



Débora Lopes Pilotto Domingues

Caracterização Geológica e Geomecânica de Travertinos.

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Sergio Augusto Barreto da Fontoura
Co-orientador: Franklin dos Santos Antunes



Débora Lopes Pilotto Domingues

Caracterização Geológica e Geomecânica de Travertinos.

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. A ser analisada pela Comissão Examinadora abaixo citada.

Prof. Sergio Augusto Barreto da Fontoura

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Franklin dos Santos Antunes

Co-orientador

Consultor Independente

Prof. Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Michéle Dal Toé Casagrande

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Rogério Schiffer de Souza

Cenpes - Petrobras

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 05 Agosto de 2011

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

Débora Lopes Pilotto Domingues

Graduou-se em Geologia, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, em 2009. Durante a graduação, atuou nas áreas de geologia de engenharia, mecânica das rochas e geofísica. Desenvolveu trabalhos de iniciação científica nos anos de 2005, 2006 e 2007. Ingressou no curso de mestrado em Engenharia Civil (Geotecnia) no ano de 2009, atuando na área de mecânica das rochas e engenharia do petróleo. Desenvolveu pesquisa sobre a caracterização geológica e geomecânica de travertinos.

Ficha Catalográfica

Domingues, Débora Lopes Pilotto

Caracterização geológica e geomecânica de travertinos / Débora Lopes Pilotto Domingues ; orientador: Sergio Augusto Barreto da Fontoura ; co-orientador: Franklin dos Santos Antunes. – 2011.

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

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2011.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Caracterização geológica. 3. Geomecânica. 4. Rochas carbonáticas. 5. Travertinos . I. Fontoura, Sergio Augusto Barreto da. II. Antunes, Franklin dos Santos III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Dedico este trabalho ao meu marido José Araruna.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela força e coragem para realizar este trabalho.

Ao meu orientador, Professor Sergio Fontoura, pelo seu constante apoio, incentivo e ensinamentos compartilhados durante esse período. Obrigada por facilitar toda a infraestrutura necessária para a realização dos ensaios de laboratório. Agradeço pela oportunidade de realizarmos este trabalho.

Ao meu co-orientador, Professor Franklin Antunes, pelos seus ensinamentos geológicos, conselhos, confiança, amizade e paciência ao longo de todo o trabalho.

Ao meu marido, José Araruna, pelo apoio, compreensão, paciência, incentivo, idéias e sugestões que auxiliaram na realização desta pesquisa.

Ao Professor e amigo, Renato Ramos, pela ajuda na coleta de amostras e por mostrar como a geologia é uma ciência apaixonante.

Aos professores Claudio Limeira, Julio Cesar, Emílio Barroso, Leonardo Borghi do Departamento de Geologia da UFRJ, pela ajuda, sugestões e realização de ensaios.

Ao Sandro Texeira da Serralheria da PUC-Rio pela preparação de corpos de prova ao longo deste trabalho. Agradeço ao Seu Pascoal por permitir a utilização de sua oficina.

Ao engenheiro Guilherme Vasquez e ao técnico Tagore, do Laboratório de Física de Rochas (Cenpes), pela realização dos ensaios de propagação de ondas ultrassônicas.

Ao engenheiro Luis Nascimento, do Cenpes, pela realização dos corpos de prova para a realização dos ensaios de resistência.

Ao Professor Sidnei Paciornik pela ajuda e ensinamentos no processamento das imagens de microtomografia, além do entusiasmo que contagia.

Agradeço ao engenheiro Erick Slis e ao técnico Soares, do Laboratório de Mecânica de Rochas, do Cenpes, pela realização dos ensaios de Scratch test.

Ao Maurício Monteiro, do Laboratório de Análise Térmicas da PUC-Rio, pela realização dos ensaios de termogravimetria.

Agradeço ao Ronaldo Pedro, do Laboratório de difração de raios-X da PUC-Rio pelas análises realizadas.

Agradeço ao Marcos Henrique pela realização e ensinamentos sobre processamento de imagens e pela boa vontade e tempo despendido.

Aos Professores Leonardo Borghi, Ricardo Tadeu, Inaya e à Milena, pela realização dos ensaios de microtomografia.

Ao Victor e Elizânio, do Laboratório de Interação Rocha Fluido do GTEP, pela realização dos ensaios de porosimetria de mercúrio, além do apoio, esclarecimentos.

Agradeço ao engenheiro Vinícius Machado e ao técnico Leornado, do Laboratório de Petrofísica Básica, pela realização dos ensaios de porosimetria à gás.

Ao engenheiro do ITUC, Allan Nogueira pela realização dos ensaios de compressão simples e pela ajuda na interpretação dos resultados.

Ao engenheiro Heitor Victor, do Laboratório de Petrofísica do Cenpes, pela realização dos ensaios de porosimetria e pelo conhecimento transmitido.

Agradeço aos técnicos do Laboratório de Geotecnia, Amaury, Josué e David pela ajuda nos ensaios de laboratório. À Mônica pela amizade e apoio. À Rita e a Fátima pela preocupação e carinho.

Ao Patrício Pires pela ajuda nos ensaios de esclerometria e pela amizade. E ao técnico Rogério Ross pelo auxílio em trabalhos de campo.

Aos amigos do “Ponto Geotécnico” Paula, Thiago Pessoa, Raquel, Ricardo, Eric, Thiago Carnavale e em especial a Carla Alessi pela sua amizade e constante apoio durante todo o mestrado.

Agradeço a minha irmã Isabel, minha mãe Diana e em especial ao meu pai Murilo pelo apoio e incentivo transmitido. Agradeço a todos do GTEP pelo convívio diário, e em especial à Vivian pelas sugestões, apoio e amizade.

Aos professores do departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio pelos conhecimentos transmitidos ao longo do curso de mestrado.

À Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas concedidas.

A todos que aqui não foram citados, mas que contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Resumo

Domingues, Débora Lopes Pilotto; Fontoura, Sergio Augusto Barreto (orientador); Antunes, Franklin dos Santos (co-orientador). **Caracterização Geológica e Geomecânica de Travertinos**. Rio de Janeiro, 2011. 315p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os reservatórios de hidrocarbonetos em rochas carbonáticas representam aproximadamente 50% da produção mundial de petróleo e tem por característica marcante sua complexidade, uma vez que são bastante heterogêneos. No Brasil, as rochas carbonáticas ganharam uma grande importância com a descoberta dos reservatórios carbonáticos do pré-sal. Entender e caracterizar estes reservatórios, que apresentam baixas taxas de penetração, exigirá grandes esforços em pesquisa e desenvolvimento. Uma pequena contribuição neste sentido é proporcionada nesta dissertação, onde três distintas rochas carbonáticas, o travertino romano, o travertino turco e o travertino de Itaboraí, foram caracterizadas geológica- e geomecanicamente. O programa experimental consistiu na caracterização mineralógica, química, textural e diagenética, bem como na realização de ensaios de resistência e de porosidade. De posse dos resultados do programa experimental buscou-se correlações entre os índices/propriedades/parâmetros determinados. Verificou-se que a resistência à compressão simples dos materiais é diretamente proporcional, a sua densidade, a sua velocidade de propagação de ondas e ao índice esclerométrico; e inversamente proporcional a sua porosidade. Constatou-se ainda que a velocidade de propagação de ondas dos materiais é diretamente proporcional a sua densidade e inversamente proporcional a sua porosidade.

Palavras-chave

Caracterização geológica geomecânica; Rochas carbonáticas; Travertinos.

Abstract

Domingues, Débora Lopes Pilotto; Fontoura, Sergio Augusto Barreto (advisor); Antunes, Franklin dos Santos (co-advisor). **Geological and Geomechanical Characterization of Travertines**. Rio de Janeiro, 2011. 315p. M.Sc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Hydrocarbon reservoirs in carbonate rocks represent circa 50% of all oil produced worldwide. Those reservoirs are very complex since they are quite heterogeneous. In Brazil, carbonate rocks gained a great importance with the discovery of the pre-salt reservoirs. Understand and characterize these reservoirs, that present low penetration rates, will require major efforts in research and development. A small contribution in this regard is provided in this dissertation, where three travertines (*i.e.*, Roman, Turkish and Itaboraí) were geologically and geomechanically characterized. The experimental program consisted in the chemical, mineralogical, textural and diagenetic characterization, as well as strength and porosity tests. A comprehensive analysis of test results from the experimental program was carried out in order to seek correlations between the indexes/properties/parameters determined. It was found that the unconfined compression strength of materials is directly proportional to its density, its velocity of ultrasonic wave propagation and to Schmidt test hammer index; and inversely proportional to its porosity. It was also found that the velocity of ultrasonic wave propagation of materials is directly proportional to its density and inversely proportional to its porosity.

Keywords

Geological and Geomechanical Characterization; Carbonate Rocks; Travertine.

Sumário

1 Introdução	28
1.1. Motivação	28
1.2. Objetivo	29
1.3. Estrutura da Dissertação	30
2 Revisão Bibliográfica	32
2.1. Definição de Rochas Carbonáticas	32
2.2. Rochas carbonáticas detríticas	32
2.3. Rochas carbonáticas orgânicas (<i>Reef rocks</i>)	34
2.3.1. Travertinos	34
2.4. Reservatórios carbonáticos	37
2.5. Classificação das rochas carbonáticas	38
2.5.1. Classificação de rochas carbonáticas detríticas	38
2.5.2. Classificação de rochas carbonáticas biogênicas (<i>Reef Rocks</i>)	43
2.5.3. Classificação Genética de Wright	47
2.5.4. Classificação de Travertinos	48
2.6. Parâmetros de interesse para caracterização de rochas carbonáticas	52
2.6.1. Porosidade	52
2.6.2. Mineralogia	63
2.6.3. Textura	66
2.6.4. Arranjo textural (<i>Fabric</i>)	68
2.6.5. Parâmetros de resistência	70
2.7. Correlações dos parâmetros geomecânicos da rocha	93
3 Geologia	97
3.1. Geologia do Pré-Sal	97
3.2. Evolução do Atlântico Sul	98
3.3. Bacias da Margem Leste Meridional	100
3.3.1. Bacia de Campos	101
3.3.2. Bacia de Santos	105
3.4. Geologia das rochas análogas propostas	110

3.4.1. Travertinos da Bacia de São José de Itaboraí	110
3.4.2. Travertino Romano	114
3.4.3. Travertino Turco	118
4 Materiais e Métodos	122
4.1. Materiais utilizados	122
4.2. Metodologia de Trabalho	126
4.3. Metodologia dos ensaios de caracterização das rochas carbonáticas	128
4.3.1. Análises químicas e mineralógicas	128
4.3.2. Análise Textural	137
4.3.3. Termogravimetria	138
4.3.4. Análises de Porosidade	140
4.3.5. Ensaios de Resistência	151
5 Apresentação e Discussão dos Resultados	164
5.1. Análises químicas e mineralógicas	164
5.1.1. Espectrometria por fluorescência de raios-X	164
5.1.2. Ataque Sulfúrico	168
5.1.3. Análise de lâminas petrográficas através de microscopia óptica com luz transmitida	169
5.1.4. Análise de lâminas petrográficas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV)	176
5.1.5. Difração de Raios-X	184
5.2. Análise Textural	187
5.3. Termogravimetria	191
5.4. Análises de porosidade	193
5.4.1. Análise de porosidade através da captura e processamento de imagens	193
5.4.2. Determinação dos Índices Físicos	202
5.4.3. Porosimetria por intrusão de mercúrio	206
5.4.4. Porosimetria à gás	223
5.4.5. Microtomografia	226
5.5. Ensaios de Resistência	244
5.5.1. Ensaio de Compressão simples	244
5.5.2. Ensaio de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais e transversais	252
5.5.3. Ensaios de esclerometria	253

5.5.4. Ensaio de abrasividade Cerchar	259
5.5.5. Scratch test	260
5.6. Correlações geológica e geomecânica	264
5.6.1. Correlações dos valores encontrados na literatura com os resultados encontrados nesta pesquisa	274
6 Conclusões	281
6.1. Recomendações para trabalhos futuros	284
Referências Bibliográficas	285
APÊNDICE I Microscopia Eletrônica de Varredura	297
APÊNDICE II Análises Macroscópicas	302
APÊNDICE III Lâminas Petrográficas	307
APÊNDICE IV Esclerometria	311

Lista de figuras

Figura 2.1 – Constituintes aloquímicos de rochas carbonáticas.....	33
Figura 2.2 – Travertino da Cidade de Tivoli, Italia	35
Figura 2.3 – Pedreira onde são extraídos os blocos de travertino, na cidade de Tivoli, Itália.....	35
Figura 2.4 – Classificação de Folk (1959).....	39
Figura 2.5 – Classificação modificada de Folk (1962).....	40
Figura 2.6 – Escala de tamanho dos grãos/cristais proposta por Folk	40
Figura 2.7 – Tabela de classificação de Dunham (1962).	42
Figura 2.8 – Tabela de Classificação de Embry & Klován (1971).....	43
Figura 2.9 – Diagrama triangular MSC proposto por Riding (2002).....	44
Figura 2.10 – Classificação estrutural das rochas carbonáticas orgânicas.....	45
Figura 2.11 – Esboço da classificação de rochas carbonáticas orgânicas, mostrando os principais processos formados e as estruturas dominantes (suporte).	46
Figura 2.12 – A categoria Cement Reef e a Carbonate Mud Mound plotadas no diagrama MSC	47
Figura 2.13 – Tabela de classificação proposta por Wright (1992).....	48
Figura 2.14 – Esquema de classificação unificada de travertinos.	51
Figura 2.15 – Equipamento utilizado na determinação da porosidade em rochas	54
Figura 2.16 – Estufa utilizada para a determinação do teor de umidade.	55
Figura 2.17 – Preparação de lâminas petrográfica.....	55
Figura 2.18 – Lâmina petrográfica de um dolomito da Formação Shuaiba, Quatar.....	56
Figura 2.19 – Tipos de poros da classe fabric seletivo da classificação de Choquette & Pray (1970).....	57
Figura 2.20 – Tipos de poros das classes fabric não seletivo e fabric seletivo ou não da classificação de Choquette & Pray (1970).....	57
Figura 2.21 – Diagrama com as modificações genéticas propostas por Choquette & Pray (1970).....	60

Figura 2.22 – Classificação geológica/petrofísica do espaço poroso vugar em carbonatos baseado na interconecção dos vugs proposta por Lucia (1983)..	61
Figura 2.23 – Classificação geológica/petrofísica do espaço poroso interparticular em carbonatos baseado na seleção e tamanho dos grãos e cristais proposta por Lucia (1983).	61
Figura 2.24 – Classificação Genética de porosidade em rochas carbonáticas proposta por Ahr (2008).	63
Figura 2.25 – Formas cristalinas típicas de calcita e dolomita encontradas em rochas carbonáticas.	64
Figura 2.26 – Estrutura atômica do mineral calcita.	65
Figura 2.27 – Classificação quanto ao tamanho dos grãos de Wentworth (1922).	66
Figura 2.28 – Classificação de Grabau (1960).	67
Figura 2.29 – Os tipos de fabrics encontrados em rochas carbonáticas.).	69
Figura 2.30 – Amostra no ensaio de compressão simples.	70
Figura 2.31 – Curvas típicas de tensão axial <i>versus</i> deformação.....	71
Figura 2.32 – Curva completa de tensão-deformação de um corpo de prova de material rochoso	71
Figura 2.33 – Métodos para o cálculo do módulo de Young a partir da curva tensão-deformação..	72
Figura 2.34 – Esquema de classificação do grau de fissuramento da rocha.	77
Figura 2.35 – Equipamento para ensaio de propagação de ondas longitudinais.	78
Figura 2.36 – Equipamento Autolab 500	79
Figura 2.37 – Princípio método <i>cross hole</i>	79
Figura 2.38 – Martelo de Schmidt digital do tipo L da marca Proceq.....	80
Figura 2.39 – Gráfico de correlação do martelo de Schmidt do tipo L.	81
Figura 2.40 – Ilustração dos dois tipos de equipamento Cerchar existentes.	82
Figura 2.41 – Microscópio óptico utilizado na análise do desgaste da ponteira recomendada pela norma ASTM D7625-10	83
Figura 2.42 – Esboço das formas abrasivas das extremidades da ponteira após o ensaio sob a utilização do microscópio..	84
Figura 2. 43 – Compilação de valores típicos de CAI para alguns tipos de rochas	85
Figura 2.44 – Equipamento de Scratch da marca TerraTek TSI™	88

Figura 2.45 – Forças atuantes no ensaio de scratch test utilizando cortadores do tipo sharp	88
Figura 2.46 – Forças atuantes no ensaio de scratch test utilizando cortadores do tipo blunt	89
Figura 2.47 – Gráfico de energia específica intrínseca (ϵ) <i>versus</i> comprimento do risco	90
Figura 2.48 – Correlação entre a energia específica intrínseca e a resistência à compressão simples (UCS).....	90
Figura 2.49 – Resultados obtidos por Yasar & Erdogan (2004)..	93
Figura 2.50 – Resultados obtidos por Török & Vásárhelyi (2010).....	95
Figura 3.1 – Modelo geodinâmico esquemático da margem continental divergente.....	99
Figura 3.2 – Mapa de localização das bacias da margem Leste Meridional Brasileira.....	101
Figura 3.3 – Mapa de localização da Bacia de Campos.....	102
Figura 3.4 – Coluna estratigráfica da bacia de Campos.....	103
Figura 3.5 – Perfil Sísmico da Bacia de Campos	105
Figura 3.6 – Carta de eventos do sistema petrolífero, configuração Subsal, Bacia de Campos.....	105
Figura 3.7 – Mapa de localização da Bacia de Santos.....	106
Figura 3.8 – Coluna estratigráfica da bacia de Santos.....	107
Figura 3.9 – Carta de eventos do sistema petrolífero, configuração Subsal, Bacia de Santos.....	109
Figura 3.10 – Desenho esquemático da configuração do sistema petrolífero subsal	109
Figura 3.11 – Mapa índice de localização de área	110
Figura 3.12 – Bacia de São João de Itaboraí.	111
Figura 3.13 – Coluna crono-estratigráfica da Bacia de Itaboraí.....	114
Figura 3.14 – Mapa esquemático da Região de Toscana e Lácio	115
Figura 3.15 – Geologia da Região do Lácio.	116
Figura 3.16 – Mapa da Turquia destacando a Cidade de Antalya (círculo em vermelho).	118
Figura 3.17 – Mapa Geológico da região de Antalya.....	119
Figura 3.18 – Seção Geológica da região de Antalya	120
Figura 4.1 – Localização do afloramento no Parque Paleontológico de Itaboraí onde foram coletadas as amostras de travertino.....	122

Figura 4.2 – Afloramento de travertino fitado na Bacia de São José do Itaboraí.	123
Figura 4.3 – Amostras coletadas de travertino fitado da bacia de Itaboraí.	123
Figura 4.4 – Placas de travertino romano utilizadas na pesquisa.	125
Figura 4.5 – Placas de travertino turco utilizadas no trabalho.	126
Figura 4.6 – Fluxograma de trabalho.	127
Figura 4.7 – Espectrômetro de fluorescência de raios-x, da marca Philips, Modelo PW 2400.	129
Figura 4.8 – Preparação de amostras para o ensaio de Fluorescência de raios-x.	129
Figura 4.9 – Amostra moída para a realização do ensaio de ataque sulfúrico.	131
Figura 4.10 – Lâminas petrográficas usadas nas análises mineralógicas	132
Figura 4.11 – Microscópio óptico utilizado nas análises microscópicas	133
Figura 4.12 – Microscópio Eletrônico de varredura (MEV/EDS) utilizado nas análises petrográficas.	134
Figura 4.13 – Equipamento <i>Sputter coater</i> usado na metalização das lâminas petrográficas.	135
Figura 4.14 – Difrator Siemens D5000 utilizado na pesquisa.	136
Figura 4.15 – Realização da análise macroscópica das amostras estudadas.	137
Figura 4.16 – Desenho detalhado de um equipamento de termogravimetria	138
Figura 4.17 – Equipamento utilizado nos ensaios termogravimétricos.	139
Figura 4.18 – Amostras utilizadas no ensaio de termogravimetria.	139
Figura 4.19 – Digitalização das lâminas petrográficas.	141
Figura 4.20 – Sequência de captura e concatenação automática de 4x5 imagens formando um mosaico.	141
Figura 4.21 – Fluxograma da sequência de processamento e análise de imagens	142
Figura 4.22 – Etapas do cálculo dos índices físicos.	144
Figura 4.23 – Porosímetro utilizado nos ensaios de porosimetria.	145
Figura 4.24 – Corpos de prova utilizados no programa experimental.	146
Figura 4.25 – Porosímetro CORELAB, modelo UP-400 utilizado no ensaio.	147
Figura 4.26 – Corpos de prova preparados para a realização do ensaio de porosimetria à gás.	147
Figura 4.27 – Microtomógrafo Skyscan 1173 utilizado no programa experimental	149
Figura 4.28 – Amostras analisadas no microtomógrafo.	150
Figura 4.29 – Corpos de prova utilizados no ensaio de compressão simples	152

Figura 4.30 – Montagem do transdutor de força.	153
Figura 4.31 – Equipamentos utilizados no ensaio	154
Figura 4.32 – Esclerômetro do tipo L, da marca Proceq e a base de aço utilizados no ensaio.....	156
Figura 4.33 – Malha retangular realizada no ensaio de esclerometria.	156
Figura 4.34 – Equipamento CERCHAR	158
Figura 4.35 – Ponteira em condições de uso para o ensaio de abrasividade CERCHAR.	159
Figura 4.36 – Amostras utilizadas nos ensaios de abrasividade Cerchar	159
Figura 4.37 – Equipamento utilizado no ensaio de Scratch test.	161
Figura 4.38 – Amostras utilizadas no ensaio <i>Scratch test</i>	161
Figura 4.39 – Etapas da realização do <i>Scratch test</i>	162
Figura 5.1 – Amostras escolhidas para a realização do ensaio.....	165
Figura 5.2 – Calcita microcristalina observada na lâmina TRI-10.....	170
Figura 5.3 – Minerais de calcita com formato alongado encontrados na lâmina TRI-09.....	170
Figura 5.4 – Intercalação da calcita com óxido de ferro observada na lâmina TRI-01.....	171
Figura 5.5 – Lâmina petrográfica TRR-01a no qual pode-se visualizar calcita espática ao redor do poro em azul (corante azul de metileno) e matriz de calcita microcristalina.	172
Figura 5.6 – Lamelas de fibras de vegetais encontradas na lâmina TRR-01b..	172
Figura 5.7 – Grumos de calcita presentes na lâmina TRR-01a.	173
Figura 5.8 – Calcita espática e calcita microcristalina observadas na lâmina petrográfica TRT-01a de travertino turco.....	174
Figura 5.9 – Lâmina petrográfica TRR-01d com a matriz da rocha delimitada em vermelho.	174
Figura 5.10 – Diagrama MSC proposto por Riding (2002) com os resultados do travertino romano e turco plotados.....	176
Figura 5.11 – Imagem MEV na qual se pode observar calcita sob a forma euédrica e subédricas e poro com 38,1 µm de largura.....	177
Figura 5.12 – Calcita com formato alongado observada na lâmina TRI-08 e seu respectivo gráfico EDS mostrando o pico de cálcio.....	178
Figura 5.13 – Quartzo encontrado na lâmina TRI-03 e seu respectivo gráfico EDS, no qual pode ser visto o pico de sílica.....	179
Figura 5.14 – Intercalação de calcita com óxido de ferro e matéria orgânica vista na lâmina TRI-02.....	180

Figura 5.15 – Calcitas de granulação grosseira ao redor de um poro de 372µm de largura, na lâmina petrográfica TRR-01d.....	182
Figura 5.16 – Cristais de calcita observados na lâmina TRT-01e e seu respectivo gráfico EDS com o pico de cálcio.....	183
Figura 5.17 – Difrátograma referente à amostra TRI-01.....	185
Figura 5.18 – Difrátograma da amostra TRI-03.....	185
Figura 5.19 – Difrátograma da amostra TRI-09.....	186
Figura 5.20 – Difrátograma da amostra TRR-01 de travertino romano.....	186
Figura 5.21 – Difrátograma da amostra TRT-01 de travertino turco..	187
Figura 5.22 – Formulário com a descrição macroscópica da amostra TRI-07..	188
Figura 5.23 – Estrutura laminada com intercalações de bandas porosas e bandas maciças observada na amostra TRR-01 de travertino romano.....	189
Figura 5.24 – Imagem gerada no MEV mostrando os dois tipos de texturas observadas na amostra TRI-08.....	190
Figura 5.25 – Gráfico da variação de massa <i>versus</i> temperatura da amostra TRI-03.....	192
Figura 5.26 – Gráfico da variação de massa <i>versus</i> temperatura da amostra TRR-01.....	192
Figura 5.27 – Gráfico da variação de massa <i>versus</i> temperatura da amostra TRT-01.....	193
Figura 5.28 – Tipos de poros encontrados nas lâminas petrográficas dos travertinos de Itaboraí..	194
Figura 5.29 – Tipos de poros encontrados nas lâminas dos travertinos romanos.....	195
Figura 5.30 – Tipos de poros encontrados nas lâminas dos travertinos turcos.	195
Figura 5.31 – Sequência de mosaicos e a imagem panorâmica (junção dos mosaicos) realizados na lâmina TRI-02.....	196
Figura 5.32 – Comparação entre a placa TRR-01 (à esquerda) e a placa TRR-02 (à direita).....	200
Figura 5.33 – Índices físicos das amostras de travertino de Itaboraí.....	203
Figura 5.34 – Índices físicos dos corpos de prova retirados do bloco TRI-05 de travertino de Itaboraí.....	204
Figura 5.35 – Índices físicos das amostras de travertino romano e turco.....	205
Figura 5.36 – Gráfico de intrusão acumulativa <i>versus</i> diâmetro dos poros dos corpos de prova de travertino de Itaboraí.....	209
Figura 5.37 – Gráfico de intrusão incremental <i>versus</i> diâmetro dos poros dos corpos de prova de travertino de Itaboraí.....	210

Figura 5.38 – Gráfico com a distribuição dos tamanhos de poros dos corpos de prova da amostra TRI-05.	211
Figura 5.39 – Gráfico com a distribuição dos tamanhos de poros dos corpos de prova da amostra TRI-09.	211
Figura 5.40 – Gráfico com a distribuição dos tamanhos de poros dos corpos de prova da amostra TRI-10.	212
Figura 5.41 – Gráfico de intrusão acumulativa <i>versus</i> diâmetro dos poros dos corpos de prova retirados das placas TRR-01 e TRR-02.	213
Figura 5.42 – Gráfico de intrusão incremental <i>versus</i> diâmetro dos poros dos corpos de prova retirados das placas TRR-01 e TRR-02.	214
Figura 5.43 – Gráfico com a distribuição dos tamanhos de poros dos corpos de prova da amostra TRR-01 e TRR-02.....	214
Figura 5.44 – Gráfico de intrusão acumulativa <i>versus</i> diâmetro dos poros dos corpos de prova retirados das placas TRR-01, TRT-02 e TRT-03.....	216
Figura 5.45 – Gráfico de intrusão incremental <i>versus</i> diâmetro dos poros dos corpos de prova retirados das placas TRT-01, TRT-02 e TRT-03.	217
Figura 5.46 – Gráfico com a distribuição dos tamanhos de poros dos corpos de prova da amostra TRT-01, TRT-02 e TRT-03.	217
Figura 5.47 – Gráfico com a distribuição dos tamanhos de poros dos corpos de prova da amostra TRI-09 que foram levados à estufa com a temperatura de 150°C.....	219
Figura 5.48 – Gráfico com a distribuição dos tamanhos de poros dos corpos de prova da amostra TRI-10 que foram levado à estufa com a temperatura de 150°C.....	220
Figura 5.49 – Gráfico com a distribuição dos tamanhos de poros dos corpos de prova da amostra TRR-01 que foram levado à estufa com a temperatura de 150°C.....	221
Figura 5.50 – Gráfico com a distribuição dos tamanhos dos poros dos corpos de prova da amostra TRT-01 que foram levado à estufa com a temperatura de 150°C.....	223
Figura 5.51 – Corpos de prova utilizados no ensaio de porosimetria a gás.....	225
Figura 5.52 – Imagens reconstruídas no programa NRecon.	227
Figura 5.53 – Metodologia gerada para a análise de microtomografia.	228
Figura 5.54 – Tela do programa CTan, onde pode ser visto o processo de segmentação das imagens da amostra de travertino romano.	229

Figura 5.55 – Histograma com a distribuição do diâmetro dos poros na amostra TRI-09 (travertino de Itaboraí), apresentando classes com espaçamento de 250µm.....	231
Figura 5.56 – Histograma com a distribuição do diâmetro dos poros na amostra TRI-09 (travertino de Itaboraí), apresentando classes com espaçamento de 50µm.....	231
Figura 5.57 – Histograma com a distribuição do diâmetro dos poros na amostra TRR-01	232
Figura 5.58 – Histograma com a distribuição do diâmetro dos poros na amostra TRT-01.....	232
Figura 5.59 – Perfil de porosidade das 1650 seções 2-D da amostra de travertino de Itaboraí.....	233
Figura 5.60 – Perfil de porosidade das 1550 seções 2-D da amostra de travertino romano.....	234
Figura 5.61 – Perfil de porosidade das 2300 seções 2-D da amostra de travertino turco.....	234
Figura 5.62 – Amostras utilizadas no ensaio de microtomografia e os seus respectivos modelos gerados a partir do processamento das imagens....	235
Figura 5.63 – Tela de visualização do programa CTvol.	237
Figura 5.64 – Imagem 3-D reconstruída da amostra TRI-09	238
Figura 5.65 – Corte da imagem 3-D reconstruída da amostra TRI-09.....	239
Figura 5.66 – Imagem 3-D reconstruída da amostra TRR-01.....	240
Figura 5.67 – Corte da imagem 3-D reconstruída da amostra TRR-01	241
Figura 5.68 – Imagem 3-D reconstruída da amostra TRT-01.....	242
Figura 5.69 – Corte na imagem 3-D reconstruída da amostra TRT-01.....	243
Figura 5.70 – Comparação entre os corpos de prova.	245
Figura 5.71 – Contato entre os grãos da amostra TRI-05.	245
Figura 5. 72 – Curva tensão-deformação do corpo de prova TRI-04 (01).	246
Figura 5. 73 – Curva tensão-deformação do corpo de prova TRI-04 (02).	247
Figura 5.74 – Curva tensão-deformação do corpo de prova TRI-05 (01).	248
Figura 5.75 – Curva tensão-deformação do corpo de prova TRI-05 (02).	248
Figura 5.76 – Curva tensão-deformação do corpo de prova TRI-05 (03).	248
Figura 5.77 – Curva tensão-deformação do corpo de prova TRI-05 (04).	249
Figura 5.78 – Tipos de ruptura verificados nos corpos de prova.	249

Figura 5.79 – Gráfico resumido da classificação de rochas intactas para rochas carbonáticas (77 corpos de prova, 22 locais e várias fontes) proposto por Deere & Miler (1966) com os resultados encontrados nesta pesquisa plotados.....	250
Figura 5.80 – Malha retangular realizada na superfície da amostra TRI-04 e os respectivos índices esclerométricos.....	254
Figura 5.81 – Histograma realizado na amostra TRI-04.....	256
Figura 5.82 – Diagrama de distribuição dos índices esclerométricos da amostra TRI-04.....	257
Figura 5.83 – Diagrama de distribuição dos índices esclerométricos do corpo de prova TRI-05 (04).....	258
Figura 5.84 – Compilação de valores típicos de CAI para alguns tipos de rochas de acordo com Karling (2000), Plinninger et al. (2002) e Buchi et al. (1995) com os resultados encontrados nesta pesquisa plotados.....	260
Figura 5.85 – Gráfico da energia específica <i>versus</i> comprimento do primeiro corte, realizado na amostra TRI-05.....	261
Figura 5.86 – Variação dos valores da energia específica durante o corte na superfície da amostra TRI-05.....	261
Figura 5.87 – Gráfico da energia específica <i>versus</i> comprimento do primeiro corte, realizado na amostra TRR-01.....	262
Figura 5.88 – Variação dos valores da energia específica durante o primeiro corte realizado na superfície da amostra TRR-01.	262
Figura 5.89 – Gráfico da energia específica <i>versus</i> comprimento do primeiro corte, realizado na amostra TRT-01.....	263
Figura 5.90 – Variação dos valores da energia específica durante o primeiro corte realizado na superfície da amostra TRT-01.....	264
Figura 5.91 – Gráfico UCS <i>versus</i> densidade seca realizado nos corpos de prova TRI-05.....	265
Figura 5.92 – Gráfico UCS <i>versus</i> porosidade realizado nos corpos de prova TRI-05.....	265
Figura 5.93 – Gráfico UCS <i>versus</i> Vp realizado nos corpos de prova TRI-05..	266
Figura 5.94 – Gráfico UCS <i>versus</i> índice esclerométrico (RL) realizado nos corpos de prova TRI-05.....	266
Figura 5. 95 – Gráfico Et <i>versus</i> porosidade realizado nos corpos de prova TRI-05.....	267
Figura 5.96 – Gráfico módulo de Young estático (Et) <i>versus</i> módulo de Young dinâmico (Ed) realizado nos corpos de prova TRI-05.....	268

Figura 5.97 – Gráfico V_p <i>versus</i> módulo de Young estático (E_t) realizado nos corpos de prova TRI-05.....	268
Figura 5.98 – Gráfico velocidade de ondas longitudinais (V_p) <i>versus</i> densidade aparente seca realizado nos corpos de prova TRI-05.	269
Figura 5.99 – Gráfico velocidade de ondas longitudinais (V_p) <i>versus</i> porosidade realizado nos corpos de prova TRI-05.....	269
Figura 5.100 – Gráfico velocidade de ondas transversais (V_{s1}) <i>versus</i> porosidade realizado nos corpos de prova TRI-05.	270
Figura 5.101 – Gráfico velocidade de ondas transversais (V_{s2}) <i>versus</i> porosidade realizado nos corpos de prova TRI-05.	271
Figura 5.102 – Gráfico V_p <i>versus</i> índice esclerométrico (RL) realizado nos corpos de prova TRI-05.....	271
Figura 5.103 – Gráfico porosidade <i>versus</i> índice esclerométrico (RL) realizado nos corpos de prova TRI-05.....	272
Figura 5.104 – Gráfico densidade <i>versus</i> índice esclerométrico (RL) realizado nos corpos de prova TRI-05.....	272
Figura 5. 105 – Gráfico densidade <i>versus</i> índice esclerométrico (RL) realizado nas placas de travertino romano e turco.	273
Figura 5.106 – Gráfico porosidade <i>versus</i> índice esclerométrico (RL) realizado nas placas de travertino romano e turco.	273
Figura 5.107 – Gráfico de correlação da velocidade de ondas longitudinais (V_p) com a densidade seca.	274
Figura 5.108 – Gráfico de correlação da velocidade de ondas longitudinais (V_p) com a resistência à compressão simples.	275
Figura 5.109 – Gráfico de correlação da velocidade de ondas longitudinais (V_p) com o módulo de Young (E).....	275
Figura 5.110 – Gráfico de correlação da densidade aparente seca com a velocidade de ondas longitudinais (V_p).....	276
Figura 5.111 – Gráfico de correlação da porosidade com a velocidade de ondas longitudinais (V_p).	276
Figura 5.112 – Gráfico de correlação da resistência à compressão simples (UCS) com a densidade aparente seca.	277
Figura 5.113 – Gráfico de correlação da resistência à compressão simples (UCS) com a porosidade.....	277
Figura 5.114 – Gráfico de correlação da resistência à compressão simples (UCS) com a velocidade de ondas longitudinais (V_p).	278

Figura 5.115 – Gráfico de correlação da resistência à compressão simples (UCS) com a densidade aparente seca.	279
Figura 5.116 – Gráfico de correlação da resistência à compressão simples (UCS) com a porosidade.....	279
Figura 5. 117 – Gráfico de correlação do módulo de Young (Et) com a porosidade	280
Apêndice I 1 – Imagem MEV da lâmina TRI-08, onde observam-se minerais de calcita com matéria orgânica, e seu respectivo gráfico EDS.....	297
Apêndice I 2 – Imagem MEV da lâmina TRI-08, onde pode ser visualizado o alinhamento dos minerais de calcita, e seu respectivo gráfico EDS.	298
Apêndice I 3 – Imagem MEV da lâmina TRI-03, onde pode ser visualizado um poro preenchido por sílica, e seu respectivo gráfico EDS.....	299
Apêndice I 4 – Imagem MEV da lâmina TRR-01d, onde pode ser visualizado um poro preenchido por matéria orgânica, e seu respectivo gráfico EDS	300
Apêndice I 5 – Imagem MEV da lâmina TRT-01e, onde pode ser visualizado um poro do tipo vugular envolto por minerais de calcita, e seu respectivo gráfico EDS.	301
Apêndice II 1 – Formulário com a descrição macroscópica da amostra TRI-01.....	302
Apêndice II 2 – Formulário com a descrição macroscópica da amostra TRI-03.	303
Apêndice II 3 – Formulário com a descrição macroscópica da amostra TRI-04.	303
Apêndice II 4 – Formulário com a descrição macroscópica da amostra TRI-05.	304
Apêndice II 5 – Formulário com a descrição macroscópica da amostra TRI-05.	304
Apêndice II 6 – Formulário com a descrição macroscópica da amostra TRI-09.	305
Apêndice II 7 – Formulário com a descrição macroscópica da amostra TRI-10.	305
Apêndice II 8 – Formulário com a descrição macroscópica da amostra TRR-01.	306
Apêndice II 9 – Formulário com a descrição macroscópica da amostra TRT-01.	306

Apêndice III 1 – Imagem panorâmica da lâmina petrográfica TRI-04.	307
Apêndice III 2 – Imagem panorâmica da lâmina petrográfica TRI-09.	308
Apêndice III 3 – Imagem panorâmica da lâmina petrográfica TRR-01c.....	309
Apêndice III 4 – Imagem panorâmica da lâmina petrográfica TRT-03.....	310
Apêndice IV 1 – Resultados do ensaio de esclerometria na amostra TRI-06...	311
Apêndice IV 2 – Resultados do ensaio de esclerometria na amostra TRI-05... .	312
Apêndice IV 3 – Resultados do ensaio de esclerometria na amostra TRI-10 ...	313
Apêndice IV 4 – Resultados do ensaio de esclerometria na amostra TRR-01..	314
Apêndice IV 5 – Resultados do ensaio de esclerometria na amostra TRT-03..	315

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Valores típicos de velocidade de onda longitudinal de rochas.....	75
Tabela 2.2 – Velocidade de onda longitudinal dos principais minerais.....	75
Tabela 4.1 – Erro analítico.....	130
Tabela 5.1 – Resultados da composição química, expressa em óxidos, das amostras de travertino de Itaboraí.....	164
Tabela 5.2 – Classificação de rochas carbonáticas quanto à razão MgO/CaO.....	165
Tabela 5.3 – Classificação das amostras de travertino de Itaboraí quanto à razão MgO/CaO.....	166
Tabela 5.4 – Resultados da composição química, expressa em óxidos, de amostras de travertino de romano e travertino turco.	167
Tabela 5.5 – Classificação das amostras de travertino romano e turco quanto à razão MgO/CaO.....	167
Tabela 5.6 – Resultados obtidos através do ensaio de ataque sulfúrico.	168
Tabela 5.7 – Quantidade de quartzo nas amostras de travertino de Itaboraí. ..	169
Tabela 5.8 – Resultados dos constituintes presentes nas lâminas petrográficas de travertinos romanos.....	175
Tabela 5.9 – Resultados dos constituintes presentes nas lâminas petrográficas de travertinos turcos.....	175
Tabela 5.10 – Valores dos parâmetros obtidos através do processamento dos mosaicos das lâminas dos travertinos fitados de Itaboraí.....	197
Tabela 5.11 – Valores dos parâmetros obtidos através do processamento dos mosaicos das lâminas dos travertinos romanos.	198
Tabela 5.12 – Valores dos parâmetros obtidos através do processamento dos mosaicos das lâminas dos travertino turcos.	198
Tabela 5.13 – Resultados dos índices físicos determinados nas amostras de travertino de Itaboraí.	202
Tabela 5.14 – Índices físicos dos corpos de prova retirados do bloco TRI-05 de travertino de Itaboraí.	204
Tabela 5.15 – Valores dos índices físicos encontrados nas amostras de travertino romano e turco.	205

Tabela 5.16 – Resultados dos ensaios da primeira campanha realizado nas amostras de travertino de Itaboraí.....	206
Tabela 5.17 – Classificação quanto ao tamanho dos poros proposto por Beiravand (2003).....	209
Tabela 5.18 – Resultados dos ensaios de porosimetria da primeira campanha em corpos de prova de travertino de romano.....	213
Tabela 5.19 – Resultados de porosimetria de mercúrio realizados em corpos de prova de travertino romano no Cenpes.	215
Tabela 5.20 – Resultados dos ensaios da primeira campanha nos corpos de prova de travertino de turco.	216
Tabela 5.21 – Resultados de porosimetria de mercúrio realizados em corpos de prova de travertino turco no Cenpes/Petrobras.	218
Tabela 5.22 – Resultados da segunda campanha dos corpos de prova de travertino de Itaboraí.	219
Tabela 5.23 – Resultados da segunda campanha dos corpos de prova de travertino romano.	220
Tabela 5.24 – Resultados da segunda campanha nos corpos de prova de travertino turco colocados na estufa à 150°C.	222
Tabela 5.25 – Valores das dimensões e volumes encontrados nos corpos de prova.....	223
Tabela 5.26 – Resultados dos parâmetros obtidos através do ensaio de porosimetria à gás.....	224
Tabela 5.27 – Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para as amostras analisadas.	226
Tabela 5.28 – Resultados da análise da porosidade realizada nos modelos 3-D gerados a partir das imagens de microtomografia.....	230
Tabela 5.29 – Resultados dos ensaios de compressão simples nos corpos de prova de travertino de Itaboraí.	244
Tabela 5.30 – Classificação de rochas intactas com base na resistência proposta por Deere & Miller (1966).	251
Tabela 5.31 – Classificação de rochas intactas com base no módulo razão proposta por Deere & Miller (1966).	251
Tabela 5.32 – Resultados do ensaio de propagação de ondas ultrassônicas nos corpos de prova obtidos da amostra TRI-05.....	252
Tabela 5.33 – Resultados dos ensaios de esclerometria.	254
Tabela 5.34 – Resultados dos ensaios de esclerometria realizados nos corpos de prova TRI-05.	258

Tabela 5.35 – Resultados do ensaio de abrasividade Cerchar.	259
Tabela 5.36 – Resultados do ensaio de <i>Scratch test</i> nos travertinos estudados.	260