



Ruby Lorena Hernández Pico

**Influência da microestrutura nas propriedades mecânicas
de rochas carbonáticas usando imagens 3D de
microtomografia de raios-X**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil do Departamento de
Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Sergio Augusto Barreto da Fontoura

Rio de Janeiro
Setembro de 2013



Ruby Lorena Hernández Pico

**Influência da microestrutura nas propriedades mecânicas
de rochas carbonáticas usando imagens 3D de
microtomografia de raios-X**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil do Departamento de
Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-
Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo
assinada.

Prof. Sergio Augusto Barreto da Fontoura

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Sidnei Paciornik

Departamento de Ciência dos Materiais Metalúrgica - PUC-Rio

Prof. Celso Romanel

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Dr. Erick Slis Raggio Santos

CENPES/PETROBRAS

José Eugenio Leal

Coordenador setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 09 de setembro de 2013

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Ruby Lorena Hernández Pico

Graduou-se em Engenharia de Petróleos na UIS (Universidad Industrial de Santander-Colômbia) em 2009. Durante a graduação, atuou como pesquisadora na área de geomecânica enfocada a predição de produção de areia em poços produtores de hidrocarbonetos no convenio UIS - ICP (Instituto Colombiano del Petróleo). Atualmente, pesquisadora do Grupo de Tecnologia e Engenharia de Petróleos GTEP-PUC-Rio, nas áreas de análise de estabilidade e caracterização de carbonatos.

Ficha Catalográfica

Hernández Pico, Ruby Lorena

Influência da microestrutura nas propriedades mecânicas de rochas carbonáticas usando imagens digitais 3D de microtomografia de raios-X / Ruby Lorena Hernández Pico; orientador: Sergio Augusto Barreto da Fontoura – 2013.

167 f. il. (color.); 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2013.

Incluí referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Microestrutura. 3. Imagens digitais. 4. Microtomografia. 5. Análise numérica. 6. Propriedades mecânicas. 7. Módulo de Young. I. Fontoura, Sergio Augusto Barreto da. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia III. Título.

CDD: 624

A meus incondicionais companheiros de luta
Mãe Maritza Pico A., pai Nazario Hernández F.,
Irmãos: Laura M. H. P., Danny F. H. P e
namorado Elkin O. Mantilla. J.

Agradecimentos

Em primeiro lugar a Deus, por seu amor, permissão, bondade e misericórdia; por acompanhar-me nas dificuldades e brindar-me a sabedoria para aprender com elas; por ter colocado e mantido em meu caminho pessoas realmente valiosas; por ensinar-me o verdadeiro valor das coisas simples, o verdadeiro significado da distancia e por brindar-me a força necessária para realizar meus sonhos.

Agradeço à minha mãe, Maritza Pico Ariza, meu grande exemplo de luta e perseverança, por seus inúmeros esforços e sacrifícios para que eu me tornasse a profissional que sou, por manter minha motivação nos momentos certos, por brindar-me seu amor, apoio, orações e companhia incondicional mesmo distante fisicamente. Por sempre ter um espaço para mim apesar das próprias dificuldades, você caminha comigo em todos os momentos. Obrigada por seu nobre ensinamento, você é minha mentora, minha guerreira e heroína. Admiro você, mãe.

Agradeço a meu pai, Nazario Hernández, por dar-me a fortaleza moral, por forjar meu caráter com mão firme na minha infância e adolescência, por ensinar-me a nunca desistir de meus sonhos, por mostrar-me o eterno amor que você sente por seus filhos, por sempre ter uma benção para mim, por dar-me exemplo da imensa

fê e ser meu guia espiritual, você é uma prova viva da existência dos milagres de Deus.

Gostaria de agradecer a meus irmãos por serem uma de minhas grandes motivações, por lembrar-me que nunca podemos desistir e que as dificuldades fazem os sonhos valer a pena. A minha irmã, Laura Hernández, obrigada por suas orações, amizade e companhia na distancia. A meu irmão por brindar-me sempre o carinho de um coração nobre e seus conselhos.

Gostaria de agradecer a meu querido namorado, Elkin O. Mantilla, você tem me ensinado coisas de valor incalculáveis, você me ensino o verdadeiro sentido do querer, de não desistir, obrigada por não desistir de mim, por acreditar no relacionamento a distancia. Obrigada por permitir-me conhecer um sonhador incansável, de criatividade admirável, um menino sobrevivente no homem imprevisível que você é. Sempre estarei grata pelo apoio e amor incondicional. Você é muito mais do que imagina para mim e das palavras escritas aqui.

Agradeço a minha família em geral por serem motivação para ser cada vez melhor. Agradeço especialmente a minha tia querida, Maria C. Hernández e a meu tio, Clodomiro Torres por serem apoios em etapas decisivas de minha vida.

Agradeço especialmente ao professor Sergio A. B. Fontoura pela valiosa oportunidade e pela confiança depositada em minhas capacidades e em minha pessoa desde nossa primeira conversa. Agradeço sua amizade, paciência, apoio e incentivo tanto acadêmico como pessoal. Obrigada por acolher-me e disponibilizar as ferramentas e infraestrutura necessária do GTEP para o desenvolvimento deste trabalho.

Gostaria de agradecer a Guilherme Lima Righetto por sua amizade, paciência, tempo, disponibilidade e entusiasmo, por compartilhar seu valioso conhecimento e suas brilhantes ideias durante esta dissertação. Sem você não teria sido possível.

Agradeço a Débora Pilotto por sua amizade, por compartilhar e transmitir-me seu conhecimento e aprendizado.

Agradeço a cada uma das personas do grupo de tecnologia e engenharia de petróleo (GTEP-PUC-Rio) por serem parte importante nesta ultima etapa de meu mestrado, por abrir as portas do grupo e acolher-me da melhor forma possível, sempre estarei grata com cada um de vocês.

Agradeço a Talita Miranda e a Vivian Marchesi pela amizade, seus conselhos foram parte vital para mim nesta etapa.

Agradeço a toda equipe do Laboratório de Processamento Digital de Imagens (LPDI). Especialmente ao professor Sidnei Paciornik por brindar-me seu conhecimento, o laboratório e por permiti-me assistir a suas excelentes aulas.

Agradeço a Rosimeria Silva e Álvaro Talavera pela ajuda e sua sincera amizade.

Gostaria de agradecer a Darwin Mateus e a Juan David por sua amizade e apoio mútuo. Sem dúvida uma excelente equipe Colombiana nesta etapa.

Agradeço a minha amiga, Karina Silva Salas, pelo acompanhamento e apoio mútuo desde a graduação.

Agradeço a todos meus amigos que, mesmo desde à distancia torcem por meu sucesso, especialmente a Alexander Martinez, por seu apoio, carinho e orientação incondicional.

Agradeço ao Departamento de Engenharia civil, a cada um dos professores que foram parte de minha formação.

Agradeço a Grupo de Tecnologia e Engenharia de Petróleo (GTEP-PUC-Rio) pela concessão do complemento de bolsa de mestrado.

Agradeço à PUC-Rio.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

Resumo

Hernández Pico, Ruby Lorena. Fontoura, Sergio Augusto Barreto. **Influência da microestrutura nas propriedades mecânicas de rochas carbonáticas usando imagens 3D de microtomografia de raios-X.** Rio de Janeiro, 2013. 167p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Reservatórios carbonáticos contêm entre 50 e 60% de petróleo e gás do mundo. No entanto, estas rochas têm apresentado problemas operacionais consideráveis durante as etapas de perfuração e produção. Tais problemas são originados pelas dificuldades na caracterização adequada destas rochas em função da complexa distribuição espacial de sua micro e macro estrutura. Enquanto ambas as escalas possuem importância no entendimento do comportamento de carbonatos, o presente trabalho trata da análise da microestrutura. Nesse âmbito, a proposta deste trabalho integra o processamento e análises de imagens digitais adquiridas mediante microtomografia de raios-X, elaboração de malhas de elementos finitos e simulação numérica de forma a prever propriedades elásticas, com o objetivo de correlacionar a microestrutura e o módulo de Young. Foram utilizadas imagens digitais de amostras de afloramento (travertinos) considerados como possíveis análogas a rochas carbonáticas de reservatório. A metodologia implementada permitiu obter sub-amostras que incluem uma gama de microestruturas e porosidades numa única amostra para assim simular numericamente o módulo de Young. Os resultados dos ensaios virtuais foram comparados com os resultados de ensaios reais executados em amostras da mesma rocha e dados encontrados na literatura. A aplicação da metodologia e os resultados obtidos indicam o potencial e as limitações atuais desta técnica. Conclui-se neste estudo que o valor do módulo de Young das amostras simuladas numericamente é afetado pela distribuição espacial, conectividade dos poros e pela microporosidade da rocha. Os valores encontrados no ensaio virtual tendem a serem superiores aos obtidos em ensaios reais devido à dificuldade de inserir, no modelo de micro estrutura, os contatos entre os grãos assim como regiões mais compressíveis não determinadas na aquisição das imagens.

Palavras-chave

Microestrutura; imagens digitais; microtomografia; análise numérica; propriedades mecânicas; módulo de Young.

Abstract

Hernandez Pico, Ruby Lorena. Fontoura, Sergio Augusto Barreto (Advisor). **Influence of microstructure on mechanical properties of carbonate rocks using 3D digital images of X-ray microtomography.** Rio de Janeiro, 2013. 167p. M.SC. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Carbonate reservoirs contain between 50 and 60% of oil and gas in the world. However, these rocks have presented considerable operational problems during drilling and production steps. Such problems are caused by the difficulties in proper characterization of these rocks due the complex spatial distribution of their micro and macrostructure. Although both scales have importance in understanding the behavior of carbonates, the present work deals with the analysis of the microstructure. In this context, the proposal of this work integrates the processing and analysis of digital images acquired by x-ray microtomography, finite element mesh generation and numerical simulations to predict elastic properties in order to correlate the microstructure and the Young's modulus. We used digital images of samples of outcrop (travertine) considered as a possible analogous to carbonate rocks of reservoir. The methodology implemented allowed get sub-samples that include a range of microstructures and porosities in a single sample to determine numerically the Young's modulus. The virtual test results were compared with laboratory test results performed on samples from the same rock and data found in the literature. The application of the methodology and the results obtained indicate the potential and current limitations of this technique. This study concluded that the value of Young's modulus of numerically simulated samples is affected by spatial distribution, pore connectivity and microporosity of these rocks. The values found in the virtual test tend to be higher than those obtained in laboratory tests due to the difficulty of inserting, in the model of micro structure, contacts between the grains as well as more compressible regions not certain on the acquisition of the images.

Keywords

Microstructure; digital imaging; microtomography; numerical analysis; mechanical properties; Young's modulus.

Sumário

1 Introdução	19
1.1. Motivação e objetivo	19
1.2. Estrutura da dissertação	20
2 Revisão Bibliográfica	21
2.1. Importância das rochas carbonáticas	21
2.2. Definição de rochas carbonáticas	21
2.2.1. Rochas carbonáticas detríticas	22
2.2.2. Rochas carbonáticas orgânicas	24
2.3. Processos de formação: Sedimentação e diagênese	25
2.4. Reservatórios carbonáticos	28
2.4.1. Formação de reservatórios carbonáticos	30
2.5. Classificação das rochas carbonáticas	33
2.6. Principais características das rochas carbonáticas	34
2.6.1. Características geológicas e petrofísicas	35
2.6.2. Características mecânicas	39
2.6.3. Microestrutura, propriedades elásticas e mecânicas.	44
2.7. Técnicas de estudo das rochas carbonáticas	49
2.7.1. Microtomografia	50
2.7.2. Processamento de imagens e análise digital de imagens (PADI)	52
2.7.3. Geração de malhas a partir de volumes tridimensionais	58
2.7.4. Análise de elementos finitos	63
2.7.5. Rochas carbonáticas sob o ponto de vista de simulação	68
3 Materiais e métodos	74
3.1. Métodos	74
3.2. Definição de amostras	75
3.2.1. Estudos preliminares	75
3.3. Aquisição de imagens	86
3.4. Processamento e análises	88
3.5. Geração de malhas	95
3.6. Aplicação de análise de Elementos Finitos	98

3.7. Avaliação de resultados	102
4 Resultados	104
4.1. Aquisição das amostras	104
4.2. Processamento e análises de imagens	106
4.2.1. Sub - amostragem em imagens digitais	106
4.2.2. Pré-processamento, processamento, análise e visualização no CTAN	108
4.2.3. Pré-processamento, processamento, análises e visualização no ScanIP.	111
4.3. Geração das malhas no volume 3D	120
4.4. Modelo computacional e método de elementos finitos	127
4.5. Análise e avaliação de resultados	135
5 Considerações finais	150
5.1. Conclusões	150
5.2. Recomendações	153
Referências Bibliográficas	154
Apêndice I Sub-amostragem digital e modelos tridimensionais rocha-poro.	163

Lista de figuras

Figura 2-1. Principais grãos aloquímicos das rochas carbonáticas.	23
Figura 2-2. Rochas carbonáticas orgânicas.	24
Figura 2-3. Diagrama de pressão-temperatura e regimes de diagênese.	26
Figura 2-4. Origem dos reservatórios carbonáticos.	32
Figura 2-5. Fase inicial da formação do Atlântico Sul.	33
Figura 2-6. Distribuição de rochas carbonáticas.	33
Figura 2-7. Relação: tamanho do grão, seleção e porosidade em areias não consolidadas.	36
Figura 2-8. Estrutura de deposição em rochas detríticas.	38
Figura 2-9. Influência das propriedades fundamentais sobre a porosidade.	38
Figura 2-10. Módulo de Young frente à porosidade.	40
Figura 2-11. Propriedades mecânicas e ultra-sons com porosidade ..	43
Figura 2-12. Resistência para travertinos bandeados, direção de bandas paralelas e perpendiculares à direção da carga.	44
Figura 2-13. Curvas tensão-deformação registrado para travertinos (ALHTR, CLASTR e ALBTR) e tufo (GODTUF).	44
Figura 2-14. Microestrutura, dependência e influência do material.	45
Figura 2-15. Fatores que controlam as propriedades físicas das rochas carbonáticas reservatórios.	46
Figura 2-16. Módulo de Young medio frente ao algoritmo de raio medio de poro.	46
Figura 2-17. Comportamento elástico - plástico de rochas carbonáticas em função de a dissolução e da temperatura.	47
Figura 2-18. Curvas de UCS em função de V_p . Curvas B e E definidas para calcários.	48
Figura 2-19. Curvas de UCS em função de V_p , diversas litologias e correlações para um mesmo tipo de rocha.	48
Figura 2-20. Fluxograma do processo de microtomografia de raios-X.	51
Figura 2-21. Sequência padrão do processamento e análises de imagens.	53
Figura 2-22. Procedimentos de pré-processamento no domínio do espaço real.	54
Figura 2-23. Operações pontuais.	55
Figura 2-24. Operações Locais.	55

Figura 2-25. Pós-processamento: Extração de atributos.....	57
Figura 2-26. Etapas gerais de geração de malhas tridimensionais a partir de dados de imagens.....	59
Figura 2-27. Cubos de triangulação.....	61
Figura 2-28. Resultados de propriedades elásticas para carbonatos homogêneos sob três condições de saturação.....	71
Figura 2-29. Comparação entre módulos volumétrico e cisalhante experimental e simulado (FEM e DEM).....	73
Figura 3-1. Metodologia geral desenvolvida.....	74
Figura 3-2. Amostras coletadas de travertino da bacia de Itaboraí.....	76
Figura 3-3. Placas de travertino Romano.	77
Figura 3-4. Placas de travertino Turco.....	77
Figura 3-5. Difração de raios-X, Travertino de Itaboraí: a) TRI-01, b) TRI-03, c) TRI-09.....	79
Figura 3-6. Corpos de prova antes e depois do ensaio: (a) TRI-04 e (b) TRI-05 (04).	82
Figura 3-7. Contato entre os grãos da amostra TRI-05.....	82
Figura 3-8. Difração de raios-X: a) Travertino Romano TRR-01 e b) Travertino Turco TRT-01.....	84
Figura 3-9. Amostras de travertinos: a) TRI-09, b) TRR-01, c) TRT-01.....	86
Figura 3-10. Microtomógrafo SkysCan 1173 utilizado no programa experimental: a) vista frontal do equipamento e b) porta amostras.	88
Figura 3-11. Metodologia para processamento e análises das imagens digitais dos travertinos microtomografados.	89
Figura 3-12. Parâmetros específicos utilizados do programa CTAN. Φ : Porosidade.	92
Figura 3-13. Parâmetros específicos utilizados do programa ScanIP. Φ : Porosidade.	94
Figura 3-14. Amostra de rocha submetida à compressão uniaxial.....	98
Figura 3-15. Curva Tensão-deformação.....	100
Figura 3-16. Fluxograma de etapas de simulação de aplicação de deslocamento.	102
Figura 4-1. Amostra irregular Travertino Romano. a) Fotografia da amostra. b) Imagem 3D da amostra microtomografada.....	105
Figura 4-2. Amostra irregular Travertino Turco. a) Fotografia da amostra. b) Imagem 3D da amostra microfotografada.....	105

Figura 4-3. Amostra irregular Travertino de Itaboraí. a) Fotografia da amostra. b) Imagem 3D da amostra microfotografada.	105
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.	106
Figura 4-5. Fissura presente na amostra de travertino turco microtomografada. Imagem 2D.	107
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.	108
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.	109
Figura 4-8. Comparação dos filtros de ScanIP, TRT, imagem 2D: a) Imagem original, b) Bilateral Filter, c) Mean Filter, d) Median Filter.	112
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.	112
Figura 4-10. Segmentação da microestrutura no programa ScanIP. TRR-2. Vista semitransparente: a) segmentação da rocha, b) segmentação dos poros.	113
Figura 4-11. Segmentação da microestrutura no programa ScanIP. TRT-3: a) Imagem original. b) Imagem binária ressaltando poros e rocha.	113
Figura 4-12. Modelo da amostra do travertino de Itaboraí no programa ScanIP . a) Fotografia de amostra real. b) Modelo da amostra, em 3D.	115
Figura 4-13. Volumes 3D de sub-amostra dos três travertinos: a) TRI-1, b) TRR-1, c) TRT-1.	115
Figura 4-14. Volumes 3D das sub-amostras: a) TRI-1, b) TRR-1, c) TRT-1.	116
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.	117
Figura 4-16. Histograma de frequência de diâmetros de poros das sub-amostras de travertino Romano.	119
Figura 4-17. Histograma de frequência de diâmetros de poros das sub-amostras de travertino Turco.	119

Figura 4-18. Visualização 3D sub-amostra TRT-3. Em vermelho, poros vugurales, em azul, poros tipo intergranular.....	120
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.....	122
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 FE Free, 9.1e6 elementos.	123
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.....	124
Figura 4-22. Curva tensão-deformação: TRI-1.....	129
Figura 4-23. Curva tensão-deformação: TRT-3, “resample” 80.	130
Figura 4-24. Curva tensão-deformação: TRI-3, “resample” 60.	130
Figura 4-25. Curva tensão-deformação: TRI-3, “resample” 50.	131
Figura 4-26. Curva tensão-deformação: TRR-1.	131
Figura 4-27. Curva tensão-deformação: TRR-2	132
Figura 4-28. Curva tensão-deformação: TRR-3.	132
Figura 4-29. Curva tensão-deformação: TRT-1.....	133
Figura 4-30. Curva tensão-deformação: TRT-2.....	133
Figura 4-31. Curva tensão-deformação: TRT-3.....	134
Figura 4-32. Curva tensão-deformação: TRT-4.....	134
Figura 4-33. Curva tensão-deformação: TRT-5.....	135
Figura 4-34. Comparativo: curvas tensão-deformação: TRI-1. Curvas vermelha e lilás obtidas em laboratório, curva azul obtida em simulação numérica.....	136
Figura 4-35. Metodologia proposta para trabalhos futuros.	137
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.	138
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.	139
Figura 4-38. Comparativo: Curvas tensão-deformação para TRT-3 com manipulação de resolução.	140
Figura 4-39. Comparativo: Curvas Tensão-Deformação para sub-amostras de travertino Romano.	141

Figura 4-40. Comparativo: Curvas Tensão-Deformação para sub-amostras de travertino Turco.....	141
Figura 4-41. Visualização 3D do TRI-1: a) modelo semitransparente da rocha antes da simulação, b) modelo da rocha após a simulação.	142
Figura 4-42. Visualização 3D do TRR-1: a) modelo semitransparente da rocha antes da simulação, b) modelo da rocha após a simulação.	142
Figura 4-43. Visualização 3D do TRR-2: a) modelo semitransparente da rocha antes da simulação, b) modelo da rocha após a simulação.	143
Figura 4-44. Visualização 3D do TRR-3: a) modelo semitransparente da rocha antes da simulação, b) modelo da rocha após a simulação.	143
Figura 4-45. Visualização 3D do TRT-1: a) modelo semitransparente da rocha antes da simulação, b) modelo da rocha após a simulação.	145
Figura 4-46. Visualização 3D do TRT-2: a) modelo semitransparente da rocha antes da simulação, b) modelo da rocha após a simulação.	145
Figura 4-47. Visualização 3D do TRT-3: a) modelo semitransparente da rocha antes da simulação, b) modelo da rocha após a simulação.	146
Figura 4-48. Visualização 3D do TRT-4: a) modelo semitransparente da rocha antes da simulação, b) modelo da rocha após a simulação.	146
Figura 4-49. Visualização 3D do TRT-5: a) modelo semitransparente da rocha antes da simulação, b) modelo da rocha após a simulação.	147
 Anexo I. 1. Sub-amostragem: a) Imagem 3D da amostra irregular do travertino Romano microtomografado. b) Sub-amostra TRI-1.	163
Apêndice I. 2. Sub-amostragem: a) Imagem 3D da amostra irregular do travertino Turco microtomografado; b), c), d) e e) Sub-amostras cilíndricas.	164
Apêndice I. 3. Modelos tridimensionais (volume cilíndrico) das sub-amostras do travertino Turco.	165
Apêndice I. 4. Visualização 3D, sub-amostras TRR-2 e TRR-3 a) Visualização externa modelos rocha e poros, b) visualização do sistema poroso interno.	166
Apêndice I. 5. Visualização 3D, sub-amostras TRT-3, TRT-4 e TRT-5 a) Visualização externa modelos rocha e poros, b) visualização do sistema poroso interno.	167

Lista de tabelas

Tabela 2.1. Escalas e técnicas no estudo estrutural.	50
Tabela 2.2. Comparação de módulos simulados e medidos. Usando o modelo Hetzian.	71
Tabela 2.3. Comparação de módulos simulados e medidos. Usando o modelo Hookean.	72
Tabela 3.1. Resultados dos ensaios de compressão simples nos corpos de prova de travertino de Itaboraí.	80
Tabela 3.2. Resultados dos constituintes presentes nas lâminas petrográficas de travertinos romanos.	83
Tabela 3.3. Resultados dos constituintes presentes nas lâminas petrográficas de travertinos turcos.	83
Tabela 3.4. Faixa de variação de propriedades índice para TRR e TRT.	85
Tabela 3.5. Resultados da análise da porosidade realizada nos modelos 3D gerados a partir das imagens de microtomografia.	85
Tabela 3.6. Resultados dos ensaios de esclerometria para travertinos Romano e Turco.	86
Tabela 3.7. Parâmetros utilizados no microtomógrafo para as amostras analisadas.	87
Tabela 3.8. Características de imagens bidimensionais de microtomografia.	87
Tabela 3.9. Parâmetros de descrição e avaliação da qualidade de elementos tetraédricos.	96
Tabela 3.10. Módulos, densidades e velocidades de onda da Calcita.	103
Tabela 3. 11. Módulos Volumétricos, de cisalhamento, Young e coeficiente de Poisson da Calcita.	103
Tabela 4.1. Dimensões das sub-amostras cilíndricas para os travertinos.	107
Tabela 4.2. Análises de porosidade no programa CTAN para imagens digitais das amostras de travertinos.	110
Tabela 4.3. Análises de porosidade no programa CTAN para imagens digitais das amostras de travertinos.	110
Tabela 4.4. Análise de porosidade no programa CTAN para sub-amostras cilíndricas.	111
Tabela 4.5. Análises de porosidade no programa ScanIP para sub-amostras cilíndricas.	114

Tabela 4.6. Informação de parâmetros de malhas geradas para os sub-amostras a partir de algoritmos FEGrid e FEFree.	125
Tabela 4.7. Informação de parâmetros de malhas geradas para as sub-amostras a partir do algoritmo FEGrid com manipulação da resolução.	126
Tabela 4.8. Manipulação da resolução: aplicação de “Resample” para TRR-1.	127
Tabela 4.9. Propriedades do principal componente mineralógico: Calcita.	128
Tabela 4.10. Deslocamentos calculados para as sub-amostras.	128
Tabela 4.11. Dados obtidos para os modelos do TRT-3 com manipulação da resolução.	140
Tabela 4.12. Discrepância nos resultados para os modelos do TRT-3.	140
Tabela 4.13. Porcentagens de porosidade e módulo de Young para sub-amostras do travertino Romano.	144
Tabela 4.14. Porcentagens de porosidade e módulo de Young para sub-amostras do travertino Turco.	144
Tabela 4.15. Avaliação de resultados: Comparativo dados obtidos por método de elementos finitos com dados de métodos experimentais e literatura.	147
Tabela 4.16. Tempo requerido para a simulação numérica das sub-amostras dos três tipos de travertinos com manipulação de resolução.	149