



Gustavo Henrique Oliveira Sobreira

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

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1221957/CA

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: Sergio Augusto Barreto da Fontoura

Rio de Janeiro
Janeiro de 2015



Gustavo Henrique Oliveira Sobreira

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

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.

Sergio Augusto Barreto da Fontoura

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Dr. Erick Slis Raggio Santos

CENPES / PETROBRAS

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico / PUC-Rio

Rio de Janeiro, 21 de Janeiro de 2015.

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

Gustavo Henrique Oliveira Sobreira

Graduou-se em Engenharia de petróleo pela Universidade Gama Filho em 2011. Ingressou no curso de mestrado em engenharia civil (geotecnia) em 2012 atuando na área de mecânica das rochas e engenharia de petróleo. Desenvolveu pesquisa sobre a caracterização geomecânica de travertinos.

Ficha Catalográfica

Sobreira, Gustavo Henrique Oliveira

Avaliação de propriedades elásticas de rochas carbonáticas a partir de análise microestrutural / Gustavo Henrique Oliveira Sobreira ; orientador: Sergio Augusto Barreto da Fontoura. – 2015.

120 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2015.

Inclui bibliografia

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 Civil. III. Título.

CDD: 624

Para meus pais, minha irmã e amigos.

Agradecimentos

Ao meu orientador, professor Sergio Fontoura, pelo seu constante apoio, incentivo e ensinamentos compartilhados durante esse período. Agradeço pela oportunidade de realizarmos este trabalho.

Ao professor Sidnei Paciornik pelo ensinamento no processamento de imagem.

Aos meus pais pelo apoio durante a minha vida toda, pela confiança nas minhas decisões e por me ensinarem a valorizar a família. A minha irmã Beatriz por sempre estar disposta a me ajudar e aos meus amigos da PUC-Rio que estiveram do meu lado durante essa caminhada.

Aos professores da Engenharia Civil da PUC-Rio, pelas excelentes aulas ministradas.

Ao GTEP, Grupo de Tecn. de Eng. de Petróleo do departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, e todos os seus funcionários.

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Resumo

Sobreira, Gustavo Henrique Oliveira; Fontoura, Sergio Augusto Barreto da. **Avaliação de propriedades elásticas de rochas carbonáticas a partir de análise microestrutural**. Rio de Janeiro, 2015. 120p. 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 suas 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, 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 subamostras que incluem uma gama de microestruturas e porosidades numa única amostra para assim simular numericamente o módulo de Young. Conclui-se neste estudo que os poros maiores (vuggys) são os principais responsáveis pelo comportamento do material quando o mesmo é carregado, e também a influência da estrutura porosa nos resultados, foi possível observar que a posição dos poros afeta o módulo de elasticidade do corpo de prova.

Palavras-chave

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

Abstrac

Sobreira, Gustavo Henrique Oliveira; Fontoura, Sergio Augusto Barreto da (Advisor). **Evaluation of elastic properties of carbonatic rocks from microstructural analysis**. Rio de Janeiro, 2015. 120p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Carbonate reservoirs contain between 50 and 60 % of oil and gas reserves in the world. However, these rocks have presented considerable operating problems during the phases of drilling and production. Such problems are originated by the difficulties in the proper characterization of these rocks due to the complex spatial distribution of its micro and macro structure. While both scales have importance on the carbonate behavior understanding, this paper deals with the analysis of the microstructure. In this context, the aim of this work is part of the processing and digital image analysis, mesh preparation and finite element numerical simulation to predict elastic properties, in order to correlate the microstructure and the Young's modulus. Using digital images of outcrop samples (travertine) considered as possible analogous to carbonate rocks reservoir. The methodology implemented afforded sub-samples that include a range of porosities and microstructures for a single sample well numerically simulate the Young's modulus. It is concluded in this study that the larger pores (vuggys) are mainly responsible for the behavior of the material when it is loaded, and also the influence of the porous structure in the results, it was observed that the position of pores affects the modulus of elasticity of sample.

Keywords

Microstructure, digital images, microtomography, numerical analysis, mechanical properties, Young's modulus.

SUMÁRIO

1	Introdução	15
1.1.	Objetivo e Motivação	16
1.2.	Estrutura da dissertação	17
2	Revisão bibliográfica	18
2.1.	Rochas Carbonáticas	18
2.1.1.	Classificação das rochas carbonáticas	22
2.1.2.	Processos de Formação	24
2.1.3.	Travertinos	25
2.1.4.	Porosidade e comportamento mecânico	26
2.2.	Processamento e Análise Digital de Imagens	32
2.2.1.	Aquisição da imagem	32
2.2.2.	Pré-processamento	39
2.2.3.	Extração de Atributos	42
2.3.	Métodos dos elementos finitos	44
2.3.1.	Geração de malhas tridimensionais	46
2.3.2.	Análise de elementos finitos	48
2.4.	Modelo Elástico	49
2.5.	Ensaio de compressão simples ou uniaxial	50
2.5.1.	Preparação dos corpos de prova	51
2.5.2.	Ensaio	52
2.6.	Efeito de escala	54
3	Materiais e Métodos	56
3.1.	Materiais utilizados	56
3.2.	Metodologia utilizada	59
3.2.1.	Processamento de imagens	60
3.2.2.	Extração da porosidade	65
3.2.3.	Geração de malhas	68
3.2.4.	Elementos finitos	72

4	Resultados	80
4.1.	Porosidade	80
4.2.	Malhas geradas	85
4.3.	Resultados da simulação	87
4.3.1.	Simulação com um material	87
4.3.2.	Simulação com dois materiais	89
4.3.3.	Simulação com quatro materiais	90
4.4.	Análise e avaliação dos resultados	91
4.4.1.	Comparação com outros autores	95
4.4.2.	Influência da estrutura porosa no módulo de elasticidade	96
5	Considerações finais	100
5.1.	Conclusões	100
5.2.	Recomendações	101
	Bibliografia	102
	APÊNDICE I	105

Lista de Figuras

Figura 1.1 Amostras de poço.....	16
Figura 2.1 Fábrica de carbonatos.....	19
Figura 2.2 Principais elementos componentes das rochas carbonáticas.....	20
Figura 2.3 Principais Grãos.	21
Figura 2.4 Classificação de Dunham.....	23
Figura 2.5 Classificação de Embry e Klovan	24
Figura 2.6 Classificação da porosidade de Choquette & Pray (1970). (Fonte: Modificado Scholle & Scholle, 2003).	28
Figura 2.7 Módulo de elasticidade x porosidade (Gardner et al, 2010).	30
Figura 2.8 Módulo de elasticidade x porosidade (Pilotto, 2011 e Palchik, 2010).	31
Figura 2.9 Fluxo de trabalho (imagens).	32
Figura 2.10 Matriz de uma imagem.....	33
Figura 2.11 Pixel e Voxel.....	33
Figura 2.12 Esquema do sistema Tomográfico.	34
Figura 2.13 Princípio da formação da imagem tomográfica.	35
Figura 2.14 Microtomógrafo SkysCan 1173 utilizado no programa experimental: a) vista frontal do equipamento e b) porta amostras. (Pilotto, 2011).	36
Figura 2.15 Resolução.	37
Figura 2.16 Resolução e intensidade.	38
Figura 2.17 Histograma de imagem.	38
Figura 2.18 Operação local.....	39
Figura 2.19 Operação Geométrica.....	40
Figura 2.20 Segmentação.	41
Figura 2.21 Floodfill.....	42
Figura 2.22 Conectividade (imagens 2D).....	43
Figura 2.23 Ferets a) Ferets mínimo b) Ferets máximo.	43
Figura 2.24 Contexto de um problema de MEF adaptado de Bathe, 1982.....	45
Figura 2.25 Tetraedros e hexaedros.....	47
Figura 2.26 Ensaio uniaxial.	52
Figura 2.27 Corpo de prova no ensaio.....	52
Figura 2.28 Diagrama tensão (σ) – deformação (ϵ).....	54

Figura 2.29 Efeito escala Adaptado de Hoek & Brown (1980).	55
Figura 3.1 Travertino de Itaboraí. a) Real b) Imagem.	56
Figura 3.2 Travertino romano. a) Real b) Imagem.	57
Figura 3.3 Travertino Turco. a) Real b) Imagem.	57
Figura 3.4 Sub amostragem digital: a) Amostra para ensaio de compressão simples. b) Análise digital da geometria da amostra e c) Subamostragem. ..	58
Figura 3.5 Fluxo de trabalho.	60
Figura 3.6 Corte.	61
Figura 3.7 Mediana e média.	61
Figura 3.8 Efeito dos Filtros a) Sem filtro b) Mean c) sigma d) Median.	63
Figura 3.9 Limiarização manual.	63
Figura 3.10 Reamostragem.	64
Figura 3.11 Floodfill.	65
Figura 3.12 Extração da porosidade.	66
Figura 3.13 Extração da porosidade.	66
Figura 3.14 Informação dos poros.	67
Figura 3.15 Visualização 3D.	68
Figura 3.16 Definição da quantidade de materiais.	71
Figura 3.17 Corte da amostra gerada no Scan IP.	71
Figura 3.18 Fluxo de trabalho MEF.	72
Figura 3.19 Sistema de unidades.	73
Figura 3.20 Módulos Volumétricos, de cisalhamento, Young e coeficiente de Poisson da Calcita Adaptado de: Zhao, et al.(2009).	73
Figura 3.21 Corte do TR3 (2materiais (a))	74
Figura 3.22 Corpo de prova MEF.	75
Figura 3.23 Corpo de prova antes e depois do deslocamento (figuras em sobrescala).	76
Figura 3.24 Corpo de prova(em corte) antes e depois do deslocamento (figuras em sobrescala).	77
Figura 3.25 Gráfico dos deslocamentos.	77
Figura 3.26 Tensões do topo do corpo de prova.	78
Figura 3.27 Média das tensões do corpo de prova.	78
Figura 3.28 Obtenção do módulo de elasticidade.	79
Figura 4.1 Travertino de Itaboraí. Travertino Romano e Travertino Turco	80

Figura 4.2 Travertinos Romanos.	81
Figura 4.3 Travertinos Turcos.	82
Figura 4.4 Classificação de Knackstedt.....	83
Figura 4.5 Malha para um material.	85
Figura 4.6 Malha para dois materiais (a) e (b).	86
Figura 4.7 Malha para dois materiais (c).....	86
Figura 4.8 Malha para quatro materiais.....	87
Figura 4.9 Tensão- Deformação do Travertino de Itaboraí.	88
Figura 4.10 Módulo de Elasticidade x Porosidade (original e reamostragem).	92
Figura 4.11 Gráfico com a influência de cada material.....	92
Figura 4.12 Gráfico com a influência da proporção dos materiais.....	93
Figura 4.13 Gráfico comparando resultados de dois materiais com quatro materiais.	93
Figura 4.14 Gráfico do coeficiente de Poisson de todas as amostras.	94
Figura 4.15 Gráfico do módulo de elasticidade de todas as amostras.	94
Figura 4.16 Gráfico com os valores encontrados no presente trabalho e trabalho de Garder (2010)	95
Figura 4.17 Gráfico com valores encontrados em ensaios numéricos e laboratório.	95
Figura 4.18 Valores do módulo de elasticidade para a mesma porosidade.....	96
Figura 4.19 Valores do módulo de elasticidade para uma faixa de porosidade. ...	97
Figura 4.20 Travertino Turco 5 Travertino Turco 4 Travertino Turco 2.	98
Figura 4.21 Variação dos valores encontrados na literatura e no presente trabalho.	99

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para as amostras analisadas. (Pilotto, 2011)	36
Tabela 2.2 Características das imagens bidimensionais procedentes do processo de microtomografia para os travertinos.....	37
Tabela 3.1 Dimensões e resolução das subamostras.	58
Tabela 3.2 Classificação de poros de Knackstedt.....	67
Tabela 3.3 Tipos de manchas geradas no <i>Scan IP</i>	69
Tabela 3.4 Número de elementos gerados para cada sub amostra.	70
Tabela 3.5 Dados de entrada em relação a intensidade do material.	73
Tabela 4.1 Cinco poros com maior volume, média do volume de poros, desvio padrão e menor poro.	83
Tabela 4.2 Porosidade encontradas no trabalho de Pico (2013) e no presente trabalho.	84
Tabela 4.3 Diferença dos Travertinos Romanos 1 e 3.....	84
Tabela 4.4 Resumo das simulações com um material.	88
Tabela 4.5 Módulo de elasticidade de entrada para simulação com dois materiais.	89
Tabela 4.6 Resumo das simulações com dois materiais.....	89
Tabela 4.7 Módulo de elasticidade de entrada para simulação com quatro materiais.	90
Tabela 4.8 Resumo das simulações com quatro materiais.	90
Tabela 4.9 Volume total, média, desvio padrão e os dez maiores poros.....	97

Lista de Equações

Equação 2.1	40
Equação 2.2	40
Equação 2.3	48
Equação 2.4	48
Equação 2.5	49
Equação 2.6	49
Equação 2.7	49
Equação 2.8	50
Equação 2.9	50
Equação 2.10	53
Equação 2.11	53
Equação 2.12	54
Equação 2.13	54
Equação 4.1	54
Equação 4.2	91