

3 Materiais e Métodos

Neste capítulo serão apresentados os materiais usados nessa pesquisa e a metodologia utilizada para tirar as propriedades das amostras microtomografada.

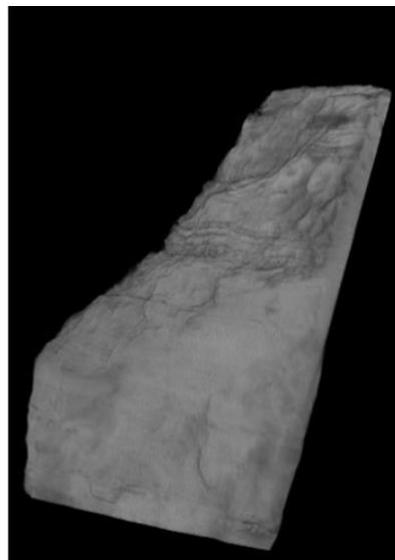
3.1. Materiais utilizados

Conforme mostrado na figura 1.2, as etapas de definição de amostras e aquisição de imagem foram realizados por Pilotto, (2011) e a subamostragem realizada por Pico (2013).

Para a realização desse trabalho foram utilizados nove corpos de prova retirados de três travertinos de origens diferentes, Travertino de Itaboraí, Travertino Romano e Travertino Turco.



a)



b)

Figura 3.1 Travertino de Itaboraí. a) Real b) Imagem.

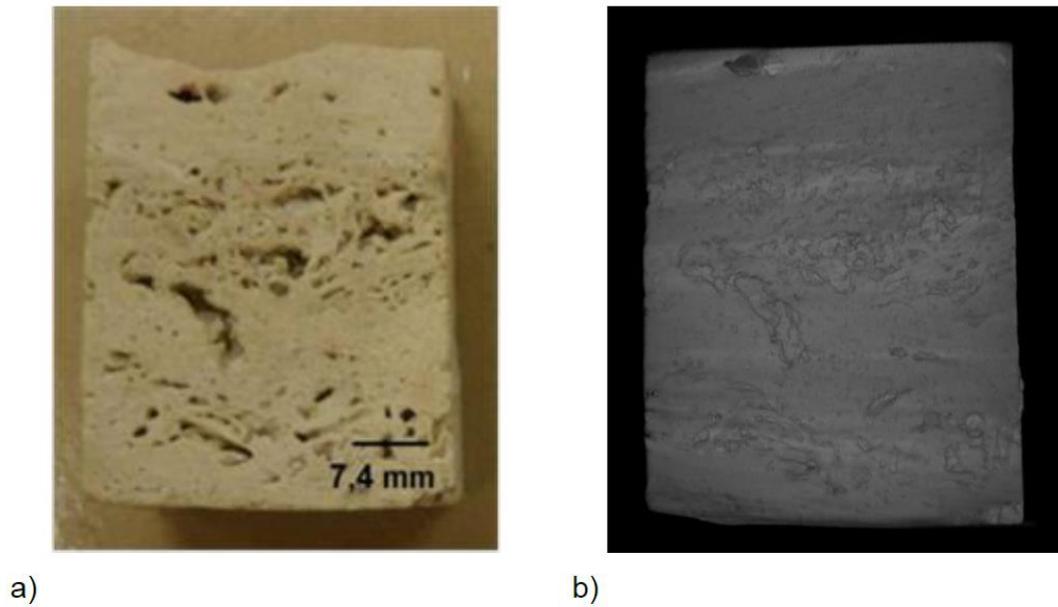


Figura 3.2 Travertino romano. a) Real b) Imagem.

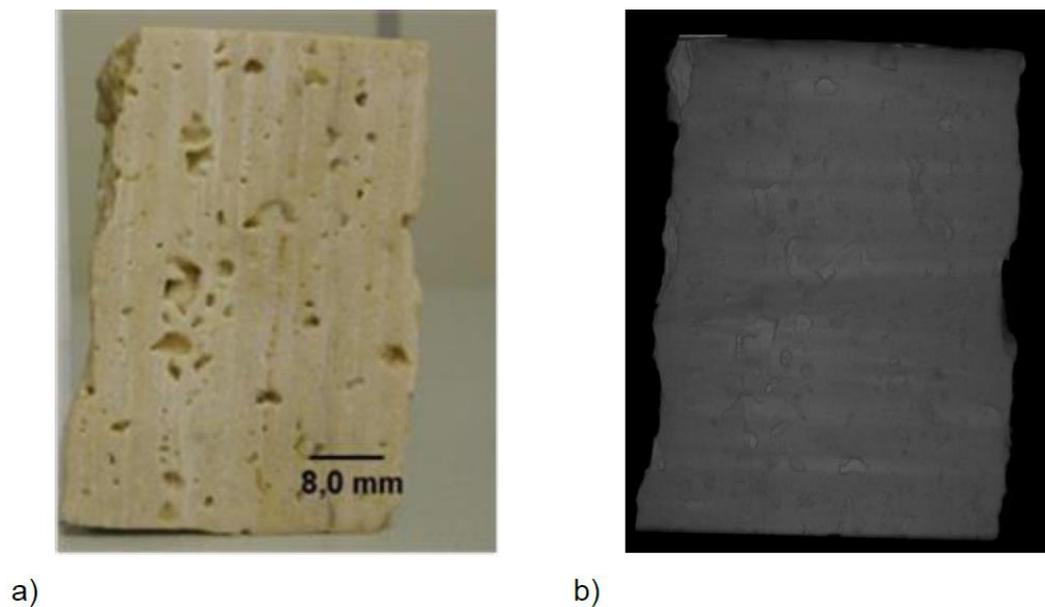


Figura 3.3 Travertino Turco. a) Real b) Imagem.

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

A técnica utilizada permite a extração de várias subamostras a partir de uma amostra microtomografada, em qualquer direção, conforme a figura 3.4. Diferente da realização de corpos de provas reais, os corpos de provas digitais permitem a simulação de vários ensaios e não passam por processos de extração ou corte.

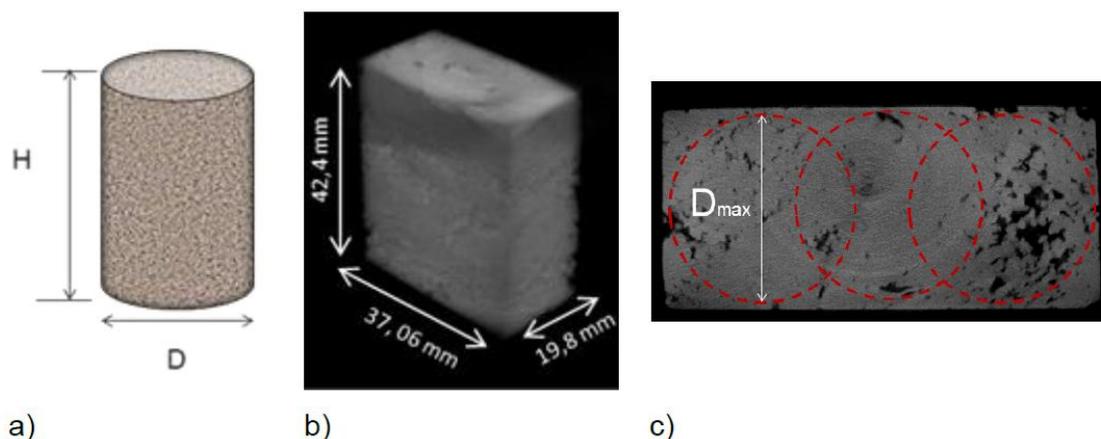


Figura 3.4 Sub amostragem digital: a) Amostra para ensaio de compressão simples. b) Análise digital da geometria da amostra e c) Subamostragem.

As dimensões das subamostras assim como a nomenclatura utilizada estão apresentadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 Dimensões e resolução das subamostras.

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

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

- O *Fiji* é um programa grátis e de código aberto de tratamento de imagens que oferece uma variedade de funções para a manipulação de imagens como filtros, ferramentas de segmentação e extração de atributos.
- O programa *Scan IP* é um software comercial desenvolvido pela companhia Simpleware (*Exeter, UK, 2000*). 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. O programa dispõe de um conjunto de instrumentos de medição para fornecer análises quantitativas que permitem o estudo das estruturas dos materiais.

- O *ABAQUS* é um pacote de software comercial para análise por elementos finitos desenvolvido pela *HKS Inc.* de *Rhode Island*, E.U.A. e agora comercializado sob a *SIMULIA* marca da *Dassault Systemes S.A.* Este *software* de grande aplicação em diversas áreas da engenharia consiste em duas partes: gráfica (*ABAQUS/CAE* e *ABAQUS/Viewer*) e solver (*ABAQUS/Standard* e *ABAQUS/Explicit*).
 - O *ABAQUS/CAE* é pré e pós-processador. Como pré-processador, gera o arquivo de entrada de dados que contém a geometria, propriedades do material, condições de contorno, carregamento aplicado e a malha de elementos finitos definidos pelo usuário. O programa ainda permite que o arquivo de entrada de dados seja alterado manualmente pelo usuário. Como pós-processador, o *ABAQUS/CAE* possibilita a visualização gráfica dos resultados.
 - O *ABAQUS/Viewer* funciona exclusivamente como pós-processador.
 - O *ABAQUS/Standard* e o *ABAQUS/Explicit* simulam computacionalmente carregamentos estáticos e dinâmicos, respectivamente.

Todos os programas foram usados nas dependências do GTEP (Grupo de Tecn. de Eng. de Petróleo) do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, em um computador com processador *Intel core i7 3960 CPU 3,30 GHz* (12 CPUs), memória RAM de 64 GB, sistema operacional *Windows 7* de 64 Bits.

3.2. Metodologia utilizada

O foco desse trabalho é entender como a estrutura porosa dos travertinos influencia nas propriedades elásticas seguindo a ordem do fluxograma com as

etapas de processamento, extração de atributos, geração de malhas, análise de elementos finitos e análise de resultados.

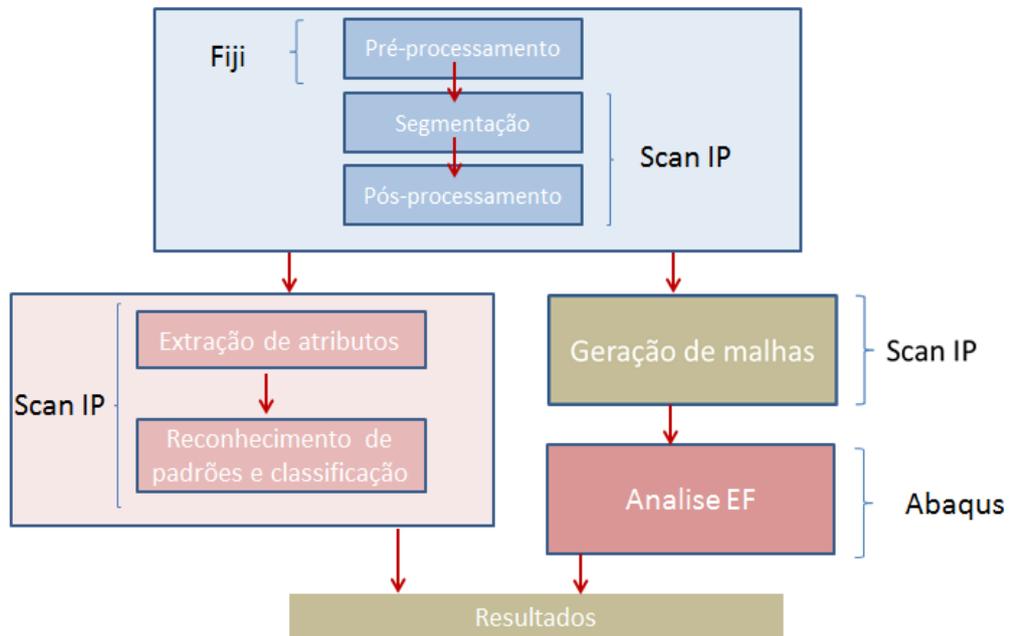


Figura 3.5 Fluxo de trabalho.

3.2.1. Processamento de imagens

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

As imagens subamostradas tem um excesso de *pixels* pretos depois da borda, a ferramenta *crop* do programa *Fiji* retira esse excesso deixando a imagem otimizada, economizando espaço e tempo de processamento.

- Imagem (791x791x1464)
- 873,6Mb



- Imagem (749x749x1464)
- 785Mb



Figura 3.6 Corte.

3.2.1.1. Filtros

O programa *Fiji* apresenta uma série de filtros para se trabalhar com imagens. Aqui iremos abordar apenas os três mais comuns: *Mean*, *Median* e *Sigma Filter Plus*.

O filtro *Mean* faz uma média dos valores dos pixels adjacentes, já o *Median* faz uma mediana. O filtro *Sigma* realiza uma suavização usando o domínio e uma faixa da sua vizinhança, o resultado é uma imagem que é suavizada nas regiões homogêneas e as bordas são preservadas.

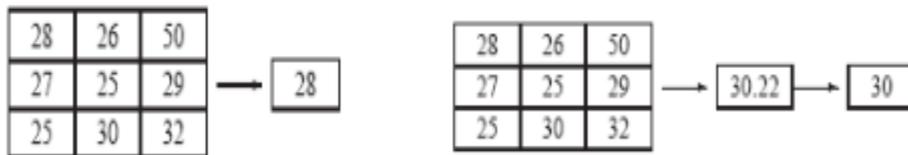
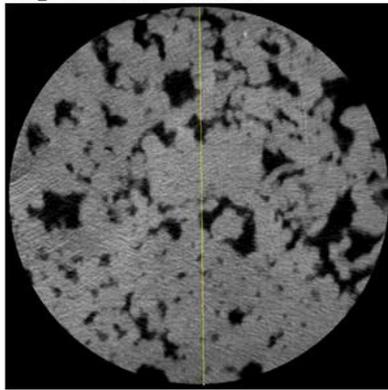


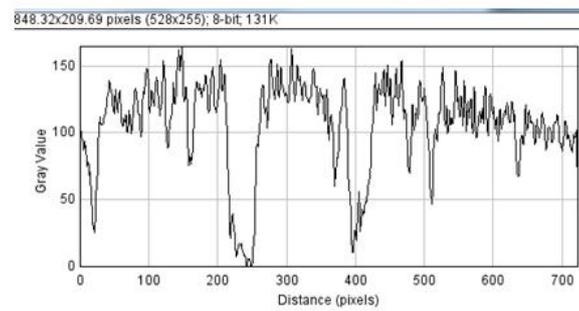
Figura 3.7 Mediana e média.

Em uma seção 2D traçamos uma linha qualquer sobre a imagem para obtermos um histograma de intensidade por distância. Depois aplicamos os três filtros para comparar os resultados.

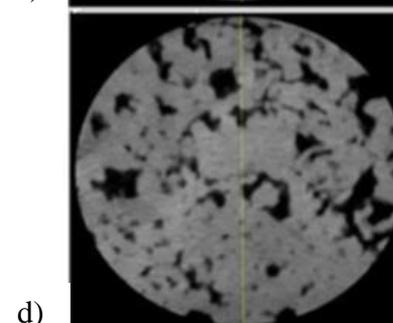
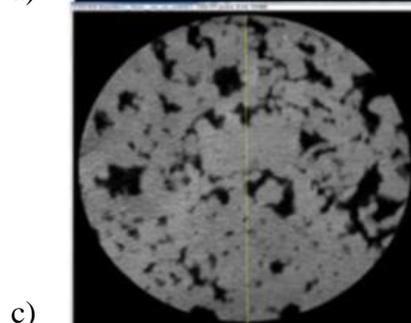
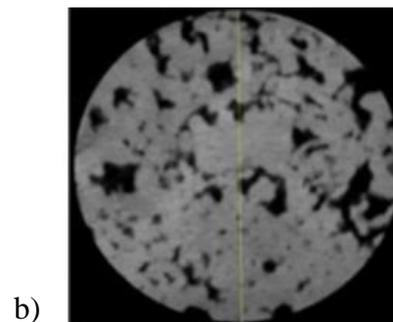
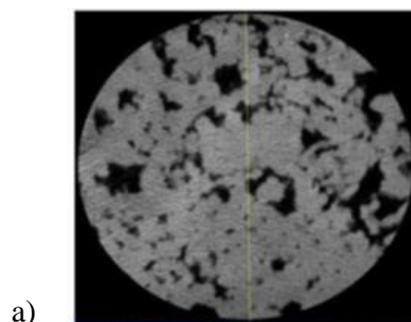
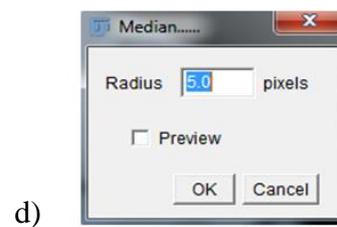
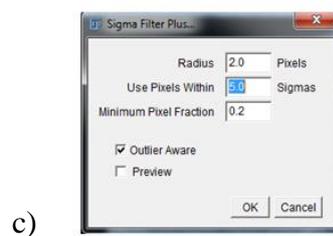
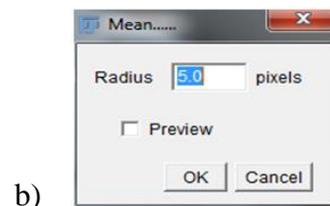
Figura sem filtro



Histograma da figura



- Filtros



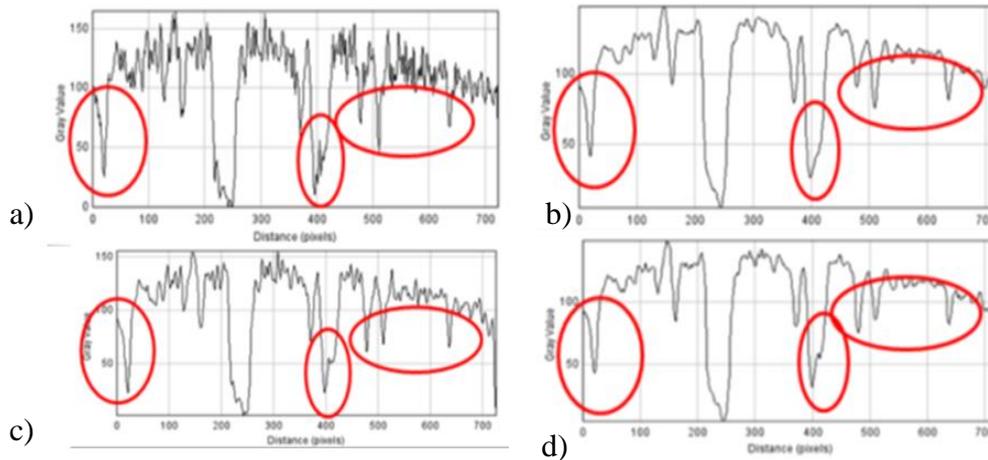


Figura 3.8 Efeito dos Filtros a) Sem filtro b) Mean c) sigma d) Median.

A figura 3.8 mostra que o filtro *Sigma* apresenta menor redução da intensidade nas bordas, o resultado disso é uma menor interferência na medição da porosidade.

3.2.1.2. Limiarização

O programa *Fiji* permite que o usuário opte por três tipos de limiarização: manual, automática ou por programas de redes neurais. O *Scan IP* permite apenas a limiarização manual, fazendo com que esta técnica seja usada no decorrer desta dissertação uma vez que a geração de malhas será gerada a partir do módulo de elementos finitos do *Scan IP*.

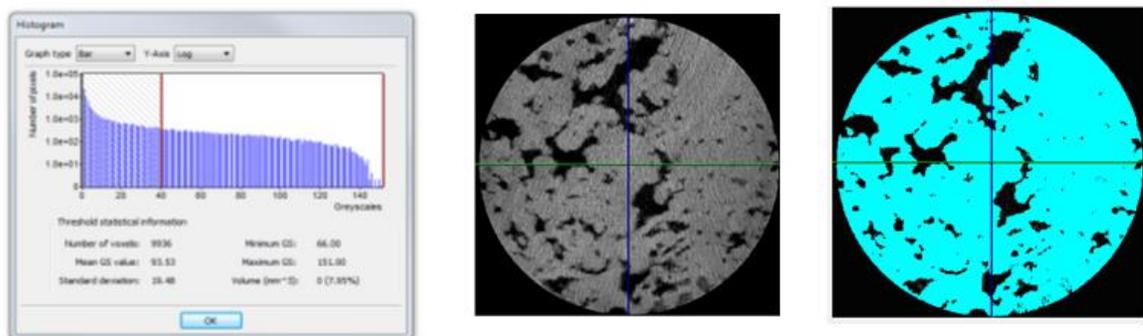


Figura 3.9 Limiarização manual.

O limiar escolhido foi o de 60. O mais correto é que seja analisado caso a caso, porém, para isto, é necessário experiência do operador e comparação com

medidas físicas reais, tais como porosidade total, por exemplo. O valor único permite uma homogeneização da técnica.

3.2.1.3. Reamostragem

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

O programa *Scan Ip* oferece quatro opções para a reamostragem: Vizinhança próxima, Maior ganha, Linear e Efeito do volume parcial. Os dois primeiros métodos são recomendados para imagens binárias ou já segmentadas, já os dois últimos são recomendados para imagens em escala de cinza. Neste trabalho usaremos o método da vizinhança próxima.

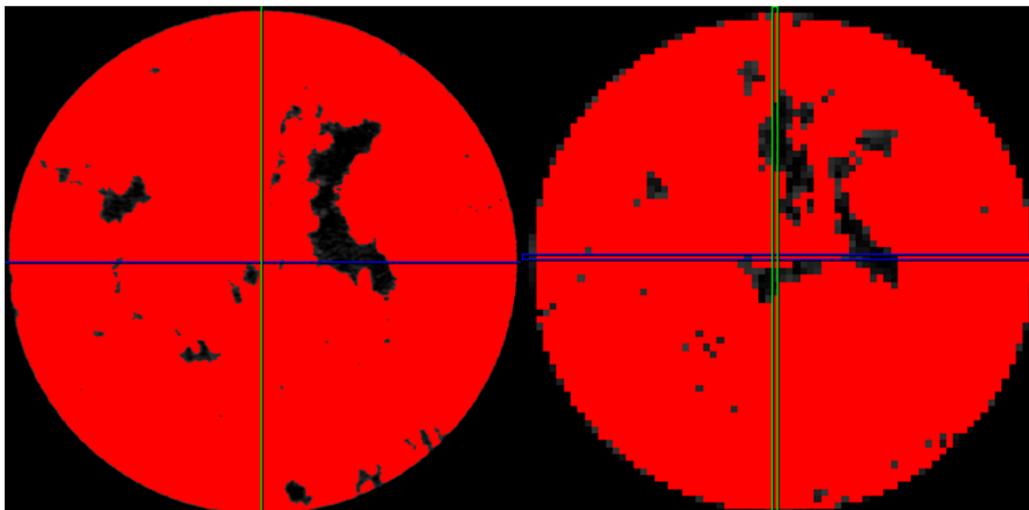


Figura 3.10 Reamostragem

Esta técnica afeta a porosidade, isso faz com que a porosidade tenha que ser medida antes e depois desta técnica, para medirmos sua variação e efeito.

É importante salientar que se trata de uma operação em três dimensões e a figura mostra apenas o resultado final em uma seção em duas dimensões.

3.2.1.4. Floodfill

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

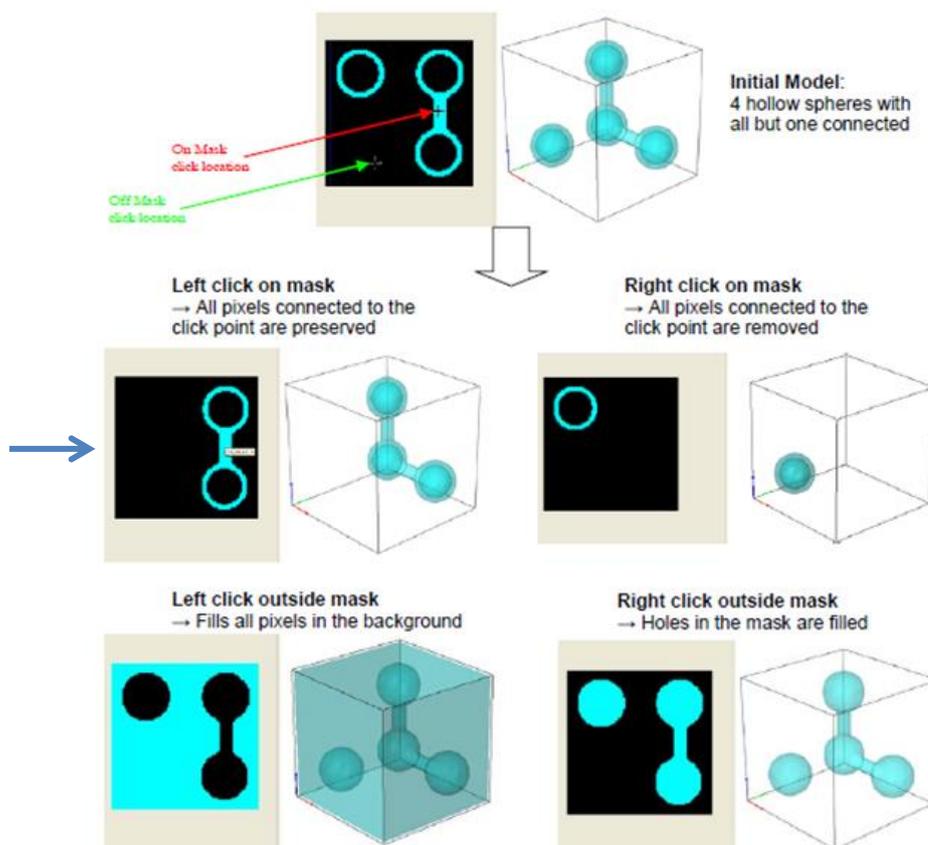


Figura 3.11 Floodfill.

3.2.2. Extração da porosidade

Após a imagem segmentada o programa *Scan IP* fornece uma máscara com uma cor (pode ser alterada) que sobrepõe à faixa tonal escolhida na segmentação. Conforme mostra a figura 3.12. Essa máscara é renomeada como material.

O próximo passo é a geração da máscara poros, que são os *voxels* de intensidade abaixo do limiar escolhido para o material.

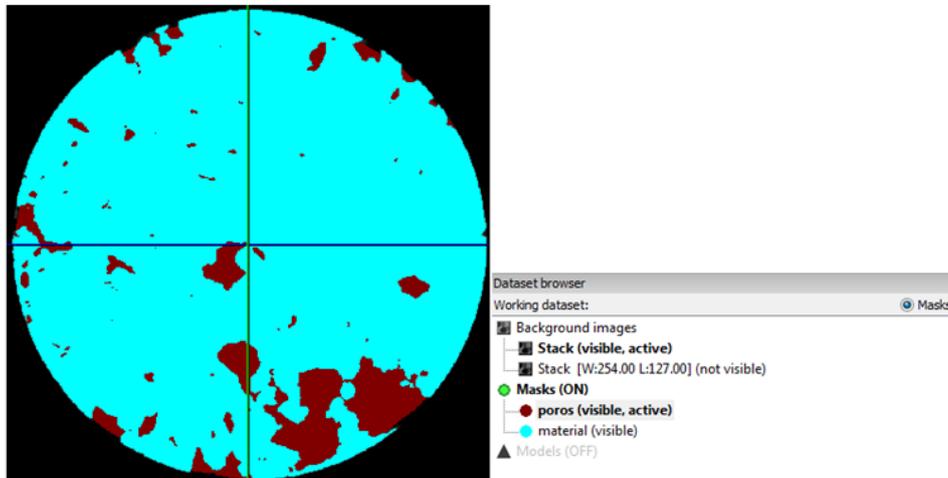


Figura 3.12 Extração da porosidade.

O programa *Scan IP* tem uma ferramenta de análise de atributos, dentre as opções fornecidas pelo programa, e usamos a contagem de *voxel* por máscara para definir a porosidade.

Project information

Image statistics

Current tool:

Mask statistics

Update stats Update on the fly

| Name | Voxel count | Volume (mm ³) | Surface are... | Mean greys... | Std Dev of ... |
|--------------|-------------|---------------------------|----------------|---------------|----------------|
| material | 546,513,459 | 9.69e3 | 13.3e3 | 116 | 17.1 |
| poros | 55,978,426 | 993 | 10.3e3 | 20.6 | 19.4 |
| Grand total | | | | | |
| Sum (2 it... | 602,491,885 | 10.7e3 | 23.7e3 | | |

Figura 3.13 Extração da porosidade.

O programa oferece também a opção de e contagem dos poros e seus respectivos tamanhos.

Project information

Image statistics

Current tool:

Mask statistics

Update stats Update on the fly

| Name | Voxel:Count | Voxel:Volu... | Voxel:Surface area (mm ²) | OBB:Major Extent (mm) | OBB:Extent Ratio (Minor to major) | OBB:Extent Ratio (Medial to ...) |
|----------|-------------|---------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| poros:1 | 66 | 1.17e-3 | 93.9e-3 | 0.22 | 0.47 | 0.66 |
| poros:2 | 351 | 6.23e-3 | 0.37 | 0.48 | 0.38 | 0.61 |
| poros:3 | 54 | 958e-6 | 72.1e-3 | 0.19 | 0.55 | 0.79 |
| poros:4 | 14,428 | 0.26 | 7.26 | 1.74 | 0.44 | 0.70 |
| poros:5 | 48 | 869e-6 | 91.1e-3 | 0.22 | 0.38 | 0.77 |
| poros:6 | 26 | 461e-6 | 55.8e-3 | 0.16 | 0.54 | 0.85 |
| poros:7 | 1 | 17.7e-6 | 4.08e-3 | 26.1e-3 | 1.00 | 1.00 |
| poros:8 | 5 | 88.7e-6 | 15.0e-3 | 89.0e-3 | 0.50 | 0.59 |
| poros:9 | 17 | 319e-6 | 35.4e-3 | 0.14 | 0.38 | 0.73 |
| poros:10 | 2 | 35.5e-6 | 6.80e-3 | 52.2e-3 | 0.50 | 0.50 |
| poros:11 | 1 | 17.7e-6 | 4.08e-3 | 26.1e-3 | 1.00 | 1.00 |
| poros:12 | 1 | 17.7e-6 | 4.08e-3 | 26.1e-3 | 1.00 | 1.00 |
| poros:13 | 4 | 71.0e-6 | 12.2e-3 | 83.8e-3 | 0.31 | 0.61 |
| poros:14 | 2 | 35.5e-6 | 6.80e-3 | 52.2e-3 | 0.50 | 0.50 |
| poros:15 | 8 | 142e-6 | 19.0e-3 | 84.2e-3 | 0.57 | 0.62 |

Template: Pore size (Built-in)

Figura 3.14 Informação dos poros.

Knackstedt (2006) sugeriu uma classificação de poros em três categorias de acordo com seu diâmetro, conforme mostra a tabela 3.2. Como a resolução da imagem é de 26 micras, não serão encontrados poros intragranulares.

Tabela 3.2 Classificação de poros de Knackstedt.

| Tipo de porosidade | Diâmetro do poro |
|--------------------|-------------------------------------|
| Vugular-Fenestral | Maior a 200 μm |
| Intergranular | Maior ou igual que 10 μm |
| Intragranular | Menor de 10 μm |

Outro ponto importante é a localização desses poros, se estão distribuídos homogeneamente ou se estão concentrados em alguma parte da amostra. Isso pode ser feito através da visualização 3D, conforme a figura 3.15.

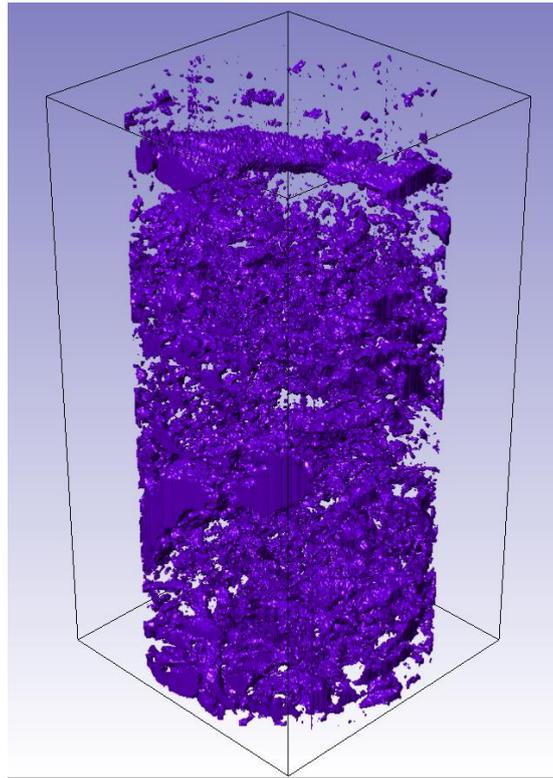


Figura 3.15 Visualização 3D.

3.2.3. Geração de malhas

A geração das malhas tridimensionais é feita no software *Scan IP* no módulo elementos finitos. As imagens segmentadas são usadas para a aplicação de algoritmos de geração de malhas.

A geração de modelos tridimensionais é constituída a partir de uma grade cartesiana de dados em escala de cinza que representam a intensidade relativa do sinal digitalizado em todo o volume da imagem.

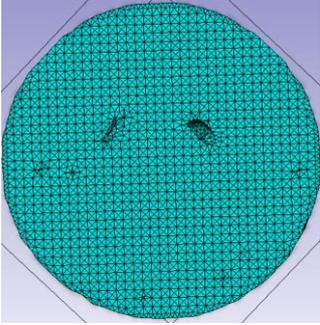
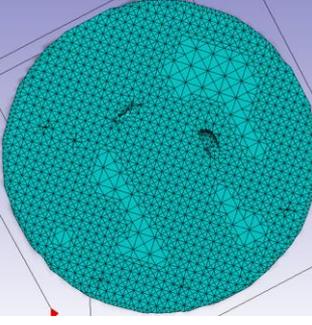
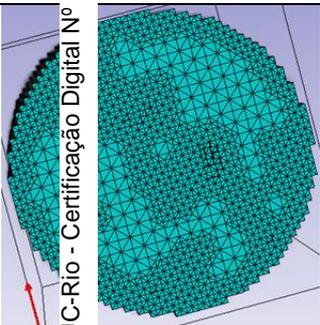
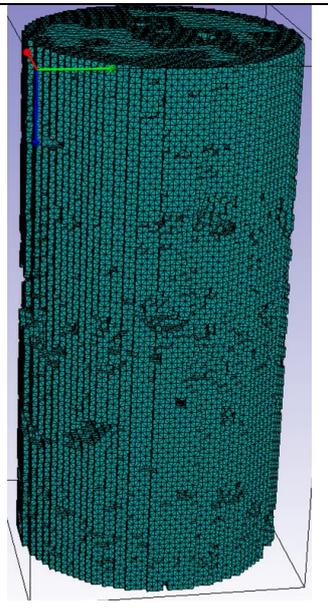
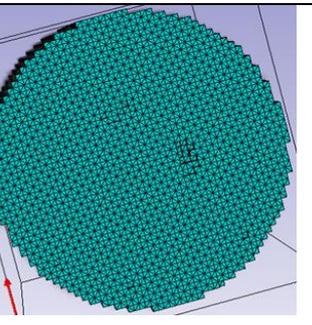
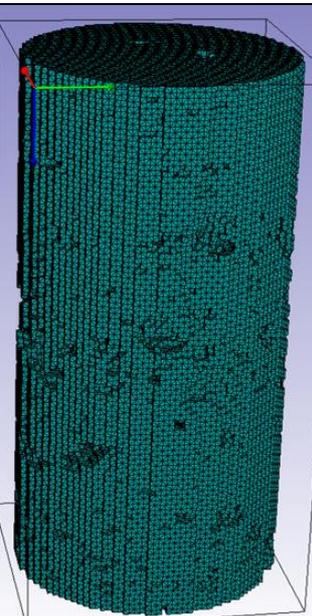
O módulo de elementos finitos do *Scan IP* fornece dois métodos ou algoritmos para geração de malhas, os algoritmos *FE Grid* e o *FE Free*. O algoritmo *FE Grid* dispõe de dois tipos de malhas a do tipo “*voxel*” e do tipo suavizado.

Após a criação da malha, o programa permite ao usuário a opção de inspecionar a qualidade da malha em parâmetros que descrevem a forma e qualidade dos elementos tetraédricos gerados.

A tabela 3.3 mostra quatro tipos de malhas geradas no *Scan IP*. Para escolher qual tipo de malha usar, os parâmetros avaliados foram o número de

elementos e as medidas dos ângulos do diedro. O *FE Grid Voxel* apresentou melhor métrica dos elementos. Ângulos grandes ou pequenos distorcem a malha e podem gerar problemas de execução no programa de elementos finitos.

Tabela 3.3 Tipos de manhas geradas no *Scan IP*.

| | | | |
|--|---|---|---|
|  |  |  |  |
| <p>Fe Free Num de elem tet: 1379496 Angulo Min: 2.85172 Angulo Max: 154.158</p> | | <p>FE Grid Smoothed Num de elem tet: 1210669 Angulo Min: 3.4594 Angulo Max: 154.158</p> | |
|  |  |  |  |
| <p>FE Grid Voxel 4*4*4 Num de elem tet: 856278 Angulo Min: 35.2643 Angulo Max: 144.736</p> | | <p>FE Grid Voxel 1*1*1 Num de elem tet: 893090 Angulo Min: 54.7353 Angulo Max : 125.265</p> | |

Por apresentar melhores métrica, o algoritmo escolhido foi o *FE Grid* (1*1*1), apesar de esse algoritmo gerar mais elementos que os demais e os algoritmos *FE Free* e *FE Smoothed* representarem melhor o contorno dos grãos.

Quanto melhor for a resolução da imagem, maior será o número de elementos gerados. Como o número de elementos é um limitante no programa de

elementos finitos a aplicação da técnica de reamostragem é necessária, diminuindo a resolução da imagem. A malha do Travertino Romano 2 com a resolução original ficou com 101 milhões de elementos. A tabela 3.4 mostra o número de elementos gerados após a reamostragem para cada amostra.

Tabela 3.4 Número de elementos gerados para cada sub amostra.

| Subamostra | Nº de elementos |
|------------|-----------------|
| TI-1 | 1.109.520 |
| TR-1 | 945.385 |
| TR-2 | 952.755 |
| TR-3 | 893.090 |
| TT-1 | 1.007.890 |
| TT-2 | 1.020.970 |
| TT-3 | 960.700 |
| TT-4 | 999.660 |
| TT-5 | 1.008.980 |

Após a escolha do algoritmo de geração de malhas o programa usa a máscara gerada na segmentação para obtenção do número de materiais serem utilizados e a definição de contatos e nós.

Cada material é definido por uma faixa de tonalidade no histograma. Na figura 3.16 o primeiro material irá ser o de voxels com faixa tonal entre 60 e 80 (na escala de cinza) e o segundo material entre 80 e 255. Na faixa tonal (60 e 80) foram observadas como as intensidades dos *voxels* nos contornos dos poros e do corpo de prova.

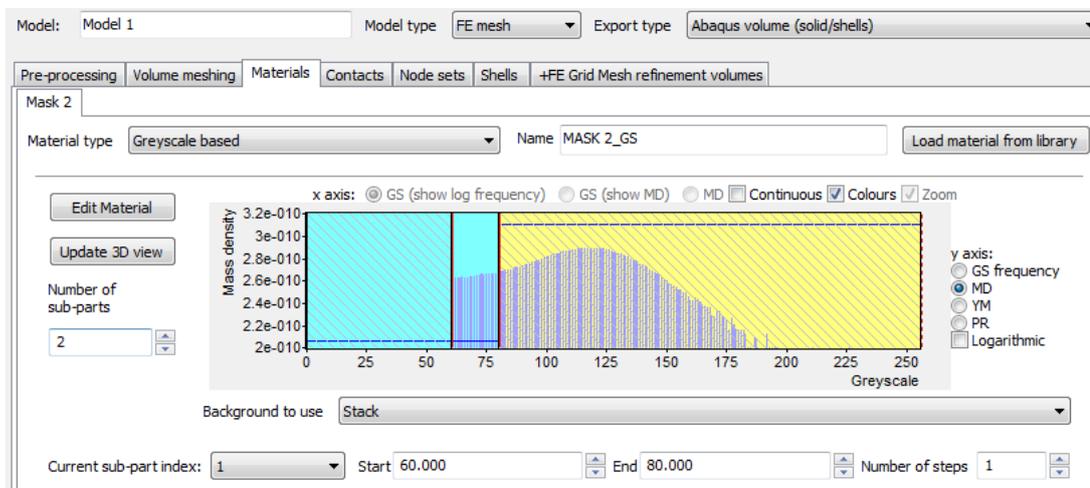


Figura 3.16 Definição da quantidade de materiais.

Também é necessário inserir no programa as condições de contorno para geração de contatos e nós. Os contornos e nós são definidos a partir dos máximos e mínimos da máscara gerada.

Após a definição do tipo de malha, número de materiais, contatos e nós, a malha tetraédrica é gerada e sua qualidade verificada. Caso satisfatória, ela pode ser exportada como arquivo *.INP* para o programa de elementos finitos.

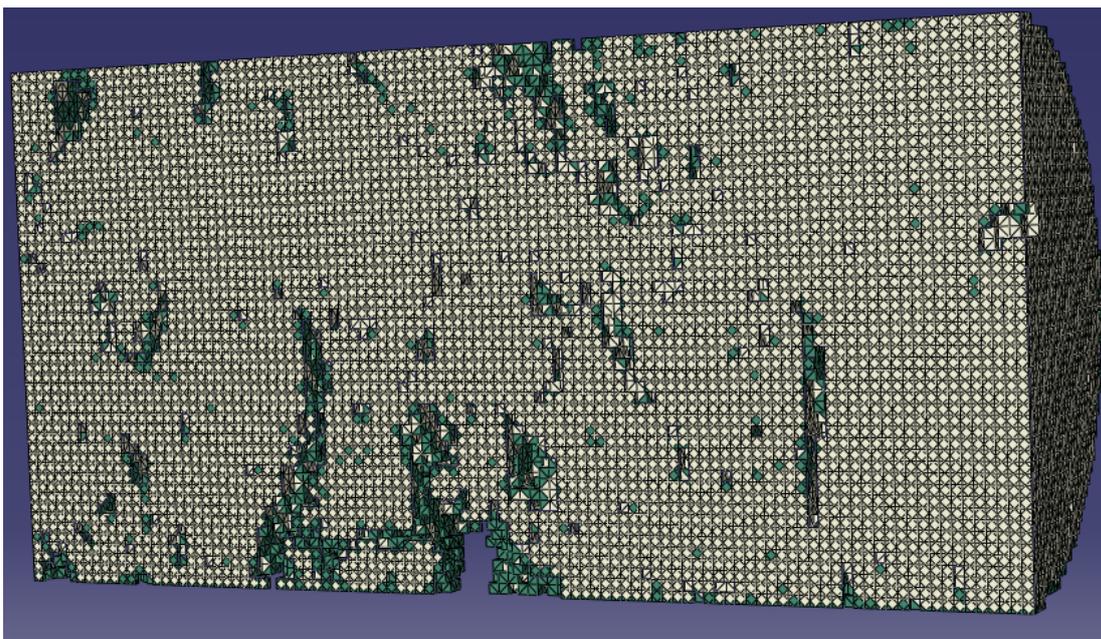


Figura 3.17 Corte da amostra gerada no Scan IP.

3.2.4. Elementos finitos

Com o intuito de simular as propriedades elásticas e obter o módulo de elasticidade do sistema poroso foi usado o método dos deslocamentos que propõe simular a aplicação de deslocamentos uniformes gerando tensões locais. As simulações foram feitas no programa *ABAQUS*.

O *Scan IP* forneceu a geometria do problema, os elementos, nós e superfícies, no *ABAQUS* inserimos as condições de contorno, propriedades do material e o deslocamento. No fluxograma da figura 3.18 proposto por Pico (2013) são apresentadas as etapas para a simulação.

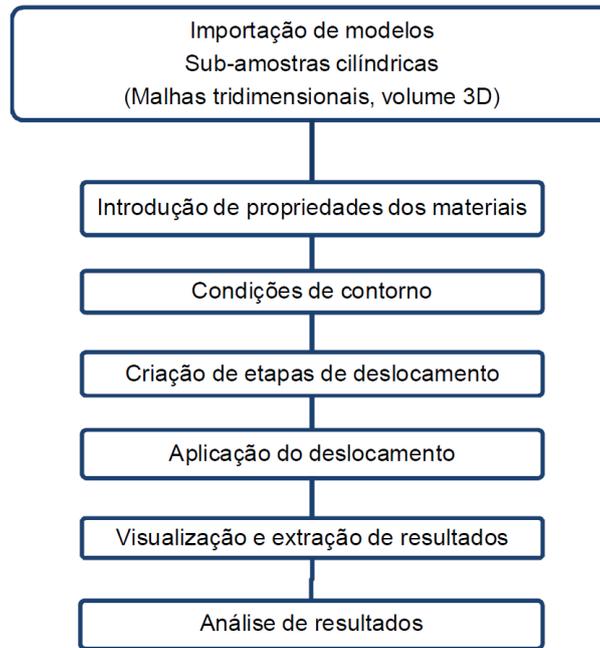


Figura 3.18 Fluxo de trabalho MEF.

Como a saída do programa *Scan IP* é em milímetros, usamos o sistema métrico nomeado pelo manual do ABAQUS como SI (mm), assim a densidade fica em tonelada por milímetro cúbico e as tensões em Mega Pascal.

| Quantity | SI | SI (mm) | US Unit (ft) | US Unit (inch) |
|----------|------------------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| Length | m | mm | ft | in |
| Force | N | N | lbf | lbf |
| Mass | kg | tonne (10^3 kg) | slug | $\text{lbf s}^2/\text{in}$ |
| Time | s | s | s | s |
| Stress | Pa (N/m^2) | MPa (N/mm^2) | lbf/ft^2 | psi (lbf/in^2) |
| Energy | J | mJ (10^{-3} J) | ft lbf | in lbf |
| Density | kg/m^3 | tonne/mm^3 | slug/ft^3 | $\text{lbf s}^2/\text{in}^4$ |

Figura 3.19 Sistema de unidades.

3.2.4.1. Introdução das propriedades do material

Para os elementos com apenas um material foram usados os valores médios da calcita retirados da compilação de dados Zhao *et al.* (2009) .

| Parâmetros elásticos | Valores do modelo | | | | Dados experimentais | | | | | | | | | |
|----------------------|--------------------|------|------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|------------|------------------|-----------------|--------------------------------|------------------------|--------------------|
| | Paverse et al. | | | Fisler et al. | Dandekar (1968) | | | | | | | Mean value/ Standard deviation | | |
| | Hernandez-P (2013) | RIM | SM | | Voigt (1910) | Bhimsenachar (1945) | Reddy et al. (1960) | Peselnick et al. (1963) | Pulse-echo | Phase comparison | Herarmon (1979) | | Vo Thanh et al. (1984) | Chen et al. (2001) |
| K | 72,4 | 74,3 | 72,8 | 79,6 | 67,2 | 67,3 | 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 | 33,1 | 37,1 | 30,7 | 31,8 | 31,8 | 31,9 | 31,7 | 32,7 | 32,59/5,17 |
| v | 0,29 | 0,3 | 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 | 85,2 | 96,9 | 81 | 83,5 | 83,6 | 83,7 | 83,5 | 85,88 | 85,23/12,93 |

Figura 3.20 Módulos Volumétricos, de cisalhamento, Young e coeficiente de Poisson da Calcita Adaptado de: Zhao, et al.(2009).

Para as mesmas amostras foram realizados testes com dois materiais e quatro materiais. Conforme mostra a tabela 3.4. Os valores foram atribuídos de acordo com a intensidade do *voxel*, para intensidades de cores mais claras foi atribuído o valor médio da calcita pura (85GPa) e para intensidades mais escuras o valor do módulo de Young foi diminuído com o objetivo de simular um material alterado.

Tabela 3.5 Dados de entrada em relação a intensidade do material.

| Amostras | Materiais | Módulo de elasticidade (MPa) | Coeficiente de Poisson |
|-----------------------|-----------------|---|------------------------|
| Todas | 1 material | 85000 | 0,3 |
| TT1,2,3,4,5 e TR1,2,3 | 2 materiais (a) | Intensidade (60-80)-78000 Intensidade (80-255)-85000 | 0,3 |
| TT1,2,3,4,5 e TR1,2,3 | 2materiais (b) | Intensidade (60-80)-70000 Intensidade (80-255)-85000 | 0,3 |
| TT1,2,3,4,5 e TR1,2,3 | 2materiais (c) | Intensidade (60-120)-78000 Intensidade (120-255)-85000 | 0,3 |
| TT1,2,3,4,5 e TR1,2,3 | 4 materiais | Intensidade (60-90)-65000 Intensidade (90-110)-70000 Intensidade (110-150)-78000 Intensidade (150-255)-85000 | 0,3 |

A faixa tonal (60 -80) representa o contorno dos poros e do corpo de prova e os valores de 78.000 MPa e 70.000 MPa representam o material alterado próximo ao poro.

Os valores usados para a simulação com quatro materiais e com dois materiais (c) foram usados como representação de diferentes situações e para comparação dos resultados.

Na figura 3.21 o material de cor mais clara representa a calcita enquanto que o material verde representa a calcita alterada próxima dos poros. Geralmente os fluídos contidos nos poros da rocha alteram o mineral constituinte ao longo do tempo, tornando-o menos resistente.

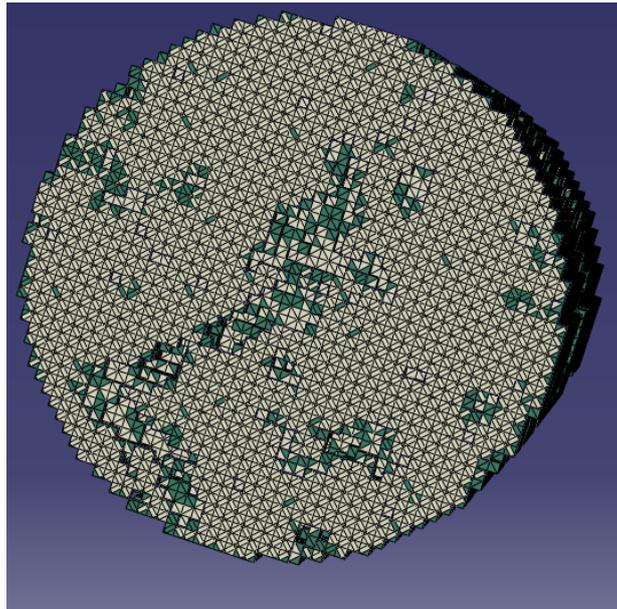


Figura 3.21 Corte do TR3 (2materiais (a))

3.2.4.2.

Etapa da criação das condições de contorno e deslocamentos

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

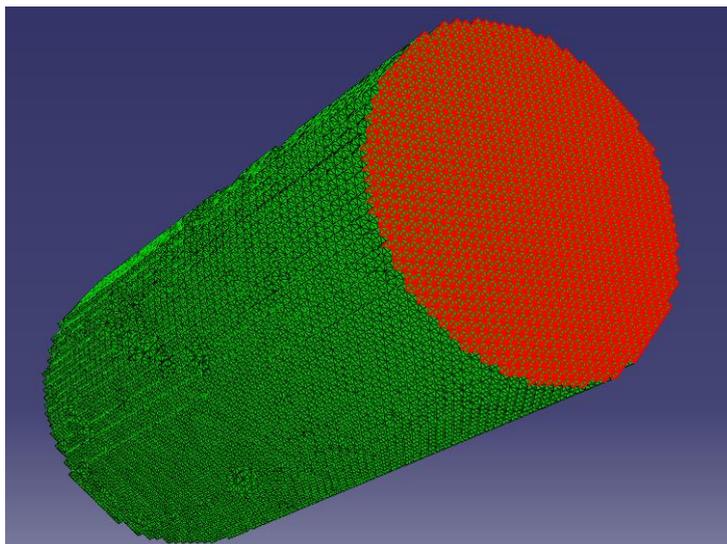


Figura 3.22 Corpo de prova MEF

3.2.4.3. Visualização e extração de resultados

As figuras abaixo mostram o corpo de prova do Travertino Romano 2 antes e depois do deslocamento. O corpo de prova representado é simulado com dois materiais com 85Gpa (80-255) para o primeiro material e 78Gpa (60-80) para o segundo material.

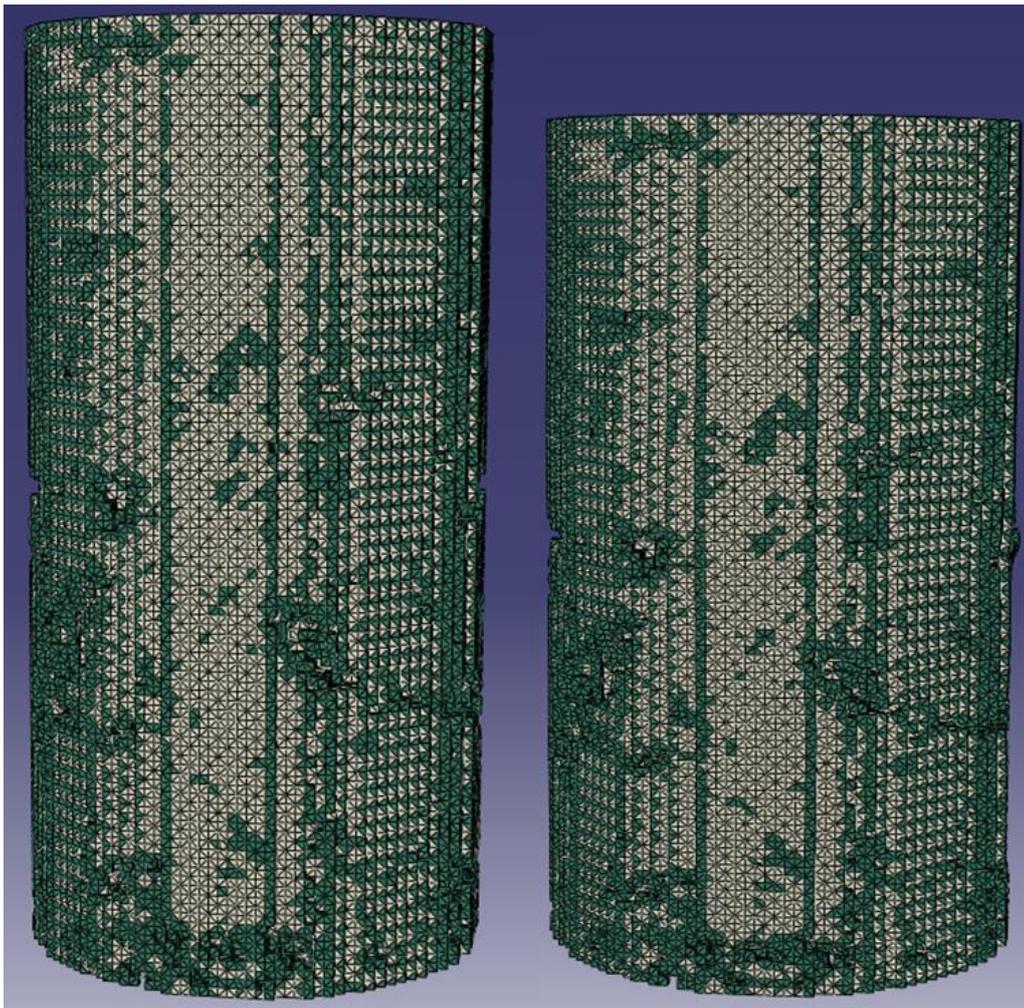


Figura 3.23 Corpo de prova antes e depois do deslocamento (figuras em sobrescala).

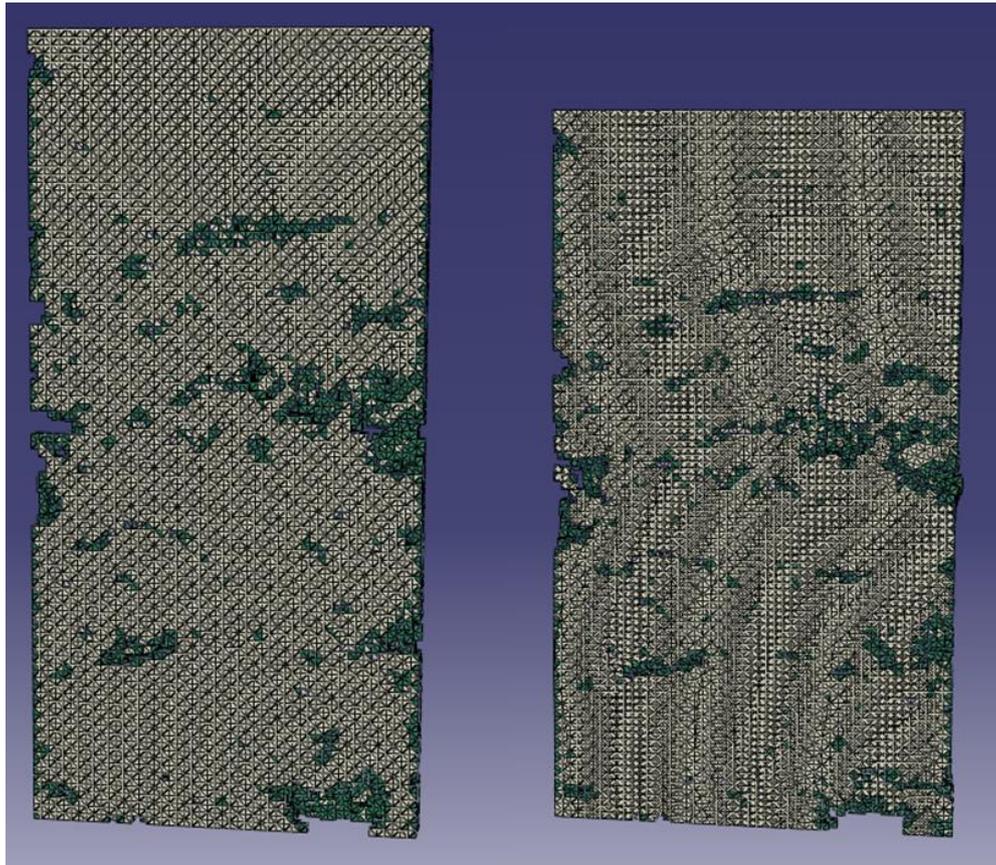


Figura 3.24 Corpo de prova(em corte) antes e depois do deslocamento (figuras em sobrescala).

No programa Abaqus o deslocamento vertical é chamado de U33, o programa divide o deslocamento em passos de tempo, e o valores são plotados na como figura abaixo e podem ser exportados em forma de tabela.

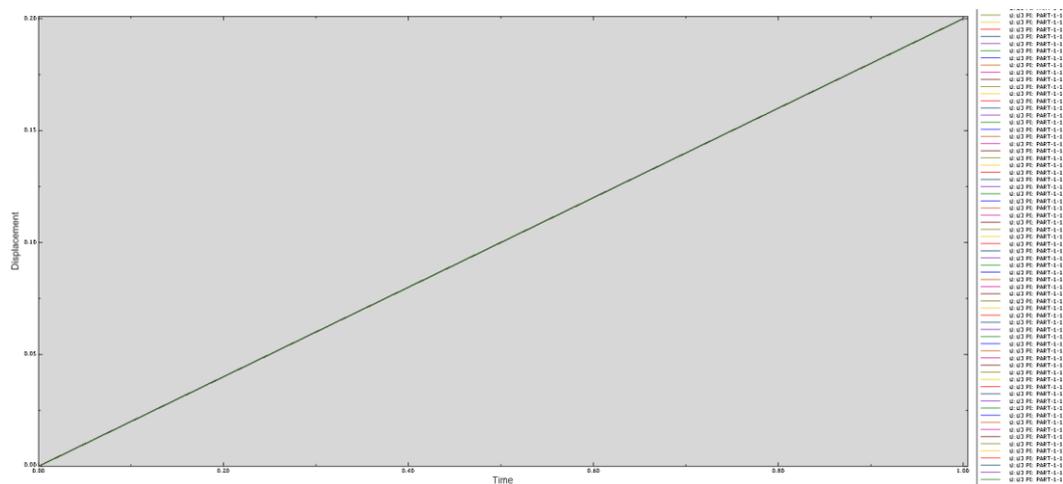


Figura 3.25 Gráfico dos deslocamentos.

O deslocamento é retirado do topo da amostra, assim como a tensão vertical que no programa é chamada de S33. Para a medição são retiradas a média das tensões no topo da amostra. A figura 3.26 mostra as tensões para cada elemento no topo da amostra e a figura 3.27 a média dessas tensões.

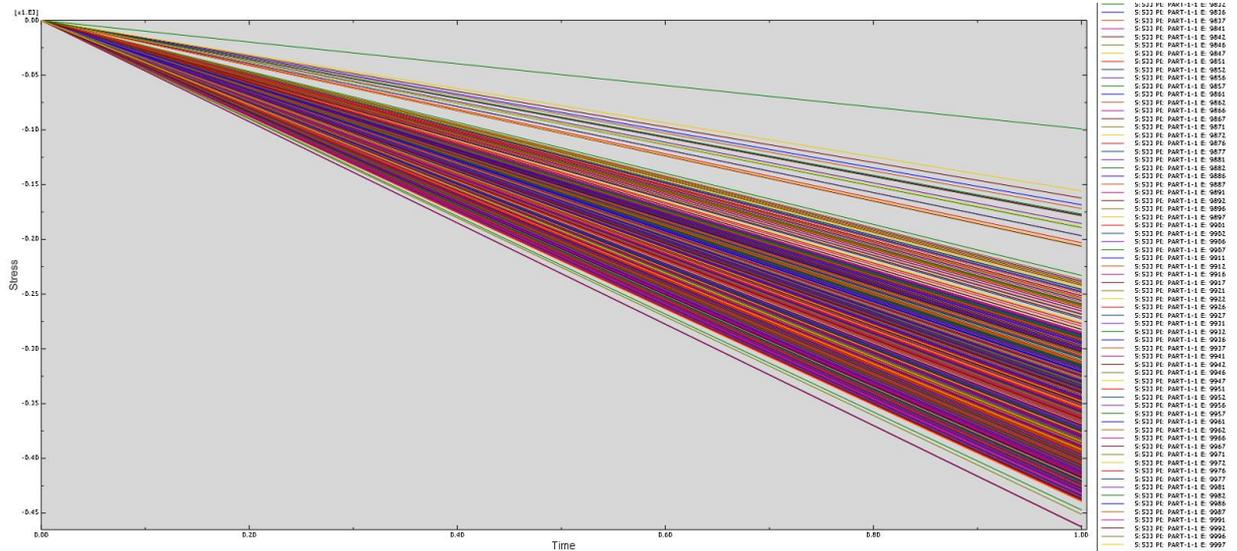


Figura 3.26 Tensões do topo do corpo de prova.

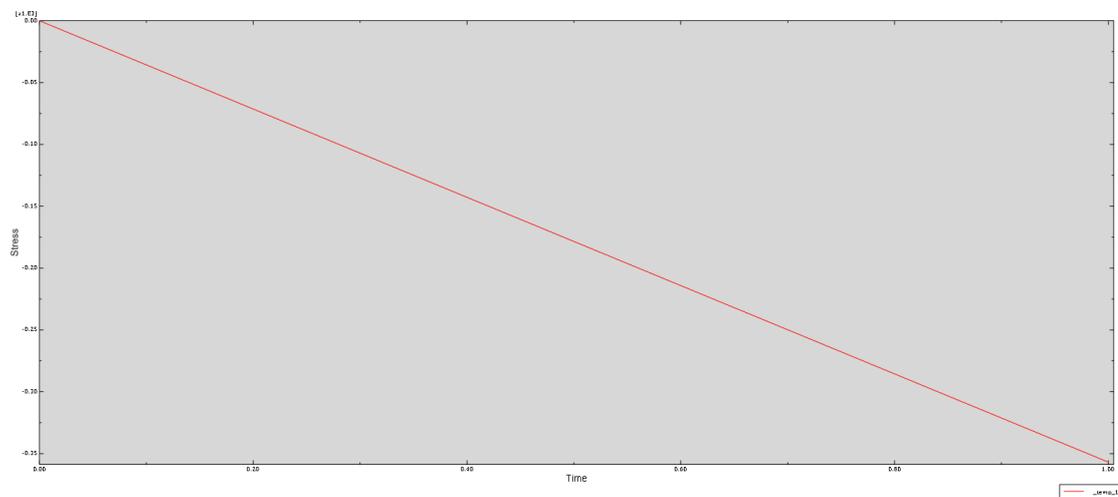


Figura 3.27 Média das tensões do corpo de prova.

Para o valor da deformação axial em cada passo de tempo é utilizada a fórmula do capítulo 2, que é a divisão do deslocamento (U_{33}) pela altura do corpo de prova (38,06mm para o travertino romano 2). Já o módulo de elasticidade é retirado da inclinação da reta do gráfico de tensão x deformação.

O coeficiente de Poisson é retirado da razão da média da deformação radial (ϵ_r) pela deformação axial (ϵ_{ax}).

| S33 | U33 | E33 |
|---------|-------|----------|
| 0 | 0 | 0 |
| 17,7289 | 0,01 | 0,000263 |
| 35,4578 | 0,02 | 0,000525 |
| 62,0511 | 0,035 | 0,00092 |
| 97,509 | 0,055 | 0,001445 |
| 132,967 | 0,075 | 0,001971 |
| 168,424 | 0,095 | 0,002496 |
| 203,882 | 0,115 | 0,003022 |
| 239,34 | 0,135 | 0,003547 |
| 274,798 | 0,155 | 0,004073 |
| 310,255 | 0,175 | 0,004598 |
| 345,714 | 0,195 | 0,005123 |
| 354,577 | 0,2 | 0,005255 |

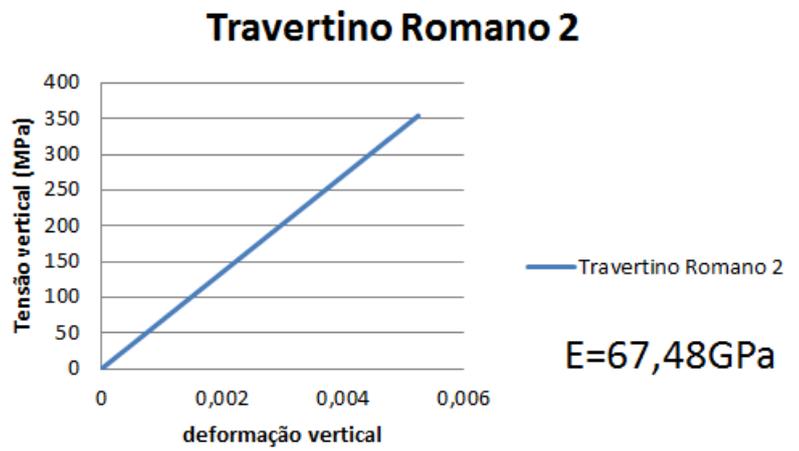


Figura 3.28 Obtenção do módulo de elasticidade.