

3 Materiais e métodos

3.1. Métodos

O trabalho apresentado nesta dissertação tem como foco caracterizar propriedades das rochas carbonáticas a partir principalmente de dados digitais. Para tanto, as metodologias serão apresentadas em detalhe neste capítulo.

O intuito deste trabalho é entender como as propriedades estruturais e microestruturais das rochas carbonáticas influenciam as propriedades elásticas e como estas podem ser obtidas por meio de dados de imagens digitalizadas. A Figura 3-1 apresenta o fluxograma da metodologia implementada em seis etapas. Apresentam-se junto a cada etapa os “softwares” comerciais usados neste trabalho. Cabe salientar que na Figura 3-1 as duas primeiras etapas, em cor cinza, foram desenvolvidas no trabalho prévio realizado por Pilotto, (2011), sendo, portanto, dados de entrada para as etapas desenvolvidas na presente pesquisa, destacados pelo retângulo azul. Este fluxo de trabalho pode ser seguido e é válido não só para rochas carbonáticas, mas para qualquer material cujo interesse seja avaliar a influência de sua estrutura.

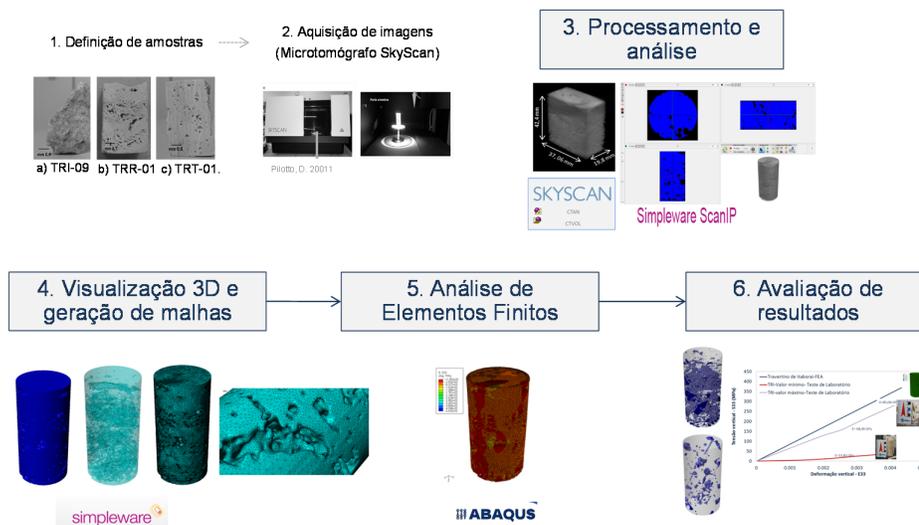


Figura 3-1. Metodologia geral desenvolvida.

3.2. Definição de amostras

Devido à dificuldade em se obter testemunhos de rochas carbonáticas do Pré-sal optou-se pelo estudo de rochas carbonáticas, análogas às rochas reservatório as quais foram analisadas por Pilotto, (2011). Por conseguinte três tipos particulares de travertino, o travertino de Itaboraí da Bacia de São José de Itaboraí, no Parque Paleontológico de Itaboraí, no Brasil, o travertino Romano da região de Toscana e Lácio na Roma e travertino Turco da Cidade de Antalya na Turquia, são o objeto de estudo nesta dissertação.

Deve-se ter em conta que os travertinos podem representar de maneira adequada às rochas carbonáticas reservatório por apresentar características texturais como forma dos poros, tamanho, agentes formadores, composição mineralógica. No entanto, em termos de sua gênese os travertinos têm uma origem mais química e as rochas carbonáticas reservatório tem uma origem orgânica.

Nas Figura 3-2-3.4, são apresentadas as amostras dos três travertinos coletadas e nomeadas por (Pilotto, 2011) pelas siglas TR (Travertino), TRI (Travertino de Itaboraí), TRT (Travertino Turco), TRR (travertino Romano).

Os travertinos Romanos e Turcos correspondem a amostras com geometria de lâminas, uma vez que este tipo de rocha é trazido ao Brasil já fracionado em placas de espessura de 2 a 3 cm.

3.2.1. Estudos preliminares

A caracterização geológica e parte da geomecânica destes travertinos foram estudadas por meio de análises e descrições estruturais, químicas e mineralógicas, de porosidade e distribuição de tamanho de poro, além das análises da microestrutura por meio de análises de imagem digital de amostras microtomografadas e de lâminas petrográficas. Detalhes da metodologia seguida para tais análises podem ser encontradas no trabalho de Pilotto, (2011).

A seguir, apresenta-se um breve resumo dos principais resultados de caracterização encontrados no trabalho citado anteriormente para os três tipos de travertinos.

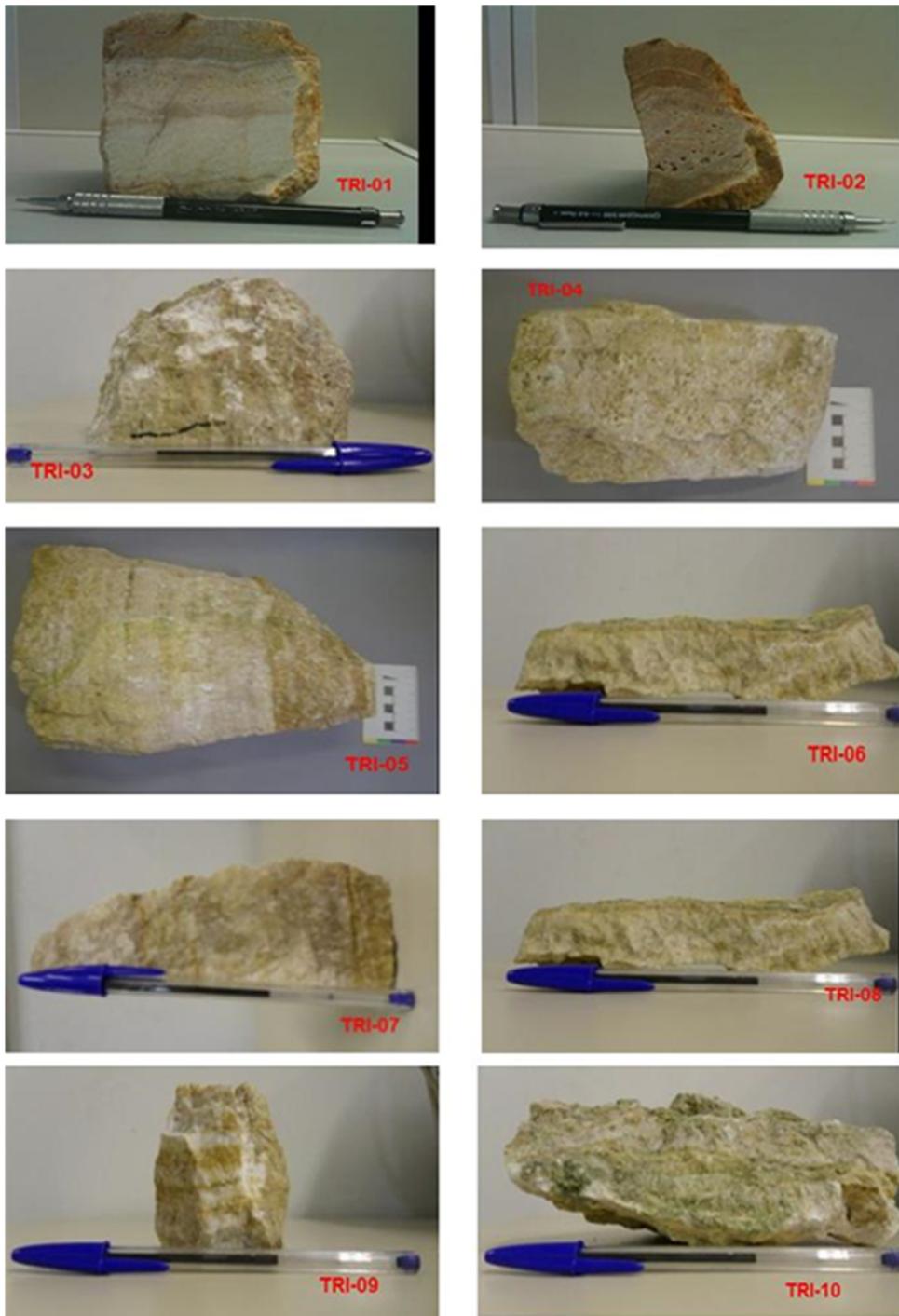


Figura 3-2. Amostras coletadas de travertino da bacia de Itaboraí. (Fonte: Pilotto, 2011)

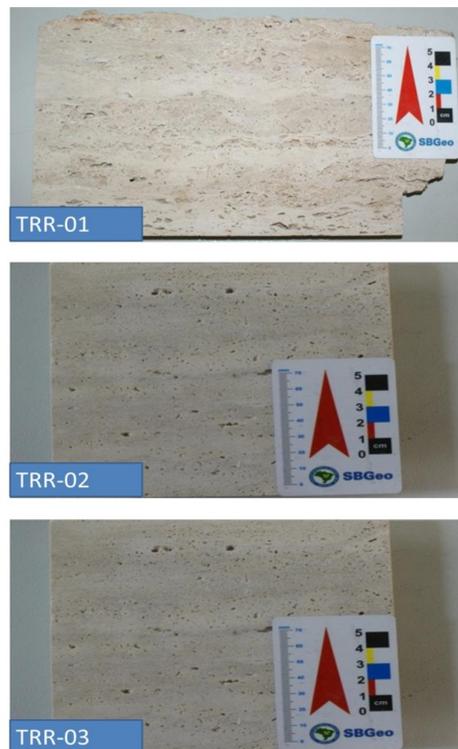


Figura 3-3. Placas de travertino Romano. (Fonte: Pilotto, 2011).

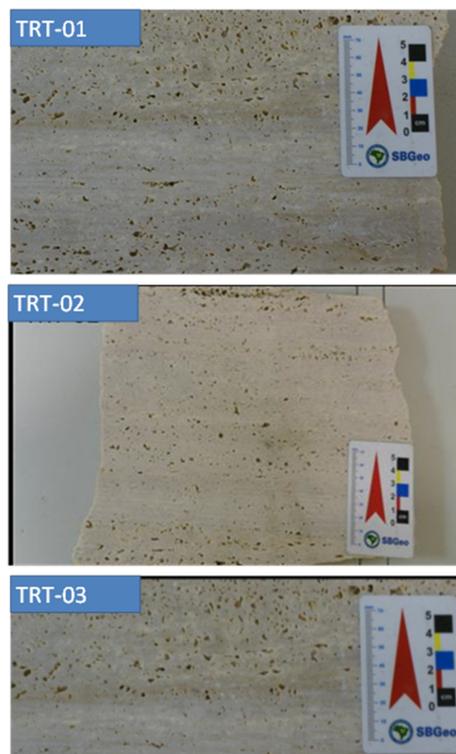


Figura 3-4. Placas de travertino Turco. (Fonte: Pilotto, 2011).

a) Travertinos de Itaboraí

De acordo com as análises químicas e mineralógicas feitas pelo método de espectrometria por fluorescência de raios-X as três amostras de travertinos de Itaboraí apresentam uma alta concentração de CaO (Cal viva) entre 45 a 55 %, indicando a presença de calcita nas amostras. Estes travertinos foram classificados como calcário calcítico com base na relação MgO/CaO. Estas amostras apresentaram os mesmos componentes químicos, indicativo que a rocha fonte dos elementos químicos é a mesma para as três amostras. Os ensaios de ataque sulfúrico indicaram uma quantidade de sílica considerável, entre 0,3 a 0,6 %. No entanto, as três amostras pertencentes ao um mesmo bloco apresentam diferenças de concentração dos elementos químicos e isso poderia refletir na resposta mecânica das três amostras.

Nas análises de lâminas petrográficas, através de microscopia óptica para o reconhecimento de minerais, análises de textura, porosidade e feições diagenéticas, foi encontrada ocorrência de calcita, calcita microcristalina e calcita espática. Já nas análises de lâminas petrográficas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram detectados cristais de quartzo, material silicoso, preenchendo alguns poros, matéria orgânica preenchendo poros ou aderida à calcita e poros que variam de 8 μm a 1,4 mm.

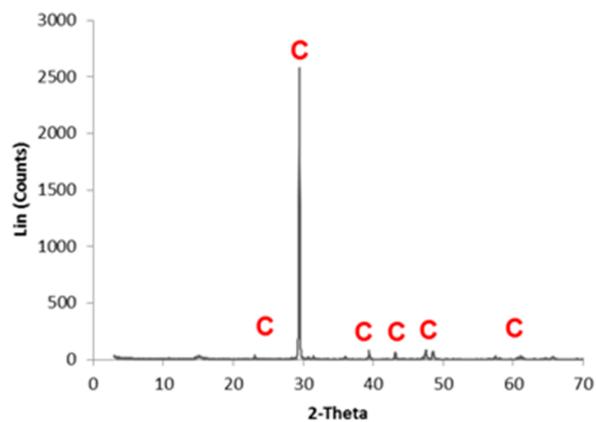
As análises de difração de raios-X para os travertinos de Itaboraí corroboram a presença de quartzo e calcita nas amostras TRI-03 e 09. Na amostra TRI-01 o quartzo foi inexistente, conforme pode ser observado na Figura 3-5.

Segundo a análise textural podem-se perceber duas texturas diferentes, uma textura alinhada que apresenta uma granulometria maior e outra na qual os minerais estão dispersos com granulometrias menores. As texturas reconhecidas foram às texturas microcristalina e as texturas fibrosas. As estruturas encontradas foram: laminada e maciça. Salienta-se a inexistência de matéria orgânica livre.

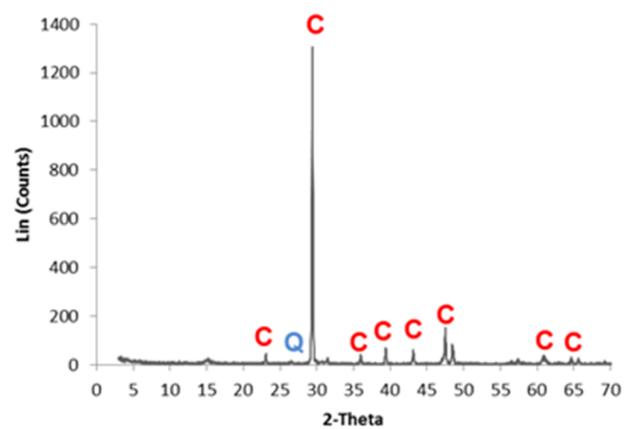
Em relação aos índices físicos, os travertinos de Itaboraí apresentam massa específica seca, saturada, densidade esquelética aparente e porosidades aparentes variando entre 2,42 a 2,63 mg/m^3 , 2,50 a 2,64 mg/m^3 , 2,62 a 2,68 mg/m^3 e 1,74 a 4,20 %, respectivamente.

Poros intercristalinos, vulgares, fenestrais, móldicos, shelter e fratura foram encontrados no travertino de Itaboraí mediante a análise de porosidade através da captura e processamento de imagens. Por esta técnica foi observado que os travertinos de Itaboraí apresentam uma porosidade baixa, de 0 a 1,76%.

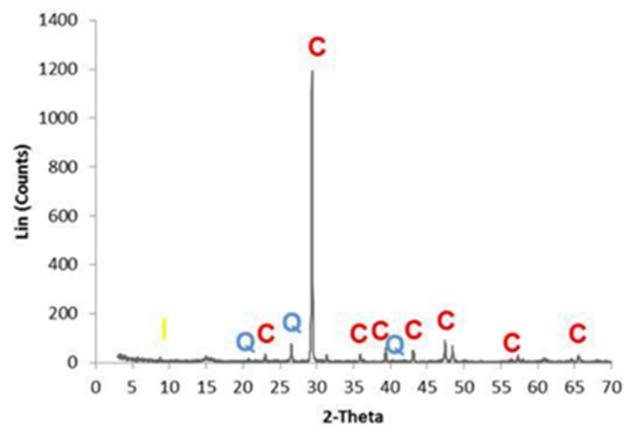
Considerando a microporosidade, os valores da porosidade variaram entre 0,02 a 2,3%, com um valor médio de 0,6%.



a)



b)



c)

Figura 3-5. Difração de raios-X, Travertino de Itaboraí: a) TRI-01, b) TRI-03, c) TRI-09. (Fonte: Pilotto, 2011)

Segundo as análises de porosidade por intrusão de mercúrio, a porosidade efetiva varia entre 0,68 e 4,07 % com diâmetros de poro médio entre 10,91 e 32,48 μm . É importante observar que resultados de porosimetria a gás foram muito maiores (5,3 e 10,6 %) e segundo Pilotto, (2011), acredita-se que o travertino de Itaboraí não tenha um alto valor de volume de poros, mas que os valores de porosidade determinados por porosimetria a gás sejam decorrentes de fissuramento interno devido a processos intempéreos.

As análises de porosidade 3D por análise das imagens digitais provenientes de microtomografia revelaram uma porosidade total de 0,24 %, a porosidade conectada ou aberta de 0,16 % e porosidade não conectada ou fechada de 0,08%, confirmando a baixa porosidade destas amostras, observando que apresentaram uma maior quantidade de poros conectados do que de poros não conectados. O diâmetro dos poros também foi estudado nesta análise encontrando uma maior concentração do diâmetro de poros entre 50 a 250 μm .

Ensaio de compressão simples foram realizados em seis corpos de prova dos blocos de travertino de Itaboraí. É importante esclarecer que os corpos de prova usados para estes ensaios são pertencentes às amostras TRI-04 e TRI-05 que não foram microtomografadas.

Resultados da resistência à compressão simples (UCS), módulo de Young axial, coeficiente de Poisson e deformação máxima axial, são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Resultados dos ensaios de compressão simples nos corpos de prova de travertino de Itaboraí. (Fonte: Pilotto, 2011)

Corpos de prova	UCS (MPa)	Módulo de Young (E) (GPa)	Coefficiente de Poisson (ν)	Deformação axial máxima (ϵ_{ax}) (%)
TRI-04 (01)	56,39	13,83	0,06	0,46
TRI-04 (02)	55,03	15,67	0,16	0,51
TRI-05 (01)	39,86	62,93	0,35	0,067
TRI-05 (02)	27,2	39,83	0,25	0,074
TRI-05 (03)	40,69	68,46	0,37	0,068
TRI-05 (04)	43,29	42,62	0,19	0,094

As diferenças nos parâmetros medidos e expostos na Tabela 3.1 para os corpos de prova TRI-04 e TRI-05 são possivelmente devidas às diferenças de forma de grãos, contatos entre eles, texturas e porosidade.

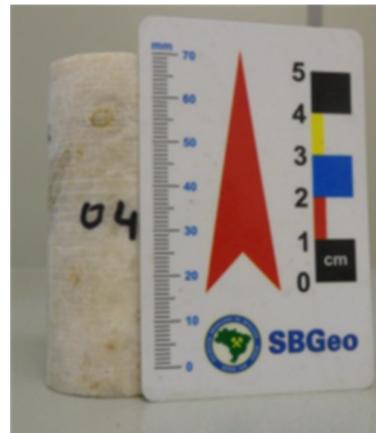
Cabe ressaltar que o TRI-04 é mais poroso e pelos resultados obtidos nos ensaios de porosidade, densidade aparente seca e saturada, velocidade de

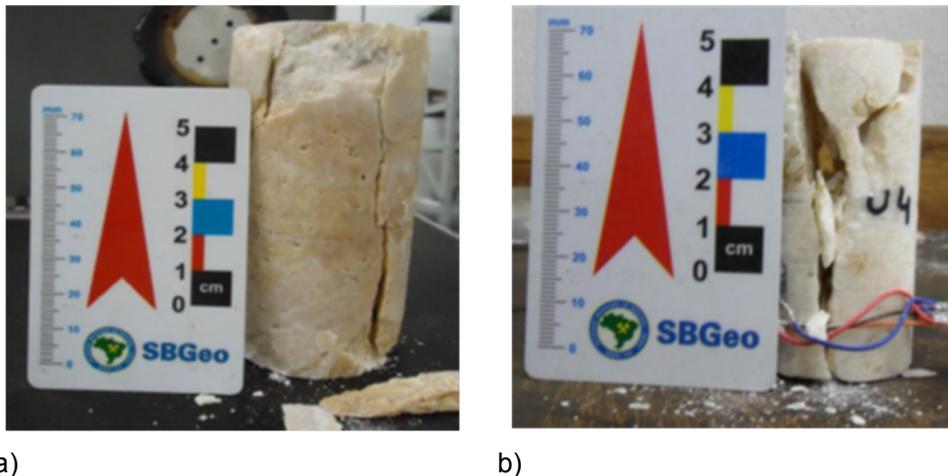
ondas ultrassônicas, esperava-se valores mais elevados da resistência à compressão simples (UCS) nos corpos de prova obtidos do bloco TRI-05, porém os dados da Tabela 3.1 revelaram um comportamento completamente diferente ao esperado.

A Figura 3-6, apresenta os corpos de prova antes e depois do ensaio. Na Figura 3-7 observa-se o tipo de grãos e contatos do corpo de prova TRI-05.

Os resultados anteriormente discutidos corroboram uma vez mais a alta complexidade das rochas carbonáticas e como elas não seguem a tendência geral de resposta das propriedades elásticas e mecânicas da maioria das rochas sedimentares, nas quais relações e comportamentos padrões a partir de propriedades índices como a densidade e a porosidade podem ser estabelecidos. Para este tipo de rochas não é possível afirmar que, por exemplo, se obterá uma resistência baixa, se a rocha apresenta uma baixa densidade, alta porosidade e, por conseguinte baixos valores de velocidades acústicas, uma vez que parâmetros característicos destas rochas como micro fraturas, microporosidade, arranjo do sistema poroso, alta heterogeneidade, tipo de contato entre grãos, texturas, influenciam significativamente resposta as propriedades mecânicas sim marcar um padrão específico.

Os valores de resistência a compressão variam entre 42 e 76 MPa aproximadamente.





a)

b)

Figura 3-6. Corpos de prova antes e depois do ensaio: (a) TRI-04 e (b) TRI-05 (04). (Adaptado de: Pilotto, 2011)



Figura 3-7. Contato entre os grãos da amostra TRI-05. (Fonte: Pilotto, 2011).

b) Travertinos Romanos e Turcos

As amostras de travertino Romano e Turco, uma de cada um, apresentaram também altas concentrações de CaO (55,4%) indicando a presença de calcita e são classificados como calcário calcítico pela relação de MgO/CaO como o travertino de Itaboraí. No entanto, o travertino Romano apresenta SO₃ que pode ser indicativo de ação hidrotermal no processo de formação.

A ocorrência de calcita espática equidimensional ao redor dos poros e calcita microcristalina, também conhecida como micrita, além da presença de cimento em forma de lamelas de fibras vegetais e alguns grumos de calcita que indicam influência de bactérias.

A influência de bactérias foi detectada nas análises de lâminas petrográficas através de microscopia óptica para o travertino Romano. Os resultados desta análise são mostrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Resultados dos constituintes presentes nas lâminas petrográficas de travertinos romanos. (Adaptado de: Pilotto, 2011).

Lamina Petrográfica	Matriz (%) (Calcita microcristalina)	Cimento (%) (Calcita espática)	Poros (%)
TRR-01a	63	31,2	5,8
TRR-01b	51,66	43,63	4,71
TRR-01c	45,24	48,16	6,6
TRR-01d	62,05	24,89	13,06
Média	55,49	36,97	7,54

O travertino Turco apresenta características similares, no entanto foi encontrada uma maior porcentagem de cimento como pode ser observado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Resultados dos constituintes presentes nas lâminas petrográficas de travertinos turcos. (Adaptado de: Pilotto, 2011).

Lamina Petrográfica	Matriz (%) (Calcita microcristalina)	Cimento (%) (Calcita espática)	Poros (%)
TRT-01a	42,46	57,26	0,27
TRT-01b	15,63	84,24	0,13
TRT-01c	8,12	91,74	0,14
TRT-02a	10,60	89,34	0,007
TRT-03a	26,95	73,04	0,005
Média	20,75	79,13	0,12

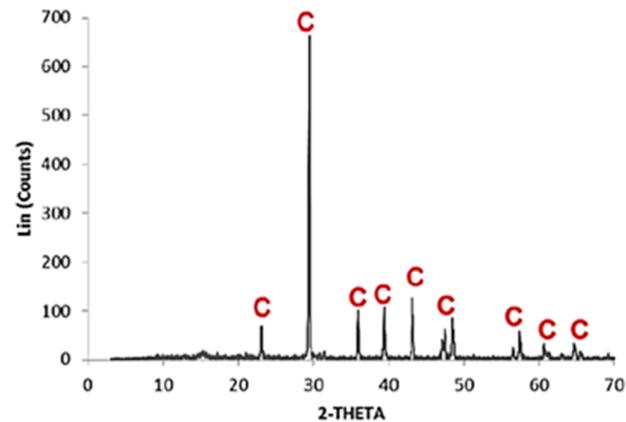
Nas análises de lâminas petrográficas do travertino Romano através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), foram observados cristais de calcita sob a forma subhédricas principalmente ao redor dos poros, com granulometria grosseira a fina, presença de matéria orgânica preenchendo poros ou aderida aos cristais de calcita e poros que variam de 20 μ m a 2,12 mm.

Os travertinos turcos apresentaram cristais de calcita com granulometria mais grosseira ao redor dos poros, e calcita, com granulometria mais fina disseminado na lâmina e no interior de alguns poros e poros que variam de 12 μ m a 3,0 mm.

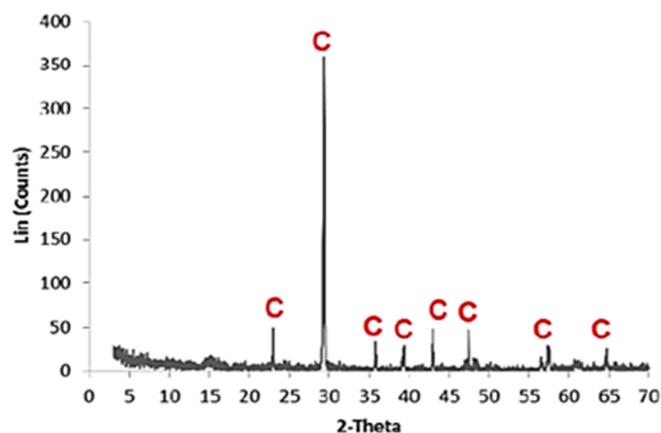
As análises de difração de raios-X para os travertinos romanos e turcos indicam presença apenas de calcita como pode ser observado na Figura 3-8.

Para o travertino Romano, a análises textural revelou a inexistência de matéria orgânica livre, presença de estruturas laminadas com intercalações de bandas mais porosas com bandas mais maciças e textura microcristalina. As texturas granulares finas e microcristalinas foram observadas na análise textural

dos travertinos Turcos, com a maioria dos poros envoltos por cristais de calcita que apresentam uma maior granulometria como característica particular.



a)



b)

Figura 3-8. Difração de raios-X: a) Travertino Romano TRR-01 e b) Travertino Turco TRT-01. (Fonte: Pilotto, 2011).

Em relação aos índices físicos, os travertinos romanos e turcos apresentam massas específicas secas, saturadas, densidade esquelética aparente e porosidade aparente variando entre os valores apresentados na Tabela 3.4

Poros inter cristalinos, intracristalinos, vulgares e fenestrales foram encontrados tanto nos travertinos romanos como turcos mediante a análise de porosidade através da captura e processamento de imagens. Por este método também foram estimadas porosidades entre 2,61 a 12,3 % com um valor médio de 5,99%, apresentado assim, valores de porosidade mais elevados que os travertinos de Itaboraí. Para o travertino turco os valores calculados entre 0,01 a

0,27%, com um valor médio de 0,12% apresentaram uma subestimação da porosidade porque muitos poros nas lâminas não foram preenchidos pelo corante azul de metileno e alguns outros estavam preenchidos parcialmente por matéria orgânica ou por cristais de calcita com uma granulometria mais grosseira.

Tabela 3.4. Faixa de variação de propriedades índice para TRR e TRT. (Fonte: Pilotto, 2011).

Travertino	Massa específica aparente seca (mg/m ³)	Massa específica aparente saturada (mg/m ³)	Densidade esquelética aparente (mg/m ³)	Porosidade Aparente (%)
TRR	2,24 -2,38	2,36 – 2,46	2,59 -2,60	8,08 -12,27
TRT	2,46 – 2,53	2,52 - 2,57	2,60-2,65	4,40 - 6,05

Cabe destacar que nos três travertinos é observada uma variação considerável de porosidade entre lâminas o qual indica a heterogeneidade destas rochas.

Segundo as análises de porosidade por intrusão de mercúrio, a porosidade efetiva para os travertinos romanos e turcos varia entre 5,45 a 6,06 % e 2,99 a 5,28 % com diâmetros de poros médio entre 33,32 a 79,23 μm e 38,12 a 50,01 μm respectivamente.

Das análises de porosidade 3D mediante análises de imagens digitais provenientes de microtomografia foram obtidas a porosidade total, a porosidade conectada ou aberta e a porosidade não conectada ou fechada, tanto para o travertino romano como para o turco, como pode ser observado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5. Resultados da análise da porosidade realizada nos modelos 3-D gerados a partir das imagens de microtomografia. (Fonte: Pilotto, 2011).

Amostra	Porosidade Total (%)	Porosidade aberta (%)	Porosidade fechada (%)
TRR-01	6,49	5,38	1,11
TRT-01	4,26	2,33	1,93

A maior concentração de diâmetros de poro para os dois tipos de travertino foi encontrada na faixa de 0 a 50 μm , faixa menor que para o travertino de Itaboraí.

As análises de porosidade desses travertinos indicam a presença de micro e macroporosidade especialmente pela diferença encontrada nos resultados de

ensaios de laboratório tais como injeção de mercúrio, injeção de gás e as análises de lâminas e de imagens digitais.

Não foi possível confeccionar corpos de prova para a realização de ensaios de compressão simples nos travertinos romanos e turcos pelo fato destes materiais se apresentarem forma de placas. No entanto, ensaios esclerométricos realizados apresentam uma estimativa dos valores de UCS, conforme apresentado na Tabela 3.6.

Cabe ressaltar, após deste estudo preliminar, que as amostras selecionadas dos três travertinos para posteriormente serem microtomografadas, correspondem às amostras TRI-09, TRR-01 e TRT-01 que podem ser observadas na Figura 3-9.

Tabela 3.6. Resultados dos ensaios de esclerometria para travertinos Romano e Turco. (Fonte: Pilotto, 2011)

Amostra	Índice esclerométrico médio	UCS estimado (Mpa)
TRR-01	25	32,05
TRT-02	25	36,49
TRT-03	32	52,51

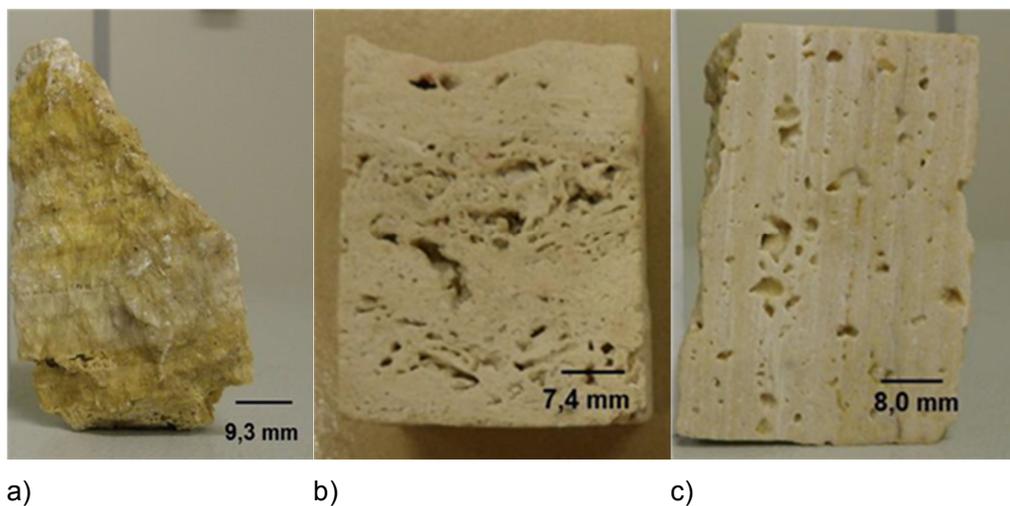


Figura 3-9. Amostras de travertinos: a) TRI-09, b) TRR-01, c) TRT-01. (Adaptado de: Pilotto, 2011)

3.3. Aquisição de imagens

As imagens utilizadas nesta pesquisa correspondem a imagens de três amostras de travertinos (TRI-09, TRR-01 e TRT-01) capturadas no microtomógrafo da marca SkyScan, modelo 1173, (Figura 3-10), no Laboratório

de Geologia Sedimentar (Lagesed) do Instituto de Geociências da UFRJ, durante a dissertação de mestrado realizada por Pilotto, (2011).

A tensão utilizada na aquisição das imagens foi de 80 kV, com uma corrente de 100 μ A. O microtomógrafo possui um tubo de raios-X com uma potencia de 8W. A Tabela 3.7 apresenta os parâmetros utilizados no microtomógrafo para as amostras.

O resultado são pilhas de imagens bidimensionais. Na Tabela 3.8 são apresentadas as informações do número de imagens bidimensionais e sua equivalência em GBytes, para as três amostras dos travertinos microtomografadas.

Tabela 3.7. Parâmetros utilizados no microtomógrafo para as amostras analisadas. (Fonte: Pilotto, 2011)

Amostra	Tensão (KV)	Rotação Total (°)	Passo angular (°)	Resolução espacial (μ m)	Tempo de exposição para cada projeção (ms)	"Frames"	Tempo total de aquisição
TRI-09	80	0 a 180	0,5	33,84	800	5	32 min e 37 seg
TRR-01	80	0 a 180	0,5	26,08	800	5	32 min e 28 seg
TRT-01	80	0 a 180	0,5	26,08	800	5	32 min e 35 seg

Tabela 3.8. Características de imagens bidimensionais de microtomografia.

Amostra de Travertino	Número de imagens bidimensionais	Equivalência em GBytes
TRI-09	2057	9,62
TRR-01	1813	8,47
TRT-01	2383	11,1

Vale ressaltar que a resolução espacial das amostras (26 e 34 μ m) impediu a detecção de poros muito pequenos que se encontram entre a escala micro e perto da escala nano no microtomógrafo. A resolução espacial das imagens do microtomógrafo infelizmente encontra-se dentro de faixas de resolução baixa que não proporcionam um elevado contraste de fases ideal para ressaltar as características e identificar minerais, grãos e cimento nas amostras.

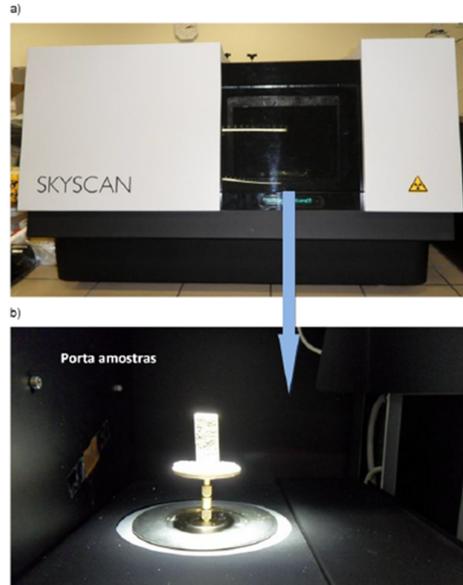


Figura 3-10. Microtomógrafo SkyScan 1173 utilizado no programa experimental: a) vista frontal do equipamento e b) porta amostras. (Fonte: Pilotto, 2011).

3.4. Processamento e análises

Para o desenvolvimento desta etapa decidiu-se seguir a sequência padrão do processamento de imagens, metodologia de PDI e ADI descrita na Figura 2-21 e estudada no capítulo 2.

Como passo prévio as etapas de pré-processamento, segmentação e análise e com objetivo de simular as propriedades elásticas decidiu-se analisar a geometria digital das amostras e extrair um volume de interesse (VOI), volumes cilíndricos, das amostras digitais de cada travertino a ser estudado. Este passo prévio, será nomeado de sub-amostragem digital de aqui para frente. Nesta ordem de ideias foi gerado o fluxograma da Figura 3-11.

Foram usadas as funcionalidades do pacote comercial SkyScan, especificamente o software CTAN. Ele permite que o usuário realize visualização 2D, filtragem de imagens, seleção de regiões de interesse (ROI) ou volumes (VOI), segmentação, processamento, aplicação de filtros morfológicos no pós-processamento, análise quantitativa e geração de modelos 3D para sua visualização em o programa CTvol.

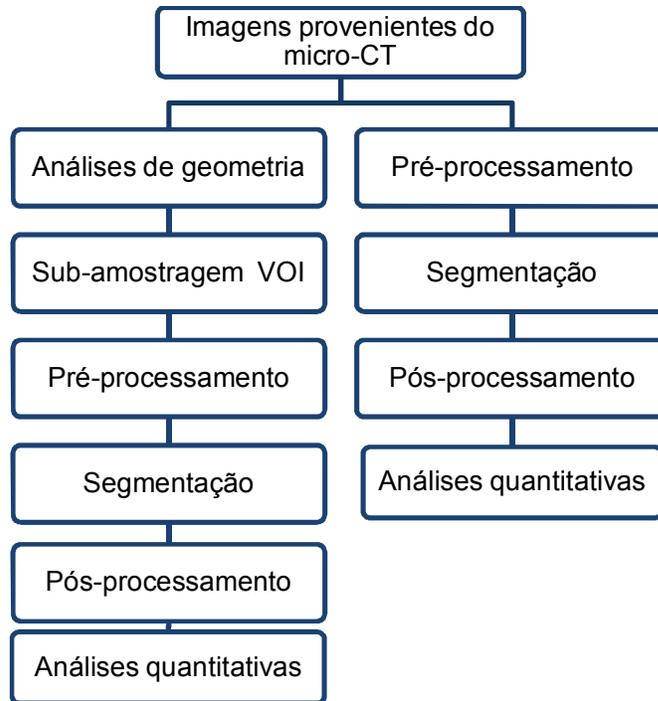


Figura 3-11. Metodologia para processamento e análises das imagens digitais dos travertinos microtomografados.

O processo foi conduzido nas dependências do Laboratório de Processamento Digital de Imagens (LPDI) do Departamento de Engenharia de Materiais da PUC-Rio. Utilizou-se um computador com processador Intel core i7 3930K CPU 3,20GHz (12 CPUs), memória RAM de 24 GB com um sistema operacional de 64 bits. É importante ressaltar aqui que a manipulação de imagens digitais de microtomografia requer equipamentos computacionais com características operacionais robustas.

Como pode ser apreciado na Figura 3-9 são amostras com geometrias irregulares, altura entre 40 a 70 mm com comprimento variando entre 30 mm a 40 mm e largura entre 10 mm a 19 mm aproximadamente.

Analisando cada uma das amostras decidiu-se extrair sub-amostras cilíndricas que cumprissem com relação diâmetro-altura (D/H) de acordo as normas ISRM 2007 visando que as simulações fossem realizadas com geometrias similares às utilizadas nos ensaios reais de compressão simples no laboratório.

Assim, dois grupos de sub-amostras cilíndricas foram extraídas com o intuito de analisar além das influências da microestrutura, a influência de escala nos resultados finais. Um primeiro grupo de sub-amostras maiores, considerando a máxima relação D/H permitida pela geometria original das amostras e um

segundo grupo com relações D/H menores em diferentes profundidades das amostras.

A sub - amostragem cilíndrica foi realizada no programa CTAN devido a o fato que este permite extrair regiões de interesse (ROI) em imagens 2D ou volumes de interesse (VOI) em 3D, com geometrias específicas (retangulares, circulares, quadrados, etc.) e salva-las num novo arquivo de menor tamanho desconsiderando o restante das imagens originais. Nesse novo arquivo, fatias são removidas para ajustar a dimensão de altura e obter a relação D/H desejada no volume cilíndrico 3D (VOI), para uma análise posterior.

Posteriormente, procedeu-se com os processos de PDI e DAI tanto para as amostras digitais completas como para as sub-amostras cilíndricas com o intuito de ter uma sensibilidade das propriedades da estrutura.

A etapa de processamento foi dividida em duas partes: uma de análises e uma segunda parte de geração de modelos em 3D. As partes mencionadas têm metodologias de tratamento diferentes com o objetivo principal de redução de tempo de operação das ferramentas computacionais.

A etapa de pré-processamento, ou como é comumente conhecida etapa de filtragem, consistiu na aplicação de processos de manipulação tais como brilho, contraste, iluminação e correção de defeitos ou ruídos de vários tipos gerados durante a aquisição das microtomografias que poderiam degradar a sua qualidade impedindo uma análise quantitativa confiável. Nesta etapa foram aplicados os algoritmos utilizados por Pilotto, (2011). Foi aplicado o filtro Kuwahara equivalente ao filtro sigma que faz correções de ruído mantendo os detalhes da imagem. Este filtro é usado na análise das imagens dos travertinos uma vez que ele permite uma boa redução de ruído e visualização de detalhes das amostras reais.

Como foi mencionado os dados provenientes das microtomografias se apresentam inicialmente como um conjunto de imagens 2D que posteriormente são empilhadas para formar o volume 3D e por tanto o processamento pode ser realizado já seja com base no “slice 2D” ou com base no volume 3D. No entanto, os cálculos com base neste último são muito mais demorados.

A etapa de segmentação de imagens visa em primeira instância separar ou identificar os “pixels ou voxels” que pertencem à fase sólida (grãos e diferentes minerais), os “pixels ou voxels” que correspondem à fase porosa e os que pertencem ao fundo da imagem.

Infelizmente, a resolução das imagens digitais dos travertinos, restringiu a identificação separadamente de cristais, grãos, cimento e componentes minerais

(calcita, quartzo e sílica) que apresentam absorção de raios-x muito semelhantes entre eles. Portanto, toma-se como hipótese que esses componentes não diferenciados formam uma única fase sólida. Assim, durante a segmentação são identificadas somente duas fases: sólida “rocha” e vazios “poros”.

Acredita-se, também que a presença de inclusões de poro e microfissuras de dimensões menores, por baixo da resolução de aquisição, podem ser responsáveis de manchas nas imagens que também dificultam a diferenciação de fases durante a segmentação. Por consequência é possível obter erro embutido nos resultados desta etapa.

A segmentação nas imagens bidimensionais dos travertinos foi realizada mediante técnicas de segmentação manual como a limiarização (thresholding), útil para os tons de cinza das microtomografias. Este algoritmo permite classificar os “pixels” com base na frequência de intensidade no histograma de tons de cinzas. Assim, pixels com intensidades menores a 50 (partes pretas) foram considerados poros e os pixels contíguos com intensidades entre 50 a 255 (partes cinza e brancas) foram considerados como fase sólida, é dizer, rocha. Esta segmentação 2D é interpolada e é possível reconstruir posteriormente o volume tridimensional a partir dela.

É importante ter presente que os valores limite da segmentação de fases com base no histograma são valores determinados por o analista, deste modo não são valores fixos.

Na etapa de pós-processamento, foram omitidas as operações morfológicas realizadas no trabalho antecedente de Pilotto, (2011), devido a que essas operações podem superestimar parâmetros como a porosidade segundo o comunicado pessoal da autora supracitada.

Finalmente, a etapa de análise quantitativa que visa obter parâmetros como a porosidade total, a porosidade aberta e fechada, assim como o número de objetos presentes, área total ocupada pelo objeto entre outras pode ser finalizada.

Parâmetros específicos utilizados do programa CTAN durante todo o processo são expostos no fluxograma da Figura 3-12.

Adicionalmente foram gerados os modelos 3D das duas fases, rocha e poros para as sub-amostras cilíndricas com o intuito de levar este modelos para o módulo de geração e visualização de malhas de elementos finitos do software comercial ScanIP da companhia Simpleware. Infelizmente os formatos de saída dos modelos de volumes 3D gerados pelo programa CTAN são incompatíveis com os arquivos de entrada do ScanIP, motivo pelo qual decidiu-se levar as

pilhas de imagens 2D cortadas das microtomografias, as “sub-amostras cilíndricas”, obtidas no CTan para ScanIP e realizar os processos de pré-processamento, segmentação, análise quantitativas e visualização 3D neste programa como etapas anteriores a geração de malhas mediante o módulo elementos finitos do mesmo pacote de Simpleware.

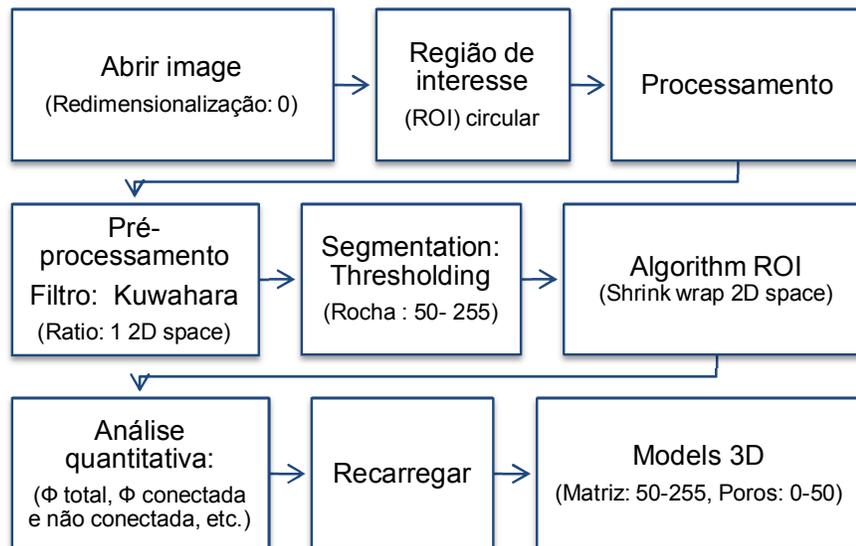


Figura 3-12. Parâmetros específicos utilizados do programa CTAN. Φ : Porosidade.

O programa ScanIP é um software comercial desenvolvido pela companhia Simpleware (<http://www.simpleware.com/>). O programa oferece uma ampla variedade de filtros e ferramentas de processamento de imagem para visualizar, medir dados e gerar modelos 3D a partir dados de micro-CT, nano-CT e microscopia. Este programa dispõe de um conjunto de instrumentos de medição para fornecer análises quantitativas que permitem o estudo das estruturas dos materiais. O programa ScanIP junto com o módulo elementos finitos, o qual será descrito em seções posteriores neste capítulo, foram adquiridos pelo Grupo de Tecnologia e Engenharia de Petróleo (GTEP) do Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro (PUC-Rio) e instalado num computador com um processador Intel core i7-2600 CPU 3,40 GHz, memória RAM de 8,0 GB e sistema operacional de 64 Bits.

Na etapa de pré-processamento, buscou-se suprimir os ruídos das imagens, foram testados especificamente três algoritmos de filtros dentro da gama disponível no programa. O filtro bilateral “Bilateral Filter”, o filtro médio “Mean filter” e o filtro Mediana “Median Filter”. A definição dos filtros supracitados e descritos abaixo pode ser encontrada em Simpleware Ltd., (2012)

O filtro bilateral “Bilateral Filter” realiza suavização usando tanto o domínio como uma faixa da vizinhança. Dois kernels Gaussianos são utilizados para suavizar a imagem. O resultado é uma imagem suavizada nas regiões homogêneas, preservando as bordas.

O filtro media “Mean Filter”, é comumente usado para redução de ruído. O filtro calcula o valor de cada “pixel” de saída, encontrando a média estatística da vizinhança do “pixel” de entrada correspondente. A média estatística da vizinhança é transmitida como a saída associada ao valor de pixel no centro da vizinhança.

O filtro Mediana “Median Filter” é comumente usado como uma abordagem robusta para redução de ruído. Este filtro é particularmente eficaz contra a presença de falsos níveis de cinza. O filtro mediana calcula o valor de cada pixel de saída como a mediana estatística da vizinhança dos valores em torno do pixel de entrada correspondente.

A função dos filtros é limpar ou reduzir ruído. No entanto, eles podem afetar as análises qualitativas e conseqüentemente o volume 3D que será usado para gerar a malha de elementos finitos. Optou-se fazer a comparação dos resultados das análises de porosidade determinadas no programa CTAN aplicando o filtro Kuwahara e cumprindo o processo de segmentação, com os resultados de porosidades encontradas utilizando os três algoritmos no ScanIP. Os resultados serão apresentados no capítulo seguinte.

No processo de segmentação das fases de interesse, (neste o caso duas fases, rochas e poros), foi utilizada a ferramenta de segmentação iterativa baseada na limiarização (Threshold). A aplicação desta ferramenta exige a criação de uma máscara para cada fase na qual o resultado do processo poderá ser visualizado. Similarmente ao processo de segmentação considerado no programa CTAN a rocha foi definida entre a faixa de 50 a 255 e os poros entre 0 a 50. A ferramenta de limiarização iterativa permite visualizar de forma ressaltada nas projeções 2D as regiões da imagem que se situam entre os limites definidos como pertencentes a fase que esteja sendo criada.

Para o caso da máscara que define a rocha, segundo Simpleware Ltd., (2012), uma propriedade particular na qual o algoritmo de limiar falha é a preservação de conectividade, ou seja, a seleção de pixel é baseada puramente em tons de cinza e não analisa as áreas ligadas o isoladas da imagem. Deste modo, é possível observar no volume 3D da rocha pequenos volumes, da mesma, isolados ou flutuantes que não estão conectados ao volume como um todo. Por tanto, é sugerido à utilização do algoritmo de crescimento de regiões

“FloodFill” após da limiarização. O resultado será uma nova máscara com os pixels dentro da limiarização que estejam conectados, desconsiderando partes isoladas ou flutuantes.

O programa ScanIP permite obter visualização 3D desde o momento em que as imagens do microtomógrafo são importadas ao programa “volume de renderização” sem ter que executar qualquer segmentação, permitindo a sua vez a visualização das máscaras de segmentação quando seja requerido. O programa permite então, obter diferentes visualizações tanto da superfície da rocha, como de sua estrutura interna como será apresentado no capítulo 4.

Finalizadas estas etapas, procedeu-se com as análises quantitativas, fornecidas pelas máscaras, poros e rocha, por meio da ferramenta de informações estatísticas.

Decidiu-se fazer uma análise comparativa dos valores de porosidade total calculados por cada programa (ScanIP e CTAN). Os resultados são apresentados e discutidos no próximo capítulo.

Parâmetros específicos utilizados do e no programa ScanIP durante o processo são expostos no fluxograma da Figura 3-13.

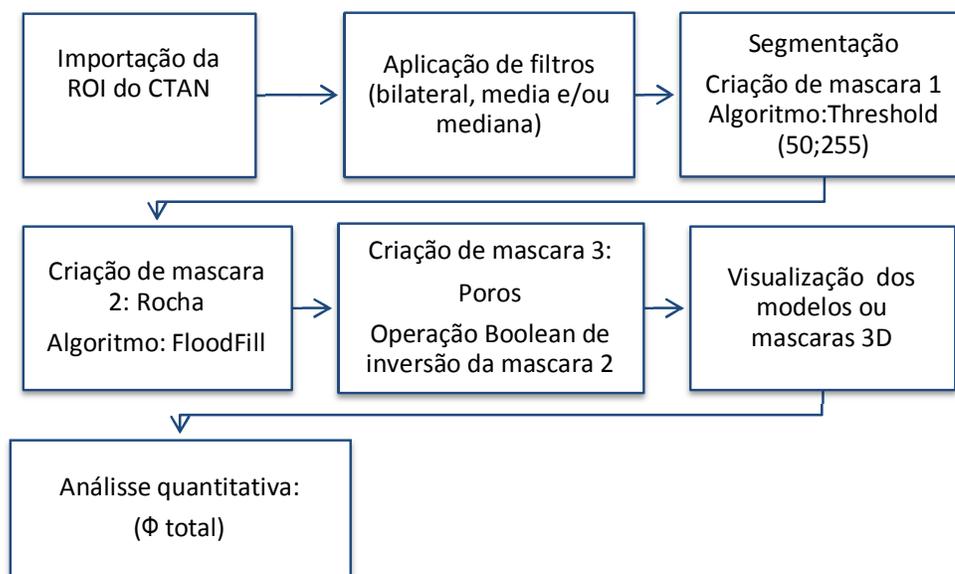


Figura 3-13. Parâmetros específicos utilizados do programa ScanIP. Φ : Porosidade.

3.5. Geração de malhas

A fim de executar a simulação numérica de propriedades físicas, uma malha de elementos finitos precisa ser construída. Até aqui as imagens foram segmentadas em duas fases gerando um volume 3D (rocha e poros), e agora serão submetidas ao processo de geração de malhas de elementos finitos.

Como foi introduzido na seção anterior o programa utilizado para tal foi o ScanIP com o módulo integrado elementos finitos.

O módulo fornece uma solução para a conversão de dados de imagem 3D em modelos volumétricos multiparte, gerando malhas do volume ou da superfície prontas para importação a softwares comerciais de análises de elementos finitos, para estudar o comportamento estrutural, ou para pacotes de dinâmica de fluidos computacional (CFD).

O enfoque desta dissertação é o estudo do comportamento estrutural pelo qual as malhas de elementos tetraédricos geradas foram importadas em formatos para programas de análise de elementos finitos.

O módulo fornece dois algoritmos específicos para a geração de malhas, nomeados FEGrid e FEFree.

Essas duas abordagens não necessitam do passo preliminar de reconstrução de superfície (isosuperfície-triangulação).

O algoritmo elementos finitos FEGrid é mais rápido e robusto que o algoritmo FEFree, gerando malhas tetraédricas ou malhas com a combinação de elementos tetraédricos e hexaédricos. No entanto, restringe o controle sobre o número de elementos gerados, ou seja, sobre a densidade da malha. Os métodos de geração de malhas baseados em *Grid* são abordados por a aproximação de “voxel” e por uma adaptação da técnica “marching cubes” nomeado como suavizado ou “Smoothed”.

A aproximação “voxel” foi proposta por Keyak, et al., (1990), num trabalho para aplicações médicas, e consiste em exportar diretamente os “voxels” que foram devidamente classificados e separados na etapa de segmentação como elementos finitos hexagonais. No entanto, este método tem vantagens e desvantagens. A aparência pouco realista dos modelos gerados é uma das desvantagens importantes a mencionar.

Por outro lado à aproximação “Marching Cubes”, adaptada por Müller, et al., (1995) para geração de malhas tendo para cada caso, uma tesselação completa do volume de hexaedros é pré-calculada e estabelecida numa tabela,

ao invés de determinar triangulações de superfícies só. Esta técnica supera o problema de superfícies de redes escalonadas da aproximação de “voxels”. Não obstante, a técnica herda alguns inconvenientes do algoritmo “Marching cubes”.

O algoritmo FEFree é um algoritmo de geração de malhas tetraédricas com maior flexibilidade, possibilitando um maior controle sobre o número de elementos e nós a ser gerados. Por sua vez permite a geração de malhas, nas superfícies de varias partes, automaticamente adaptadas às características da segmentação realizada com antecedência. Este algoritmo funciona com base no algoritmo FEGrid. Aqui é gerada interna e automaticamente uma malha FEGrid da qual são extraídas as superfícies que posteriormente são remalhadas por métodos como o AF ou a tetraedrização de Delaunay. Nas regiões perto das falhas ou poros a malha é refinada com elementos de menor tamanho que nas regiões maiores e mais homogêneas do modelo. Parâmetros avançados permitem manipular a densidade da malha, modificando o tamanho de comprimentos das arestas das superfícies.

No presente trabalho, foram testados os dois tipos de algoritmo e foi selecionado um deles com base na qualidade das malhas, fornecidas ao final do processo. Foram avaliados parâmetros de qualidade tais como número de elementos finitos, tempo de elaboração e facilidade de importação para programas de simulação. Foram realizadas malhas com diferentes configurações e simplificações dentro de cada algoritmo, inclusive alterando a resolução da imagem numa etapa prévia ao processo de geração de malhas. Os resultados serão apresentados no capítulo seguinte.

Quando as malhas são geradas é possível obter informação da qualidade dos elementos da malha. Na Tabela 3.9 são apresentados parâmetros que descrevem a forma e qualidade dos elementos das malhas geradas e fornecidos pelo programa ao final do processo.

Tabela 3.9. Parâmetros de descrição e avaliação da qualidade de elementos tetraédricos.

Parâmetro	Tetraedro perfeito	Tetraedro degenerado
Relação de aspecto (In-out aspect ratio)	1	0
Relação de comprimento (Edge Legth ratio)	1	>>1
Inclinação angular (Angular skew)	Arcos1/3	>>Arcos1/3 ou <<Arcos1/3
Inclinação do volume tetraédrico (Tetrahedron angular skew)	0	1
Medida do fator de forma (Shape Fator measures)	1	0
Medidas de ângulo diedro (Dihedral angle measures)	$D_{\min} < 10$ e $D_{\max} < 160$	$D_{\min} > 10$ ou $D_{\max} > 160$

Dentro das medidas ou métricas de qualidade são encontradas: a métrica de qualidade do tetraedro e o padrão de medida de qualidade dos tetraedros, apresentados no módulo geração de malhas de ScanIP como “Aspect Ratio measures” e “In-out aspect ratio” respetivamente.

Esta ultima é descrita pela relação:

$$Q = 3x \frac{R_{in}}{R_{out}} \quad (3.1)$$

Em que:

R_{in} : raio da esfera inscrita

R_{out} : raio da esfera circunscrita

Segundo (Simpleware Ltd., 2012), esta métrica é robusta e conhecida por se correlacionar bem com as métricas de qualidade de elementos utilizados dentro de softwares de elementos finitos. Uma qualidade mínima de 0.1 ou mais geralmente indica uma malha de qualidade.

A relação comprimento borda (Edge length ratio) também fornece uma medida da distorção do elemento equilátero. Valores mais altos indicam elementos mais pobres. Para cada elemento a relação de comprimento de bordas, b , esta dada pela relação do comprimento maior e o comprimento menor.

A inclinação angular ou *Angular Skew* fornece uma medida de quão inclinado um elemento é. A base para esta métrica é o ângulo diedro entre os planos do tetraedro.

A inclinação do volume de tetraedro determina o quão perto do ideal (equilátero) um elemento é. Com base no volume do tetraedro que se encaixa dentro do uma esfera onde cada vértice do tetraedro original encontra-se em sua superfície.

A medida do fator de forma proporciona uma medida da forma do volume do elemento com base ao volume ideal do elemento.

E o ângulo diedro, *Dihedral angle measures*, é o ângulo entre dois planos. Para um tetraedro, há seis ângulos diedros computados.

Para uma descrição mais extensa de cada parâmetro remetimos ao leitor para (Simpleware Ltd., 2012).

Finalmente as malhas tridimensionais volumétricas geradas e selecionadas foram exportadas como arquivos **. INP para software de elementos finitos ABAQUS.

3.6. Aplicação de análise de Elementos Finitos

De acordo com Roberts, et al., (2000), para prever as propriedades elásticas ou interpretar corretamente as relações experimentais da porosidade, é necessário dispor de um método preciso de se relacionar as propriedades elásticas, a porosidade e microestrutura. Um dos métodos para derivar as relações de propriedades-porosidade dos materiais porosos é resolver computacionalmente as equações de elasticidade para modelos digitais da microestrutura.

Assim é preciso estudar o comportamento mecânico (tensão-deformação) das rochas.

As propriedades mecânicas definem a capacidade do material para suportar ações externas ou internas como a aplicação de forças de compressão ou extensão.

Considerando um corpo de prova submetido à ação de compressão normal σ_z uniformemente distribuída sobre uma das faces da amostra, como se pode ver na Figura 3-14, deformações axial e radial (laterais ou circunferenciais) acontecem.

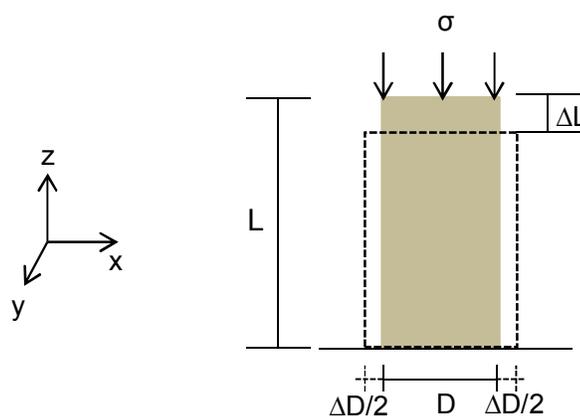


Figura 3-14. Amostra de rocha submetida à compressão uniaxial. (Adaptado de: Duarte, et al., 2002).

Assim a deformação axial ϵ_{ax} pode ser descrita como a relação entre a variação do comprimento (ΔL) e o comprimento inicial (L), assim:

$$\varepsilon_{ax} = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.2)$$

E a deformação lateral ou radial, ε_{rad} , como:

$$\varepsilon_{rad} = \frac{\Delta D/2 + \Delta D/2}{D} \quad (3.3)$$

A deformação induzida sobre o corpo pode ser elástica ou plástica. Na deformação elástica o corpo recupera a forma e volume inicial quando a tensão aplicada cessa, por outro lado, na deformação plástica o corpo sofre deformações permanentes. As deformações dependem significativamente tanto da tensão aplicada, da temperatura, da velocidade ou taxa de deformação quanto da estrutura do material. Assim, por exemplo, a temperatura constante, os materiais geralmente se comportam como elásticos quando pequenas tensões são aplicadas. Tornam-se plásticos quando essas tensões superam certo limite, nomeado limite de proporcionalidade. A partir de esse limite, fenômenos internos irreversíveis iniciam tais como propagação de fissuras, ocorrência maior de compressão de grãos e dos poros, entre outros.

No regime elástico, a existência de uma proporcionalidade entre a tensão e a deformação é assumida, considera-se o material em regime elástico linear. Este comportamento constitui a lei de Hooke. Assim, pode-se definir uma constante de proporcionalidade entre as deformações axiais e radiais ou laterais, denominada coeficiente de Poisson, assim:

Com deformações radiais:

$$v = -\frac{\varepsilon_{rad}}{\varepsilon_{ax}} \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_y = -v * \varepsilon_x \text{ ou } v = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_z = -v * \varepsilon_x \text{ ou } v = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \quad (3.6)$$

Este coeficiente está entre 0 e 0,5 se a rocha for considerada como um material, elástico, linear e isotrópico e seria um valor constante segundo o descrito por Duarte, et al., (2002). Deve-se ter em mente que o valor pode ser

considerado constante até o valor de carregamento no qual a formação ou desenvolvimento de fraturas não acontece.

Dados de tensão – deformação em testes de compressão ou tração são plotados em diagramas tensão (σ) – deformação (ϵ) como pode ser observado na Figura 3-15. O regime elástico linear na curva é descrito por uma linha reta com certa inclinação, que indica a proporcionalidade entre os dois parâmetros. Nesse trecho, se a tensão é diminuída lentamente, o mesmo segmento da curva em sentido oposto será percorrido até alcançar o ponto de origem em que as tensões e de deformações são nulas.

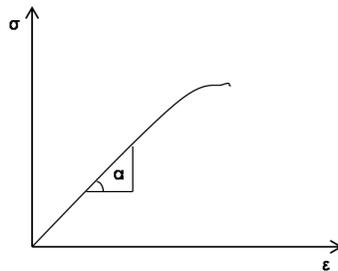


Figura 3-15. Curva Tensão-deformação. (Adaptado de: Duarte, et al., 2002).

No segmento em que a lei de Hooke é cumprida é possível definir o módulo de elasticidade ou Módulo de Young (E) que é diferente para cada material. O módulo de Young corresponde ao coeficiente angular da parte linear do diagrama tensão-deformação obtido, no ensaio.

Assim:

$$\sigma_x = E * \epsilon_x \quad (3.7)$$

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \quad (3.8)$$

Substituindo ϵ_x da equação 3.7 nas equações 3.4 ou 3.5 e 3.6 dependendo do caso, para obter:

$$\epsilon_y = -\nu * \epsilon_x = -\nu * \frac{\sigma_x}{E} \quad (3.9)$$

$$\epsilon_z = -\nu * \epsilon_x = -\nu * \frac{\sigma_x}{E} \quad (3.10)$$

Para resolver computacionalmente, métodos estáticos e dinâmicos são as aproximações usadas. Nesta dissertação, o problema é abordado utilizando o método estático que propõe simular uma aplicação de deformações uniformes

em uma microestrutura gerando tensões locais. Com o intuito de simular propriedades elásticas e obter especificamente o módulo de Young do sistema (rocha porosa), foi usado o método de elementos finitos. As simulações executam-se por meio do software ABAQUS, software para a modelagem de elementos finitos.

A grande maioria dos estudos numéricos adota certas considerações relacionadas às limitações teórico-numéricas, com o intuito de representar fenômenos físicos, e o presente trabalho não é exceção.

Devido à impossibilidade de diferenciar grãos de minerais e do cimento especialmente por causa da resolução de captura das imagens. Decidiu-se então, abordar o problema partindo da suposição seguinte:

Com o intuito de analisar a sensibilidade das propriedades elásticas com as variações de porosidade, o material rochoso foi assumido como composto por um único mineral puro, sem grãos e sem material cimentante.

As considerações assumidas são:

- a) O material e sua estrutura completamente elástica, linear e isotrópica.
- b) A densidade do sistema rochoso igual à densidade do mineral principal.
- c) As propriedades mecânicas como Módulo de Young (E) e coeficiente de Poisson (ν) são as do mineral. Nomeados no presente trabalho como (E_m) e (ν_m) respectivamente. Propriedades físicas de vários minerais estão bem documentadas na literatura Mavko, et al., (1998) e Zhao, et al., (2009).
- d) A variação de comprimento foi calculada de modo a obter um deslocamento representativo de ensaios de laboratório, isto é, entre 0.5 e 1 %.

Para a suposição, os modelos foram fixados na base na direção do deslocamento aplicado e livre nas outras duas direções. O deslocamento foi aplicado em direção normal no topo das amostras. Os nós no topo foram restringidos na direção do deslocamento aplicado e deixados livres nas outras duas direções. A resposta ao deslocamento aplicado foi de interesse em ordem a compreender como a microestrutura influencia as propriedades mecânicas das rochas carbonáticas. A tensão média resultante permite estimar as propriedades elásticas efetivas.

O processo foi conduzido nas dependências do (GTEP) do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, em computadores com processadores Intel

core i7-2600 CPU 3,40 GHz (8 CPUs), memória RAM de 8,0 GB, sistema operativo de 64 Bits e um com processador Intel core i7 3960 CPU 3,30 GHz (12 CPUs), memória RAM de 24 GB, sistema operativo de 64 Bits, respectivamente. As vantagens da computação paralela permite ganhar tempo de execução e utilizar maior capacidade de memoria. Deste modo à formulação é resolvida dividindo o conjunto total de elementos do modelo em vários subconjuntos e usar os processadores, no caso 8 ou 12, para realizar os cálculos em cada subconjunto e em seguida combinar os resultados.

No fluxograma da Figura 3-16, são apresentadas as principais etapas para a simulação de aplicação de deslocamento.

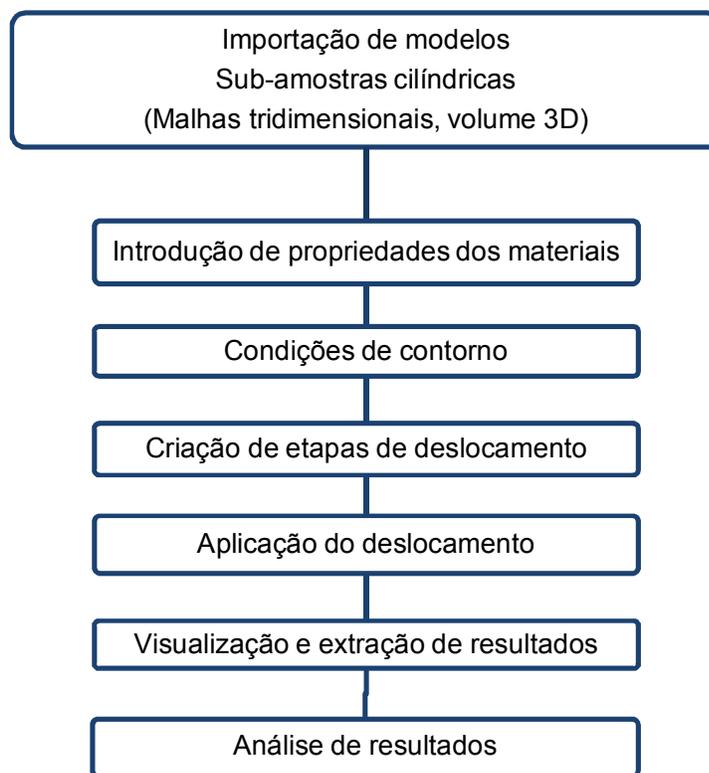


Figura 3-16. Fluxograma de etapas de simulação de aplicação de deslocamento.

3.7. Avaliação de resultados

Devido a que o objetivo do presente estudo é analisar a influencia da microestrutura nas propriedades mecânicas das rochas carbonáticas. Quer-se partir das propriedades dos sólidos (grão e cimento) para determinar as propriedades (Módulo de Young) do meio poroso. Na etapa de interpretação e

avaliação dos resultados procurou-se correlacionar parâmetros e comparar os resultados obtidos pelos métodos de laboratório e os métodos de análises numéricos, além de dados propostos na literatura na tentativa de obter os parâmetros que mais influenciam as propriedades mecânicas do material.

A faixa de variação do módulo de Young é de 10 a 80 GPa segundo os estudos realizados por autores como Yagiz, (2009), García Del Cura, et al., (2012), Martínez Martínez, (2008), Martínez-Martínez, et al., (2011), Pilotto, (2011), que foram discutidos a o longo dos capítulos anteriores.

As propriedades mecânicas dos minerais que compõem a rocha são apresentadas nas Tabela 3.10 e 20.

Tabela 3.10. Módulos, densidades e velocidades de onda da Calcita. (Adaptado de: Mavko, et al., 1998).

Módulo Volumétrico (GPa)	Módulo Cisalhante (GPa)	Densidade (g/cc)	Vp (Km/s)	Vs (Km/s)	Coefficiente de Poisson
76,8	32	2,71	6,64	3,44	0,32
63,7	31,7	2,7	6,26	3,42	0,29
70,2	29	2,71	6,34	3,27	0,32
74,8	30,6	2,71	6,53	3,36	0,32
68,3	28,4	2,71	6,26	3,24	0,32

Tabela 3. 11. Módulos Volumétricos, de cisalhamento, Young e coeficiente de Poisson da Calcita. (Adaptado de: Zhao, et al., 2009).

Parâmetros elásticos	Valores do modelo				Dados experimentais									
	Presente trabalho	Pavese et al.		Fisler et al.	Voigt ^b (1910)	Bhimsenachar ^b (1945)	Reddy et al. (1960)	Peselnick et al. (1963)	Dandekar (1968) Pulse-echo	Dandekar (1968) Phase comparison	Herarmon (1979)	Vo Thanh et al. (1984)	Chen et al. (2001)	Mean value ^d /Standard deviation
K	72.4	74.3	72.8	79.6	67.2	67.30	83.6	74.6	74.6	75.4	73.2	75.3	75.9	74,12/13,85
G	35.6	33.6	31.8	28.4	32.5	33,10	37,1	30,7	31,8	31,8	31,9	31,7	32,7	32,59/5,17
v	0,29	0,30	0,31	0,34	0,29	0,29	0,31	0,32	0,31	0,32	0,31	0,32	0,31	0,31/0,03
E	91,8	87,5	83,2	76,2	83,9	85,20	96,9	81,0	83,5	83,6	83,7	83,5	85,88	85,23/12,93

^a A média e o desvio padrão são obtidos a partir de todos os resultados experimentais. ^b

Os dados são obtidos a partir do artigo de Dandekar.