricos para as sub-amostras em cada tipo de travertino (Romano e Turco), as curvas tensão-deformação nas Figura 4-39 e 4.40, revelam uma variação no Módulo de Young obtido, mais marcadamente nas sub-amostras do travertino Romano.

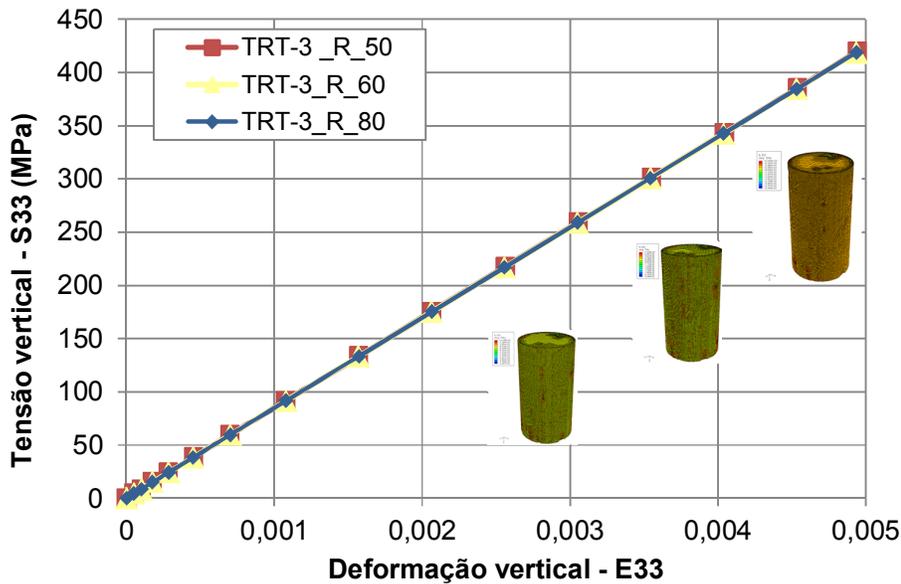


Figura 4-38. Comparativo: Curvas tensão-deformação para TRT-3 com manipulação de resolução.

Tabela 4.11. Dados obtidos para os modelos do TRT-3 com manipulação da resolução.

Fator de Resample	Porosidade (%)	NE	NN	t	E (GPa)
0	1,26	8816179	1923059	Não aplica	Não aplica
80	1,24	5424325	1185279	50 min	84,79
60	1,29	2965028	651361	16 min	84,77
50	1,27	1926098	423757	10 min	84,84

Tabela 4.12. Discrepância nos resultados para os modelos do TRT-3.

	Discrepância			
	Porosidade (%)	(%)	E (GPa)	(%)
Máximo	0,03	2,8	0,07	0,08
Mínimo	0,01	0,59	0,02	0,02
Médio	0,02	1,66	0,05	0,047

Já que as simulações foram feitas considerando a rocha composta somente por grãos de calcita a variação apresentada no módulo é devida provavelmente à influência da porosidade da rocha (sistema rocha-poros).

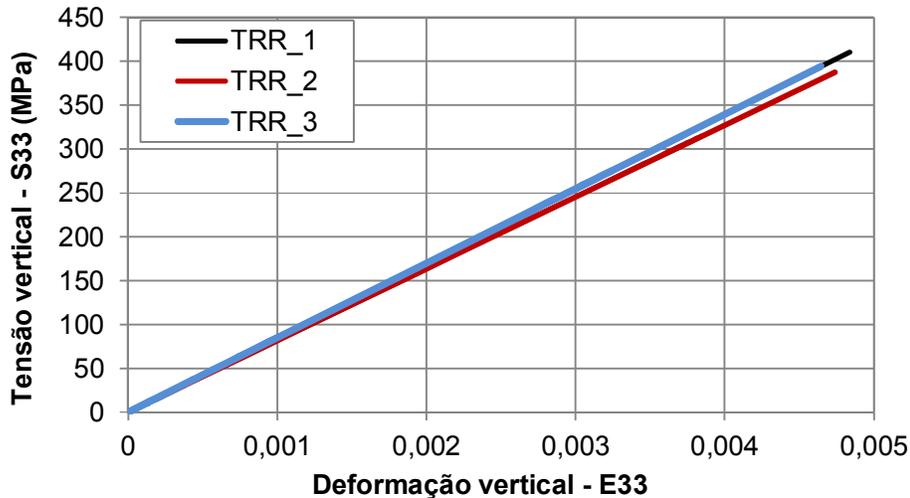


Figura 4-39. Comparativo: Curvas Tensão-Deformação para sub-amostras de travertino Romano.

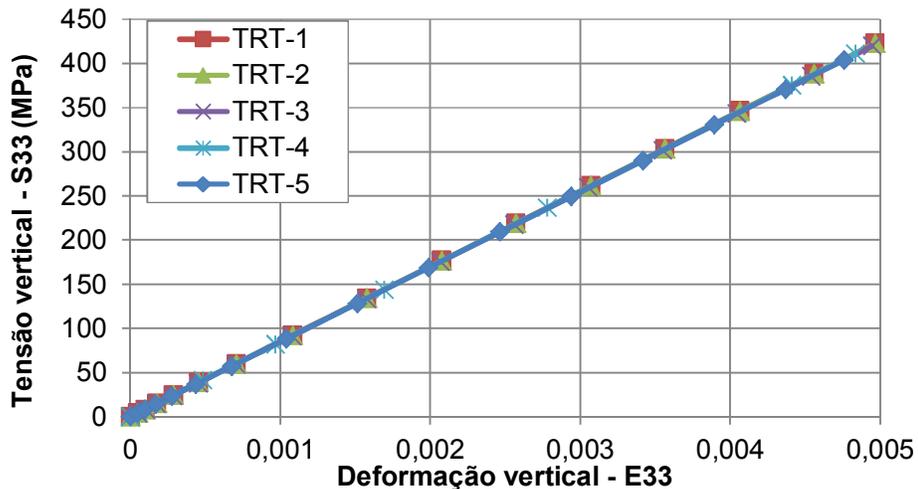
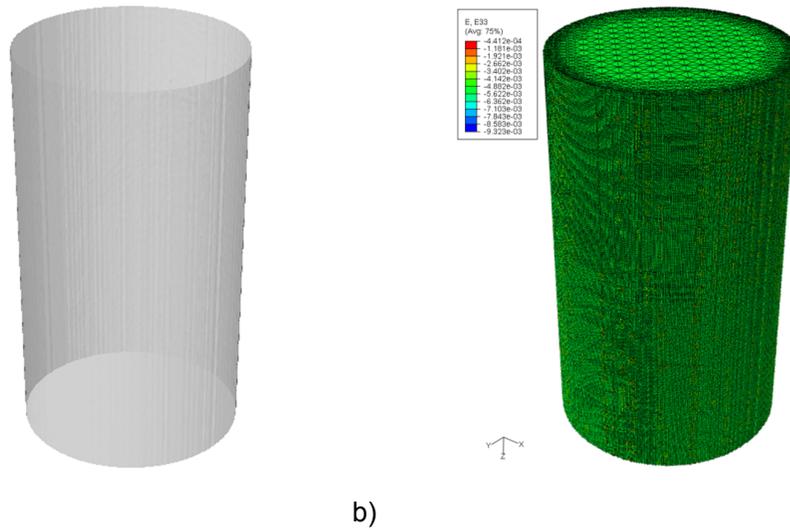


Figura 4-40. Comparativo: Curvas Tensão-Deformação para sub-amostras de travertino Turco.

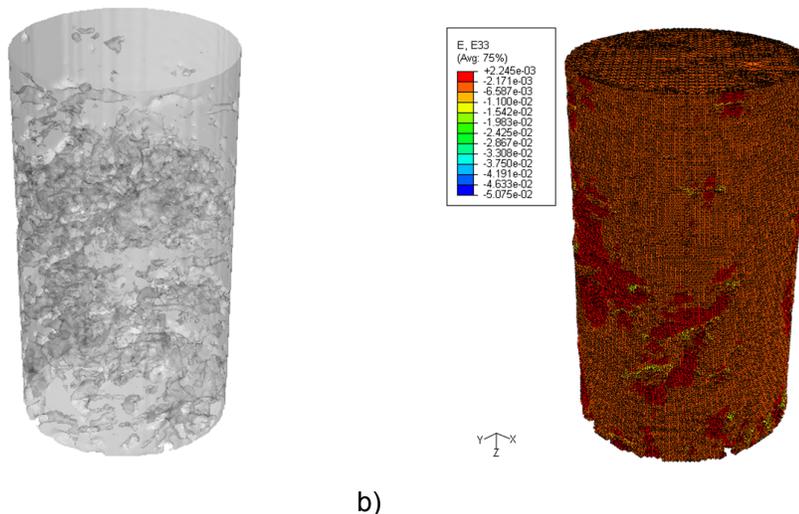
Analisando a porosidade total e o sistema poroso das rochas junto às respostas das simulações numéricas (Figura 4-41 a 4-44) é percebido que as variações estão mais influenciadas pelo arranjo do sistema de poros do que pelo valor total da porosidade. Tal fato é marcado nas respostas das sub-amostras do travertino Romano, no qual a maior variação do módulo foi obtida não na sub-amostra com maior porosidade (TRR-3) mais sim na sub-amostra com uma distribuição de poros mais homogênea ao longo de seu comprimento (TRR-2),

que por sua vez conta com a maior porcentagem de porosidade não conectada, correspondente a 19 %, veja-se na Tabela 4.13. Da resposta das simulações, observa-se, também, a concentração de deformações (cores amarelas e vermelhas) nas bordas dos poros. O que mostra a influência dos mesmos dentro da rocha.



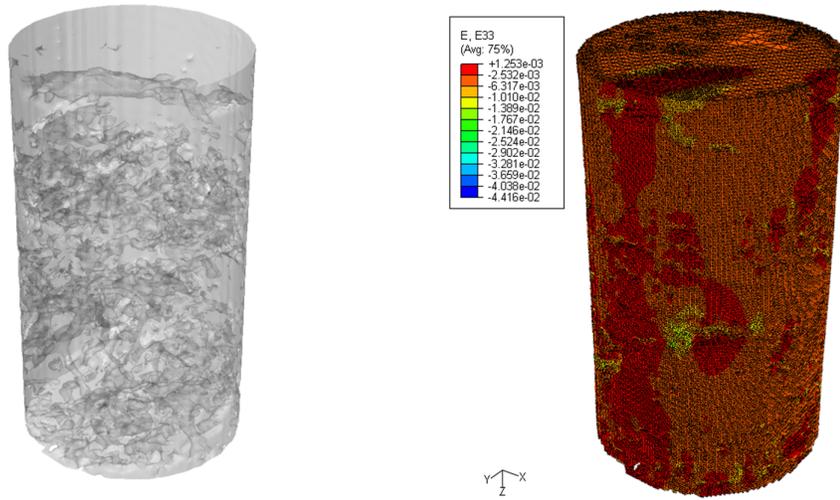
Porosidade Total (%)=0	Número de elementos=4495507
Porosidade Aberta (%)=0	Número de nós =1103621
Porosidade Fechada (%)= 0	Módulo de Young da rocha (GPa) = 85.06

Figura 4-41. Visualização 3D do TRI-1: a) modelo semitransparente da rocha antes da simulação, b) modelo da rocha após a simulação.



Porosidade Total (%)= 5,64	Número de elementos=2279320
Porosidade Aberta (%)= 4,64	Número de nós =502017
Porosidade Fechada (%)= 0,99	Módulo de Young da rocha (GPa) = 84,79

Figura 4-42. Visualização 3D do TRR-1: a) modelo semitransparente da rocha antes da simulação, b) modelo da rocha após a simulação.

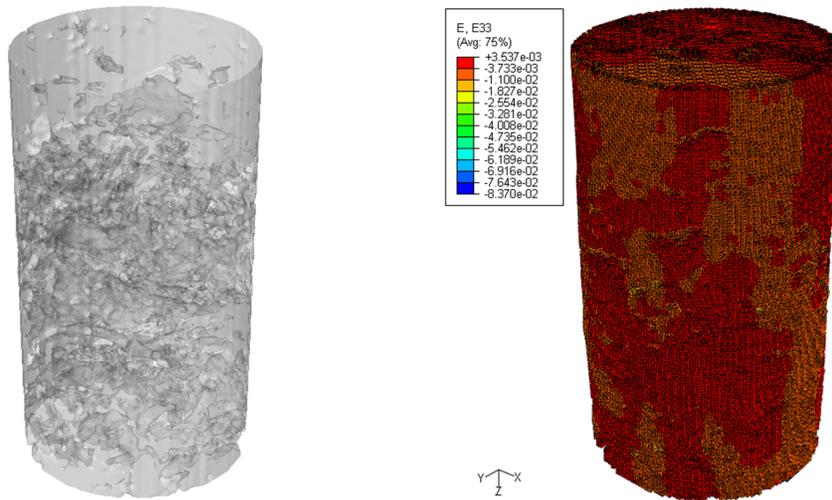


a)

b)

Porosidade Total (%)= 5,24	Número de elementos=2318286
Porosidade Aberta (%)= 4,26	Número de nós = 509284
Porosidade Fechada (%)= 0,98	Módulo de Young da rocha (GPa) = 81,84

Figura 4-43. Visualização 3D do TRR-2: a) modelo semitransparente da rocha antes da simulação, b) modelo da rocha após a simulação.



a)

b)

Porosidade Total (%)= 6,15	Número de elementos=2353431
Porosidade Aberta (%)= 5,13	Número de nós = 524475
Porosidade Fechada (%)= 1,02	Módulo de Young da rocha (GPa) = 84,93

Figura 4-44. Visualização 3D do TRR-3: a) modelo semitransparente da rocha antes da simulação, b) modelo da rocha após a simulação.

Tabela 4.13. Porcentagens de porosidade e módulo de Young para sub-amostras do travertino Romano.

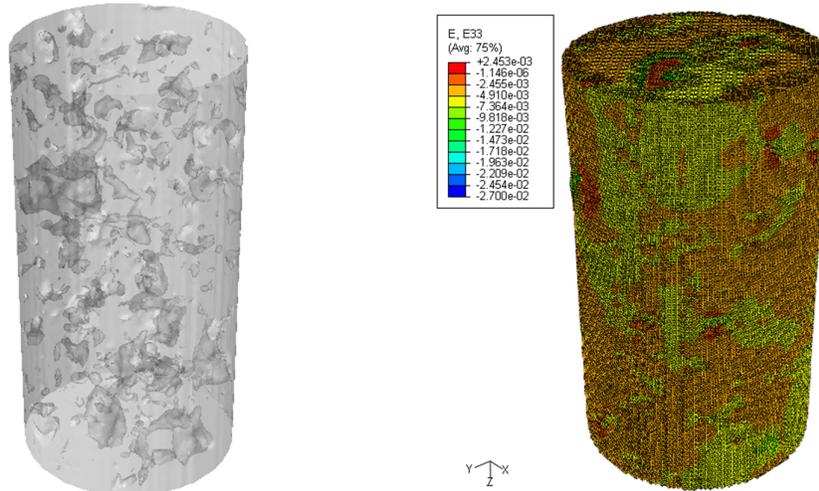
Travertino	Sub-amostra Cilíndrica	ϕ Total (%)	ϕ_c/ϕ_T (%)	ϕ_{NC}/ϕ_T (%)	E (GPa)	ϕ_{inter} (%)	ϕ_{vug} (%)
Travertino Romano	TRR-1	5,6	82	18	84,79	77	23
	TRR-2	5,2	81	19	81,84	79	21
	TRR-3	6,1	83	17	84,93	82	18

Analisando os valores obtidos a partir das sub-amostras dos travertinos Turcos, na Figura 4-40, pode-se observar que as variações do módulo foram menos expressivas. Novamente, a maior variação do módulo foi apresentada não pela amostra mais porosa. A maior diferença é fornecida pela sub-amostra TRT-3, a qual apresenta uma porcentagem de poros não conectados maior que o resto das sub-amostras (72%) e a maior porcentagem de porosidade intergranular (86%), conforme apresentado na Tabela 4.14 fato que, pode indicar uma maior influência da porosidade intergranular e da porosidade não conectada na resposta elástica da rocha. Isto concorda com García Del Cura et al., (2012), no estudo realizado para a caracterização mecânica de travertinos e tufas, no qual foi concluído que poros “vuggy” têm pouca influência sobre parâmetros como a absorção de água capilar e o módulo de elasticidade ou propagação de ondas de ultra-som, enquanto que a microporosidade é um fator determinante.

Tabela 4.14. Porcentagens de porosidade e módulo de Young para sub-amostras do travertino Turco.

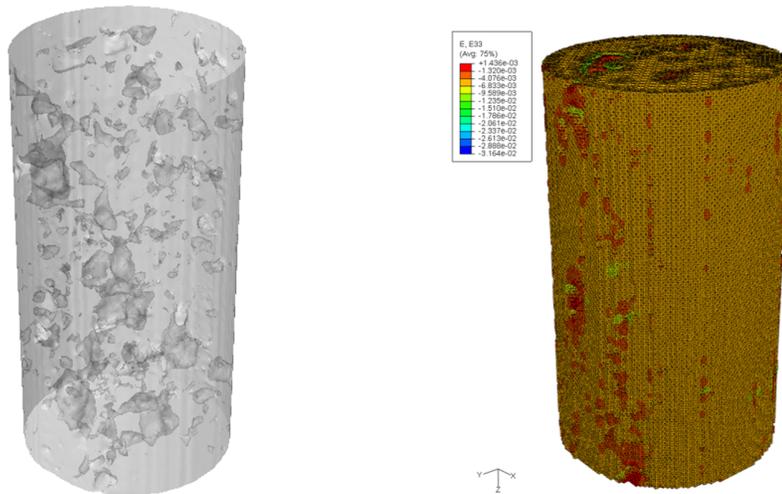
Travertino	Sub-amostra Cilíndrica	ϕ Total (%)	ϕ_c/ϕ_T (%)	ϕ_{NC}/ϕ_T (%)	E (GPa)	ϕ_{inter} (%)	ϕ_{vug} (%)
Travertino Turco	TRT-1	3,0	58	42	85,02	79	21
	TRT-2	2,5	49	51	85,03	81	19
	TRT-3	1,4	28	72	84,84	86	14
	TRT-4	1,3	36	64	84,96	79	21
	TRT-5	1,1	53	47	84,85	83	17

A acomodação do sistema poroso e sua resposta elástica, das Figura 4-45 a Figura 4-49, indicam a influência dos poros na resposta mecânica do material. Para a sub-amostra do travertino Turco, pode-se observar que no caso do TRT-3, uma quantidade de porosidade intergranular, se concentra próximo das superfícies do cilindro, nos quais é apresentada uma grande concentração de deformação.



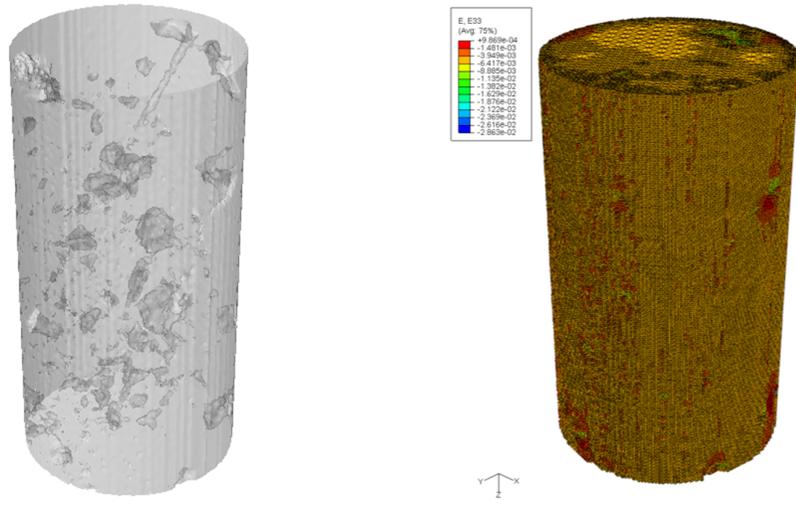
a)	b)
Porosidade Total (%)= 3,04	Número de elementos= 1906395
Porosidade Aberta (%)= 1,76	Número de nós = 409357
Porosidade Fechada (%)= 1,30	Módulo de Young da rocha (GPa) = 85,02

Figura 4-45. Visualização 3D do TRT-1: a) modelo semitransparente da rocha antes da simulação, b) modelo da rocha após a simulação.



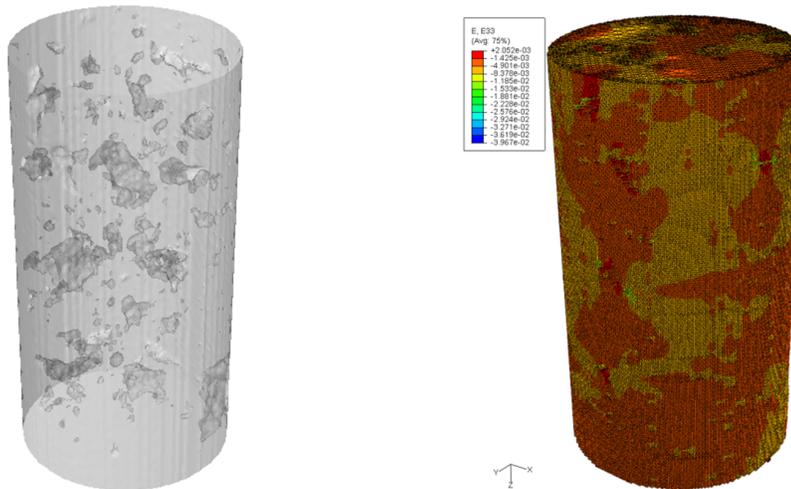
a)	b)
Porosidade Total (%)= 2,52	Número de elementos= 1870717
Porosidade Aberta (%)= 1,23	Número de nós = 399743
Porosidade Fechada (%)= 1,30	Módulo de Young da rocha (GPa) = 85,03

Figura 4-46. Visualização 3D do TRT-2: a) modelo semitransparente da rocha antes da simulação, b) modelo da rocha após a simulação.



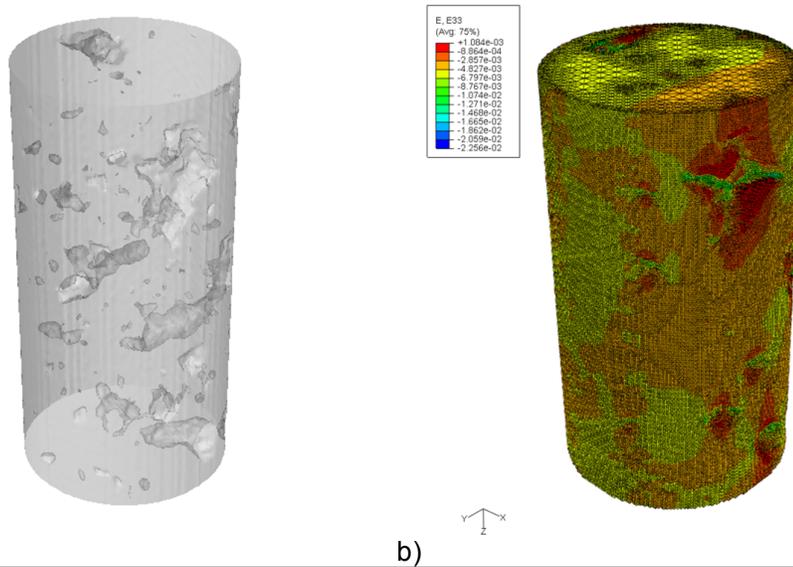
a)	b)
Porosidade Total (%)= 1,366	Número de elementos= 3332407
Porosidade Aberta (%)= 0,376	Número de nós = 705692
Porosidade Fechada (%)= 0,990	Módulo de Young da rocha (GPa) = 84,84

Figura 4-47. Visualização 3D do TRT-3: a) modelo semitransparente da rocha antes da simulação, b) modelo da rocha após a simulação.



a)	b)
Porosidade Total (%)= 1,27	Número de elementos= 3167301
Porosidade Aberta (%)= 0,46	Número de nós = 678342
Porosidade Fechada (%)= 0,81	Módulo de Young da rocha (GPa) = 84,96

Figura 4-48. Visualização 3D do TRT-4: a) modelo semitransparente da rocha antes da simulação, b) modelo da rocha após a simulação.



a)	b)
Porosidade Total (%)=1,09	Número de elementos= 2341507
Porosidade Aberta (%)= 0,58	Número de nós = 510926
Porosidade Fechada (%)= 0,51	Módulo de Young da rocha (GPa) = 84,85

Figura 4-49. Visualização 3D do TRT-5: a) modelo semitransparente da rocha antes da simulação, b) modelo da rocha após a simulação.

É importante ter em mente que publicações sobre simulação numérica de propriedades elásticas a partir de microtomografia computadorizada de rochas carbonáticas são escassas e sobre a influência da microestrutura nas propriedades mecânicas (módulo de Young) são nulas. Além disso, detalhes técnicos, não são descritos nas publicações existentes.

Foi então, realizada uma comparação dos módulos de Young obtidos das simulações com dados experimentais, Tabela 4.15.

Tabela 4.15. Avaliação de resultados: Comparativo dados obtidos por método de elementos finitos com dados de métodos experimentais e literatura.

Módulos de Young (GPa)				
Travertino	Sub-amostra Cilíndrica	Porosidade Total (%)	Método de elementos Finitos	Métodos experimentais e literatura
De Itaboraí	TRI-1	0	85,06	13,83 - 68,46 a
	TRR-1	5,64	84,79	
Romano	TRR-2	5,202	81,84	8,78 - 80 b, c, d; 10 – 160 e
	TRR-3	6,096	84,93	
	TRT-1	3,013	85,02	
Turco	TRT-2	2,507	85,03	
	TRT-3	1,362	84,84	
	TRT-4	1,262	84,96	
	TRT-5	1,084	84,85	

a: Pilotto, (2011); b: Yagiz, (2006); c: Benavente, et al., (2009); d: Martínez Martínez, (2008); e: García Del Cura, et al., (2012)

Como foi descrito anteriormente para o travertino de Itaboraí, foi encontrada uma discrepância em relação aos módulos do meio rochoso que é provavelmente devido à resolução das imagens, uma vez que dificulta a separação dos grãos do cimento. As pequenas fissuras e poros podem estar sendo negligenciadas e podem não estar sendo resolvidas pelas imagens o que tem um efeito sobre a simulação das propriedades elásticas. Observações parecidas foram encontradas por Arns, et al., (2002). Salvo tais considerações, os resultados das simulações podem ser considerados para fornecer um limite superior.

Para as sub-amostras dos travertinos Turcos e Romanos, os valores encontrados foram comparados com faixas de valores encontrados a partir de ensaios estáticos, como os encontrados por Yagiz, (2009), Benavente, et al., (2009) e Martínez Martínez, (2008) e os encontrados por García Del Cura, et al., (2012) por meio de ultra-som. É possível observar que os dados estimados por simulação numérica se encontram acima da primeira faixa de valores da Tabela 4.15, (8-80 GPa), no entanto, permanecem dentro da faixa de variação do módulo de Young encontrada por meio de ultra-som, (10-160 GPa).

É importante ter em mente que existem muitas razões para a discrepância, dos módulos encontrados na literatura e os simulados, as quais podem explicar algumas limitações do método. Uma delas é a representatividade geométrica das sub-amostras, comparadas com o maciço a escala macro, especialmente em rochas altamente heterogêneas. Limitações relacionadas às imagens de entrada, devido principalmente à resolução e qualidade da microtomografia que limita o reconhecimento completo das características microestruturais, especialmente a mineralogia complexa que implica a fase sólida da rocha e a interação entre os contatos, é dizer, entre cimento-grão e grão-grão. O anteriormente dito é reiterado por autores como Shulakova, et al., (2013) que explicam como os módulos elásticos são fortemente afetados pela porosidade e por contatos de grãos e microfissuras. Tais microfissuras reduzem os módulos elásticos dramaticamente a baixas tensões (por exemplo, Shapiro, 2003; Macbeth 2004; Liu, Rutqvist e Berryman 2006; Angus et al 2009) apud Shulakova, et al., (2013). No entanto, as microfissuras são muito finas e têm proporções muito pequenas, para serem detectadas por microtomografia de raios-X e, por conseguinte, não são contabilizados em simulações numéricas.

Parte dos contatos ou microfissuras geralmente se confundem com vazios ou em alguns casos como manchas nas imagens que podem ou não ser levados em consideração.

Por enquanto as microtomografias ainda não conseguem diferenciar estes contatos que têm características específicas em escalas nano. Além disso, se o problema da resolução fosse resolvido, as abordagens numéricas baseadas na teoria elástica-linear não seriam as aplicáveis por não levar em conta o efeito desses contatos.

Finalmente na Tabela 4.16 são apresentados os tempos computacionais consumidos na simulação para cada sub-amostra. De forma geral, são relativamente curtos, considerando o numero de nós de cada modelo. Este fato é devido à utilização de tecnologia como a computação paralela, que se torna necessária para a manipulação e estudo de rochas com topologias tão complexas a partir de imagens digitais provenientes de microtomografia.

Tabela 4.16. Tempo requerido para a simulação numérica das sub-amostras dos três tipos de travertinos com manipulação de resolução.

TR	“Resample”	NE	NN	t para geração	t para simulação
TRI-1	0	4495507	1103621	7min	40 min
TRR-1	20	2279320	502017	43s	15 min
TRR-2	20	2318286	509284	1 min	12 min
TRR-3	20	2353431	524475	45s	15 min
TRT-1	20	1906395	409357	55s	11 min
TRT-2	20	1870717	399743	39s	10 min
TRT-3	50	1926098	423757	1min	10 min
TRT-4	50	2167301	678342	1min	14 min
TRT-5	50	2141507	510926	55s	13 min