



**Mauro Gussane Benedicto Junior**

**Estudo experimental de propriedades  
geomecânicas do Travertino Romano  
(Quaternário)**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Júnior

Co-Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Andrea Ferreira Borges

Rio de Janeiro

Abril de 2018



**Mauro Gussane Benedicto Junior**

**Estudo experimental de propriedades  
geomecânicas do Travertino Romano  
(Quaternário)**

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

**Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Júnior**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental- PUC-Rio

**Prof<sup>a</sup>. Andrea Ferreira Borges**

Co-Orientadora

Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Prof<sup>a</sup>. Raquel Quadros Velloso**

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental- PUC-Rio

**Dr<sup>a</sup>. Flavia de Oliveira Lima Falcão**

Petróleo Brasileiro S.A.

**Prof. Márcio Fernandes Leão**

Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Prof. Márcio da Silveira Carvalho**

Coordenador(a) Setorial do  
Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de abril de 2018.

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

### **Mauro Gussane Benedicto Junior**

Ingressou no curso de graduação em Geologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 2006. Trabalhou na indústria do petróleo, setor de exploração, de 2011 a 2015. Reingressou ao Mestrado na PUC-Rio, iniciado conjuntamente com o trabalho em 2014, no início de 2015, sob o âmbito de dedicação exclusiva. Desenvolveu seu trabalho na linha de pesquisa de resistência anisotrópica em travertino Romano.

#### Ficha Catalográfica

Benedicto Junior, Mauro Gussane

Estudo experimental de propriedades geomecânicas do Travertino Romano (Quaternário) / Mauro Gussane Benedicto Junior; orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Júnior ; co-orientadora: Andrea Ferreira Borges. – 2018.

186 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2018.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil e ambiental - Teses. 2. Travertino Romano. 3. Propriedades geomecânicas. 4. Rochas carbonáticas. I. Vargas, Eurípedes do Amaral Júnior. II. Borges, Andrea Ferreira. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. IV. Título.

CDD: 624

## Agradecimentos

A Deus por todas as forças dadas para concluir este trabalho.

Ao meu pai, Mauro Gussane, e minha mãe, Regina Coeli, pelo apoio incondicional que deram ao longo da minha vida e que me permitiu chegar até aqui.

A minha esposa e designer, Larissa Rangel, pela compreensão, apoio emocional e todo o suporte nas edições de imagens.

Ao meu orientador, Eurípedes Vargas, e a Professora Raquel Velloso.

A minha co-orientadora, Andrea Borges, que não só gastou dias inteiros me auxiliando no projeto, como o corrigiu e me proporcionou ideias diferenciais.

Ao Professor Franklin Antunes pela imensa predisposição em ajudar quem acabara de conhecer e ao imenso suporte prestado com seu conhecimento.

A toda equipe do Laboratório de Estruturas da PUC-Rio.

Ao pesquisador Dario Prada pelo suporte e tremenda dedicação, com direito a viver perigosas aventuras em busca do material de trabalho.

Aos doutorandos Guillermo Jordan e Ana Carolina Campos pelas contribuições.

A todos os amigos que fiz nessa jornada durante o curso.

Aos Professores Ricardo Aucélio, Sonia Letchevsky e Marcos Henrique de Pinho, de outros departamentos, pelos grandes auxílios prestados.

Ao técnico Yuri Nascimento pelo auxílio na produção de um material fantástico de imagens de microscopia eletrônica (MEV) e análises químicas (EDS).

A PUC-Rio e todo seu quadro técnico, em especial a Rita de Cassia.

Ao Laboratório de Mecânica e Tecnologia das Rochas (LEMETRO), da UFRJ.

Ao Laboratório de Geologia Sedimentar (LAGESED), da UFRJ.

Aos Professores Leonardo Borghi e Cícera de Almeida pelas dicas e sugestões.

A CAPES e a PUC pelo auxílio financeiro que permitiram a conclusão do trabalho.

## Resumo

Benedicto Junior, Mauro Gussane; Vargas, Eurípedes do Amaral Júnior. **Estudo experimental de propriedades geomecânicas do Travertino Romano (Quaternário)**. Rio de Janeiro, 2018. 186p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O travertino Romano é uma rocha ornamental, historicamente presente na arquitetura Romana, que mesmo nos dias de hoje é muito utilizada em decorações e fachadas. Porém no meio científico é considerada uma rocha análoga a reservatórios carbonáticos, em especial do pré-sal Brasileiro. O presente trabalho buscou realizar um estudo experimental do travertino Romano, com enfoque no comportamento geomecânico anisotrópico em duas direções (normal e paralela ao acamamento), sob valores de tensões condizentes com as que ocorrem em reservatórios. Para isto foram feitas diversas análises macro e microscópicas, incluindo microscopia eletrônica de alta resolução a fim de estudar propriedades do travertino e sua estrutura porosa. Análises químicas do material e medição em laboratório dos mais variados parâmetros para se obter uma satisfatória lista de índices físicos auxiliaram neste contexto. Ensaaios de resistência complementares, como o ensaio de carga pontual e ensaio de tração indireta (Ensaio Brasileiro) enriqueceram o estudo com resultados de ruptura nas direções perpendicular e paralela ao acamamento. Por fim, buscou-se estudar o comportamento geomecânico anisotrópico do travertino, sob a ótica normal e paralela ao acamamento sedimentar, através de ensaios triaxiais com tensão confinante variando de zero (uniaxiais) a 40 MPa, intervalo este bastante próximo as tensões efetivas de reservatórios carbonáticos brasileiros. Devido à grande heterogeneidade, os corpos de prova foram separados em grupos com intervalos de porosidade total similares. Então, com resultados de curvas tensão-deformação e trajetórias de tensão, foram possíveis diversas comparações em termos de comportamento geomecânico e observar que nem sempre o incremento da tensão confinante e a menor porosidade resultarão em maior resistência mecânica.

## Palavras-chave

Travertino Romano; propriedades geomecânicas; rochas carbonáticas.

## Abstract

Benedicto Junior, Mauro Gussane; Vargas, Eurípedes do Amaral Júnior (Advisor). **Experimental study of geomechanical properties of Roman Travertine (Quaternary)**. Rio de Janeiro, 2018. 186p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The Roman travertine is an ornamental rock, historically present in Roman architecture, which even in present days is much used in decorations and facades. However in the scientific community it is considered a rock similar to carbonate reservoirs, especially the Brazilian pre-salt. The present work sought to carry out an experimental study of the Roman travertine, focusing on the anisotropic geomechanical behavior in two directions (normal and parallel to the sedimentary bedding) under tension values consistent with those occurring in reservoirs. For this, several macro and microscopic analyzes were carried out, including high resolution electron microscopy in order to study the properties of travertine and its porous structure. Chemical analysis of the material and laboratory measurement of the most varied parameters to obtain a satisfactory list of index properties aided in this context. Complementary strength tests, such as the point load test and indirect tensile strength test (Brazilian Test) enriched the study with results of rupture in the directions perpendicular and parallel to the bedding. Finally, it was studied the anisotropic geomechanical behavior under normal and parallel optics to the sedimentary bedding through triaxial tests with confining stress ranging from zero (uniaxial) to 40 MPa, this interval very close to the effective stresses from Brazilian carbonate reservoirs. Due to the great heterogeneity, the specimens were separated into groups with similar total porosity ranges. Then, with results of stress-strain plots and stress trajectories, several comparisons were possible in terms of geomechanical behavior and observe that not always the increase of the confining stress and the lower porosity will result in greater mechanical resistance.

## Keywords

Roman Travertine; geomechanical properties; carbonate rocks.

# Sumário

<b>1 Introdução</b>	<b>23</b>
1.1. Relevância e motivação	23
1.2. Objetivos	24
1.3. Estrutura da dissertação	26
<b>2 Revisão bibliográfica</b>	<b>27</b>
2.1. Rochas carbonáticas	27
2.1.1. Componentes do arcabouço	29
2.1.1.1. Componentes aloquímicos	29
2.1.1.2. Componentes ortoquímicos	30
2.1.2. Classificação da estrutura granular	31
2.1.3. Classificação da estrutura porosa	31
2.2. Travertino	32
2.2.1. Travertino Romano	33
2.2.1.1. Contexto geológico	33
2.2.1.2. Contexto geomorfológico	35
2.2.1.3. Contexto estratigráfico	36
2.2.1.4. Influência do hidrotermalismo	38
2.2.1.5. Influência hidrográfica	39
2.3. Índices e parâmetros do travertino Romano	40
2.3.1. Luza (2014)	40
2.3.2. Kiewiet (2015)	42
<b>3 Material</b>	<b>45</b>
3.1. Material bruto	45
3.2. Material preparado	47
3.2.1. Corpos de prova	48
3.2.2. Rejeito	51

3.2.2.1. Corpos de rejeito regular	51
3.2.2.2. Corpos de rejeito irregular	51
<b>4 Metodologia</b>	<b>52</b>
4.1. Parâmetros físicos	53
4.1.1. Densidade relativa dos sólidos ( $G_s$ )	53
4.1.2. Índices medidos	53
4.1.3. Índices calculados	55
4.2. Caracterização petrográfica	59
4.2.1. Análise macroscópica	59
4.2.2. Análise microscópica	60
4.2.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	62
4.3. Caracterização química	63
4.3.1. Difractometria de raios-x	63
4.3.2. Espectrometria de raios-x	64
4.3.3. Determinação elementar de CHN	64
4.3.4. Espectroscopia por energia dispersiva (EDS)	65
4.4. Caracterização da estrutura porosa	65
4.4.1. Análise macroscópica	65
4.4.2. Análise microscópica	66
4.4.3. Porosimetria por intrusão de mercúrio	66
4.4.4. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	67
4.5. Caracterização da resistência mecânica	67
4.5.1. Ensaio de carga pontual	67
4.5.2. Ensaio Brasileiro	70
4.5.3. Ensaio de compressão uniaxial	72
4.5.4. Ensaio de compressão triaxial	74
<b>5 Resultados</b>	<b>77</b>
5.1. Parâmetros físicos	77
5.1.1. Densidade relativa dos grãos ( $G_s$ )	77
5.1.2. Índices medidos	78

5.1.3. Índices calculados	79
5.2. Caracterização petrográfica	85
5.2.1. Análise macroscópica	85
5.2.2. Análise microscópica	87
5.2.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	90
5.3. Caracterização química	93
5.3.1. Difratometria de raios-x	93
5.3.2. Espectrometria de raios-x	93
5.3.3. Determinação elementar de CHN	94
5.3.4. Espectroscopia por energia dispersiva (EDS)	95
5.4. Caracterização da estrutura porosa	100
5.4.1. Análise macroscópica	100
5.4.2. Análise microscópica	105
5.4.3. Porosimetria por intrusão de mercúrio	107
5.4.4. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	110
5.5. Caracterização da resistência mecânica	112
5.5.1. Ensaio de carga pontual	112
5.5.2. Ensaio Brasileiro	113
5.5.3. Ensaio de compressão uniaxial	115
5.5.3.1. Ensaio uniaxial vertical	116
5.5.3.2. Ensaio uniaxial horizontal	118
5.5.4. Ensaio de compressão triaxial	120
5.5.4.1. Ensaio triaxial vertical	121
5.5.4.1.1. Ensaio triaxial vertical: $\sigma_c = 10$ MPa	121
5.5.4.1.2. Ensaio triaxial vertical: $\sigma_c = 20$ MPa	123
5.5.4.1.3. Ensaio triaxial vertical: $\sigma_c = 30$ MPa	125
5.5.4.1.4. Ensaio triaxial vertical: $\sigma_c = 40$ MPa	128
5.5.4.2. Ensaio triaxial horizontal	130
5.5.4.2.1. Ensaio triaxial horizontal: $\sigma_c = 10$ MPa	130
5.5.4.2.2. Ensaio triaxial horizontal: $\sigma_c = 20$ MPa	132
5.5.4.2.3. Ensaio triaxial horizontal: $\sigma_c = 30$ MPa	135
5.5.4.2.4. Ensaio triaxial horizontal: $\sigma_c = 40$ MPa	137

5.5.5. Parâmetros de resistência – Ensaio uniaxial e triaxial	139
5.5.5.1. Porosidade intermediária	139
5.5.5.2. Influência da tensão confinante nos ensaios	142
5.5.5.3. Critério de Mohr-Coulomb	144
5.5.5.4. Critério de Lade & Kim	146
5.5.5.5. Média dos parâmetros elásticos	149
5.5.5.5.1. Relações importantes na indústria do petróleo	150
<b>6 Conclusão</b>	<b>153</b>
6.1. Sugestões para trabalhos futuros	156
<b>7 Referências bibliográficas</b>	<b>157</b>
<b>8 Apêndices</b>	<b>163</b>
8.1. Apêndice I Índices físicos de todos os corpos de prova	164
8.2. Apêndice II Análise Microscópica	166
8.3. Apêndice III Gráficos Espectroscopia por energia dispersiva (EDS)	175
8.4. Apêndice IV Avaliação superficial dos corpos de prova	177
	177
8.5. Apêndice V Índices físicos e parâmetros elásticos compilados	179
8.6. Apêndice VI Parâmetros elásticos (Gráfico de dispersão)	181

## Lista de figuras

Figura 1 - Classificação do arcabouço carbonático. (Fonte: Adaptado de Domingues, 2011)	30
Figura 2 - Corpo de poro e garganta. (Fonte: Luza, 2011)	32
Figura 3 - Mapa geológico da área – (a) geologia regional; (b) travertinos geotermiais de Tivoli. (Fonte: Filippis <i>et al.</i> , 2013)	34
Figura 4 - Modelo digital de elevação da área de estudo. (a) Borda do cume Colle Fiorito; (b) Planos de falha em torno do Colle Fiorito; (c) Modelo digital de elevação mostrando o contraste no relevo entre as montanhas ao redor, o cume Colle Fiorito e a zona de platô de travertino. (Fonte: Filippis <i>et al.</i> , 2013)	36
Figura 5 - Sessão geológica identificando as superfícies erosivas. (Fonte: Filippis, 2013)	37
Figura 6 - Coluna estratigráfica da Bacia de Acque Albule. (Modificado de Luza, 2014)	38
Figura 7 - Percolação de fluidos e desgaseificação do CO <sub>2</sub> através das fraturas. (Fonte: Filippis, 2013)	39
Figura 8 - Rede de drenagens ao redor da pedreira de Tivoli. (Fonte: Google Earth)	40
Figura 9 - Bloco de travertino Romano de Tivoli não orientado.	45
Figura 10 - Orientação do acamamento do travertino Romano.	46
Figura 11 - Separação do bloco em dois “andares” – A1, mais denso e A2, mais poroso.	46
Figura 12 - Representação 3D do bloco e nomenclatura dada a cada par de faces.	47
Figura 13 - Corpos de prova verticais mais densos.	49
Figura 14 - Corpos de prova verticais mais porosos.	49
Figura 15 - Corpos de prova horizontais mais densos.	50
Figura 16 - Corpos de prova horizontais mais porosos.	50
Figura 17 - Rejeito de travertino. (A) brilho terroso; (B) brilho vítreo; (C) material acinzentado; (D) material escuro e manchas avermelhadas ao redor.	60
Figura 18 - Lâminas delgadas do travertino Romano para análise microscópica.	61
Figura 19 - Corpos de rejeito utilizados nas análises de MEV.	62

Figura 20 - CP's horizontais por grau de porosidade. (A) Mais densos; (B) Mais porosos.	66
Figura 21 - Fragmentos de travertino com porosidades variadas utilizados.	67
Figura 22 - Orientação dos exemplares nos ensaios. (Adaptado de ASTM, 2016)	68
Figura 23 - Espécime horizontal no ensaio brasileiro antes (a) e depois (b) da ruptura.	71
Figura 24 - Corpo de prova revestido por uma membrana de baixa resistência à tração sendo preparado para o ensaio uniaxial.	73
Figura 25 - Corpo de prova CPV 14 antes (a) e depois (b) do preenchimento.	75
Figura 26 - Montagem do conjunto de membranas para ensaio triaxial. (a) Membrana transparente colocada; (b) Membrana preta sendo colocada; (c) Membrana preta colocada e conjunto travado com presilhas nos contatos com os caps superior e inferior.	75
Figura 27 - Massa específica x Porosidade – Amostragem vertical.	83
Figura 28 - Massa específica x Porosidade – Amostragem horizontal.	85
Figura 29 - Atração magnética nos corpos de rejeito regular.	86
Figura 30 - Lâmina delgada de travertino Romano nº 12 com orientação ortogonal ao acamamento.	87
Figura 31 - Seção da lâmina 6 com poros grandes não preenchidos.	88
Figura 32 - Lâmina delgada de travertino Romano nº 4 com orientação ortogonal ao acamamento.	89
Figura 33 - Lâmina delgada de travertino Romano nº 9 com orientação paralela ao acamamento.	89
Figura 34 - Trecho com escala aumentada da lâmina delgada de travertino Romano nº 9 com orientação paralela ao acamamento.	90
Figura 35 - Calcita microcristalina (esquerda) e espática (direita) com zoom de 30x.	91
Figura 36 - Calcita espática com zoom de 100x e grãos de contaminantes.	91
Figura 37 - Calcita microcristalina com zoom de 1000x.	92
Figura 38 - Calcita microcristalina com zoom de 6500x.	92
Figura 39 - Gráfico de difração de raios-x do comportamento da calcita.	93
Figura 40 - Amostra analisada em poros de calcita (esq) e imagem do ponto no MEV (dir).	95
Figura 41 - Pontos da amostra analisada e curvas químicas por EDS de cada um deles.	96

Figura 42 - Amostra analisada de material escuro (esq) e imagem do ponto no MEV (dir).	97
Figura 43 - Pontos da amostra analisada e curvas químicas por EDS de cada um deles.	98
Figura 44 - Amostra analisada de material acinzentado (esq) e imagem no MEV (dir).	99
Figura 45 - Pontos da amostra analisada e curvas químicas por EDS de cada um deles.	99
Figura 46 - Amostras verticais 6 e 14 – (A) Amostra densa à esquerda e amostra com poros concentrados na região central à direita; (B) Amostra densa à esquerda e amostra com poros distribuídos ao longo do corpo de prova à direita.	101
Figura 47 - Colapso de poros em CPV 59 e CPV 21.	102
Figura 48 - Corpos de prova de alta porosidade rompidos em ensaios de PLH.	103
Figura 49 - Corpos de prova de baixa porosidade rompidos em ensaios de PLH.	103
Figura 50 - Gráfico de Porosidade total x Porosidade isolada.	104
Figura 51 - Lâmina 2 (Ortogonal ao acamamento) – Binária – Porosidade Total de 3,03%.	105
Figura 52 - Lâmina 6 (Paralela ao acamamento) – Binária – Porosidade Total de 15,85%.	106
Figura 53 - Lâmina 4 (Ortogonal ao acamamento) – Binária – Porosidade Total de 7,16%.	106
Figura 54 - Lâmina 12 (Ortogonal ao acamamento) – Binária – Porosidade Total de 4,45%.	107
Figura 55 - Gráfico de porosimetria – Intrusão incremental x Diâmetro dos poros.	108
Figura 56 - Gráfico de porosimetria – Intrusão acumulativa x Diâmetro dos poros.	110
Figura 57 - Poro fenestral preenchido por calcita espática visto no MEV com zoom de 40x.	110
Figura 58 - Poro com preenchimento de esparita e magnetita incrustada visto no MEV em zoom de 600x.	111
Figura 59 - Microporos intergranulares na calcita microcristalina com preenchimento de material ex situ visto no MEV com zoom de 1000x.	111
Figura 60 - Point Load Horizontal – Resistência uniaxial x Porosidade total.	113
Figura 61 - Resistência a tração na ruptura x Porosidade total.	115

Figura 62 - CPV - Tensão desviadora x Deformação axial (Ensaio uniaxial).	116
Figura 63 - CPV - Deformação volumétrica x Deformação axial (Ensaio uniaxial).	117
Figura 64 - CPH - Tensão desviadora x Deformação axial (Ensaio uniaxial).	118
Figura 65 - CPH - Deformação volumétrica x Deformação axial (Ensaio uniaxial).	119
Figura 66 - CPV - Tensão desviadora x Deformação axial (Ensaio triaxial – 10 MPa).	121
Figura 67 - CPV – Deformação volumétrica x Deformação axial (Ensaio triaxial – 10 MPa).	122
Figura 68 - CPV - Tensão desviadora x Deformação axial (Ensaio triaxial – 20 MPa).	124
Figura 69 - CPV – Deformação volumétrica x Deformação axial (Ensaio triaxial – 20 MPa).	124
Figura 70 - CPV - Tensão desviadora x Deformação axial (Ensaio triaxial – 30 MPa).	126
Figura 71 - CPV – Deformação volumétrica x Deformação axial (Ensaio triaxial – 30 MPa).	127
Figura 72 - CPV - Tensão desviadora x Deformação axial (Ensaio triaxial – 40 MPa).	128
Figura 73 - CPV – Deformação volumétrica x Deformação axial (Ensaio triaxial – 40 MPa).	129
Figura 74 - CPH - Tensão desviadora x Deformação axial (Ensaio triaxial – 10 MPa).	130
Figura 75 - CPH – Deformação volumétrica x Deformação axial (Ensaio triaxial – 10 MPa).	131
Figura 76 - CPH - Tensão desviadora x Deformação axial (Ensaio triaxial – 20 MPa).	133
Figura 77 - CPH – Deformação volumétrica x Deformação axial (Ensaio triaxial – 20 MPa).	133
Figura 78 - CPH - Tensão desviadora x Deformação axial (Ensaio triaxial – 30 MPa).	135
Figura 79 - CPH – Deformação volumétrica x Deformação axial (Ensaio triaxial – 30 MPa).	136

Figura 80 - CPH - Tensão desviadora x Deformação axial (Ensaio triaxial – 40 MPa).	138
Figura 81 - CPH – Deformação volumétrica x Deformação axial (Ensaio triaxial – 40 MPa).	138
Figura 82 - Ensaios triaxiais - Tensão desviadora na ruptura x Tensão confinante.	140
Figura 83 - CPV – Tensão desviadora x Tensão confinante – Limite de porosidade.	141
Figura 84 - CPH – Tensão desviadora x Tensão confinante – Limite de porosidade.	142
Figura 85 - CPV – Tensão desviadora x Porosidade total.	143
Figura 86 - CPH – Tensão desviadora x Porosidade total.	143
Figura 87 - Gráfico $p \times q$ – Critério de Mohr-Coulomb (Envoltórias de resistência).	145
Figura 88 - Critério de Lade & Kim (Envoltórias de resistência).	148

## Lista de tabelas

Tabela 1 - Índices físicos do travertino Romano. (Adaptado de Luza, 2014)	41
Tabela 2 - Ensaio uniaxial do travertino Romano. (Adaptado de Luza, 2014)	41
Tabela 3 - Ensaio triaxial do travertino Romano. (Adaptado de Luza, 2014)	42
Tabela 4 - Critério de falha do travertino Romano. (Adaptado de Luza, 2014)	42
Tabela 5 - Porosidade e massa específica do travertino Romano. (Adaptado de Kiewiet, 2015)	43
Tabela 6 - Ensaio triaxial do travertino Romano. (Adaptado de Kiewiet, 2015)	43
Tabela 7 - Parâmetros de elasticidade e resistência do travertino Romano. (Adaptado de Kiewiet, 2015)	44
Tabela 8 - Grupos de corpos de prova por direção do furo e grau de porosidade visual.	48
Tabela 9 - Tabela de lâminas do travertino com orientação e porosidade variadas.	61
Tabela 10 - Grupo de amostras em pó analisadas na difração de raios-x.	63
Tabela 11 - Fator de conversão K para o índice de carga pontual em função do diâmetro da amostra. (Fonte: ASTM)	69
Tabela 12 - Parâmetros físicos dos espécimes nos ensaios verticais de carga pontual.	69
Tabela 13 - Parâmetros físicos dos espécimes nos ensaios horizontais de carga pontual.	70
Tabela 14 - Parâmetros físicos dos espécimes verticais nos ensaios brasileiros.	71
Tabela 15 - Parâmetros físicos dos espécimes horizontais nos ensaios brasileiros.	72
Tabela 16 - Planilha do Excel para cálculo de $G_s$ do Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio.	77
Tabela 17 - Índices medidos dos corpos de prova verticais.	78
Tabela 18 - Índices medidos dos corpos de prova horizontais.	79

Tabela 19 - Índices calculados dos corpos de prova verticais.	80
Tabela 20 - Índices calculados dos corpos de prova verticais.	81
Tabela 21 - Índices calculados dos corpos de prova verticais.	82
Tabela 22 - Índices calculados dos corpos de prova horizontais.	83
Tabela 23 - Índices calculados dos corpos de prova horizontais.	84
Tabela 24 - Índices calculados dos corpos de prova horizontais.	84
Tabela 25 - Percentuais dos elementos químicos obtidos por espectrometria de raios-x.	94
Tabela 26 - Percentuais dos elementos químicos com a determinação elementar de CHN.	94
Tabela 27 - Dados de intrusão e da estrutura porosa – Porosimetria de mercúrio.	108
Tabela 28 - Classificação de tamanho dos poros. (Fonte: Domingues, 2011)	109
Tabela 29 - Resultados dos ensaios de carga pontual com eixo axial vertical.	112
Tabela 30 - Resultados dos ensaios de carga pontual com eixo axial horizontal.	113
Tabela 31 - Resultados dos ensaios brasileiros horizontais (EBH).	114
Tabela 32 - Resultados dos ensaios brasileiros verticais (EBV).	114
Tabela 33 - CPV – Índices físicos (Ensaio uniaxial).	117
Tabela 34 - CPV – Propriedades da curva e parâmetros elásticos (Ensaio uniaxial).	117
Tabela 35 - CPH – Índices físicos (Ensaio uniaxial).	119
Tabela 36 - CPH – Propriedades da curva e parâmetros elásticos (Ensaio uniaxial).	120
Tabela 37 - CPV – Índices físicos (Ensaio triaxial – 10 MPa).	122
Tabela 38 - CPV – Propriedades da curva e parâmetros elásticos (Ensaio triaxial – 10 MPa).	123
Tabela 39 - CPV – Índices físicos (Ensaio triaxial – 20 MPa).	125
Tabela 40 - CPV – Propriedades da curva e parâmetros elásticos (Ensaio triaxial – 20 MPa).	125
Tabela 41 - CPV – Índices físicos (Ensaio triaxial – 30 MPa).	127
Tabela 42 - CPV – Propriedades da curva e parâmetros elásticos (Ensaio triaxial – 30 MPa).	128

Tabela 43 - CPV – Índices físicos (Ensaio triaxial – 40 MPa).	129
Tabela 44 - CPV – Propriedades da curva e parâmetros elásticos (Ensaio triaxial – 40 MPa).	130
Tabela 45 - CPH – Índices físicos (Ensaio triaxial – 10 MPa).	131
Tabela 46 - CPH – Propriedades da curva e parâmetros elásticos (Ensaio triaxial - 10 MPa).	132
Tabela 47 - CPH – Índices físicos (Ensaio triaxial – 20 MPa).	134
Tabela 48 - CPH – Propriedades da curva e parâmetros elásticos (Ensaio triaxial - 20 MPa).	134
Tabela 49 - CPH – Índices físicos (Ensaio triaxial – 30 MPa).	136
Tabela 50 - CPH – Propriedades da curva e parâmetros elásticos (Ensaio triaxial - 30 MPa).	137
Tabela 51 - CPH – Índices físicos (Ensaio triaxial – 40 MPa).	139
Tabela 52 - CPH – Propriedades da curva e parâmetros elásticos (Ensaio triaxial - 40 MPa).	139
Tabela 53 - CPV – Parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb.	146
Tabela 54 - CPH – Parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb.	146
Tabela 55 - CPV – Parâmetros adimensionais de Lade & Kim e pressão atmosférica.	147
Tabela 56 - CPH – Parâmetros adimensionais de Lade & Kim e pressão atmosférica.	147
Tabela 57 - CPV – Média dos parâmetros elásticos separados por grupo de tensão confinante e grau de porosidade.	149
Tabela 58 - CPH – Média dos parâmetros elásticos separados por grupo de tensão confinante e grau de porosidade.	150
Tabela 59 - Razão entre os módulos de elasticidade (E) e deformabilidade ( $E_{Def}$ ) com a resistência à compressão simples nas duas direções de acamamento (CPV e CPH).	151
Tabela 60 - CPV - Razão entre a resistência à compressão simples (UCS) e a resistência à tração ( $\sigma_T$ ), separados por grau de porosidade.	151
Tabela 61 - CPH - Razão entre a resistência à compressão simples (UCS) e a resistência à tração ( $\sigma_T$ ), separados por grau de porosidade.	152

## Lista de siglas

CP	Corpo de Prova
CPV	Corpo de Prova Vertical
CPH	Corpo de Prova Horizontal
ASTM	American Society Testing n' Materials
ABNT	Associação Bras. de Normas Técnicas
ISRM	International Society for Rock Mechanics
NBR	Norma Técnica Brasileira
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
ROP	Rate Of Penetration
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DEM	Digital Elevation Model
UNESP	Universidade Estadual Paulista
PLT	Point Load Test
EB	Ensaio Brasileiro
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
CHN	Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio
LRDX	Laboratório de Difração de Raios-X
DCMM	Departamento de Ciência de Materiais e Metalurgia da PUC-Rio
LEMETRO	Laboratório de Mecânica e Tecnologia de Rochas da UFRJ
EDXRF	Espectroscopia de Raios-X por Dispersão de Energia
LIRF	Laboratório de Interação Rocha-Fluido
GTEP	Grupo de Tecnologia e Engenharia do Petróleo
LVDT	Linear Variable Differential Transformer

## Lista de símbolos

$D$	Diâmetro Médio
$H$	Altura
$M_{Nat}$	Massa Natural
$M_s$	Massa Seca
$M_{Sub}$	Massa Submersa
$M_{Sat} Ap$	Massa Saturada Aparente
Desloc.	Deslocamento
$V_{Total}$	Volume Total
$w$	Teor de Umidade
$Vv_E$	Volume de Vazios dos Poros Externos
$Mw_E$	Massa de Água dos Poros Externos
$Mw_i$	Massa de Água dos Poros Internos
$Vv_i$	Volume de Vazios dos Poros Internos
$M_w$	Massa de Água Total nos Poros
$Vv_w$	Volume de Vazios Interconectados
$M_{Sat}$	Massa Saturada Total
$\eta_{wi}$	Porosidade Interconectada Interna
$\eta_{we}$	Porosidade Interconectada Externa
$R\eta_w$	Razão: Porosidades Interna e Externa
$\eta_w$	Porosidade Interconectada Total
$\rho_{sol}$	Massa Específica dos Sólidos
$V_s$	Volume dos Sólidos
$V_v$	Volume de Vazios Total
$\eta_{Total}$	Porosidade Total
$\Delta\eta$	Porosidade Isolada
$\eta_{Isso}$	Percentual de Poros Isolados
$e$	Índice de Vazios
$g$	Aceleração da Gravidade

$\rho_s$	Massa Específica Seca
$\rho_{\text{Sat}} A_p$	Massa Específica Saturada Aparente
$\rho_{\text{Sat}}$	Massa Específica Saturada
$\gamma_s$	Peso Específico Seco
$\gamma_{\text{Sat}} A_p$	Peso Específico Saturado Aparente
$\gamma_{\text{Sat}}$	Peso Específico Saturado
$\gamma_{\text{Sub}}$	Peso Específico Submerso
$\sigma_c$	Tensão Confinante
$\sigma_d$	Tensão Desviadora
$\sigma_R$	Tensão na Ruptura
$\sigma_{\text{Max}}$	Tensão Desviadora Máxima Atingida
$\sigma_T$	Tensão de Tração
$\epsilon_{Ax}$	Deformação Axial
$\epsilon_{\text{Rad}}$	Deformação Radial
$\epsilon_{\text{Vol}}$	Deformação Volumétrica
$E$	Módulo de Elasticidade (ou de Young)
$E_{\text{Def}}$	Módulo de Deformabilidade
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$G$	Módulo de Cisalhamento
$K_r$	Módulo Volumétrico por Relação
$K$	Módulo Volumétrico
$P$	Carga Máxima Aplicada na Ruptura
$\Delta L$	Deslocamento do LVDT
$I_s$	Índice de Carga no Point Load Test
UCS	Resistência a Compressão Uniaxial
$K_f$	Envoltória de Ruptura no Gráfico $p \times q$
$a'$	Coesão Efetiva no Gráfico $p \times q$
$\alpha'$	Ângulo de Atrito Efetivo no Gráfico $p \times q$
$c'$	Coesão Efetiva no Gráfico $\sigma \times \tau$

$\phi'$	Ângulo de Atrito Efetivo no Gráfico $\sigma \times \tau$
$\eta_1$	Parâmetro adimensional de Lade & Kim equivalente a $f(n)$
$m$	Parâmetro adimensional exponencial de Lade & Kim
$P_a$	Pressão Atmosférica ao Nível do Mar

# 1

## Introdução

### 1.1.

#### Relevância e motivação

Sabe-se que as rochas reservatório carbonáticas representam pelo menos metade da produção mundial de petróleo, sendo estas marcadas pela sua distinta complexidade, uma vez que este tipo de rocha tem um caráter bastante heterogêneo.

O carbonato ocorre sob diversificadas mineralogias, estando ainda suscetível a substituição total ou parcial de algum componente. Ou ainda recristalização, que consiste na mudança da estrutura cristalina. Característico de meios aquosos, este material normalmente ocorre em ambiente lacustre ou marinho, podendo ter influência da flora e fauna local na sua formação e/ou modificação, tanto em escala macro, como microscópica. Apenas este conjunto de fatores justificariam a heterogeneidade observada em rochas carbonáticas. Porém, o ambiente carbonático além de sofrer influência do intemperismo, transporte, retrabalhamento e deposição em um novo local, formando uma nova rocha a partir de grãos de outros minerais (ou ainda de outras rochas carbonáticas), também pode receber material *ex situ* ao seu ambiente, isto é, oriundo de fora da bacia sedimentar, denominado terrígeno. Considerando parte ou total dos fatores citados é possível compreender o porquê das rochas carbonáticas apresentarem um caráter tão heterogêneo, tanto sob o ponto de vista geológico, como geomecânico.

No Brasil, as rochas carbonáticas ganharam destaque com a descoberta dos reservatórios carbonáticos do pré-sal. Conhecer e caracterizar estes reservatórios, que têm apresentado baixas taxas de penetração, segundo Milani (2010), demandará grandes esforços em pesquisa e desenvolvimento. O presente autor, que trabalhou com reservatórios carbonáticos em plataformas *offshore*, reforça o que foi dito por Milani. As taxas de penetração, vulgo ROP (*Rate Of Penetration*), utilizadas no carbonato do pré-sal ficam em torno de cinco metros por hora, chegando a casos extremos de um metro por hora. Para efeito de comparação é possível furar uma camada de halita (rocha evaporítica de composição idêntica ao sal de cozinha) à taxa ROP de 90 metros por hora, embora seja razoável neste campo profissional a utilização de até 30 metros por hora.

A caracterização de qualquer reservatório ou mesmo a estratigrafia acima dele pode ser feita através do emprego da sísmica, que não depende de perfuração e fornece informações preliminares sob o ambiente de estudo. Seguida de poços de exploração, onde pode-se observar o material perfurado, ainda que totalmente fragmentado em calha e, junto ao trecho inicial da coluna de perfuração, utilizar algumas ferramentas geofísicas a fim de analisar propriedades da rocha de forma

indireta, como raio gama e potencial espontâneo, concomitante a perfuração. Por último, em geral somente para rochas reservatório, é possível realizar a perfilagem de poços, a qual é feita após um segmento do poço já ter sido perfurado, mas não revestido. É feita com equipamento especial e um conjunto de sensores complexos, onde a corrida poço a dentro é feita exclusivamente para a perfilagem. Demanda um complexo aparato, incluindo a própria cabine de monitoramento e mão de obra extremamente qualificada. É um processo de elevado custo e somente válido para ambientes onde haja possível retorno econômico, o que praticamente se traduz em rochas reservatório.

Contudo, a caracterização geomecânica só é possível através de ensaios mecânicos em corpos de prova de rocha. Porém, as elevadas profundidades em que se encontram estes reservatórios, em geral entre 3000 e 5000 metros, tornam uma operação muito cara, tendo em vista o alto custo do equipamento, equipe especializada e a pequena quantidade de material que é resgatada, isto quando não ocorrem perdas, que podem ser totais. Por esta razão, a obtenção de corpos de prova para ensaios triaxiais com exemplares de reservatórios carbonáticos, especialmente para muitos ensaios, é rara. Como alternativa para esta avaliação utiliza-se normalmente rochas análogas. Para o exemplo das rochas do pré-sal costuma-se utilizar amostras de travertino.

Como citado acima, a dificuldade na obtenção de exemplares da rocha reservatório para a realização de ensaios mecânicos levou ao emprego de um método alternativo através de rocha análoga. Diversos pesquisadores acadêmicos e da Petrobrás sugerem o uso do travertino como análogo ao carbonato microbial do pré-sal. Dentre eles, Domingues (2011) e Kiewiet (2015), que usaram o travertino Romano.

Kiewiet (2015) apontou algumas razões para tal consideração - apresentam resistência mecânica elevada e podem apresentar permeabilidade considerável, concentrada principalmente ao longo da direção de acamamento. Estas duas características tornariam o travertino um potencial análogo de fácies de rochas reservatório carbonáticas de elevadas profundidades, já que nelas são esperadas rochas de elevadas resistências.

## **1.2. Objetivos**

O foco central deste trabalho buscou contribuir no conhecimento sobre o travertino Romano, suas características, fatores geológicos influentes e, principalmente, o comportamento geomecânico anisotrópico em duas direções - ortogonal e paralela ao acamamento sedimentar. Domingues (2011) realizou um estudo experimental em três tipos de travertino, dentre eles o Romano, levantando diversas informações quanto a propriedades físicas e químicas deste material, porém sob um estudo da resistência mais concentrado em ensaios uniaxiais no travertino Itaboraí. Luza (2014) trabalhou exclusivamente com travertino Romano, caracterizando o material sob diversos pontos de vista macro e microscópicos, além

de realizar ensaios uni e triaxiais de baixo confinamento, chegando a cerca de 10 MPa. Já Kiewiet (2015) realizou um estudo aprofundado com travertino Romano com amostras intactas e cisalhadas para estudar a reativação de falha na rocha. À exceção de Kiewiet (2015), que trabalhou também com espécimes com eixo axial inclinado em relação ao acamamento, todos os autores citados trabalharam com exemplares com eixo axial dos corpos de prova orientados verticalmente em relação ao acamamento.

O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo experimental aprofundado sobre rochas carbonáticas, utilizando o mesmo material de estudo dos autores acima, isto é, o travertino Romano. Porém, além de uma análise descritiva completa da rocha, foram realizados ensaios de compressão com espécimes com eixo axial vertical e paralelo ao acamamento, denominados amostras verticais e horizontais, respectivamente. Além de estudar o comportamento geomecânico da rocha em duas direções, buscou-se também trabalhar com tensões confinantes mais elevadas, chegando a 40 MPa. Ensaios de tração com amostragens de rocha verticais e horizontais também foram realizados.

Considerada a espessura dos reservatórios carbonáticos brasileiros, entre 3000 e 5000 metros, e que a lâmina da água fica em torno de 2000 metros, estimou-se uma tensão total no reservatório entre 95 e 145 MPa. Porém, descontando-se a poropressão, as tensões efetivas verticais para este mesmo intervalo ficariam em torno de 45 a 75 MPa. Considerando uma razão conservadora em torno de 50% entre as tensões verticais e horizontais, seriam esperadas nestes reservatórios tensões horizontais efetivas aproximadamente entre 22 e 36 MPa. Por esta razão adotou-se um intervalo de tensões confinantes entre zero (uniaxial) e 40 MPa para realização dos ensaios triaxiais.

Buscou-se levantar considerações sobre a área de estudo e informações relevantes sobre os aspectos geológicos e geomorfológicos da região de origem do material para comparar com a análise descritiva da rocha. Para um eficiente estudo descritivo, dividiu-se a interpretação da rocha em caracterização petrográfica, química e caracterização da estrutura porosa. Aqui foi realizada uma diversidade de análises para tentar compreender tudo que é natural da rocha e o que é material *ex situ*, bem como a influência deste conjunto na resistência mecânica da mesma. Também foram realizados ensaios de correlação ao uniaxial, isto é, o ensaio de carga pontual (*Point Load Test*) e ensaio de tração indireta (Ensaio Brasileiro).

Este trabalho estimou a resistência do material com ensaios triaxiais sob tensões confinantes relativamente altas, isto é, com valores ainda pouco considerados em estudos similares. E ainda com corpos de prova sob duas orientações de eixo axial em relação ao acamamento. Outro destaque é que foi calculada uma grande diversidade de índices físicos de todos os corpos de prova para auxiliar na interpretação dos resultados mecânicos, bem como utilizou-se principalmente a porosidade total, calculada a partir da densidade dos sólidos.

Ao final, compilou-se os dados em gráficos de tensão desviadora *versus* deformação axial para cada grupo de tensão confinante, bem como gráficos de tensão desviadora *versus* porosidade total. Os resultados foram inseridos em dois

critérios de ruptura para melhor entendimento e interpretação, bem como obtenção dos parâmetros de resistência do material. Mohr-Coulomb, mais tradicional critério de ruptura utilizado na engenharia, e Lade & Kim, muito comum no setor petrolífero.

### **1.3.**

## **Estrutura da dissertação**

### **Pré-Textual**

Folha de rosto; Termo de aprovação; Ficha Catalográfica; Agradecimentos; Resumo; Abstract; Sumário; Lista de figuras; Lista de tabelas; Lista de siglas; Lista de símbolos.

### **Capítulo 1 – Introdução**

Breve esclarecimento sobre a relevância do estudo, características e objetivos do mesmo e a estrutura da dissertação.

### **Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica**

Um breve resumo sobre rochas carbonáticas, seus principais constituintes, mineralogia, geoquímica e referência aos modelos de classificação. Também foi feita uma breve descrição sobre o travertino e sua formação, bem como citado um modelo de classificação específico para o mesmo. Depois foi dado enfoque especificamente ao travertino Romano, considerando seu contexto geológico, geomorfológico, estratigráfico e possíveis influências sobre a rocha – hidrotermalismo e influência hidrográfica da região

### **Capítulo 3 – Material utilizado**

Explicação completa sobre o material utilizado, características do bloco, direção do acamamento e análise preliminar da porosidade. Seguida do tipo de corpos de prova obtidos, dimensões, orientação do furo e nomenclatura de todo material.

### **Capítulo 4 – Métodos**

Metodologia utilizada na obtenção dos índices físicos, bem como toda a análise petrográfica química e da estrutura porosa. Por último, descrição de toda metodologia empregada nos ensaios mecânicos.

### **Capítulo 5 – Resultados**

Os resultados foram lançados e quando numéricos, analisados, plotados e comparados. Buscou-se comentar tudo de relevante observado a fim de se produzir uma boa conclusão.

### **Capítulo 6 – Conclusões**

Com base nos dados obtidos e resultados, e na comparação entre eles, foram feitas conclusões e considerações pertinentes, além de sugestões para trabalhos futuros.

### **Pós-Textual**

Referências bibliográficas; Apêndices.

## 2

### Revisão bibliográfica

Neste capítulo foi feita uma breve abordagem sobre rochas carbonáticas, suas características químicas e mineralógicas, bem como fatores que podem modificar a estrutura cristalina do carbonato. Em seguida, um breve resumo sobre os principais componentes do arcabouço carbonático e referência aos principais modelos de classificação da estrutura granular do carbonato. Pequenas considerações foram feitas a respeito da estrutura porosa e citações aos principais modelos de classificação para carbonatos. Um breve resumo sobre travertino e citação a um modelo de classificação para esta rocha, seguidos pelas considerações mais importantes acerca do travertino Romano completaram a revisão bibliográfica quanto as características geoquímicas desta rocha.

Quanto as características geomecânicas foram utilizados dados de trabalhos anteriores, também utilizando o travertino Romano, onde extraíram-se resultados de ensaios mecânicos, parâmetros elásticos e parâmetros de resistência a fim de se fazer uma comparação com os resultados obtidos neste trabalho.

#### 2.1.

##### Rochas carbonáticas

O carbonato normalmente ocorre na natureza como rocha oriunda de precipitado químico, com a possibilidade deste fenômeno ocorrer por interferência biológica. Para um carbonato ser formado por clastos, ele precisa ter sido retrabalhado (erodido, transportado e depositado) a partir de fragmentos de outras rochas carbonáticas, de origem química ou bioquímica. Porém, esta é uma condição de retrabalhamento de um material pré-existente. O material carbonático depositado primariamente por precipitação, diferente dos sedimentos terrígenos, é formado diretamente ou muito próximo à área de acumulação (bacia sedimentar), isto é, autóctone (Suguio, 2003).

Todos os carbonatos são formados pela combinação bivalente do ânion composto  $(\text{CO}_3)^{-2}$  com algum metal alcalino terroso, que possui valência +2 e com afinidade química a esta molécula. Ou também com qualquer outro cátion, necessariamente com afinidade química e que apresente esta mesma carga positiva. Os cátions mais comuns encontrados associados a molécula de carbonato são Ca (cálcio), Mg (magnésio) e Fe (ferro).

A mineralogia de mais comum ocorrência é composta por: calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomita [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ] e aragonita ( $\text{CaCO}_3$ ). Todos são carbonato de cálcio e com propriedades físicas similares. As diferenças aparecem nos “contaminantes” ou na

estrutura cristalina. A calcita possui sistema cristalino trigonal (classe hexagonal escalenoédrica), dureza 3,0 na Escala de Mohs, clivagem em três direções, brilho vítreo a terroso, densidade relativa de 2,72 e reage a frio com ácido clorídrico (HCl). A dolomita apresenta o sistema trigonal (classe romboédrica), dureza de 3,5 a 4,0, mas não reage com o HCl a frio, devido a substituição parcial do cálcio pelo magnésio na composição. Apresenta brilho vítreo à nacarado e densidade relativa de 2,85. Já a aragonita apresenta o sistema cristalino ortorrômbico (classe bipiramidal rômica), brilho vítreo, não possui clivagem romboédrica; isto a difere da Calcita. Além disso, possui clivagem imperfeita em uma direção, reage menos intensamente do que a calcita com o ácido clorídrico a frio, apresenta dureza entre 3,5 e 4,0 na escala de Mohs e densidade relativa de 2,95.

Dos três minerais principais, calcita e aragonita representam mais da metade dos carbonatos presentes na natureza. Este último é mais instável, principalmente em condições de superfície, sendo muito comum a recrystalização (mudança de sistema cristalino) para calcita. Aquela por sua vez é o mais abundante e comum deste tipo de mineral. Já a dolomita não é primária e resulta da substituição (“contaminação”) dos íons de  $\text{Ca}^{+2}$  pelos de  $\text{Mg}^{+2}$ . Esta substituição pode ser total e formar este mineral secundário. Ou parcial, resultando no que é chamado calcita dolomitizada.

Outros dois minerais de relativa ocorrência na natureza são siderita ( $\text{FeCO}_3$ ) e ankerita [ $\text{Ca}(\text{Mg,Fe})(\text{CO}_3)_2$ ]. A siderita tem sistema cristalino trigonal (classe hexagonal escalenoédrica), brilho vítreo, clivagem romboédrica perfeita, dureza entre 3,5 e 4,0 na Escala Mohs e densidade relativa 3,8. Por sua vez, a ankerita tem sistema cristalino trigonal (classe romboédrica), clivagem perfeita, brilho vítreo a perláceo, dureza entre 3,0 e 4,0 e densidade relativa próxima de 2,90.

Da mesma forma que ocorre com a dolomita, a formação de siderita e ankerita pode estar ligada diretamente a substituição, ou seja, íons de cálcio substituídos total ou parcialmente por ferro e magnésio. Esta informação é de extrema relevância, pois existe a suspeita de influência de fluídos hidrotermais no material de estudo.

Os principais minerais de ambiente carbonático foram citados acima. Existem cerca de mais de 50 minerais, muitos instáveis sob condições ambientais e que podem ser substituídos, recrystalizados ou até dissolvidos. O fundamental sobre o ambiente deposicional carbonático é que precisa ser necessariamente aquoso, como lacustre ou marinho, e normalmente de baixa energia. Os minerais vão precipitar conforme ocorrerem em quantidades satisfatórias para tal, em dissociação iônica no meio aquoso e menor tendência de solubilidade nas condições de temperatura e pressão encontrados. Quanto menos solúvel for o mineral, mais rapidamente ele tende a precipitar. Também é importante citar os fatores que controlam essa deposição. Apesar de um assunto complexo, estes podem ser resumidos fundamentalmente em:

**Temperatura** – Quanto maior a temperatura, mais favorável à precipitação carbonática. Depósitos calcários modernos são muito mais comuns em regiões tropicais do que frias.

**Pressão** – Tal como a temperatura, quanto maior a pressão, mais favorável à deposição dos carbonatos. Curvas de solubilidade mostram que quanto mais alta a pressão, menor a solubilidade para uma grande variedade de solutos.

**Grau de agitação** – Mais comum em zonas de baixa energia, a deposição carbonática também pode ocorrer em ambientes agitados, inclusive influenciado por ondas.

**Atividade Orgânica** – Tão importante quanto temperatura e pressão, a atividade microbial (*zooplâncton*) e de seres macroscópicos, tais como gastrópodes e braquiópodes influenciam diretamente na precipitação química do carbonato, bem como alguns casos de substituição e recristalização.

### 2.1.1. Componentes do arcabouço

Rochas calcárias apresentam composição bastante diversificada. Existem variações nas separações de grupos e classificações desses componentes. Os conceitos introduzidos por Folk (1968), que são citados e incrementados por outros autores, foram utilizados. O referido autor divide os componentes do arcabouço carbonático em aloquímicos e ortoquímicos.

#### 2.1.1.1. Componentes aloquímicos

**Oólitos e Pisólitos** – partículas esferoidais constituídas concentricamente, formadas principalmente por calcita ou aragonita. Quando com diâmetro até 2,0 mm são denominadas oólitos. Superiores a este valor, pisólitos.

**Bioclastos** – materiais esqueléticos oriundos de atividade orgânica, como as carapaças carbonáticas dos mais diversos organismos macro e microscópicos. Um exemplo muito comum são restos de concha de molusco que são denominadas neste caso específico como coquinas.

**Intraclastos** – termo introduzido por Folk (1959) para designar fragmentos carbonáticos depositados num arcabouço após o processo de sedimentação deste.

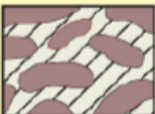

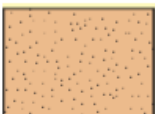

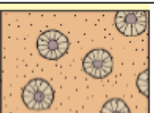


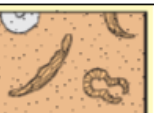

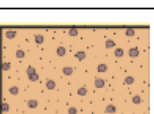
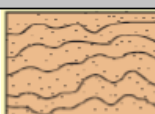
**Pelotas fecais** – partículas extremamente pequenas (entre 0,03 a 0,15 mm), de forma esférica e compostas por calcita microcristalina. Em geral são excrementos de invertebrados depositados em sedimentos marinhos. Diferenciam-se dos oólitos pelo tamanho muito menor, ausência de textura concêntrica e ausência de intraclastos.

### 2.1.1.2. Componentes ortoquímicos

**Micrita (Calcita microcristalina)** – Segundo Grabau (1924), a textura micrítica é caracterizada por grãos com diâmetro igual ou inferior a 5 micrômetros (5  $\mu\text{m}$ ). Representa a porção lamosa de carbonato (grãos finos) análoga à matriz em um arenito. Folk (1959) afirma que este material pode ocorrer sob a forma de calcita ou aragonita.

**Esparita (Calcita espática)** – Análogo ao cimento em rochas terrígenas, esparita é um agregado de cristais de carbonato formados principalmente por calcita, aragonita, calcita dolomitizada ou dolomita, com tamanhos maiores a 4  $\mu\text{m}$ , que precipitam nos espaços vazios existentes entre os grãos dos sedimentos carbonáticos.

A Figura 1 ilustra esta classificação, onde as duas primeiras colunas constituem as rochas aloquímicas. Já na terceira estão incluídas as rochas ortoquímicas e, separadamente, os biolitito, que abrangem construções recifais e outros tipos de bioconstruções (Tucker, 1991; Lopes, 1995).

		Rochas aloquímicas		Rochas ortoquímicas
Tipo de grão aloquímico		Calcita espática	calcita microcristalina	Matriz micrítica sem grãos aloquímicos
	Intraclastos	 <b>Intrasparito</b>	 <b>Intramicrito</b>	 <b>Micrito</b>
	Oólitos	 <b>Oosparito</b>	 <b>Oomicrito</b>	 <b>Dismicrito</b>
	Bioclastos	 <b>Bioesparito</b>	 <b>Biomicrito</b>	Rochas recifais autóctones
	Pelotas fecais	 <b>Pelesparito</b>	 <b>Pelmicrito</b>	
				 <b>Biolitito</b>

**Figura 1** Classificação do arcabouço carbonático. (Fonte: Adaptado de Domingues, 2011)

### 2.1.2.

#### Classificação da estrutura granular

Existem variados modelos de classificação para rochas calcárias. O mais antigo e, até certo ponto, bastante abrangente foi proposto por Grabau (1924). Ele utiliza para rochas carbonáticas os mesmos termos utilizados para classificação de rochas terrígenas, como lutito (rocha com predomínio de material lamoso), arenito (predominante areia) e rudito (conglomerado) acrescidos do prefixo “calc”. No Brasil é uma nomenclatura popular no meio acadêmico, porém satisfatória apenas para determinações de campo ou outros trabalhos que necessitem de uma descrição sucinta, tal como interpretação de amostras de calha diretamente em plataformas de petróleo. Existem dois propósitos principais para sistemas de classificação: realizar descrição sistemática de propriedades fundamentais da rocha e facilitar a compreensão da informação dada.

Os modelos de classificação mais modernos e populares utilizados até os dias de hoje para classificação de materiais detríticos foram propostos por Folk (1959), com uma pequena atualização em 1962, e Dunham (1962). Para classificações de recifes os modelos mais clássicos foram desenvolvidos por Embry e Klovan (1971) e Riding (2002). Por último, um modelo muito utilizado que considera aspectos deposicionais, diagenéticos e biológicos foi proposto por Wright (1992).

Folk (1959/1962) e Dunham (1962) funcionam muito bem para classificar carbonatos detríticos, mas não são usuais para descrever rochas recifais ou texturas diagenéticas. Para recifes, por exemplo, Folk classifica como biolitito (*biolithite*), enquanto Dunham como *boundstone*. Os termos se referem, de forma indiscriminada, a uma coisa só. Contudo, rochas recifais são bastante heterogêneas e apresentam grande variação na porosidade. Pensando nisso, Embry e Klovan (1971) foram os primeiros a criar uma classificação mais apropriada para rochas carbonáticas de recifes, que nada mais é do que uma extensão do Modelo de Dunham (1962). Posteriormente Riding (2002) apresentou uma classificação mais completa para rochas recifais. Dos modelos de classificação mais comuns citados, o único que considera além de características da rocha formada, características dos ambientes de formação e deposição é o proposto por Wright (1992), ou seja, para estudos mais aprofundados, como de rocha reservatório, este modelo é o mais apropriado.

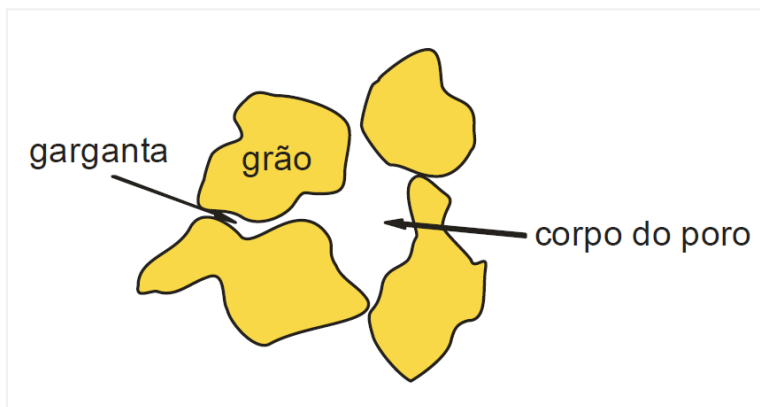
Os modelos referidos acima são citados e explicados em estudos sobre o travertino Romano, a exemplo de Domingues (2011) e Luza (2014).

### 2.1.3.

#### Classificação da estrutura porosa

A porosidade nas rochas pode ser de dois tipos: primária, gerada durante a diagênese da rocha, ou secundária, originada a partir de qualquer processo pós-diagenético, tal como dissolução por percolação de fluídos.

Al-kharusi (2007) define a estrutura porosa num sistema prático em corpo do poro, que representa uma unidade de vazio de um universo deles, e garganta, que são espaços menores e mais alongados que conectam essas unidades porosas (corpos de poros), como visto na Figura 2.



**Figura 2** Corpo de poro e garganta. (Fonte: Luza, 2011)

Assim como para classificação de material granular carbonático, existem modelos para classificar tamanho e forma de poros. Neste trabalho, em termos de nomenclatura, foi considerado o modelo de classificação de poros de Choquette & Pray (1970), também descritos em Domingues (2011) e Luza (2014).

## 2.2. Travertino

Segundo Filippis (1998), o nome “travertino” deriva do latim *Tivurtinus*, nome da idade tardia-imperial da área de Tivoli. Os romanos chamavam a rocha extraída desta localidade como *Lapis Tiburtinus*, cuja tradução seria pedra de Tiburtinus. Este último termo refere-se ao mesmo antigo nome que fazia referência a Tivoli, porém na escrita romana. O arquiteto da antiga Roma, Vitruvius, referiu-se ao *Lapis Tiburtinus* como a pedra que resistia a tudo, desde grandes cargas de peso às “feridas” do tempo”.

O termo ‘travertino’ foi o pioneiro para caracterizar rochas carbonáticas de águas termais de Tivoli, porém esta rocha não é exclusiva desta localidade, ocorrendo em diversos lugares onde o ambiente deposicional apresentou condições similares. Inclusive, durante algumas décadas, diversos autores apresentaram divergências quanto a classificação para rocha carbonática oriundas de águas termais. Alguns denominavam travertino, enquanto outros, tufa calcária. Novamente há um confronto de definições entre autores. Em geral, os mesmos divergem quanto à classificação, priorizando critérios específicos de litofácies, biofácies e/ou condições térmicas.

Segundo Ford & Pedley (1996), as tufas calcárias são depósitos carbonáticos originados em águas continentais “frias”, sob temperatura ambiente, tendo como característica distintiva a presença de remanescentes de macrófitas, invertebrados e bactérias. Estes mesmos autores descrevem os travertinos como depósitos carbonáticos, oriundos de fontes termais e hidrotermais, cuja constituição predominante é de precipitados físico-químicos e microbiais, sem a presença de macrófitas e restos orgânicos. Ou seja, estes autores priorizaram características de biofácies e condições térmicas.

Riding (2002) incluiu travertino na Categoria *Cement Organics Reefs* de sua classificação. Contudo, o envolvimento orgânico não é majoritariamente importante na formação destas rochas para considerá-las carbonatos orgânicos. O autor define travertino como um depósito carbonático criado a partir da cimentação de organismos, que não apresentam esqueletos, com textura laminada, cristalina e arbustiva.

Dos diversos modelos para classificação de travertinos e tufas calcárias, o modelo considerado para travertinos utilizado neste trabalho foi o de Pentecost & Viles (1994), também citado e descrito em Domingues (2011).

### 2.2.1.Travertino Romano

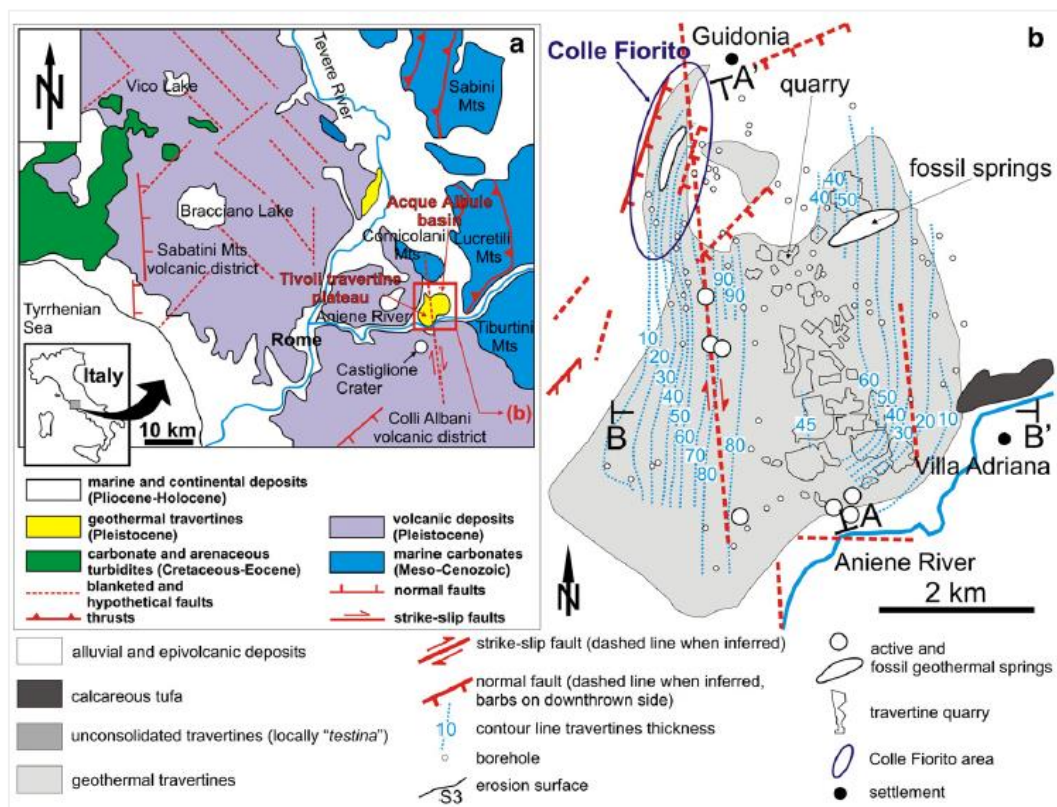
Os travertinos térmicos (de fontes hidrotermais) são depósitos químicos de  $\text{CaCO}_3$  precipitados em áreas geotérmicas ativas. Em geral, ao redor ou ao longo de fontes geotérmicas e fissuras abertas (Bargar, 1978; Crossey *et al.*, 2006), formando morfologias de depósitos tão diferentes quanto cascatas, travertinos de avental e canal, cristas de fissura, planaltos e torres. A formação de travertinos termais está relacionada com a existência de um circuito geotérmico de fluidos agressivos que, depois de interagir com rochas de carbonato no substrato, ascendem para a superfície onde liberam a maior parte do teor de bicarbonato de cálcio na forma de depósito de travertino. Os fluidos que estão na origem dos depósitos de travertino são, de fato, altamente mineralizantes (ricos em bicarbonato de cálcio). Um dos exemplos mais estudados de travertino de fontes hidrotermais é o depósito do Pleistoceno que compreende a bacia de Acque Albule. Este travertino constitui um dos maiores depósitos conhecidos de travertino do tipo platô de idade quaternária no mundo. (Filippis *et al.*, 2013).

#### 2.2.1.1. Contexto geológico

A bacia sedimentar, datada da época pleistocênica, de Acque Albule localiza-se no centro da Itália, 30 km a leste de Roma. A bacia é delimitada pelo cinturão orogenético Cordilheira dos Apeninos, do período Neógeno, a norte e a leste, isto é, as montanhas Cornicolani e Lucretili. Pelo complexo vulcânico do Pleistoceno, Colli Albani (Colinas Albanas) ao sul. E pelo atual vale do Tibre (*Tiber*

Valley) e o domínio extensional pós-orogênico (Plioceno-Quaternário) do Mar Tirreno a oeste. A bacia Acque Albule pertence a este último domínio extensional (Cosentino & Parotto, 1986; Patacca *et al.*, 1992; Cavinato & DeCelles, 1999; Billi & Tiberti, 2009).

A Figura 3 mostra a geologia regional da bacia de Acque Albule com as principais litologias aflorantes e linhas de falhas regionais, vistas à esquerda, em 'a'. E à direita, em 'b', é visto com uma ampliação de cinco vezes a área dos travertinos geotermais que foi destacada por um quadrado de cor vermelha em 'a'.



**Figura 3** Mapa geológico da área – (a) geologia regional; (b) travertinos geotermiais de Tivoli. (Fonte: Filippis *et al.*, 2013)

A bacia Acque Albule desenvolveu-se ao longo do Pleistoceno, dentro de um quadro pós-orogênico. A atividade das falhas extensivas (principalmente na direção NW) ao longo da Margem Tirreniana, da Itália central, foi acompanhada pela atividade de falhas transcorrentes (direção NE) ou oblíquas (direção N), atuando como estruturas de acomodação entre extensões adjacentes (Faccenna *et al.*, 1994, Acocella & Funiciello, 2006).

O fundo da bacia é constituído pelo rochedo de carbonato marinho mesozóico-cenozóico que aflora nas Montanhas Cornicolani e Lucretili. O rochedo de carbonato é coberto por argilas marinhas azul-cinzentas plioceno-pleistocênicas e arenitos argilosos expostos nas colinas, localizadas a norte e nordeste da bacia

Acque Albule. E também coberto por produtos vulcânicos vindos dos “bairros vulcânicos” adjacentes de Colli Albani e Monti Sabatini. Os depósitos de enchimento da bacia são, em seguida, compostos principalmente de travertino termal do Pleistoceno Tardio, cuja espessura média é de 50 m, podendo atingir até 90 m. A deposição deste travertino tem sido contemporânea com a atividade final do vulcão adjacente Colli Albani, que ainda é classificado como em repouso (Funiciello *et al.*, 2003; De Benedetti *et al.*, 2008).

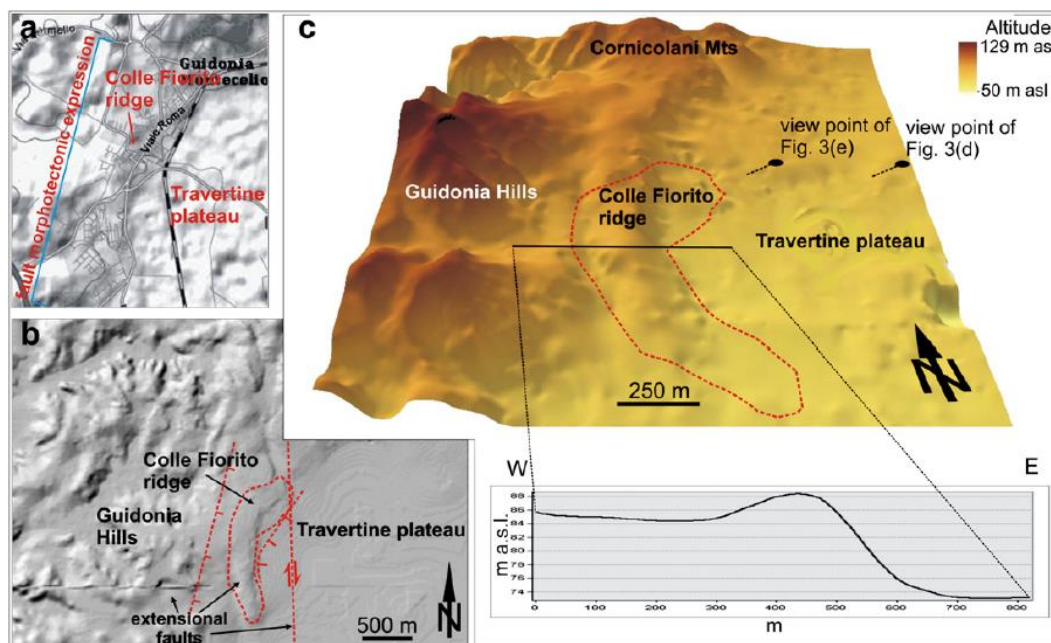
O planalto de travertino de Tivoli consiste em bancos bem organizados de estratos de travertino compactados diagonalmente, com atitude de sub-horizontal em direção ao sul. Em particular, os estratos de travertino são caracterizados por um padrão progradacional (Faccenna *et al.*, 2008), com estratos progressivamente mais íngremes e também ligeiramente mais espessos para o sul (isto é, direção de progradação). Os bancos de travertino são cortados e delimitados por superfícies erosivas, que geralmente são acompanhadas de paleossóis e paletas de argila acastanhada e características cársticas (Faccenna *et al.*, 2008, 2010). Esta evidência é sintomática de rebaixamento do lençol freático na bacia Acque Albule durante o crescimento do travertino.

O planalto do travertino de Tivoli foi parcialmente datado através dos métodos da série U. A idade mais antiga conhecida para este depósito é em torno de 116 ka, enquanto a mais nova é cerca de 29 ka (Faccenna *et al.*, 2008). Já o travertino exposto no cume da crista Colle Fiorito foi datado em 28 (+ 16 / - 15) ka. Contudo, esta medida é afetada por um grande erro devido à fração detrital na amostra (Faccenna *et al.*, 1994).

#### **2.2.1.2.**

#### **Contexto geomorfológico**

A Figura 4 ilustra três modelos digitais de elevação (DEM). Em (a) observa-se o contraste morfológico entre o planalto Tivoli (bacia de Acque Albule) e a borda do cume Colle Fiorito, ligeiramente proeminente, adjacente. Já em (b) nota-se uma linha de tendência NNE a oeste da crista de Colle Fiorito, coincidindo com uma falha ativa documentada por Faccenna *et al.* (1994) e Gasparini *et al.* (2002). Em (c) tem-se em perspectiva um modelo DEM mostrando o cume de Colle Fiorito e as zonas montanhosas, além da zona de platô do travertino.



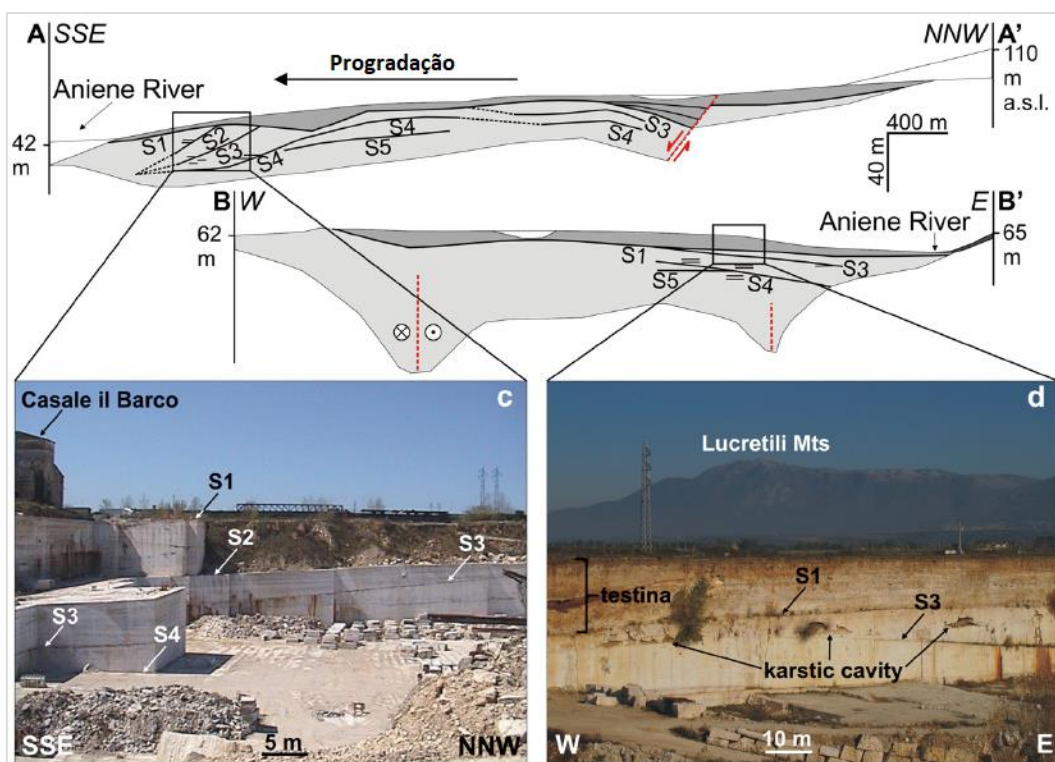
**Figura 4** Modelo digital de elevação da área de estudo. (a) Borda do cume Colle Fiorito; (b) Planos de falha em torno do Colle Fiorito; (c) Modelo digital de elevação mostrando o contraste no relevo entre as montanhas ao redor, o cume Colle Fiorito e a zona de platô de travertino. (Fonte: Filippis *et al.*, 2013)

### 2.2.1.3. Contexto estratigráfico

A sequência estratigráfica da Bacia de Acque Albule (da base para topo) é constituída por margas calcárias do Meso-Cenozóico (Ceruleo, 2005; Gasparini *et al.*, 2002), sobrepostas por argilas azuis do Plioceno, sobre as quais se encontram uma sequência de travertinos do Pleistoceno Médio-Superior (Faccenna *et al.*, 2008; Gasparini *et al.*, 2002) com espessura média de 60 m.

Esta camada de travertino apresenta uma sequência de bancos com espessuras variando entre 8 e 10 m, cada um deles separados por superfícies de erosão em *onlap* com mergulho para o sul. Além disso, cada banco apresenta finas laminações de travertino alternadas com tufas micríticas e estromatólitos laminados (Chafetz & Folk, 1984).

Como visto na Figura 5, foram identificadas cinco superfícies de erosão, nomeadas S1, S2, S3, S4 e S5 (da mais nova para mais antiga), sendo identificadas quatro unidades de deposição do travertino (B1, B2, B3 e B4), respectivamente. (Faccenna *et al.*, 2008).






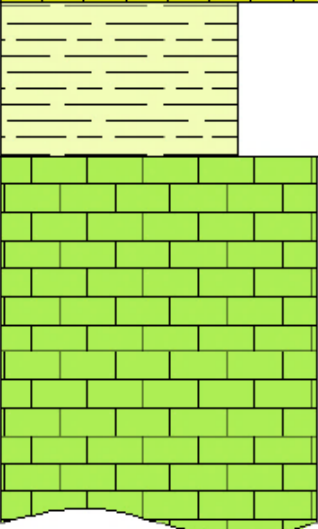


**Figura 5** Sessão geológica identificando as superfícies erosivas. (Fonte: Filippis, 2013)

Faccena *et al.*, (2008) descrevem as superfícies de erosão marcadas por paleossolos e bolsões de conglomerados com feições cársticas entre um e dois metros abaixo destas superfícies de erosão. Estas feições são evidências da ocorrência de variações no processo sedimentar e mudanças climáticas acompanhadas de processos erosivos seguidos de um novo período de deposição, isto é, um ciclo progradação (Guo & Riding, 1998; Faccena *et al.*, 2008).

Outra formação litológica, presente nas colinas ao lado norte da Bacia Acque Albule, é formada por argilas e areias calcárias esbranquiçadas, localmente chamadas *Testina*, do período Plioceno (Filippis *et al.*, 2013).

A referida estratigrafia citada nos parágrafos anteriores é apresentada em uma coluna estratigráfica, conforme observado na Figura 6. Estas litologias adjacentes ao travertino poderiam ser responsáveis por elementos *ex situ* no travertino, incomuns ao ambiente carbonático.

ERA	ÉPOCA	LITOLOGIA	
CENOZÓICO	Recente		Depósitos detríticos
	Holoceno		Testina
	Pleistoceno Superior		Travertino com intercalações de tufas
	Pleistoceno		Travertino antigo
	Plioceno		Argilas azuis
MESOZÓICO			Marga calcária

**Figura 6** Coluna estratigráfica da Bacia de Acque Albule. (Modificado de Luza, 2014)

#### 2.2.1.4.

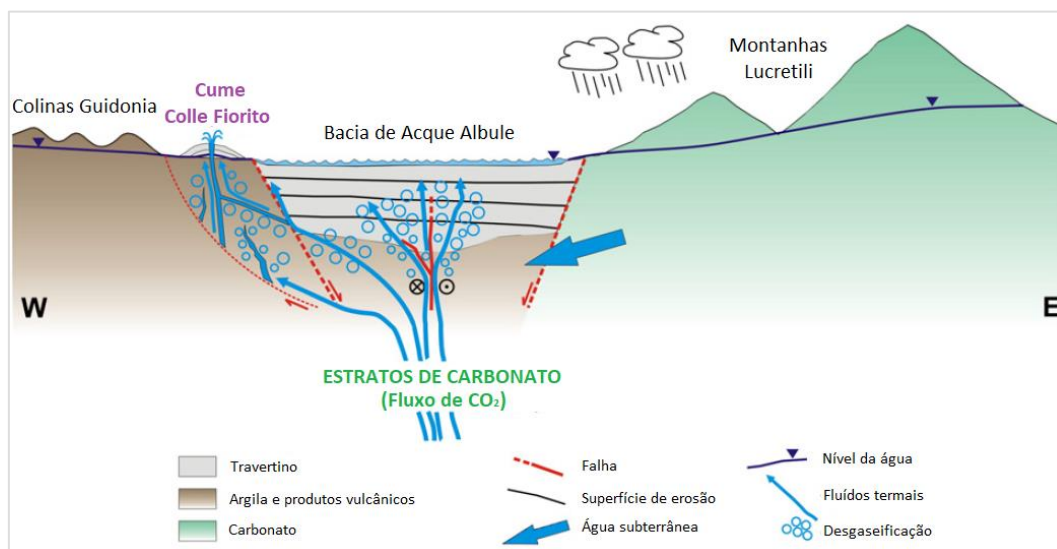
##### Influência do hidrotermalismo

Faccenna *et al.*, (2008) propuseram que o travertino *Lapis Tiburtinus* tenha sido formado a partir da alteração química dos carbonatos marinhos meso-cenozoicos, típicos da Itália Central.

Tal proposta está associada à de que as águas foram aquecidas durante o transporte em uma área de elevado fluxo de calor (origem hidrotermal) e enriquecidas com grande quantidade de CO<sub>2</sub> a partir da descarbonização de calcários no substrato (Chiodini *et al.*, 2012).

Quando o fluido atinge a superfície, a redução da pressão induz à degaseificação de CO<sub>2</sub> e, por consequência, a precipitação do carbonato de cálcio (Filippis *et al.*, 2013), a partir de processos orgânicos e inorgânicos em ambiente de fontes hidrotermais e perto de áreas continentais (Chafetz & Folk, 1984). Estes processos são favorecidos pela estrutura geológica, uma estrutura baixa, delimitada por uma série de falhas, que têm perturbado a área de sedimentação (Acocella & Turrini, 2010), alterada posteriormente por eventos tectônicos e diagenéticos.

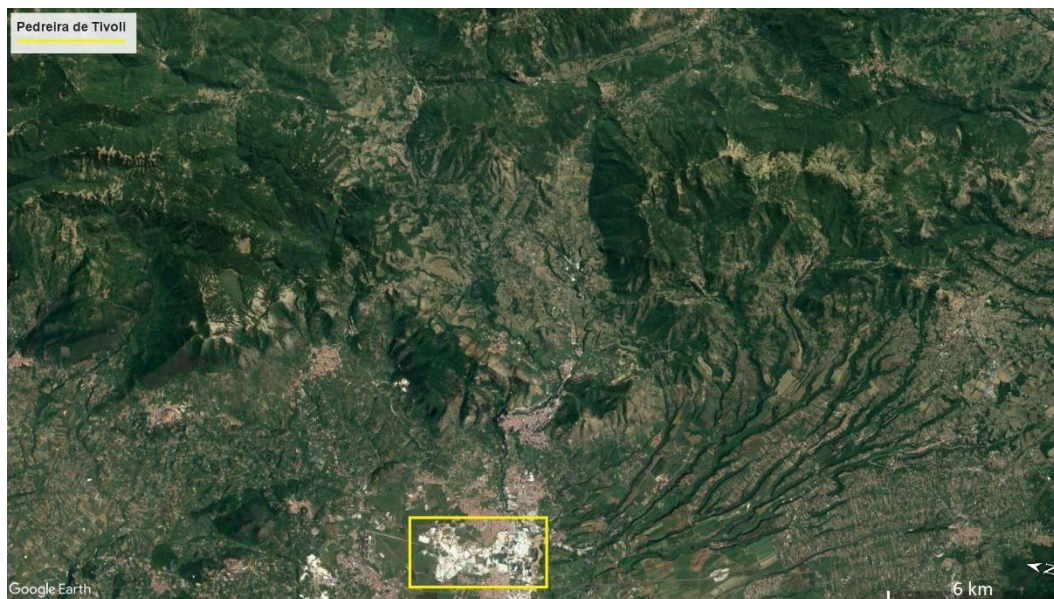
Os autores acima referem-se à percolação de águas termais como agente responsável pela deposição de material carbonático, incluindo este fenômeno como o responsável pela formação do cume Colle Fiorito. Porém esse fenômeno também pode ter sido o responsável por transportar e depositar constituintes *ex situ* ao ambiente sedimentar carbonático do travertino. O fluxo do hidrotermalismo pode ter ocorrido tanto das rochas adjacentes laterais, como também pode ser oriundo de camadas inferiores, já que na coluna estratigráfica (Figura 6) observou-se argilas e margas, que poderiam ser fontes de material terrígeno transportado e depositado no travertino através da percolação de fluidos hidrotermais, como ilustrado na Figura 7.



**Figura 7** Percolação de fluidos e desgaseificação do CO<sub>2</sub> através das fraturas. (Fonte: Filippis, 2013)

#### 2.2.1.5. Influência hidrográfica

A percolação de fluidos que depositou material carbonático proposta por Filippis (2013) pode ser a explicação pela ocorrência de componentes *ex situ* ao ambiente sedimentar carbonático, mas não é a única. Através da observação de fotos aéreas obteve-se uma delimitação de boa resolução da área de estudo. Toda a região da pedra de travertino em Tivoli está sob altíssima influência de redes de drenagens, como pode ser observado na Figura 8.



**Figura 8** Rede de drenagens ao redor da pedreira de Tivoli. (Fonte: Google Earth)

É possível observar na Figura 8 a área da pedreira delimitada por um retângulo amarelo e, ao redor, uma grande rede de drenagens, em especial, à direita da imagem, onde se observa na porção das montanhas que rodeiam a área, uma complexa e densa rede de drenagens espessas. Esta configuração geomorfológica tem um grande potencial de influência para a área da pedreira.

Considerando o Período Quaternário, que engloba o tempo de formação do travertino Romano (Pleistoceno e Holoceno), a enorme estrutura de redes de drenagem formadas na área de estudo e que o período em questão intercala glaciações e períodos quentes chuvosos, qualquer material *ex situ* identificado poderia ter sido transportado e depositado por influência hidrográfica.

### **2.3. Índices e parâmetros do travertino Romano**

Neste tópico foram mostrados resultados de porosidade e resultados de ensaios de resistência mecânica, como tensão desviadora na ruptura, bem como parâmetros elásticos e de resistência obtidos por outros autores que estudaram o mesmo material.

#### **2.3.1. Luza (2014)**

Este autor trabalhou exclusivamente com amostras de travertino Romano verticais, isto é, com o eixo axial dos corpos de prova ortogonal ao acamamento sedimentar.

Os índices físicos medidos foram massa específica seca, saturada, porosidade efetiva e porosidade total. A porosidade efetiva refere-se a medida por saturação em água e a porosidade total, pela relação com a densidade dos sólidos. Alguns exemplos de resultados podem ser vistos na Tabela 1.

**Tabela 1** Índices físicos do travertino Romano. (Adaptado de Luza, 2014)

Corpo de Prova	Massa Específica Seca	Massa Específica Saturada	Porosidade Efetiva	Porosidade Total
	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)
C2	2,25	2,39	13,53	16,66
C4	2,27	2,39	12,08	16,10
C5	2,28	2,41	13,35	15,56
C7	2,22	2,36	14,32	17,74
C8	2,26	2,38	11,30	16,18
C9	2,29	2,40	10,74	15,02
C10	2,31	2,41	10,73	14,59
C11	2,24	2,36	11,26	16,89
TR2	2,35	2,44	8,40	12,94
TR8	2,33	2,42	9,02	13,74
TR11	2,27	2,38	11,08	15,95

Ensaaios uniaxiais (UCS) foram realizados. E parâmetros elásticos, como módulo de elasticidade (E) e Poisson ( $\nu$ ), foram calculados. Estes resultados foram compilados na Tabela 2.

**Tabela 2** Ensaio uniaxial do travertino Romano. (Adaptado de Luza, 2014)

Corpo de Prova	Porosidade Efetiva	UCS	E	$\nu$	$\epsilon_{\text{Axial}}$	E / UCS	Tipo de Ruptura
	(%)	(MPa)	(GPa)	-	(%)	-	
TR 01	8,57	35,98	32,27	0,23	0,11	896,89	Cisalhamento
TR 02	8,4	48,04	39,67	0,37	0,12	825,77	Fendilhamento
TR 03	11,62	19,31	37,33	0,38	0,06	1933,20	Colapso de poros
TR 09	13,21	16,32	27,57	0,22	0,05	1689,34	Colapso de poros
TR 13	14,66	13,26	57,17	0,34	0,03	4311,46	Colapso de poros

Também foram realizados ensaios triaxiais com baixos valores de tensão confinante ( $\sigma_3$ ). Os valores das tensões principais ( $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ ), incluindo a tensão desviadora ( $\sigma_d$ ), além dos parâmetros elásticos módulos de elasticidade (E) e Poisson ( $\nu$ ) são mostrados na Tabela 3.

**Tabela 3** Ensaio triaxial do travertino Romano. (Adaptado de Luza, 2014)

Corpo de Prova	$\sigma_1$	$\sigma_3$	$\sigma_d$	E	$\nu$	Porosidade	Tipo de Ruptura
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(GPa)	-	(%)	
TR04	22,26	4,14	18,12	22,32	0,23	12,54	Colapso de poros
TR05	44,92	6,89	38,03	33,24	0,25	10,84	Colapso de poros
TR06	35,27	4,14	31,13	6,11	0,45	9,38	Cisalhamento
TR07	52,36	2,76	49,6	36,73	0,28	8,89	Fendilhamento
TR08	64,05	5,52	58,53	36,65	0,25	9,02	Cisalhamento
TR12	53,26	8,27	44,99	43,52	0,28	14,2	Fendilhamento

Com os resultados dos ensaios uni e triaxiais foram calculados parâmetros de resistência segundo os critérios de ruptura de Mohr-Coulomb e Lade & Kim, onde os resultados seguem na Tabela 4.

**Tabela 4** Critério de falha do travertino Romano. (Adaptado de Luza, 2014)

Mohr-Coulomb		Lade & Kim	
c'	7,56 MPa	n <sub>1</sub>	2,90E+06
$\phi'$	32°	m	1,42

### 2.3.2. Kiewiet (2015)

Esta autora trabalhou com travertino Romano em duas direções – vertical, isto é, com o eixo axial dos corpos de prova ortogonal ao acamamento, e inclinado, com o eixo axial inclinado 58° em relação ao acamamento. Para o grupo de amostras verticais foram utilizadas amostras intactas e secas. Já as amostras inclinadas foram previamente falhadas em ensaio de cisalhamento direto e os ensaios de reativação foram com amostras saturadas, isto é, com poropressão. Nos blocos ainda intactos foram marcadas faixas de porosidade, englobando três níveis – mais porosas, porosas e pouco porosas.

A porosidade da rocha foi calculada por injeção de gás Hélio em plugs contendo apenas rocha intacta. Os índices físicos calculados são ilustrados na Tabela 5.

**Tabela 5** Porosidade e massa específica do travertino Romano.  
(Adaptado de Kiewiet, 2015)

Rocha Intacta		
Corpo de Prova	Massa Específica Seca	Porosidade
	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)
IR_v_B1	2,38	7,12
FC_B1	2,38	12,12
DZ_B1	2,22	18,64
IR_v_B2	2,39	8,93
FC_B2	2,40	11,32
DZ_B2	2,31	17,24

As envoltórias de Mohr-Coulomb foram traçadas em vários estágios do ensaio até a ruptura. O escoamento inicial é representado pela letra “A” e vai até a letra “E”, sendo a letra “F” a envoltória na ruptura. Os valores de tensão diferencial na ruptura podem ser observados na tabela 6.

**Tabela 6** Ensaio triaxial do travertino Romano. (Adaptado de Kiewiet, 2015)

Material	Envoltória	$\sigma_c = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_c = 10 \text{ MPa}$	$\sigma_c = 20 \text{ MPa}$
		Tensão Diferencial (MPa)		
IR_v_B1	A	24,04	31,22	37,98
	B	24,04	36,48	43,22
	C	24,04	41,73	60,60
	D	24,04	42,41	65,72
	E	24,04	43,09	70,86
	F	24,04	44,04	75,05
IR_v_B2	A	12,60	42,43	62,10
	B	18,60	49,11	74,20
	C	20,59	49,11	74,20
	D	20,59	62,50	82,03

Então, dos ensaios triaxiais foram calculados os módulos de elasticidade (E) e Poisson ( $\nu$ ). Também alguns parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb foram obtidos das envoltórias, coesão ( $c'$ ) e ângulo de atrito ( $\phi'$ ), como vistos na tabela 7.

**Tabela 7** Parâmetros de elasticidade e resistência do travertino Romano.  
(Adaptado de Kiewiet, 2015)

Material	E	$\nu$	Envoltória	c'	$\phi'$
	(GPa)	-		(MPa)	(graus)
IR_v_B1	19,6	0,30	A	9,25	14,98
			F	5,89	34,09
IR_v_B2	21,2	0,24	A	3,83	33,58
			D	6,03	37,28

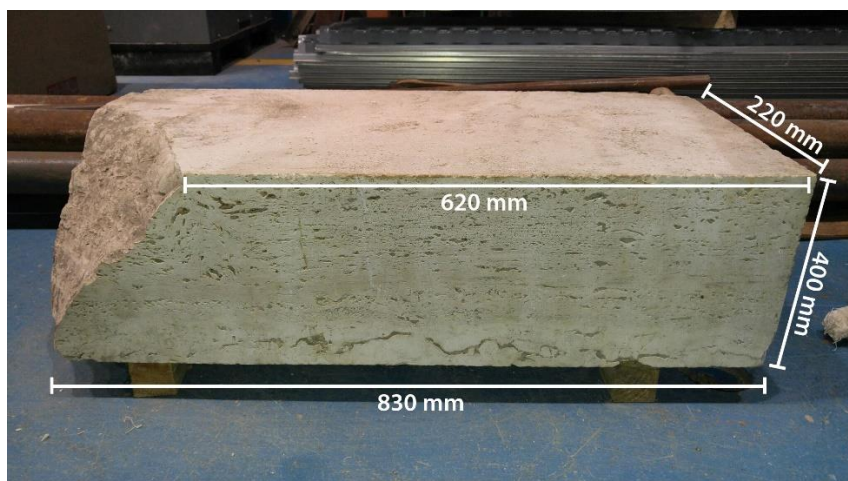
### 3

## Material

#### 3.1.

### Material bruto

Para o estudo em questão, o material adquirido para os diversos ensaios mecânicos, análises químicas e petrográficas foi o travertino Romano, oriundo de Tivoli (Itália), o qual foi importado para o Brasil dividido em um bloco não orientado, de dimensões de cerca de 830 x 400 x 220 mm, o qual pode ser visto na Figura 9.

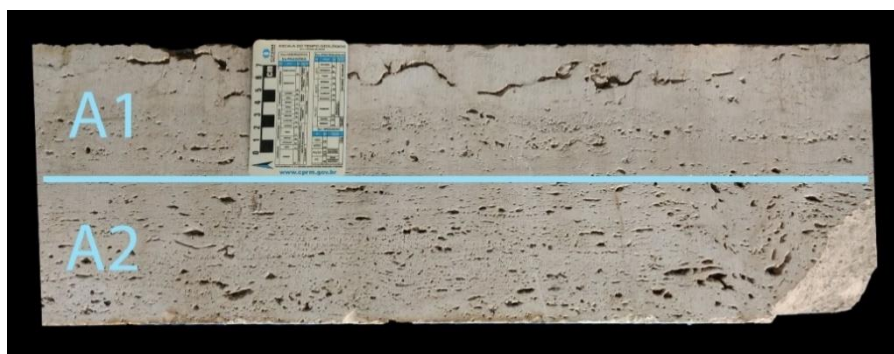


**Figura 9** Bloco de travertino Romano de Tivoli não orientado.

O mesmo apresentava uma das pontas acunhadas, acamamento subparalelo à aresta de maior dimensão (Figura 10) e dois “andares” visualmente equivalentes em termos de porosidade superficial. Na mesma direção do acamamento, uma metade bastante porosa foi definida como (A2). E na outra, observou-se o material mais denso, (A1). Para facilitar a perfuração e maior aproveitamento deste, o bloco teve a região da cunha virada para baixo, ficando a Face Principal do andar A1 como o topo de todas as amostragens, como observado na Figura 11.

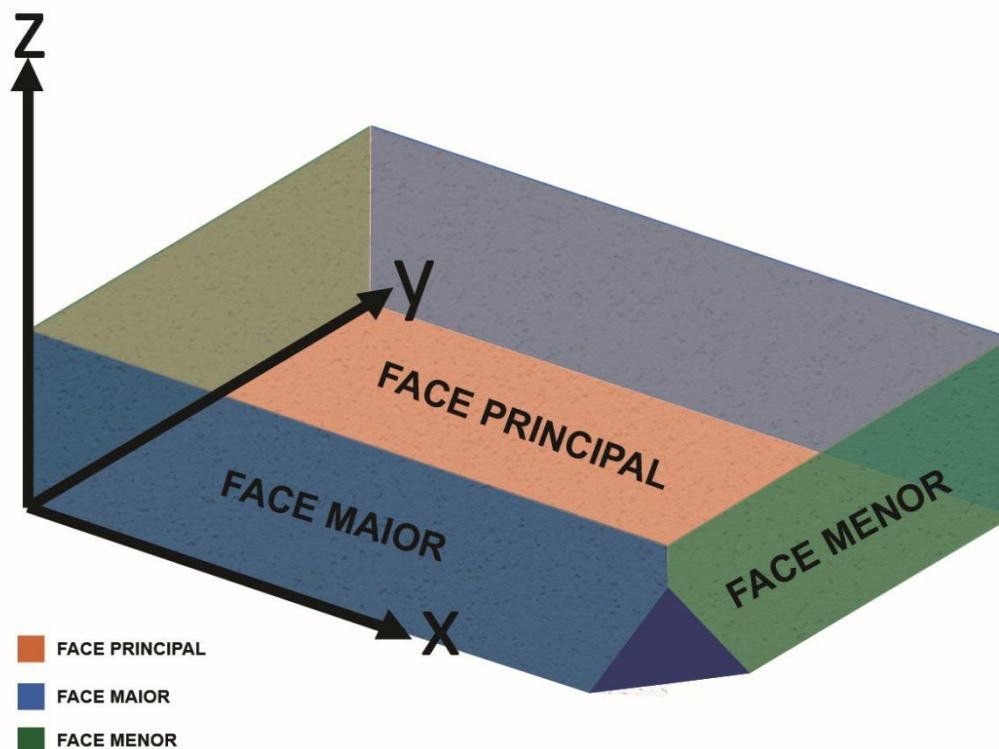


**Figura 10** Orientação do acamamento do travertino Romano.



**Figura 11** Separação do bloco em dois “andares” – A1, mais denso e A2, mais poroso.

Para fins de referenciamento foi estabelecida uma orientação para o bloco. Os pares de faces em formato retangular foram definidos de acordo com a orientação (em relação à direção de deposição) e com o tamanho. As duas faces de maior área, onde a direção de furo foi perpendicular ao acamamento, chamou-se de Face Principal, afinal foi a de maior interesse do estudo. Quanto aos outros dois pares de faces, de áreas intermediária e menor, um furo de amostragem em quaisquer uma delas estaria paralelo ao acamamento, portanto foram definidas apenas pelo critério ‘tamanho’ – maior e menor. Também foi adotado um sistema tridimensional de orientação por eixos. Conforme ilustrado na Figura 12.



**Figura 12** Representação 3D do bloco e nomenclatura dada a cada par de faces.

### 3.2. Material preparado

Através de uma perfuratriz da Marca Hilti, Modelo DD-200, foram extraídos diversos corpos cilíndricos de amostragem. Foi utilizada uma broca de 2,0 polegadas de diâmetro. A partir daí produziram-se amostragens de duas polegadas nas direções ortogonal e paralela ao acamamento. As primeiras foram extraídas com a direção de furo paralela ao eixo 'z'. Enquanto as amostras paralelas ao acamamento foram perfuradas com a direção de sondagem paralela ao eixo 'x'.

As amostragens foram divididas em dois grupos: Amostragem Vertical (AMV) e Amostragem Horizontal (AMH). Foram perfuradas 42 amostras verticais (furo paralelo ao eixo 'z') e 10 amostras horizontais (furo paralelo ao eixo 'x'). Estas amostragens foram cortadas, dando origem aos corpos de prova com as dimensões de interesse, sendo que o diâmetro já estava sempre em torno de 50 mm e altura variou entre 105,24 e 121,78 mm. Inicialmente obtiveram-se 70 corpos de prova verticais e 30 horizontais. No entanto, foram obtidos ao final, com perdas de exemplares por diversas deformações no corpo ou altura insuficiente, 55 corpos de prova de amostragem vertical adequados para ensaios uni e triaxiais. Não houve perdas na amostragem horizontal.

### 3.2.1. Corpos de prova

Os corpos de prova separados nos dois grupos já citados (Amostragem Vertical e Amostragem Horizontal) foram subdivididos em outros dois. Foram separados visualmente os mais densos dos mais porosos a fim de se obter previamente grupos de corpos de prova com tendência de resistência similar, já que um corpo menos poroso tende a ser mais resistente do que outro mais poroso. Sendo assim, eles foram separados conforme a Tabela 8.

A nomenclatura seguiu um modelo intuitivo. Todo corpo de amostragem com geometria perfeita e altura mínima necessária, onde a razão altura por diâmetro respeitasse o intervalo entre 2,0 e 2,5, foi definido como “corpo de prova” através da abreviação “CP”. Quando o eixo axial foi orientado ortogonalmente ao acamamento (paralelo ao eixo ‘z’), isto é perfuração vertical, seguido de um “V”. E de uma letra “H” (horizontal) para orientação paralela do eixo axial em relação ao acamamento (paralelo ao eixo ‘x’).

Seguiu-se a essa nomenclatura um número inteiro, positivo, maior do que zero e crescente para cada corpo de prova selecionado aleatoriamente.

**Corpos de Prova Verticais** – C P V<sub>n</sub>

**Corpos de Prova Horizontais** – C P H<sub>n</sub>

**Tabela 8** Grupos de corpos de prova por direção do furo e grau de porosidade visual.

Andar	Amostragem Vertical	
A1	CP Mais denso	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 17, 19, 21, 23, 25, 27, 29, 31, 35, 37, 41, 43, 45, 51, 53, 58, 59, 61, 62, 64, 66, 67, 69, 70
A2	CP Mais poroso	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 18, 20, 22, 24, 26, 30, 34, 36, 39, 40, 42, 44, 47, 54, 60, 63, 71
Andar	Amostragem Horizontal	
A1	CP Mais denso	1, 2, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15
A2	CP Mais poroso	4, 5, 6, 10, 11, 12, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30

Esta subdivisão visual em grupos, mais denso e mais poroso, teve por finalidade apenas uma separação prévia em grupos de corpos de prova que apresentassem uma tendência de comportamento geomecânico similar. Naturalmente, uma divisão mais técnica foi elaborada baseada em índices físicos, calculados posteriormente, em especial as porosidades total e interconectada, além de índice de vazios e massa específica seca.

Os corpos de prova dos quatro grupos observados na Tabela 8 são vistos, na mesma sequência, a seguir nas Figuras 13, 14, 15 e 16, respectivamente.



**Figura 13** Corpos de prova verticais mais densos.



**Figura 14** Corpos de prova verticais mais porosos.



**Figura 15** Corpos de prova horizontais mais densos.



**Figura 16** Corpos de prova horizontais mais porosos.

Todos os corpos de prova foram retificados, em especial topo e base, a fim de se obter a melhor regularidade das faces possível.

### 3.2.2. Rejeito

#### 3.2.2.1. Corpos de rejeito regular

Todo corpo de prova com altura claramente inferior a necessária para manter uma relação mínima com o diâmetro de 2:1, bem como corpos com deformações que impossibilitassem uma geometria cilíndrica perfeita, foram classificados como corpos de rejeito.

A nomenclatura seguiu o mesmo padrão anterior. Em laboratório, todo corpo de prova com geometria cilíndrica imperfeita e/ou altura mínima necessária foi classificado como ‘corpo de rejeito regular’ através da abreviação ‘CR’. Quando com eixo axial orientado ortogonal ao acamamento (direção de furo paralela ao eixo ‘z’), isto é vertical, seguido de um “V”. E de uma letra “H” (horizontal) para orientação do eixo axial paralela ao acamamento (direção de furo paralela ao eixo ‘x’). Seguiu-se a essa nomenclatura um número inteiro, positivo, maior do que zero e crescente para cada corpo de rejeito regular sob escolha aleatória.

**Corpos de Rejeito Verticais** – C R V<sub>n</sub>

**Corpos de Rejeito Horizontais** – C R H<sub>n</sub>

Todos os corpos de rejeito com geometria regular foram úteis na produção de corpos de prova para os ensaios de compressão puntiforme, tração indireta (Ensaio Brasileiro), lâminas petrográficas e análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

#### 3.2.2.2. Corpos de rejeito irregular

As partes restantes entre os furos de amostragem no bloco foram retiradas com o uso de marreta e produziu corpos completamente irregulares. Estes foram utilizados principalmente para análises químicas, difração de raios-x e cálculo da densidade relativa dos grãos ( $G_s$ ), com amostras previamente moídas em fração granulométrica de interesse para cada caso. Também utilizados para realização da porosimetria por intrusão de mercúrio.

## 4 Metodologia

Este programa teve por objetivo realizar um estudo experimental a respeito do carbonato travertino através da determinação de parâmetros e índices físicos, caracterização petrográfica e química do material, análise da estrutura porosa e, principalmente, características de resistência e deformabilidade do material.

Diversas grandezas e propriedades foram medidas nos corpos de prova, como diâmetro, altura, massa em condições natural, seca, submersa e saturada. A partir dos parâmetros obtidos foi possível calcular inúmeros outros índices físicos, como porosidade e massa específica. Estes índices calculados foram utilizados em contraste com os resultados dos ensaios de resistência a fim de se buscar entender o comportamento geomecânico da rocha.

Na caracterização do material foram realizadas análises petrográficas em escala macroscópica, isto é, a olho nu ou com o auxílio de uma lupa de 20 vezes de aumento, além de ácido clorídrico, canivete suíço e ímã de neodímio. E na análise microscópica, com o auxílio de microscópio estereoscópico de luz incidente. Também foram realizadas análises em microscópio eletrônico de varredura (MEV) a fim de se observar os materiais granulares, suas propriedades e disposições cristalinas. Através do próprio MEV foi possível realizar análises químicas pontuais (EDS) que forneceram picos dos principais constituintes químicos. Além de análises pontuais, foram realizadas três outras metodologias de análises químicas, que utilizaram o método do pó - difração de raios-x, espectrometria de raios-x e determinação elementar de CHN.

Na caracterização da estrutura porosa foram realizadas observações macroscópicas em rejeitos de amostras do ensaio de carga pontual e em lâminas delgadas com o uso do microscópio eletrônico de luz incidente. Análises com microscopia eletrônica de varredura (MEV) a fim de se observar a geometria, distribuição e tipos de poros, bem como a interconexão e densidade dos poros no travertino também foram feitas.

Por último, foi realizada uma série de ensaios mecânicos. Ensaio de carga pontual (*point load test*) e ensaios de tração indireta (Ensaio Brasileiro) foram realizados com corpos de prova com eixo axial orientado em duas direções em relação ao acamamento: vertical e horizontal. Seguindo esta mesma orientação de eixos, todos os ensaios triaxiais, incluindo os de confinante zero (uniaxial), foram realizados agrupando os corpos de prova em função dos índices físicos similares para cada grupo de confinamento, baseando-se principalmente na porosidade total. Este índice físico foi a principal referência na compreensão dos resultados dos ensaios triaxiais até 40 MPa.

#### 4.1.

#### Parâmetros físicos

##### 4.1.1.

##### Densidade relativa dos sólidos ( $G_s$ )

A obtenção deste parâmetro, também chamado gravidade específica dos sólidos, foi realizada no Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio pelo Técnico Josué Pereira Martins. O procedimento é padronizado pela ABNT através da Norma NBR 6508:1984 e foi feito através de ábaco em Excel. Os procedimentos básicos desta norma são descritos a seguir.

Foi utilizado o material de travertino em pó peneirado no tamanho #40 no Padrão ASTM e quatro picnômetros preenchidos com 25 g de travertino moído (10% da capacidade). Completou-se até a linha marcada de cada picnômetro com água destilada. Retirou-se o ar dos mesmos utilizando-se uma bomba de vácuo a - 0,70 atm por cerca de dez minutos. Depois completou-se o volume de cada picnômetro até o topo, onde os mesmos foram tampados. Repousou-se em banho maria por 15 minutos para equalização da temperatura. Após equalizada, pesou-se cada um deles. Descartou-se todo o material de cada picnômetro e preencheu-se até a borda com a água utilizada para o banho maria, tendo sido previamente medida sua temperatura. Pesou-se novamente.

Concluídos todos os procedimentos acima, foram lançados os valores obtidos na planilha citada. Assim, obteve-se o valor de  $G_s$  para o travertino Romano. Para obter a densidade dos sólidos bastou multiplicar o  $G_s$  pela densidade da água que, em  $\text{g/cm}^3$ , sob temperatura em torno de  $30^\circ\text{C}$ , é muito próxima do valor unitário. Portanto, a densidade dos sólidos é numericamente igual a densidade relativa dos sólidos.

##### 4.1.2.

##### Índices medidos

**Diâmetro médio (D)** - Através de um paquímetro digital foram realizadas cinco medidas no diâmetro de cada corpo de prova. Uma no topo e outra base, com o instrumento de medida totalmente paralelo, apoiado sobre uma mesa nivelada. E três outras medidas, sendo uma no centro do corpo e duas outras em pontos intermediários entre as medidas de topo e base e a medida central. A média aritmética destas forneceu o diâmetro médio de cada corpo de prova.

**Altura (H)** - Também utilizando o paquímetro digital, com o corpo de prova apoiado sobre a mesa nivelada, foram feitas repetidas medições a fim de se obter o valor mais exato possível da altura para cada corpo medido.

**Massa natural ( $M_{\text{Nat}}$ )** - Assim que chegaram ao Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio, os corpos de prova foram pesados no seu estado mais natural possível em relação às condições climáticas tropicais.

**Massa seca ( $M_s$ )** - Massa medida após submeter cada corpo de prova à uma temperatura de 100°C em estufa por 24h.

**Massa submersa ( $M_{Sub}$ )** - Utilizou-se uma balança de precisão, apoiada sobre um banco com furo no meio, presa a um cesto metálico imerso em um balde com água destilada. Cada amostra foi colocada no cesto separadamente após o processo de saturação completa, também em água destilada, através de uma bomba de vácuo a – 500 mmHg por cerca de meia hora, além de pequenos golpes com a mão sobre o dessecador para uma expulsão de ar mais eficiente. A transferência de cada corpo de prova do dessecador para o balde foi feita uma a uma, com um curtíssimo espaço de tempo em contato com o ar e da forma mais suave possível. Uma vez imersa no balde, a amostra foi agitada a fim de garantir o máximo de saturação possível. Em seguida colocada em repouso sobre o cesto metálico até se obter um valor constante de peso submerso.

**Massa saturada aparente ( $M_{Sat\ Ap}$ )** - Após medir a massa submersa, o corpo de prova foi retirado do balde e o excesso de água removido, utilizando-se movimentos circulares suaves com a palma da mão e/ou papel umedecido a fim de remover somente a água acumulada nos poros externos e na superfície do corpo por tensão superficial. O objetivo foi mensurar a massa saturada considerando basicamente a água contida nos vazios mais internos.

**Deslocamento (Desloc.)** - Este parâmetro foi uma aplicação da Teoria de Arquimedes. Comumente, a massa saturada total, isto é, considerando também os poros superficiais saturados, é medida utilizando-se uma membrana para conter a fuga da água, onde o peso desta é posteriormente descontado. Entretanto esta metodologia induz à erros devido à dificuldade de se estimar o peso da membrana molhada em diversos estágios de estiramento. Ao invés disso, utilizou-se o parâmetro denominado aqui ‘Deslocamento’.

Já se conhecia a massa saturada aparente, isto é, a massa do corpo quase totalmente saturado, a não ser pelos poros mais externos (de onde a água escapou imediatamente após emergir do recipiente aquoso). Em suma, buscou-se apenas uma forma de mensurar esta quantidade de água que escapou dos poros superficiais. Isto foi feito através da diferença de volume. O volume geométrico (ou volume total) de cada corpo de prova era conhecido, sendo igual ao produto da área da base pela altura. Após medir a massa saturada aparente ( $M_{Sat\ Ap}$ ), a única região não preenchida por água era justamente a dos poros externos. Utilizando uma proveta com 500 ml de água destilada, cada corpo foi inserido separadamente e com o auxílio de uma pipeta, para maior precisão, mediu-se a variação de volume deslocado (Deslocamento) na proveta. Se o corpo fosse perfeitamente sólido, o deslocamento de água seria exatamente igual ao valor do volume total segundo a própria Teoria de Arquimedes. Contudo, a quantidade deslocada foi sempre menor. Como cada corpo prova foi inserido na proveta logo após a medição de massa saturada aparente, a única região vazia para dar essa diferença era exatamente a dos poros superficiais. Portanto, a diferença entre o volume total ( $V_{Total}$ ) e o deslocamento é igual ao volume de água dos poros externos ( $V_{WE}$ ). Como a densidade da água é conhecida (1 g/cm<sup>3</sup>) e considerando que as unidades de massa

e volume aqui utilizadas foram as mesmas, a massa de água dos poros externos ( $M_{wE}$ ) é numericamente igual ao volume de água dos poros externos ( $V_{wE}$ ), que também se equivale ao volume de vazios externos ( $V_{vE}$ ). Esta massa ( $M_{wE}$ ) somada a massa saturada aparente ( $M_{Sat Ap}$ ) é igual a massa saturada total ( $M_{Sat}$ ).

#### 4.1.3. Índices calculados

**Volume total ( $V_{Total}$ )** - Com diâmetro médio e altura conhecidos em um corpo cilíndrico regular, o volume total pôde ser obtido geometricamente através do produto da área da base pela altura.

$$V_{Total} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot H}{4} \quad (\text{Equação 1})$$

**Altura / Diâmetro ( $H / D$ )** - Relação de elevada importância para ensaios uniaxiais e triaxiais. Para este material a ISRM recomenda valores entre 2,0 e 2,5.

**Teor de umidade ( $w$ )** - Diferença entre massa natural e massa seca sobre a massa seca. Esta por sinal é a metodologia para medir umidade. Porém as condições do material rochoso não eram naturais da sua condição de origem. Logo, este parâmetro representou o percentual de água que tendia a se manter no travertino nas condições climáticas em que se encontrava.

$$w = \frac{M_{Nat} - M_s}{M_s} \quad (\text{Equação 2})$$

**Volume de vazios dos poros externos ( $V_{vE}$ )** - A diferença entre o volume geométrico (ou volume total) e o deslocamento medido na proveta forneceu o valor deste parâmetro. Observar que este parâmetro reflete apenas a quantidade de vazios na parte mais externa do corpo de prova, isto é, nas áreas de contato direto com o ar e de onde a água saiu imediatamente ao se retirar o corpo de prova da imersão. Apesar de poder coincidir em alguns casos, esta grandeza não representa a macroporosidade, uma vez que podem haver poros grandes internos com canais de contato extremamente finos em que não se perderia água devido ao fenômeno conhecido como capilaridade.

$$V_{vE} = V_{Total} - \text{Desloc.} \quad (\text{Equação 3})$$

**Massa de água dos poros externos ( $M_{wE}$ )** - Numericamente igual ao parâmetro acima. Massa e volume se relacionam pela densidade. Como a densidade da água é  $1,0 \text{ g/cm}^3$ , todas as massas medidas estão em gramas e o volume em ml (ou  $\text{cm}^3$ ), a relação é direta.

**Massa de água dos poros internos ( $M_{wi}$ )** - Definida como a diferença entre a massa saturada aparente e a massa seca.

$$M_{wi} = M_{Sat} Ap - M_s \quad (\text{Equação 4})$$

**Volume de vazios dos poros internos ( $V_{vi}$ )** - Possui a mesma relação do caso dos poros externos. Como a densidade da água é  $1,0 \text{ g/cm}^3$ , este parâmetro é numericamente igual a massa de água dos poros internos.

**Massa total de água dos poros ( $M_w$ )** - Soma dos parâmetros de massa de água dos poros externos mais os internos.

$$M_w = M_{wE} + M_{wi} \quad (\text{Equação 5})$$

**Volume de vazios interconectados ( $V_{vw}$ )** - Utilizando a mesma relação com a densidade da água que foi utilizada para volume dos poros externos ( $V_{vE}$ ), o volume total de vazios onde a água percolou é numericamente igual a massa de água total ( $M_w$ ). Este parâmetro foi descrito pelo termo “interconectado” em função da medição ter sido feita através de saturação em água. Isto é, poros isolados (ou não conectados) não foram contabilizados devido a água não ter como alcançá-los.

**Massa saturada total ( $M_{Sat}$ )** - Pode ser obtida através da soma da massa saturada aparente ( $M_{Sat} Ap$ ) com a massa de água dos poros externos ( $M_{wE}$ ) ou pela soma da massa seca ( $M_s$ ) com a massa total de água dos poros ( $M_w$ ).

$$M_{Sat} = M_{Sat} Ap + M_{wE} \quad \text{ou} \quad M_s + M_w \quad (\text{Equação 6})$$

**Porosidade interconectada interna ( $\eta_{wi}$ )** - Razão entre o volume de vazios internos interconectados e o volume total.

$$\eta_{wi} = \frac{V_{vi}}{V_{Total}} \quad (\text{Equação 7})$$

**Porosidade interconectada externa ( $\eta_{wE}$ )** - Razão entre o volume de vazios externos interconectados e o volume total.

$$\eta_{wE} = \frac{V_{vE}}{V_{Total}} \quad (\text{Equação 8})$$

**Razão das porosidades interconectadas interna e externa ( $R\eta_w$ )** - Importante na comparação da quantidade de poros internos em relação aos externos medidos pelo método de saturação. Fornece uma ideia do quanto a porosidade interna é maior do que a externa em cada espécime ou, em casos mais raros, com um valor menor do que um, indica que existem mais poros externos.

$$R\eta_w = \frac{\eta_{wi}}{\eta_{we}} \quad (\text{Equação 9})$$

**Porosidade interconectada total ( $\eta_w$ )** - Razão entre volume de vazios interconectados e o volume total.

$$\eta_w = \frac{V_{vw}}{V_{Total}} \quad (\text{Equação 10})$$

**Volume dos sólidos ( $V_s$ )** - Com a densidade relativa dos grãos ( $G_s$ ) multiplicada pela densidade da água ( $1,0 \text{ g/cm}^3$ ) obteve-se a massa específica dos sólidos ( $\rho_{sol}$ ), que é numericamente igual ao  $G_s$ . Uma vez dividindo a massa seca (ou massa dos sólidos) pela massa específica dos sólidos encontrou-se o volume dos sólidos de cada corpo de prova.

$$V_s = \frac{M_s}{\rho_{Sol}} \quad (\text{Equação 11})$$

**Volume de vazios total ( $V_v$ )** - Diferença entre o volume total e o volume dos sólidos. Cabe ressaltar que neste caso não importa se os poros estão conectados ou não. Todos são contabilizados, pois apesar do poro não influenciar no peso, influencia no volume do espécime.

$$V_v = V_{Total} - V_s \quad (\text{Equação 12})$$

**Porosidade total ( $\eta_{Total}$ )** - Razão entre o volume de vazios total e o volume total.

$$\eta_{Total} = \frac{V_v}{V_{Total}} \quad (\text{Equação 13})$$

**Porosidade isolada ( $\Delta\eta$ )** - Diferença entre porosidade total e porosidade interconectada. Representa a parcela da porosidade correspondente as regiões de vazios sem conexão com os poros de superfície.

$$\Delta\eta = \eta_{Total} - \eta_w \quad (\text{Equação 14})$$

**Percentual de poros isolados ( $\eta_{Iso}$ )** - Este parâmetro tem por finalidade quantificar os poros isolados de cada corpo de prova sob uma mesma escala. Porosidade isolada somente representa a porosidade onde a água não conseguiu percolar. Porém, a magnitude deste parâmetro depende da porosidade total de cada espécime. Então, dividindo-se a parcela de poros isolados pela porosidade total obtém-se valores em

uma mesma escala, de zero a cem, onde tornou-se possível comparar percentuais de poros isolados entre diferentes corpos de prova.

$$\eta_{\text{Iso}} = \frac{\Delta\eta}{\eta_{\text{Total}}} \quad (\text{Equação 15})$$

**Índice de vazios (e)** - Razão entre o volume de vazios total ( $V_v$ ) e o volume dos sólidos ( $V_s$ ).

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (\text{Equação 16})$$

**Massa específica seca ( $\rho_s$ )** - Razão da massa seca pelo volume total do CP.

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_{\text{Total}}} \quad (\text{Equação 17})$$

**Massa específica saturada aparente ( $\rho_{\text{Sat Ap}}$ )** - Razão da massa saturada aparente pelo volume total do corpo de prova.

$$\rho_{\text{Sat Ap}} = \frac{M_{\text{Sat Ap}}}{V_{\text{Total}}} \quad (\text{Equação 18})$$

**Massa específica saturada total ( $\rho_{\text{Sat}}$ )** - Razão da massa saturada total pelo volume total do espécime.

$$\rho_{\text{Sat}} = \frac{M_{\text{Sat}}}{V_{\text{Total}}} \quad (\text{Equação 19})$$

**Peso específico seco ( $\gamma_s$ )** - Produto da massa específica seca pela aceleração da gravidade.

$$\gamma_s = \rho_s \cdot g \quad (\text{Equação 20})$$

**Peso específico saturado aparente ( $\gamma_{\text{Sat Ap}}$ )** - Produto da massa específica saturada aparente pela aceleração da gravidade.

$$\gamma_{\text{Sat Ap}} = \rho_{\text{Sat Ap}} \cdot g \quad (\text{Equação 21})$$

**Peso específico saturado total ( $\gamma_{\text{Sat}}$ )** - Produto da massa específica saturada total pela aceleração da gravidade.

$$\gamma_{\text{Sat}} = \rho_{\text{Sat}} \cdot g \quad (\text{Equação 22})$$

**Peso Específico Submerso ( $\gamma_{\text{Sub}}$ )** - Única medida de peso específico calculado de forma diferente, porém totalmente equivalente a metodologia vista acima. Nesta grandeza tem-se a razão do peso submerso, que equivale à massa submersa multiplicada pela aceleração da gravidade, dividido pelo volume total.

$$\gamma_{\text{Sub}} = \frac{M_{\text{Sub}} \cdot g}{V_{\text{Total}}} \quad (\text{Equação 23})$$

## 4.2.

### Caracterização petrográfica

#### 4.2.1.

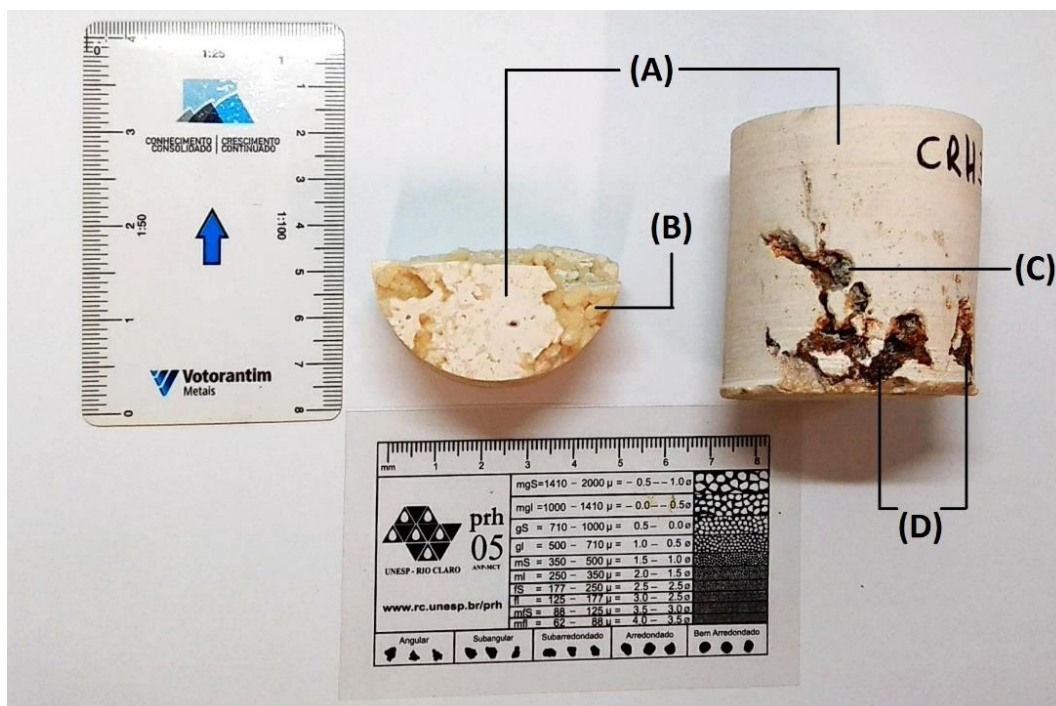
##### Análise macroscópica

Consistiu na observação da rocha a olho nu ou com lupa de vinte vezes de aumento, canivete suíço, imã de neodímio e ácido clorídrico 10%. Na observação visual foi identificado um material branco à bege claro, com brilho terroso na superfície externa e vítreo em poros e fraturas. Porosidade altamente heterogênea notada tanto na superfície dos corpos de prova, de rejeito e até irregulares, como em seções cortadas, onde foi possível observar, em áreas outrora protegidas de ações externas, a grande variação do tamanho dos vazios.

Foram identificadas manchas cinzas que poderiam indicar dolomita na composição ou dolomitização parcial, que seria o carbonato de cálcio parcialmente substituído por magnésio. Também observadas manchas avermelhadas em pequenas fraturas, ao redor de pontos escuros.

Foi observado um material escuro em diversos pontos do bloco de travertino ainda inteiro. E a contínua ocorrência deste, mesmo após amostragem, em diversas regiões do bloco, incluindo corpos de prova e rejeito (regulares ou não). Logo constatou-se que este material não poderia ser contaminação externa, uma vez que ele continuava presente em diversos corpos retirados de todas as partes do bloco. Com a presença repetitiva deste material em diversas superfícies e, até mesmo entranhada em regiões porosas de amostragens, não houve dúvida se tratar de um material de ocorrência natural, possivelmente oriundo da percolação de fluidos nos poros do carbonato. Apesar de frequentemente observado na rocha, quantitativamente este material escuro ocorreu em escassez.

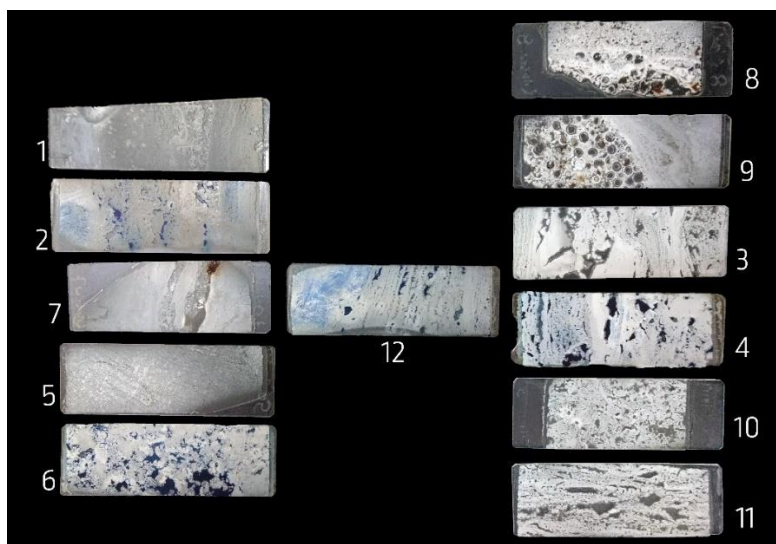
Na Figura 17 é possível observar o material branco à bege, de brilho terroso (A) e de brilho vítreo (B). Também uma pequena mancha acinzentada (C) e o material escuro bordado por manchas avermelhadas (D).



**Figura 17** Rejeito de travertino. (A) brilho terroso; (B) brilho vítreo; (C) material acinzentado; (D) material escuro e manchas avermelhadas ao redor.

#### 4.2.2. Análise microscópica

A partir de corpos de prova, corpos de rejeito regulares e rejeitos irregulares, com diversas orientações e posições do bloco, além de diferentes níveis de porosidade, foram produzidas 12 lâminas delgadas do travertino Romano. Todas as lâminas foram produzidas no Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro pelo Técnico Tarcísio Abreu. Cada sessão de interesse da rocha foi cortada sob uma espessura extremamente fina, colada em uma lâmina de vidro usando a Resina *Epoxy Araldite* e, nos casos onde se utilizou o azul de metileno, o Endurecedor *Trietilenotetramina*. Terminados estes procedimentos, as lâminas foram polidas até atingirem espessura em torno de 30  $\mu\text{m}$ . Apenas quatro lâminas foram banhadas com o corante azul de metileno. O resultado é visto na Figura 18.



**Figura 18** Lâminas delgadas do travertino Romano para análise microscópica.

Como já citado, o bloco que originou todas as amostras neste trabalho apresentou uma porção mais densa em uma metade, aqui denominada andar A1. E outra mais porosa, andar A2, conforme Figura 11. Foram utilizados corpos de rejeito, regulares e irregulares, de ambos os andares e com duas orientações principais em cada um. A tabela 9 detalha a região do bloco, mais porosa ou densa de acordo com o andar, corpo de origem e quantidade de lâminas retiradas dele, orientação de corte da lâmina em relação ao acamamento e, por último, o número da mesma.

**Tabela 9** Tabela de lâminas do travertino com orientação e porosidade variadas.

Andar	Corpo de Origem	Nº de Lâminas	Orientação com o acamamento	Nº da Lâmina
<b>A1</b>	CPV56	2	Ortogonal	<b>1</b>
			Ortogonal	<b>2</b>
	Rejeito irregular médio poroso	1	Ortogonal	<b>7</b>
	Rejeito irregular muito poroso	2	Paralela	<b>5</b>
			Paralela	<b>6</b>
<b>A2</b>	Rejeito irregular meio poroso	1	Ortogonal	<b>12</b>
	CRH5	2	Paralela	<b>8</b>
	CRH10		Paralela	<b>9</b>
	CPV55	2	Ortogonal	<b>3</b>
			Ortogonal	<b>4</b>
	Rejeito irregular muito poroso	2	Paralela	<b>10</b>
			Ortogonal	<b>11</b>

As lâminas foram agrupadas conforme o andar de porosidade e em ordem crescente de magnitude. Tanto do andar A1, quanto do A2, encontram-se na Tabela 9, de cima para baixo, exemplares que seriam de baixa, média e alta porosidade. E apenas uma lâmina de média porosidade (lâmina 12) que abrange cerca da metade de cada andar.

#### 4.2.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A vantagem do MEV em relação a outras análises por imagem é a produção de imagens nítidas a uma resolução incomparável, mesmo após o aumento do *zoom*, que pode variar entre 5 e 300.000 vezes. No mesmo conjunto, utilizando outro equipamento, foi possível fornecer a determinação elementar do material por microanálises pontuais realizadas pelo EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*).

As análises foram todas realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia (DCMM) da Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro (PUC-Rio) pelo técnico Yuri Nascimento. Foi usado o Microscópio Eletrônico de Varredura da marca Jeol, modelo JSM – 6510LV, operando a uma resolução de 4.0 nm (30 kV), para produção de imagens de alta resolução com super *zoom*. E o equipamento de microanálise espectral de raios-x da marca Thermo Scientific, modelo NORAN System 7 EDS System.

Foram utilizados corpos de rejeito regulares em pontos de interesse específicos. Na figura 19 são mostrados os exemplares citados. No primeiro (A) foram feitas apenas três imagens de alta resolução. Nos rejeitos (B) e (C) foram feitas imagens ao longo de pontos de interesse identificados, bem como análises químicas através do EDS, gerando gráficos com picos dos elementos encontrados.



**Figura 19** Corpos de rejeito utilizados nas análises de MEV.

### 4.3. Caracterização química

#### 4.3.1. Difratometria de raios-x

O método mais eficiente para tirar dúvidas quanto ao sistema cristalino e composições químicas é a caracterização por difração de raios-x. Esta análise foi realizada no Laboratório de Difração de Raios-X (LDRX), pertencente ao Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia (DCMM) da PUC-Rio, e coordenado pela Professora Sonia Letchevsky. O equipamento utilizado foi o Difratômetro D8 Discover da marca Bruker. O mesmo tem uma fenda de divergência com abertura de 0,6 mm, e uma fenda para o detector com abertura de 9,0 mm. Este equipamento permite fazer leituras do ângulo de difração ( $2\theta$ ) desde  $0^\circ$  até  $90^\circ$ . As condições de análise ficaram entre  $2^\circ$  ( $2\theta$  inicial) e  $90^\circ$  ( $2\theta$  final), ao passo de  $0,020^\circ$ .

Foram separados seis fragmentos de rejeito irregular, denominados com a sigla 'Dx', numeradas em ordem crescente. Estes foram escolhidos de acordo com características descritas na tabela 10. As amostras foram moídas na fração granulométrica de  $75\ \mu\text{m}$ , padrão #200 (ASTM).

**Tabela 10** Grupo de amostras em pó analisadas na difração de raios-x.

Amostra	Características
Dx 1	Amostra quase pura de travertino
Dx 2	Amostra pura de travertino
Dx 3	Amostra de travertino com traços de material cinza
Dx 4	Amostra de travertino alterada pela temperatura
Dx 5	Amostra de travertino com material escuro
Dx 6	Amostra de travertino com muito material cinza

As amostras Dx 1 e Dx 2 foram, respectivamente, em ordem crescente, os pedaços mais brancos e puros encontrados, isto é, onde se esperaria somente calcita. A amostra Dx 3 e Dx 6 foram, respectivamente, com pouca e muita contaminações de material cinza, onde se esperaria conteúdo dolomitizado. A amostra Dx 4 foi a única oriunda de um fragmento a permanecer na estufa a  $109^\circ\text{C}$  por 72 horas, onde poderia ocorrer uma possível alteração na estrutura cristalina da calcita. Por fim, a amostra Dx 5 apresentou material escuro encrustado, onde esperar-se-ia identificar a presença de óxidos, apesar da proporção muito inferior do material escuro.

### 4.3.2. Espectrometria de raios-x

A amostra moída de rejeito irregular denominado como 'Dx 2', a mesma utilizada para difração de raios-x e que não sofreu alteração na análise, foi reaproveitada. O padrão granulométrico manteve-se o mesmo, com fragmentos menores do que 75  $\mu\text{m}$ , #200 (ASTM), porém neste caso o material analisado foi destruído no processo. A quantidade utilizada para tal não ultrapassou 2,0 g do material em pó.

As análises foram realizadas em um espectrômetro de raios-x através de dispersão de energia (EDXRF), da marca Shimadzu, Modelo EDX 800HS, com tubo de Rh (fonte) e detector semicondutor de Si (Li). As condições instrumentais para determinações por espectrometria de EDXRF foram as seguintes: 100 s de tempo de irradiação; 10 mm de colimador; corrente de 100  $\mu\text{A}$  e tensão variando de 15 kV (elementos mais leves) a 50 kV (elementos mais pesados); fonte de raios-x operando com 10 mA. As linhas analíticas  $K\alpha$  dos elementos foram utilizadas para estabelecer valores semiquantitativos. A determinação dos elementos foi feita sob vácuo.

### 4.3.3. Determinação elementar de CHN

Esta análise foi utilizada para o material escuro encontrado nos poros e fraturas da rocha, o qual apesar de recorrente ocorre em quantidades muito pequenas. Este material foi retirado de diversos corpos de rejeito regular e irregular, separados da forma mais pura possível e moídos na fração granulométrica #200 (ASTM), isto é, menor do que 75  $\mu\text{m}$ . Contudo, não foi possível atingir mais do que 500 mg de material moído, sendo o mínimo ideal em torno de 2,0 g. Mesmo assim, a análise foi feita ajustando-se os valores de oxigênio relativo às percentagens dos outros componentes encontrados. Apesar de relativos, os valores das substâncias encontrados forneceram dados bastante úteis para a determinação da composição química deste material escuro.

A Determinação Elementar de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio nas amostras foi realizada em um Analisador Elementar Flash EA 1112 (Thermo Electron Corporation). A análise elementar foi feita sob atmosfera de He (140 ml min<sup>-1</sup>) utilizando-se um detector de condutividade térmica, a uma temperatura do forno de 900°C e temperatura da coluna de 60°C. Para a determinação de C, H e N e S, as amostras foram inseridas em cápsulas de estanho. A calibração foi realizada usando quatro padrões, listados a seguir: 2,5-Bis (5-tert-butil-2-benzoxazolil) tiofeno (BBTO) (6,51% N; 75,52% C; 6,09% H; 7,44% S), sulfanilamida (16,26% N; 41,85% C; 4,68% H; 18,62 S), cistina (11,66% N; 29,99% C; 13,43% H; 3,42% S) e um padrão de óleo lubrificante (1,29% N; 81,00% C; 13,43% H; 3,42% S). A metionina (9,39% N; 40,25% C; 7,43% H; 21,49% S) foi usada como padrão de verificação.

#### **4.3.4.**

### **Espectroscopia por energia dispersiva (EDS)**

Esta metodologia de análise química foi a única que não utilizou o método do pó, sendo uma análise química pontual por energia dispersiva que pode ser realizada no microscópio eletrônico de varredura (MEV) e cuja a sigla representa o termo *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS).

Foram analisados pontos de interesse ao passo em que eram produzidas imagens de alta resolução do travertino. As regiões de maior interesse para esta análise foram os poros e fraturas, em especial análises sobre o material escuro encontrado e sobre as manchas acinzentadas e avermelhadas.

#### **4.4.**

### **Caracterização da estrutura porosa**

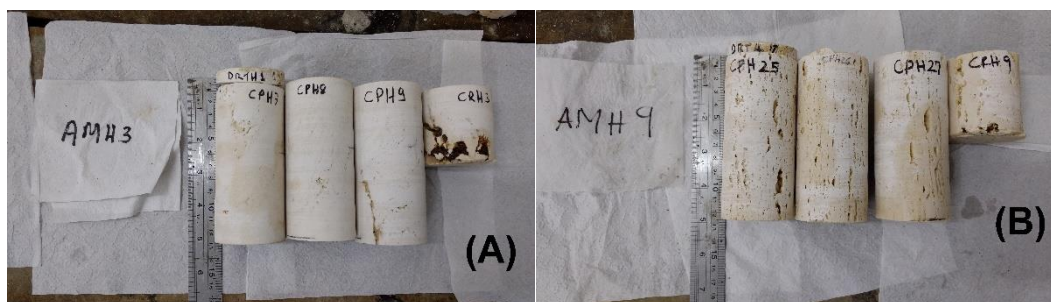
#### **4.4.1.**

### **Análise macroscópica**

A porosidade encontrada neste material foi amplamente variada, podendo ser observada a olho nu, variando entre poucos milímetros até a ordem de alguns centímetros, que podiam chegar até a pequenos *cavings* (ou cavernas), logicamente proporcionais a escala do corpo de prova.

Neste tópico a porosidade foi avaliada de três maneiras. Externamente, observando através da superfície dos corpos de prova e rejeito, avaliando tamanhos, geometrias, distribuição e preenchimentos dos mesmos. A segunda forma se utilizou de corpos já rompidos, utilizados no ensaio de carga pontual, e outros rejeitos regulares cortados que mostrassem o comportamento dos poros por dentro do espécime. E a terceira foi uma comparação das porosidades interconectada e total obtidas em laboratório, estimando a influência dos poros isolados.

Embora esta seja uma avaliação mais qualitativa, foi de extrema importância, já que é mais importante para um ensaio mecânico conhecer as propriedades e distribuição dos vazios do material a ser testado do que o ambiente de formação do mesmo. Na figura 20 observa-se os grupos de corpos de prova horizontais, separados por grau de porosidade, sendo (A) mais densos e (B) mais porosos. Foi observada uma grande heterogeneidade na forma, tamanho e distribuição dos vazios e isto influenciaria diretamente na resistência mecânica de cada corpo de prova.



**Figura 20** CP's horizontais por grau de porosidade. (A) Mais densos; (B) Mais porosos.

#### 4.4.2. Análise microscópica

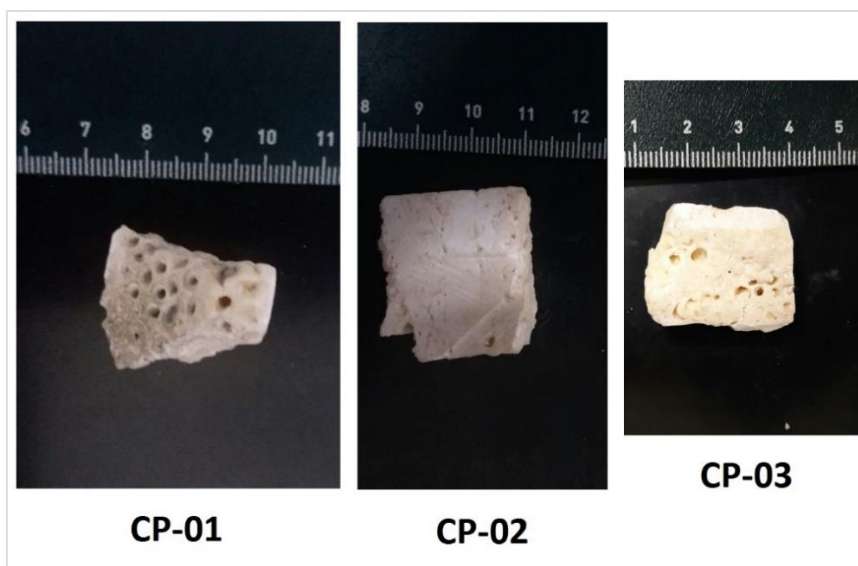
As mesmas doze lâminas delgadas, citadas no subitem 4.2.2, foram utilizadas. Apenas quatro lâminas foram banhadas em azul de metileno para gerar contraste com os poros e assim estimar a porosidade. Todas banhadas com corante foram fotografadas em alta resolução através do microscópio óptico da marca Zeiss, com *zoom* de cinco vezes, no Laboratório de Imagens e Microscopia Digital, do Departamento de Engenharia Química e Materiais da PUC-Rio, pelo Professor Marcos Henrique de Pinho Mauricio, onde foi possível montar um mosaico de várias fotos aglutinadas e observar toda a lâmina em alta resolução, estimar os valores de porosidade das mesmas através do software AxioVision v4.9, além de mais eficiência quanto ao estudo do tamanho, forma e distribuição dos poros.

#### 4.4.3. Porosimetria por intrusão de mercúrio

As análises foram realizadas no Laboratório de Interação Rocha Fluido, do Grupo de Tecnologia e Engenharia de Petróleo (GTEP), da PUC-Rio, pelo responsável técnico Victor Meléndez. O equipamento empregado foi um porosímetro da marca Micromeritics, modelo Autopore IV 9500, que pode atingir a pressões de até 228 MPa, cobrindo uma faixa de diâmetro de poros entre cerca de 0,5 a 360  $\mu\text{m}$ .

Os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio tiveram por objetivo a obtenção, a distribuição e o valor médio dos diâmetros dos poros, além da porosidade efetiva.

Foi utilizado um pedaço de rejeito irregular, que foi serrado no próprio GTEP, em três partes, separadas em porosidades visualmente distintas. A partir daí obtiveram-se um fragmento com alta porosidade, denominado CP-01, outro de baixíssima porosidade aparente, CP-02, e um terceiro fragmento com porosidade visual moderada, CP-03. Os ensaios seguiram os procedimentos estabelecidos na norma ASTM D4404 e os exemplares utilizados são vistos na Figura 21.



**Figura 21** Fragmentos de travertino com porosidades variadas utilizados.

#### **4.4.4.**

#### **Microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

A avaliação da estrutura porosa através da microscopia eletrônica de varredura contou com as mesmas amostras, corpo técnico e equipamentos já descritos no item 4.2.3 sobre caracterização petrográfica. A única ferramenta não utilizada aqui foi o EDS, já que não seria coerente fazer avaliações químicas de um espaço vazio.

As imagens dos poros foram feitas ao mesmo tempo, visando um estudo detalhado tanto do material, quanto dos poros. Buscou-se identificar, classificar e mensurar microporosidades, incluindo inter e intraparticular.

#### **4.5.**

#### **Caracterização da resistência mecânica**

##### **4.5.1.**

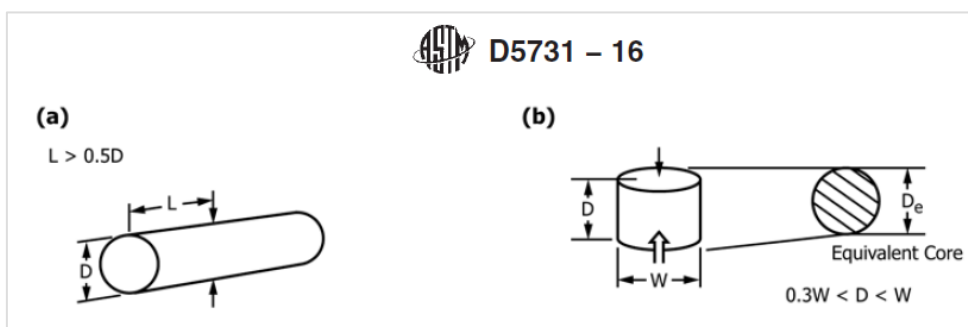
##### **Ensaio de carga pontual**

Também chamado de *Point Load Test*, este ensaio fornece, através de correlações, uma estimativa da resistência a compressão uniaxial (UCS). As normas aqui utilizadas seguiram o padrão da ASTM (*American Society for Testing and Materials*), designação D5731 (2016). Ele consiste na aplicação de cargas pontuais através de cones metálicos, coaxiais e truncados em um espécime de rocha com formato regular, ou não, e diâmetro variando entre 30 e 85 mm ao longo do eixo alinhado com os cones. Ao romper a amostra, obteve-se o índice de carga pontual ( $I_s$ ).

Foi utilizado o equipamento da marca brasileira Martins Campelo Desenvolvimento de Tecnologia Ltda, modelo manual (até 100kN), do Laboratório de Mecânica e Tecnologia das Rochas (LEMETRO), da UFRJ, Departamento de Geologia, com o auxílio do profissional responsável Márcio Leão. O equipamento foi conectado a uma pequena central eletrônica onde foram inseridos todos os dados pertinentes ao ensaio, como identificação e dimensões. Com isso foi possível obter com precisão a carga no momento da ruptura.

As amostras foram obtidas a partir de corpos de rejeito regular e ensaiadas completamente secas, com volume geométrico conhecido, diâmetro de 50 mm, orientações de ensaio diametral e axial, e altura variável, porém sempre respeitando os limites propostos pela ASTM.

Todos os ensaios foram realizados apenas com espécimes verticais, isto é, com o eixo axial ortogonal ao acamamento (direção de furo paralela ao eixo 'z'). Com estes espécimes foram realizados ensaios com orientação horizontal (a), onde diâmetro do corpo de prova corresponde a distância 'D' entre os cones, e com orientação vertical (b), onde a altura do espécime coincide com a distância 'D', conforme Figura 22.



**Figura 22** Orientação dos exemplares nos ensaios. (Adaptado de ASTM, 2016)

Para cada ensaio foi encontrado um índice de carga pontual ( $I_s$ ). Através de um fator de conversão de força (K), multiplicado pelo referido índice, foi estimada a resistência à tração em cada ensaio. No caso de ensaios horizontais e para amostras com diâmetro NX, isto é 54 mm, a ASTM propõe este fator K igual a 24. No entanto, são propostos valores diferentes para este fator de conversão de força em função da distância entre os cones (D), conforme mostrado na Tabela 11.

A orientação dos ensaios é ilustrada na Figura 22. Os corpos de prova de ensaios horizontais, mostrados em (a), foram cortados com um comprimento (L) respeitando a relação mostrada em que fosse sempre maior do que a metade da distância entre os cones (D). Bem como os espécimes de ensaios verticais foram cortados com uma distância entre os cones (D) maior do que 30% do diâmetro (W) e, ao mesmo tempo, menor do que o diâmetro (W), conforme mostrado em (b) da mesma figura.

**Tabela 11** Fator de conversão K para o índice de carga pontual em função do diâmetro da amostra. (Fonte: ASTM)

Índice generalizado para fator de conversão de força (K)		
Tamanho do diâmetro D		Valor de K (generalizado)
(mm)		
21,5	Núcleo EX	18
30		19
42	Núcleo BX	21
50		23
54	Núcleo NX	24
60		24,5

Para ensaios com eixo do cilindro na horizontal, isto é, quando o diâmetro coincide com a distância entre cones (D) foram denominados *Point Load Horizontal* (PLH). Já quanto aos ensaios com eixo cilíndrico na vertical, isto é, a altura do espécime coincide com a distância entre cones (D), foram denominados *Point Load Vertical* (PLV). Todas as amostras foram mantidas em estufa a 100°C pelo período de 24 horas no Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio. Posteriormente todas foram pesadas e medidos os respectivos diâmetro e altura, de onde obtiveram-se alguns parâmetros básicos como dimensões, massa seca ( $M_s$ ) e porosidade total, calculada a partir da densidade específica dos sólidos, conforme a Tabela 12, para ensaios verticais e Tabela 13, para ensaios horizontais.

**Tabela 12** Parâmetros físicos dos espécimes nos ensaios verticais de carga pontual.

Amostra	$M_s$	H	D	$V_{Total}$	$V_s$	$\eta_{Total}$
	(g)	(mm)	(mm)	(cm³)	(cm³)	(%)
PLV 1	131,07	26,33	50,28	52,28	48,54	7,14%
PLV 2	134,72	30,57	50,18	60,46	49,90	17,47%
PLV 3	125,10	25,53	50,20	50,53	46,33	8,31%
PLV 4	93,77	19,13	50,24	37,92	34,73	8,42%
PLV 5	91,42	18,86	50,15	37,25	33,86	9,11%
PLV 6	103,48	20,50	50,31	40,75	38,33	5,95%
PLV 7	102,83	21,08	50,28	41,86	38,09	9,01%
PLV 8	102,41	20,55	50,25	40,75	37,93	6,93%
PLV 9	88,31	18,94	50,24	37,55	32,71	12,89%
PLV 10	193,11	41,12	50,26	81,58	71,52	12,33%
PLV 11	185,33	39,56	50,33	78,70	68,64	12,79%

**Tabela 13** Parâmetros físicos dos espécimes nos ensaios horizontais de carga pontual.

Amostra	M <sub>s</sub>	H	D	V <sub>Total</sub>	V <sub>s</sub>	η <sub>Total</sub>
	(g)	(mm)	(mm)	(cm³)	(cm³)	(%)
PLH 1	153,05	32,09	50,08	63,21	56,69	10,32%
PLH 2	168,49	34,36	50,30	68,28	62,40	8,60%
PLH 3	163,09	32,46	50,20	64,25	60,40	5,98%
PLH 4	178,63	37,21	50,33	74,03	66,16	10,63%
PLH 5	176,31	35,86	50,34	71,37	65,30	8,51%
PLH 6	165,65	35,83	50,41	71,51	61,35	14,21%
PLH 7	185,43	37,83	50,06	74,46	68,68	7,76%
PLH 8	192,74	39,67	49,95	77,74	71,39	8,17%
PLH 9	190,98	41,15	50,31	81,80	70,73	13,53%
PLH 10	250,49	52,03	50,29	103,35	92,77	10,23%
PLH 11	239,29	51,33	50,28	101,92	88,63	13,04%

#### 4.5.2. Ensaio Brasileiro

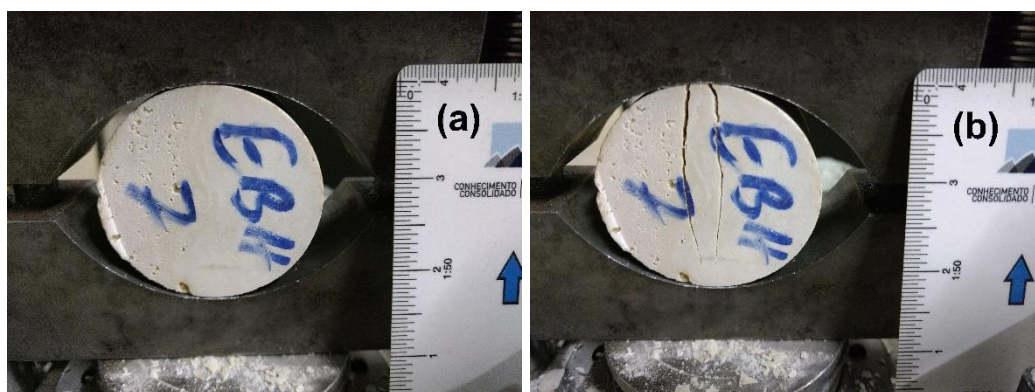
Este ensaio foi realizado com o mesmo equipamento e no mesmo local utilizado para os ensaios de carga pontual, trocando-se apenas os *caps* cônicos por *caps* em arco, padrão utilizado para o mesmo. Dessa forma obtiveram-se, com relativa precisão, os valores de carga aplicada na ruptura, através dos quais foi possível estimar a tensão de tração na ruptura.

Os padrões sugeridos pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), NBR ISO 6892-1:2013, foram rigorosamente seguidos. Utilizando-se amostras cilíndricas secas, de aproximadamente 50 mm de diâmetro e comprimento sempre com valor próximo ao raio, isto é, a espessura com aproximadamente a metade do diâmetro.

O preparo dos espécimes para este ensaio foi feito em conjunto com os destinados aos de ensaio de carga pontual, oriundos dos mesmos corpos de prova e rejeito citados no item 4.5.1 e divididos em exemplares para os dois tipos de ensaios, respeitando as devidas dimensões correspondentes. Todo o procedimento laboratorial, parâmetros e nomenclatura dos espécimes foram equivalentes ao citado no referido item. Contudo, para este ensaio só existe a posição com o eixo axial do espécime na horizontal. Então foram utilizadas amostras verticais (direção de furo paralela ao eixo 'z') e horizontais (direção de furo paralela ao eixo 'x').

Utilizou-se a sigla 'EB' seguida de um número inteiro, em ordem crescente para cada corpo de prova. Para os ensaios com amostras verticais, seguida de um 'V'. E para os ensaios horizontais, seguidos de um 'H'. Quanto a posição do corpo de prova no ensaio, não havia influência para os verticais, já que o acamamento estaria sempre no mesmo plano. No entanto, para os ensaios com amostragem horizontal, a rotação do espécime alterava a direção da linha do acamamento. Então

foi escolhida a orientação mais frágil, isto é, com o plano do acamamento sedimentar paralelo ao plano de ruptura. Na Figura 23 observa-se um exemplo de Ensaio Brasileiro antes (a) e depois (b) da ruptura. No exemplar em questão, EBH 7, observou-se o plano de acamamento paralelo ao plano de ruptura do ensaio.



**Figura 23** Espécime horizontal no ensaio brasileiro antes (a) e depois (b) da ruptura.

Os principais parâmetros calculados, como massa seca, dimensões e porosidade total foram plotados nas Tabelas 14, para amostras verticais, e 15, para amostras horizontais.

**Tabela 14** Parâmetros físicos dos espécimes verticais nos ensaios brasileiros.

Amostra	$M_s$	H	D	$V_{Total}$	$V_s$	$\eta_{Total}$
	(g)	(mm)	(mm)	(cm <sup>3</sup> )	(cm <sup>3</sup> )	(%)
EBV 1	127,58	25,84	50,26	51,27	47,25	7,83%
EBV 2	127,15	26,55	50,30	52,76	47,09	10,74%
EBV 3	125,50	26,53	50,29	52,70	46,48	11,80%
EBV 4	137,32	29,21	50,30	58,04	50,86	12,38%
EBV 5	145,51	30,45	50,23	60,34	53,89	10,68%
EBV 6	141,34	30,12	50,26	59,76	52,35	12,40%
EBV 7	126,85	26,67	50,37	53,14	46,98	11,60%
EBV 8	152,31	31,27	50,34	62,24	56,41	9,36%
EBV 9	125,03	26,41	50,17	52,21	46,31	11,30%
EBV 10	131,63	27,38	50,32	54,45	48,75	10,47%
EBV 11	132,04	27,99	50,22	55,44	48,90	11,79%
EBV 12	114,30	22,68	50,32	45,10	42,33	6,14%
EBV 13	102,69	22,41	50,24	44,43	38,03	14,39%

**Tabela 15** Parâmetros físicos dos espécimes horizontais nos ensaios brasileiros.

Amostra	$M_s$	H	D	$V_{Total}$	$V_s$	$\eta_{Total}$
	(g)	(mm)	(mm)	(cm <sup>3</sup> )	(cm <sup>3</sup> )	(%)
EBH 1	149,39	30,38	50,16	60,03	55,33	7,84%
EBH 2	132,28	27,93	50,34	55,59	48,99	11,87%
EBH 3	133,47	27,75	50,21	54,95	49,43	10,03%
EBH 4	136,68	29,05	50,12	57,31	50,62	11,68%
EBH 5	127,62	26,85	50,36	53,48	47,27	11,62%
EBH 6	149,19	32,37	50,64	65,20	55,26	15,25%
EBH 7	139,72	28,05	50,40	55,96	51,75	7,53%
EBH 8	129,77	27,69	50,37	55,18	48,06	12,89%
EBH 9	128,50	28,32	50,33	56,34	47,59	15,53%
EBH 10	150,49	33,34	50,32	66,30	55,74	15,94%

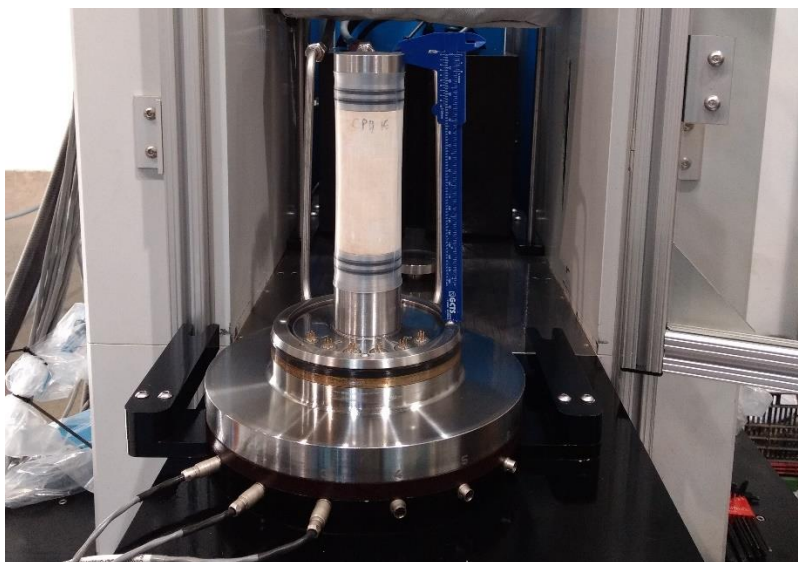
#### 4.5.3. Ensaio de compressão uniaxial

Os ensaios geomecânicos mais esclarecedores quanto ao comportamento mecânico da rocha foram os triaxiais, através dos quais pôde-se calcular parâmetros de resistência com maior precisão, ajustando-se os resultados a um ou mais critérios de resistência. Este tópico abrange o ensaio uniaxial, que pode ser entendido como um triaxial com zero de confinamento, portanto foi partir daqui que se obtiveram os melhores dados e a maior precisão dos resultados.

Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio, pelo técnico Bruno Vianna, no equipamento de ensaios de carregamento da marca GCTS, Modelo RTR 1500, capacidade de carregamento axial máximo de 1500 kN e máximo confinamento de 140 MPa, podendo realizar ensaios térmicos sob temperatura de até 200°C. Equipamento servo controlado, de aço inoxidável de altíssima resistência RC 58+ (Rockwell) e com medição de deformação através de sensores LVDT, este permite aplicar tensão desviadora diretamente sobre o corpo de prova, sem confinamento (ensaio uniaxial). Ou aplicar um carregamento hidrostático até um valor qualquer desejado para, em seguida, aplicar a tensão desviadora (ensaio triaxial). Devido à alta tecnologia embarcada nessa máquina, ela permite diversos outros tipos de ensaios, como de temperatura, poropressão e com variações de tensão, porém os mesmos não foram utilizados.

Por ser um ensaio uniaxial, não houve confinamento, isto é, a célula de carregamento hidrostático ficou vazia, portanto neste caso a tensão desviadora é numericamente igual a tensão axial. Também não houve preenchimento dos poros, sendo que a única interferência sobre os corpos de prova durante estes ensaios foi o revestimento de uma membrana transparente, de baixa resistência à tração (Figura 24), a fim de proteger todo o aparato montado com os sensores de deformação

(LVDT's), os quais são extremamente sensíveis. O equipamento foi programado para não permitir deformações superiores a 3,0 % como uma das medidas de segurança. Todos os ensaios foram programados com uma taxa de carregamento lenta e em função da deformação vertical do corpo, com valor de 0,05 % /min.



**Figura 24** Corpo de prova revestido por uma membrana de baixa resistência à tração sendo preparado para o ensaio uniaxial.

Posteriormente, foram separados corpos de prova com intervalos de porosidade total próximos, a fim de se comparar os resultados de resistência e o comportamento mecânico em cada grupo de tensão confinante sem que uma significativa variação na propriedade dos vazios interferisse nesta análise.

Os parâmetros elásticos foram de vital importância para a compreensão do comportamento geomecânico da rocha mediante ensaios uni e triaxiais. Para os ensaios uniaxiais foram calculados coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), módulos de elasticidade ( $E$ ) e deformabilidade ( $E_{Def}$ ), e o módulo de cisalhamento ( $G$ ). O coeficiente de Poisson foi calculado pela sua fórmula direta, isto é razão da deformação lateral ( $\epsilon_{Rad}$ ) e axial ( $\epsilon_{Ax}$ ). O módulo de elasticidade ( $E$ ) foi calculado no trecho de descarregamento do gráfico tensão *versus* deformação, o qual só pôde ser observado mediante *zoom*, já que a linha de descarregamento ficou muito próxima do carregamento. Já o módulo de deformabilidade ( $E_{Def}$ ) foi calculado pela tangente no ponto correspondente a 50% da tensão de ruptura deste mesmo gráfico. O módulo de cisalhamento ( $G$ ) foi obtido através da seguinte correlação:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 - \nu)} \quad (\text{Equação 24})$$

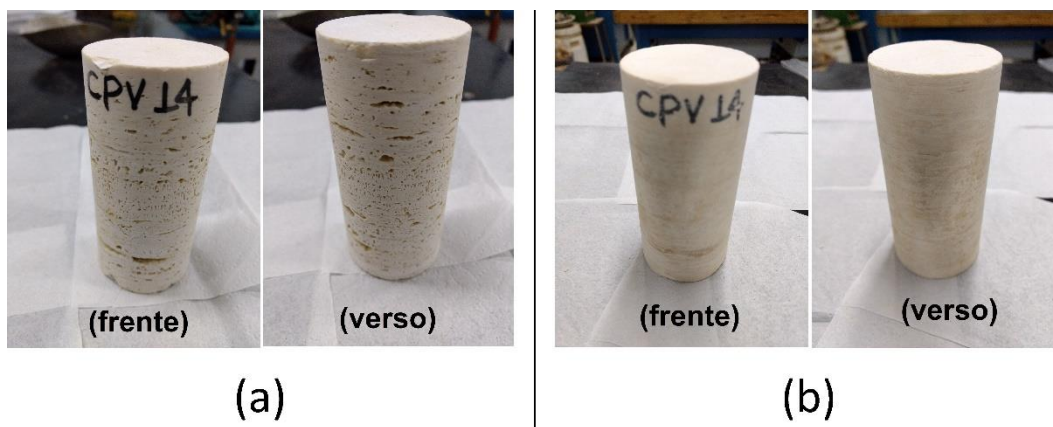
#### 4.5.4. Ensaio de compressão triaxial

Os ensaios triaxiais foram realizados no mesmo local, pelo mesmo profissional e com a mesma taxa de carregamento citados no item 4.5.3.

Neste modelo de equipamento não é possível aplicar tensão axial e confinante separadamente, tendo todo ensaio triaxial que passar necessariamente por uma fase hidrostática, carregando a célula de confinamento (*Cellpressure*) até a tensão confinante almejada e, posteriormente, aplicar a tensão desviadora através de um pistão até a ruptura do espécime. Como nos ensaios uniaxiais, todos os ensaios foram realizados com os corpos de prova completamente secos, não havendo em nenhum caso desenvolvimento de poropressões.

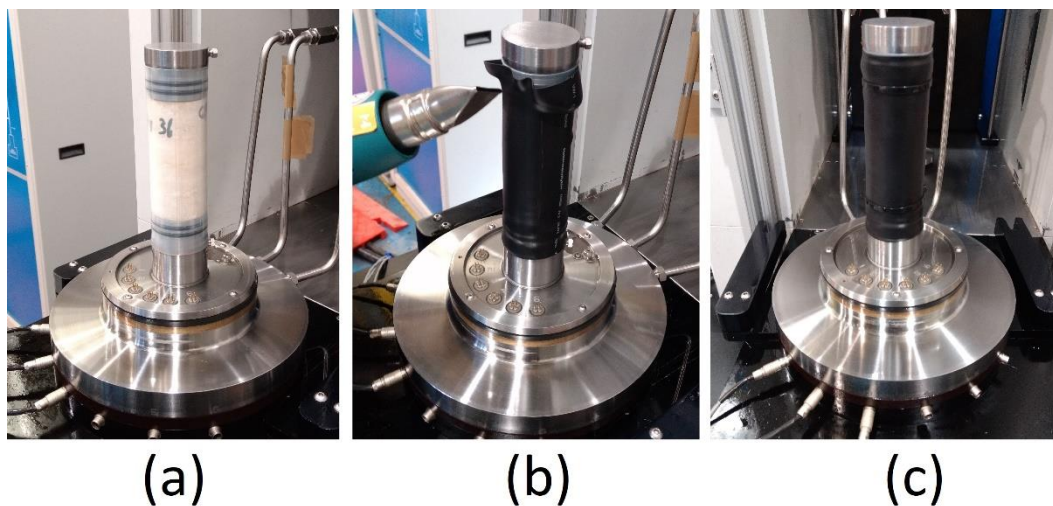
Assim como nos ensaios uniaxiais, os corpos de prova utilizados nos ensaios triaxiais foram separados em grupos similares de porosidade para cada grupo de tensão confinante. Esperou-se com isto encontrar um valor intermediário que pudesse marcar o limite na mudança de comportamento geomecânico do travertino entre porosidades mais baixas e mais altas. As tensões de confinamento variaram de zero (uniaxial) até 40 MPa, de 10 em 10 MPa.

Os ensaios uniaxiais foram realizados com apenas uma membrana e sem nenhum tipo de preenchimento. Porém, neste caso foi necessário buscar um material que pudesse preencher os poros superficiais a fim de que a membrana não fosse rompida durante a aplicação de tensão na célula de confinamento através da pressurização de óleo. Todos os ensaios triaxiais com tensão confinante tiveram algum tipo de preenchimento nos poros para impedir que membrana fosse perfurada. Nos ensaios até 10 MPa foi utilizada apenas uma argamassa de rejunte para porcelanato, o qual é um material extremamente frágil, o que foi comprovado pela facilidade de removê-lo com a ponta de uma lapiseira 0,5 mm. O interesse de um material deste tipo foi interferir o mínimo possível na resistência real do material. A partir de 20 MPa foi utilizado também o pó de travertino, sob a granulometria #40 (ASTM), inserido nos poros maiores e mais profundos. Isto foi feito apenas para evitar que a argamassa, a qual se restringiu as regiões mais superficiais dos poros, fosse empurrada pela tensão confinante para dentro do espécime, rasgando a membrana por consequência. Com 30 MPa de confinamento adotou-se, além das práticas citadas, a aplicação de uma fina camada de gesso, a qual foi aplicada após uma leve raspagem do preenchimento da argamassa. O gesso é oriundo da gipsita, resistência bem abaixo do carbonato, no entanto suas propriedades de coesão são maiores e dificultaram bastante o carregamento da argamassa para o interior dos poros. Na Figura 25 observa-se um corpo de prova antes (a) e depois (b) do preenchimento.



**Figura 25** Corpo de prova CPV 14 antes (a) e depois (b) do preenchimento.

Contudo, algumas rupturas de membrana em ensaios de 10 e 20 MPa de confinamento indicaram que a membrana transparente utilizada no ensaio uniaxial não poderia ser utilizada neste ensaio, ao menos não sozinha. A disponibilidade foi combinar a referida membrana com uma segunda membrana preta, também de baixa resistência à tração. Na Figura 26 observa-se a membrana transparente colocada (a), seguida da colocação da membrana preta (b) e a mesma colocada e fixada com presilhas de tração para melhor fixação do conjunto.



**Figura 26** Montagem do conjunto de membranas para ensaio triaxial. (a) Membrana transparente colocada; (b) Membrana preta sendo colocada; (c) Membrana preta colocada e conjunto travado com presilhas nos contatos com os caps superior e inferior.

Após os corpos de prova ensaiados, foram produzidos os gráficos de tensão desviadora *versus* deformação axial, bem como deformação axial *versus* deformação volumétrica na fase desviadora para cada exemplar em separado. Também foram geradas plotagens da tensão confinante *versus* deformação

volumétrica na fase hidrostática para cada ensaio. A compilação dos gráficos de tensão desviadora *versus* deformação axial auxiliou na interpretação dos resultados, bem como a plotagem dos dados no gráfico tensão desviadora *versus* porosidade total auxiliaram para encontrar um valor limite de porosidade que marcassem a mudança de comportamento mecânico da rocha. Destes resultados, foram calculados parâmetros elásticos e parâmetros de resistência do travertino Romano.

Os parâmetros elásticos calculados para os ensaios triaxiais foram os mesmos citados no item 4.5.3, acrescidos do módulo volumétrico (K). Este foi calculado em dois estágios - o módulo volumétrico na fase hidrostática (K), calculado no trecho de descarregamento/recarregamento da fase hidrostática, no gráfico tensão confinante *versus* deformação volumétrica. Devido ao comportamento altamente elástico, foi necessário um elevado *zoom* para visualizar o referido trecho do cálculo de (K). E, para efeitos de comparação, foi calculado o módulo volumétrico da fase cisalhante (K<sub>r</sub>), através da seguinte fórmula de correlação:

$$K_r = \frac{E}{(1 - \nu)} \quad (\text{Equação 25})$$

## 5 Resultados


Neste capítulo foram apresentados os resultados do estudo sob a mesma estrutura vista no Capítulo 4 (Metodologia). Todas as características e propriedades analisadas ou definidas no capítulo anterior foram aqui classificadas, medidas e/ou calculadas. Através dos resultados obtidos, novas análises em cima destes e comparações entre eles, foram criados mais alguns itens na estrutura deste capítulo para auxiliar na compreensão dos resultados.

### 5.1. Parâmetros físicos

#### 5.1.1. Densidade relativa dos grãos (Gs)

Foram obtidos os resultados dos picnômetros 2, 11, 32 e 36, através dos cálculos automáticos em ábaco, fornecendo quatro valores para densidade relativa dos sólidos (ou gravidade específica dos sólidos), como pode ser visto na Tabela 16. Os três primeiros picnômetros deram resultados quase idênticos e igual a 2,70 g/cm<sup>3</sup>. Somente o quarto picnômetro, de número 36, forneceu resultado igual a 2,67 g/cm<sup>3</sup>.

**Tabela 16** Planilha do Excel para cálculo de G<sub>s</sub> do Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio.

	<b>Cliente:</b> Mauro Gussane Benedicto Junior <b>Projeto:</b> Dissertação de Mestrado <b>Local:</b> Laboratório de Geotecnia (PUC-RIO) <b>Amostra:</b> Travertino Romano				<b>Data:</b> 19/08/2017 <b>Ensaio:</b> 01
Picnômetro n.º	2	11	32	36	
Volume nominal do frasco (ml)	250	250	250	250	
T = temperatura ( °C )	23,5	23,5	23,5	23,5	
M <sub>fa</sub> = massa do frasco+água (g)	342,79	321,74	328,15	343,13	
M <sub>s</sub> = massa do solo (g)	25,00	25,00	25,00	25,00	
M <sub>fas</sub> = massa do frasco+agua+solo (g)	358,54	337,49	343,92	358,79	
M <sub>s</sub> +M <sub>fas</sub> +M <sub>fa</sub> (g)	9,25	9,25	9,23	9,34	
ρ <sub>wt</sub> (obtido automaticamente do ábaco) (g/cm <sup>3</sup> )	0,99745	0,99745	0,99745	0,99745	
Massa específica dos Grãos: ρ <sub>s</sub> =(W <sub>s</sub> G <sub>wt</sub> )/(W <sub>s</sub> -W <sub>fas</sub> +W <sub>fa</sub> )	2,6958	2,6958	2,7017	2,6698	
Densidade relativa dos grãos: G <sub>s</sub> = ρ <sub>s</sub> / ρ <sub>wt</sub> (20oC)	2,7007	2,7007	2,7065	2,6746	
Média da massa específica dos grãos: ρ <sub>s</sub>	2,6978	g/cm <sup>3</sup>			
Média da densidade relativa dos grãos: G <sub>s</sub>	2,7026				

De acordo com a norma DNIT ME093/94, os resultados para cálculo de densidade não devem apresentar uma diferença igual ou superior a 0,009. Por este motivo, os resultados obtidos no picnômetro 36 foram desconsiderados. Os picnômetros 2 e 11 apresentaram valores exatamente iguais e diferindo em apenas 0,006 do de número 32. Ainda segundo a norma, o valor obtido deve ser expresso com duas casas decimas, onde os três primeiros picnômetros coincidem exatamente, sendo adotado para fins de cálculo neste trabalho  $G_s = 2,70 \text{ g/cm}^3$ .

### 5.1.2. Índices medidos

Neste subitem agrupam-se apenas índices medidos em cada corpo de prova por aparelhos de precisão, como paquímetro e balança digital. Através destes valores foi possível calcular variados índices físicos importantes na caracterização do travertino Romano.

Os resultados encontram-se na Tabela 17, para corpos de prova verticais, e 18, para corpos de prova horizontais. Estes encontram-se separados por grupo de tensão confinante dos ensaios triaxiais e em ordem decrescente de porosidade.

**Tabela 17** Índices medidos dos corpos de prova verticais.

$\sigma_c$ (MPa)	CP	D	H	M <sub>Nat</sub>	M <sub>S</sub>	M <sub>Sub</sub>	M <sub>Sat</sub> Ap	Desloc.
		(mm)	(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(ml)
	VERTICAL							
0	CPV71	50,27	113,11	537,50	530,51	322,10	540,46	217,10
	CPV24	50,38	106,39	511,14	508,68	312,80	520,03	207,80
	CPV59	50,24	121,78	600,00	597,81	368,60	605,60	235,30
	CPV67	50,28	116,92	583,00	580,89	358,90	587,25	224,70
	CPV61	50,28	116,38	580,00	578,41	357,00	585,18	227,50
10	CPV54	50,30	106,94	509,00	505,92	310,10	515,81	204,50
	CPV66	50,39	115,18	569,00	566,39	349,30	573,68	222,90
	CPV5	50,28	110,09	546,00	543,42	335,20	550,60	211,60
	CPV7	50,27	109,01	544,00	542,27	334,70	549,28	213,80
20	CPV14	50,30	107,40	516,00	509,82	309,80	519,87	210,40
	CPV63	50,17	113,37	553,80	550,76	339,60	557,20	216,20
	CPV21	50,22	107,38	530,00	526,91	324,00	534,24	208,70
	CPV13	50,29	109,00	548,00	546,00	337,40	551,30	210,80
30	CPV6	50,33	106,70	509,80	503,97	307,10	513,18	204,80
	CPV30	50,40	107,06	525,00	523,38	321,80	531,44	206,40
	CPV11	50,27	106,32	528,62	526,72	327,90	534,32	209,10
	CPV27	50,23	108,58	542,98	541,42	335,90	549,02	212,00
40	CPV37	50,18	109,02	543,40	540,24	333,40	546,96	211,50
	CPV29	50,29	107,52	537,85	536,61	333,60	544,54	210,10

**Tabela 18** Índices medidos dos corpos de prova horizontais.

$\sigma_c$ (MPa)	CP	D	H	M <sub>Nat</sub>	M <sub>S</sub>	M <sub>Sub</sub>	M <sub>Sat</sub> Ap	Desloc.
		(mm)	(mm)	(g)	(g)	(g)	(g)	(ml)
	HORIZONTAL							
0	CPH18	50,29	110,50	532,00	524,28	316,70	533,12	213,90
	CPH11	50,28	110,80	538,00	535,21	328,60	546,32	214,80
	CPH14	50,30	111,61	551,80	549,28	339,80	558,50	215,40
10	CPH10	50,26	108,31	522,00	519,50	318,60	529,90	210,00
	CPH12	50,32	109,51	531,00	528,43	325,40	537,45	210,60
	CPH25	50,31	108,72	531,22	529,17	326,90	537,88	212,40
	CPH8	50,32	109,72	551,70	549,15	340,50	555,93	211,90
20	CPH17	50,30	110,86	539,60	532,71	323,90	540,51	213,70
	CPH20	50,28	110,91	541,00	534,39	323,80	542,21	213,80
	CPH7	50,28	107,49	531,40	528,18	324,80	535,89	212,60
30	CPH21	50,21	108,55	522,00	516,09	312,60	525,17	206,30
	CPH22	50,26	110,00	531,64	529,22	328,30	540,79	213,80
	CPH13	50,25	107,15	525,50	523,83	322,50	533,79	209,50
	CPH15	50,27	109,75	542,00	539,48	331,30	546,09	209,20
40	CPH29	50,32	110,84	529,74	522,79	325,60	541,35	216,10
	CPH1	50,13	115,09	572,60	568,88	350,80	576,68	227,00

### 5.1.3. Índices calculados

Neste tópico foram listados parâmetros físicos de alta relevância na caracterização do material trabalhado. A partir dos valores obtidos no subitem 5.1.2 e formulações que seguem as sugestões da ISRM, obtiveram-se os índices calculados, listados nas tabelas a seguir.

Como no item anterior, os resultados foram separados por grupos de tensão confinante e em ordem decrescente de porosidade. Contudo, ficaria pouco legível a ilustração de todos os índices em uma única tabela. Portanto, os índices calculados foram separados em três tabelas – 19, 20 e 21, para corpos de prova verticais, e 22, 23 e 24, para corpos de prova horizontais.

Tabela 19 Índices calculados dos corpos de prova verticais.

$\sigma_c$ (MPa)	CP	$V_{Total}$	H / D	$Vv_E - Mw_E$	$Vv_I - Mw_I$	$Vv_w - Mw$	$M_{Sat}$	e
		(cm <sup>3</sup> )	-	(g) - (ml)	(g) - (ml)	(g) - (ml)	(g)	-
	VERTICAL							
0	CPV71	224,50	2,3	7,40	9,95	17,35	547,86	0,14
	CPV24	212,08	2,1	4,28	11,35	15,63	524,31	0,12
	CPV59	241,42	2,4	6,12	7,79	13,91	611,72	0,09
	CPV67	232,15	2,3	7,45	6,36	13,81	594,70	0,07
	CPV61	231,08	2,3	3,58	6,77	10,35	588,76	0,07
10	CPV54	212,50	2,1	8,00	9,89	17,89	523,81	0,13
	CPV66	229,70	2,3	6,80	7,29	14,09	580,48	0,09
	CPV5	218,59	2,2	6,99	7,18	14,17	557,59	0,08
	CPV7	216,36	2,2	2,56	7,01	9,57	551,84	0,07
20	CPV14	213,42	2,1	3,02	10,05	13,07	522,89	0,13
	CPV63	224,12	2,3	7,92	6,44	14,36	565,12	0,09
	CPV21	212,70	2,1	4,00	7,33	11,33	538,24	0,09
	CPV13	216,51	2,2	5,71	5,30	11,01	557,01	0,07
30	CPV6	212,28	2,1	7,48	9,21	16,69	520,66	0,13
	CPV30	213,59	2,1	7,19	8,06	15,25	538,63	0,10
	CPV11	211,02	2,1	1,92	7,60	9,52	536,24	0,08
	CPV27	215,16	2,2	3,16	7,60	10,76	552,18	0,07
40	CPV37	215,60	2,2	4,10	6,72	10,82	551,06	0,07
	CPV29	213,57	2,1	3,47	7,93	11,40	548,01	0,07

Tabela 20 Índices calculados dos corpos de prova verticais.

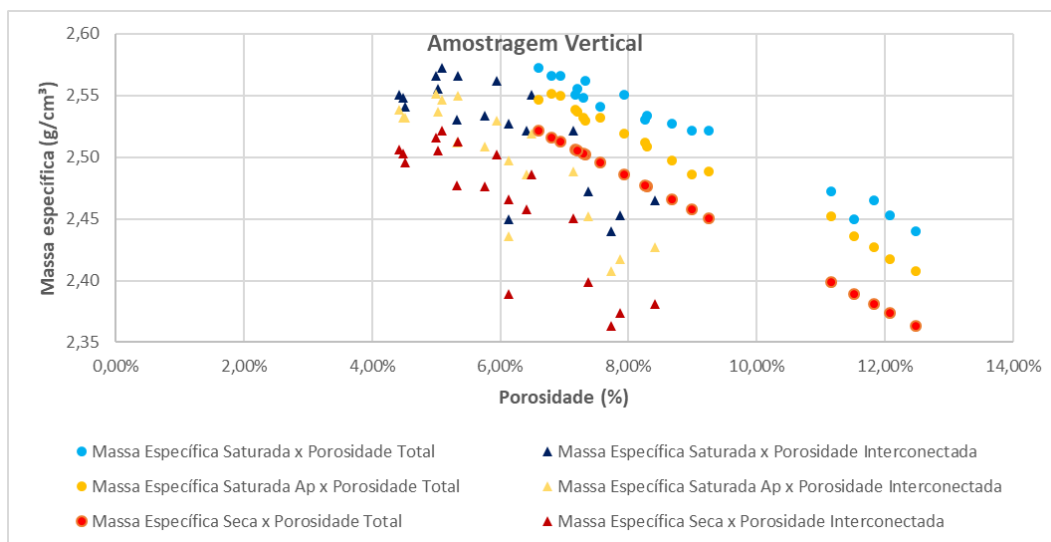
$\sigma_c$ (MPa)	CP	$\eta_{w_i}$	$\eta_{w_E}$	$R\eta_w$	$\eta_w$	$V_s$	$V_v$	$\eta_{Total}$	$\Delta\eta$	$\eta_{Iso}$
		(%)	(%)	-	(%)	(cm³)	(cm³)	(%)	(%)	(%)
VERTICAL										
0	CPV71	4,43%	3,29%	1,35	7,73%	196,49	28,01	12,48%	4,75%	38,06%
	CPV24	5,35%	2,02%	2,65	7,37%	188,40	23,68	11,17%	3,80%	33,99%
	CPV59	3,23%	2,53%	1,27	5,76%	221,41	20,00	8,29%	2,53%	30,49%
	CPV67	2,74%	3,21%	0,85	5,95%	215,14	17,01	7,33%	1,38%	18,79%
	CPV61	2,93%	1,55%	1,89	4,48%	214,23	16,85	7,29%	2,81%	38,59%
10	CPV54	4,65%	3,77%	1,24	8,42%	187,38	25,13	11,82%	3,40%	28,78%
	CPV66	3,17%	2,96%	1,07	6,13%	209,77	19,92	8,67%	2,54%	29,29%
	CPV5	3,28%	3,20%	1,03	6,48%	201,27	17,32	7,92%	1,44%	18,20%
	CPV7	3,24%	1,18%	2,74	4,42%	200,84	15,52	7,17%	2,75%	38,34%
20	CPV14	4,71%	1,41%	3,33	6,12%	188,82	24,60	11,52%	5,40%	46,87%
	CPV63	2,87%	3,53%	0,81	6,41%	203,99	20,13	8,98%	2,58%	28,68%
	CPV21	3,45%	1,88%	1,83	5,33%	195,15	17,55	8,25%	2,92%	35,44%
	CPV13	2,45%	2,64%	0,93	5,09%	202,22	14,29	6,60%	1,51%	22,94%
30	CPV6	4,34%	3,52%	1,23	7,86%	186,66	25,62	12,07%	4,21%	34,87%
	CPV30	3,77%	3,37%	1,12	7,14%	193,84	19,74	9,24%	2,10%	22,77%
	CPV11	3,60%	0,91%	3,96	4,51%	195,08	15,94	7,55%	3,04%	40,27%
	CPV27	3,53%	1,47%	2,40	5,00%	200,53	14,64	6,80%	1,80%	26,47%
40	CPV37	3,12%	1,90%	1,64	5,02%	200,09	15,52	7,20%	2,18%	30,24%
	CPV29	3,71%	1,63%	2,28	5,34%	198,74	14,83	6,94%	1,60%	23,10%

Os índices físicos dos corpos de prova de amostragem vertical, como porosidade total e massa específica, ficaram um pouco acima dos valores encontrados por Luza (2014) e mais próximos aos propostos por Kiewiet (2015).

Tabela 21 Índices calculados dos corpos de prova verticais.

$\sigma_c$ (MPa)	CP	$\rho_s$	$\rho_{Sat}Ap$	$\rho_{Sat}$	$\gamma_s$	$\gamma_{Sat}Ap$	$\gamma_{Sat}$	$\gamma_{Sub}$
		(g/cm³)	(g/cm³)	(g/cm³)	(kN/m³)	(kN/m³)	(kN/m³)	(kN/m³)
	VERTICAL							
0	CPV71	2,36	2,41	2,44	23,16	23,59	23,92	14,35
	CPV24	2,40	2,45	2,47	23,51	24,03	24,23	14,75
	CPV59	2,48	2,51	2,53	24,27	24,58	24,83	15,27
	CPV67	2,50	2,53	2,56	24,52	24,79	25,10	15,46
	CPV61	2,50	2,53	2,55	24,53	24,82	24,97	15,45
10	CPV54	2,38	2,43	2,46	23,33	23,79	24,16	14,59
	CPV66	2,47	2,50	2,53	24,16	24,48	24,77	15,21
	CPV5	2,49	2,52	2,55	24,36	24,69	25,00	15,33
	CPV7	2,51	2,54	2,55	24,56	24,88	25,00	15,47
20	CPV14	2,39	2,44	2,45	23,41	23,87	24,01	14,52
	CPV63	2,46	2,49	2,52	24,08	24,36	24,71	15,15
	CPV21	2,48	2,51	2,53	24,28	24,61	24,80	15,23
	CPV13	2,52	2,55	2,57	24,71	24,95	25,21	15,58
30	CPV6	2,37	2,42	2,45	23,27	23,69	24,04	14,47
	CPV30	2,45	2,49	2,52	24,01	24,38	24,71	15,07
	CPV11	2,50	2,53	2,54	24,46	24,81	24,90	15,54
	CPV27	2,52	2,55	2,57	24,66	25,01	25,15	15,61
40	CPV37	2,51	2,54	2,56	24,56	24,86	25,05	15,46
	CPV29	2,51	2,55	2,57	24,62	24,99	25,15	15,62

Para amostragem vertical observou-se um padrão quase linear entre massa específica seca, saturada aparente e saturada *versus* a porosidade total, enquanto que as referidas massas específicas *versus* porosidade interconectada mostraram um padrão relativamente disperso, como visto na Figura 27.



**Figura 27** Massa específica x Porosidade – Amostragem vertical.

**Tabela 22** Índices calculados dos corpos de prova horizontais.

$\sigma_c$ (MPa)	CP	$V_{Total}$	H / D	$Vv_E - Mw_E$	$Vv_I - Mw_I$	$Vv_w - Mw$	$M_{Sat}$	e
		(cm³)	-	(g) - (ml)	(g) - (ml)	(g) - (ml)	(g)	-
	HORIZONTAL							
0	CPH18	219,49	2,2	5,59	8,84	14,43	538,71	0,13
	CPH11	220,00	2,2	5,20	11,11	16,31	551,52	0,11
	CPH14	221,78	2,2	6,38	9,22	15,60	564,88	0,09
10	CPH10	214,88	2,2	4,88	10,40	15,28	534,78	0,11
	CPH12	217,78	2,2	7,18	9,02	16,20	544,63	0,11
	CPH25	216,13	2,2	3,73	8,71	12,44	541,61	0,10
	CPH8	218,20	2,2	6,30	6,78	13,08	562,23	0,07
20	CPH17	220,29	2,2	6,59	7,80	14,39	547,10	0,11
	CPH20	220,22	2,2	6,42	7,82	14,24	548,63	0,11
	CPH7	213,43	2,1	0,83	7,71	8,54	536,72	0,09
30	CPH21	214,93	2,2	8,63	9,08	17,71	533,80	0,12
	CPH22	218,24	2,2	4,44	11,57	16,01	545,23	0,11
	CPH13	212,50	2,1	3,00	9,96	12,96	536,79	0,09
	CPH15	217,83	2,2	8,63	6,61	15,24	554,72	0,09
40	CPH29	220,43	2,2	4,33	18,56	22,89	545,68	0,13
	CPH1	227,16	2,3	0,16	7,80	7,96	576,84	0,07

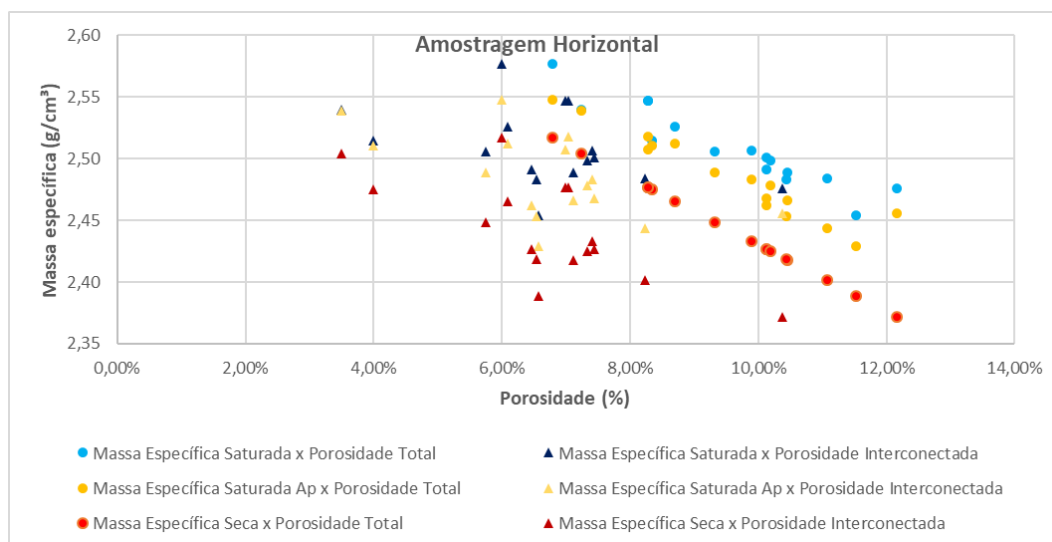
**Tabela 23** Índices calculados dos corpos de prova horizontais.

$\sigma_c$ (MPa)	CP	$\eta_{w_i}$	$\eta_{w_E}$	$R\eta_w$	$\eta_w$	$V_s$	$V_v$	$\eta_{Total}$	$\Delta\eta$	$\eta_{iso}$
		(%)	(%)	-	(%)	(cm³)	(cm³)	(%)	(%)	(%)
	HORIZONTAL									
0	CPH18	4,03%	2,55%	1,58	6,57%	194,18	25,31	11,53%	4,96%	42,99%
	CPH11	5,05%	2,36%	2,14	7,41%	198,23	21,77	9,90%	2,48%	25,10%
	CPH14	4,16%	2,88%	1,44	7,04%	203,44	18,35	8,27%	1,24%	14,95%
10	CPH10	4,84%	2,27%	2,13	7,11%	192,41	22,48	10,46%	3,35%	32,00%
	CPH12	4,14%	3,30%	1,26	7,44%	195,71	22,07	10,13%	2,69%	26,58%
	CPH25	4,03%	1,72%	2,34	5,75%	195,99	20,14	9,32%	3,56%	38,24%
	CPH8	3,11%	2,89%	1,08	5,99%	203,39	14,81	6,79%	0,79%	11,69%
20	CPH17	3,54%	2,99%	1,18	6,53%	197,30	22,99	10,44%	3,90%	37,40%
	CPH20	3,55%	2,91%	1,22	6,47%	197,92	22,29	10,12%	3,66%	36,14%
	CPH7	3,61%	0,39%	9,33	4,00%	195,62	17,80	8,34%	4,34%	52,05%
30	CPH21	4,22%	4,02%	1,05	8,24%	191,14	23,79	11,07%	2,83%	25,54%
	CPH22	5,30%	2,03%	2,61	7,33%	196,01	22,23	10,19%	2,85%	27,99%
	CPH13	4,69%	1,41%	3,32	6,10%	194,01	18,49	8,70%	2,60%	29,91%
	CPH15	3,03%	3,96%	0,77	7,00%	199,81	18,02	8,27%	1,28%	15,44%
40	CPH29	8,42%	1,96%	4,29	10,38%	193,63	26,80	12,16%	1,78%	14,60%
	CPH1	3,43%	0,07%	50,22	3,50%	210,70	16,46	7,25%	3,74%	51,67%

**Tabela 24** Índices calculados dos corpos de prova horizontais.

$\sigma_c$ (MPa)	CP	$\rho_s$	$\rho_{Sat}Ap$	$\rho_{Sat}$	$\gamma_s$	$\gamma_{Sat}Ap$	$\gamma_{Sat}$	$\gamma_{Sub}$
		(g/cm³)	(g/cm³)	(g/cm³)	(kN/m³)	(kN/m³)	(kN/m³)	(kN/m³)
	HORIZONTAL							
0	CPH18	2,39	2,43	2,45	23,41	23,80	24,05	14,43
	CPH11	2,43	2,48	2,51	23,84	24,34	24,57	14,94
	CPH14	2,48	2,52	2,55	24,27	24,68	24,96	15,32
10	CPH10	2,42	2,47	2,49	23,69	24,17	24,39	14,83
	CPH12	2,43	2,47	2,50	23,78	24,18	24,51	14,94
	CPH25	2,45	2,49	2,51	23,99	24,39	24,56	15,13
	CPH8	2,52	2,55	2,58	24,66	24,97	25,25	15,60
20	CPH17	2,42	2,45	2,48	23,70	24,05	24,34	14,70
	CPH20	2,43	2,46	2,49	23,78	24,13	24,41	14,70
	CPH7	2,47	2,51	2,51	24,25	24,61	24,64	15,22
30	CPH21	2,40	2,44	2,48	23,53	23,95	24,34	14,54
	CPH22	2,42	2,48	2,50	23,76	24,28	24,48	15,04
	CPH13	2,47	2,51	2,53	24,16	24,62	24,76	15,18
	CPH15	2,48	2,51	2,55	24,27	24,57	24,96	15,21
40	CPH29	2,37	2,46	2,48	23,24	24,07	24,26	14,77
	CPH1	2,50	2,54	2,54	24,54	24,88	24,89	15,44

Observou-se um padrão relativamente linear entre massa específica seca, saturada aparente e saturada *versus* porosidade total para amostragem horizontal, ao passo que as referidas massas específicas *versus* porosidade interconectada mostraram um padrão bastante disperso, como visto na Figura 28.



**Figura 28** Massa específica x Porosidade – Amostragem horizontal.

A análise completa, com índices físicos medidos e calculados de todos os corpos de prova, incluindo espécimes não ensaiados mecanicamente, tanto para amostragem vertical, quanto horizontal, pode ser vista em Apêndice I.

## 5.2. Caracterização petrográfica

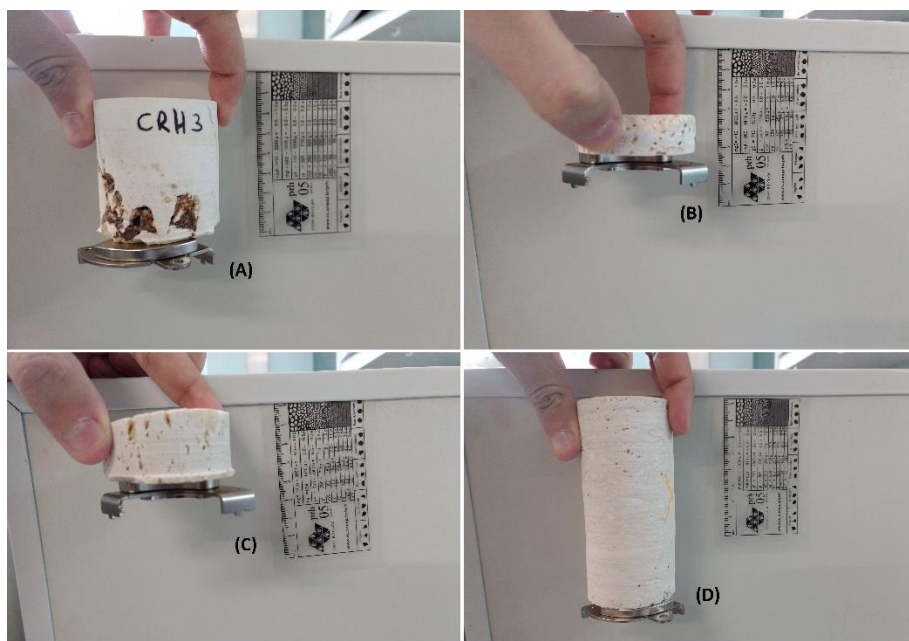
### 5.2.1. Análise macroscópica

Quanto ao material branco a bege, tanto de brilho vítreo, quanto terroso, confirmou-se tratar essencialmente de calcita. As referidas cores, brilhos e o fato de ser riscável ao canivete suíço são compatíveis com este mineral, embora a ratificação tenha sido a forte reação ao ácido clorídrico 10%. Na Figura 17 estes materiais foram mostrados em (A), calcita com brilho terroso e onde não se observou forma dos grãos. E em (B), onde observou-se um brilho vítreo e através da lupa de 20x foi possível observar os cristais de calcita. Este material pode ser classificado como drusa carbonática cuja formação é similar à de um geodo, isto é, a região das drusas foi cristalizada sob maiores temperaturas.

O material acinzentado (Figura 17 C) não reagiu ao ácido nem mesmo quando levemente aquecido, o que indica ausência de dolomita, podendo ser este

material cinza uma fraca dolomitização, isto é, alguns cátions de cálcio substituídos pelo de magnésio, ou algum tipo material *ex situ* trazido pelos fluidos termais que percolaram a rocha.

O material escuro (Figura 17 D) foi testado com o imã de neodímio, onde foi observada uma forte atração magnética. Ou seja, este material foi classificado como óxido de ferro sob a forma mineralógica magnetita, o único mineral com forte atração magnética. Este foi observado em quase todos os corpos de prova e rejeito do andar A2, isto é, aquele mais poroso e que tenderia a uma maior permeabilidade. Mesmo quando não observável superficialmente nenhum ponto escuro, o teste com o imã de neodímio na base dos corpos de prova e rejeito do andar A2 mostrou uma forte atração magnética, como visto na Figura 29. Em (A) observou-se uma grande quantidade de material escuro (magnetita), o que não ocorreu em (B) e (C), em que os corpos de rejeito são pequenos e não foi observada nenhuma magnetita. Em (D) também foi observada uma forte atração em um corpo de rejeito poroso, sem nenhum material escuro visível na superfície e ainda com preenchimento dos poros.



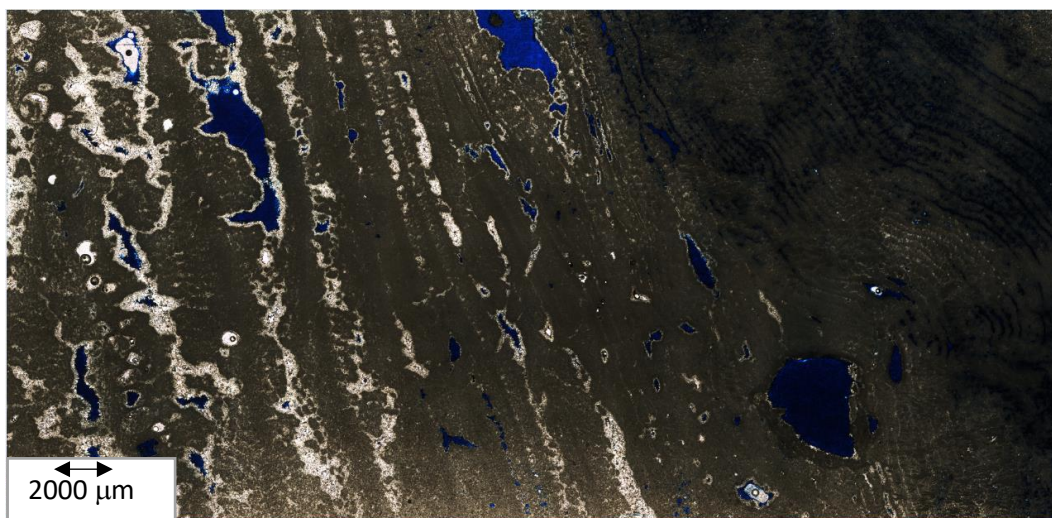
**Figura 29** Atração magnética nos corpos de rejeito regular.

Já o material avermelhado, encontrado somente em poros e descontinuidades junto à magnetita, não pôde ser classificado apenas com a observação macroscópica. Somente observou-se tratar de algum material percolado através dos vazios da rocha. As análises químicas foram as responsáveis pela classificação. Mesmo assim, pontos escuros rodeados por regiões avermelhadas costumam ser um indicador de hidrotermalismo.

### 5.2.2. Análise microscópica

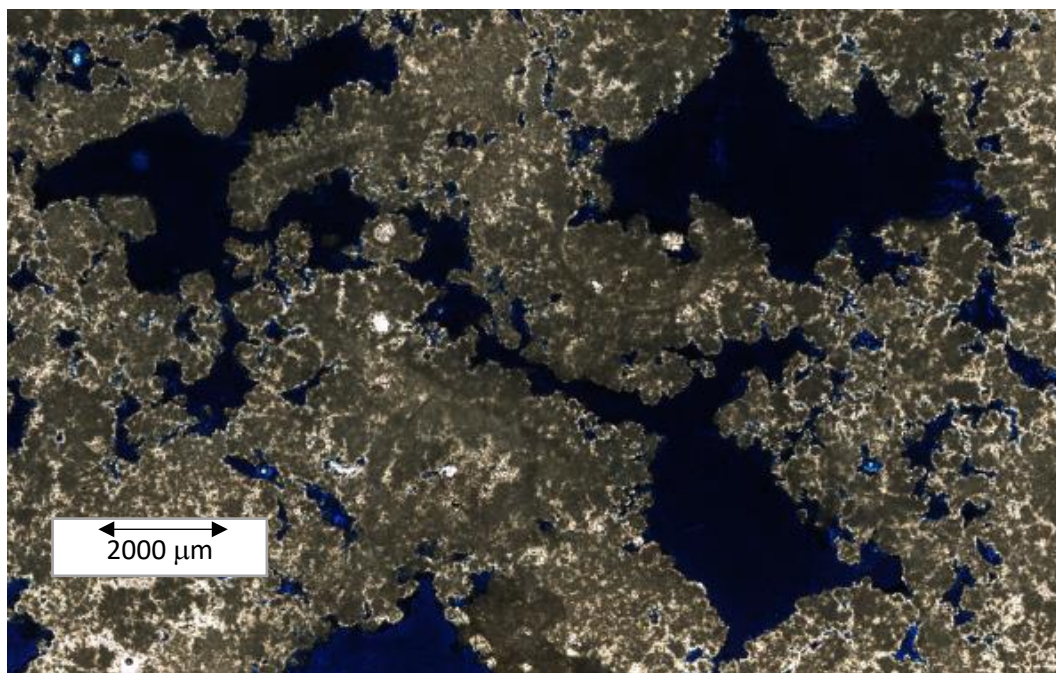
A mineralogia principal do travertino é conhecida, sendo constituída por mais de 99% de calcita. No entanto, a microscopia auxiliou na observação da forma, distribuição e seleção na ocorrência deste mineral. Em todas as lâminas foi observado que a calcita ocorre essencialmente formada por uma matriz de grãos microcristalinos, também chamada micrita ou calcita micrítica. Estes grãos não tiveram muito tempo e/ou condições de temperatura e pressão favoráveis ao desenvolvimento dos cristais e, por esta razão, ocorrem em tamanhos quase imperceptíveis, em que não se observa as bordas destes mesmo com o uso do microscópio ótico. A calcita microcristalina observada nas lâminas corresponde ao material branco à bege, de brilho terroso, observado na macroscopia. A outra forma de ocorrência da calcita foi sob a forma de esparita (ou calcita espática), que normalmente ocorre como cimento carbonático, podendo até mesmo ser parte da matriz micrítica retrabalhada. A calcita espática foi observada nas lâminas sob formas de grãos esbranquiçados, em sua maioria, e com os contornos dos minerais bem observáveis. A calcita espática corresponde ao material branco à bege, de brilho vítreo, observado na análise macroscópica.

O comportamento geral observado em todas as lâminas pode ser visto na lâmina 12 (Figura 30), já que esta é a única a englobar os dois andares de porosidade do bloco (A1 e A2). No andar A1 observou-se o predomínio absoluto de calcita micrítica com poros tendendo a formas mais arredondadas e pouco ou nenhum preenchimento de esparita. Praticamente não observada, a calcita espática presente foi encontrada apenas em microporos de canal. Já no andar A2 foi vista grande quantidade de calcita microcristalina e poros mais alongados, sendo a maioria destes bordejados por grãos de calcita espática. Em geral, quanto maiores os poros observados, maiores e mais bem desenvolvidos eram os cristais de esparita.



**Figura 30** Lâmina delgada de travertino Romano nº 12 com orientação ortogonal ao acamamento.

O predomínio de micrita, com pouca ou nenhuma ocorrência de esparita, em geral, em poros de canal extremamente finos no andar A1, foi observado em todas as lâminas que abrangeram o mesmo. Apesar de praticamente não se observar bordas de calcita espática, também no andar A1 foram observados poros grandes, em maioria, arredondados a subarredondados. Estes ocorrem majoritariamente isolados. Na figura 31 pode ser visto um setor específico da lâmina 6 onde se observa poros maiores e praticamente nenhuma borda de calcita espática.

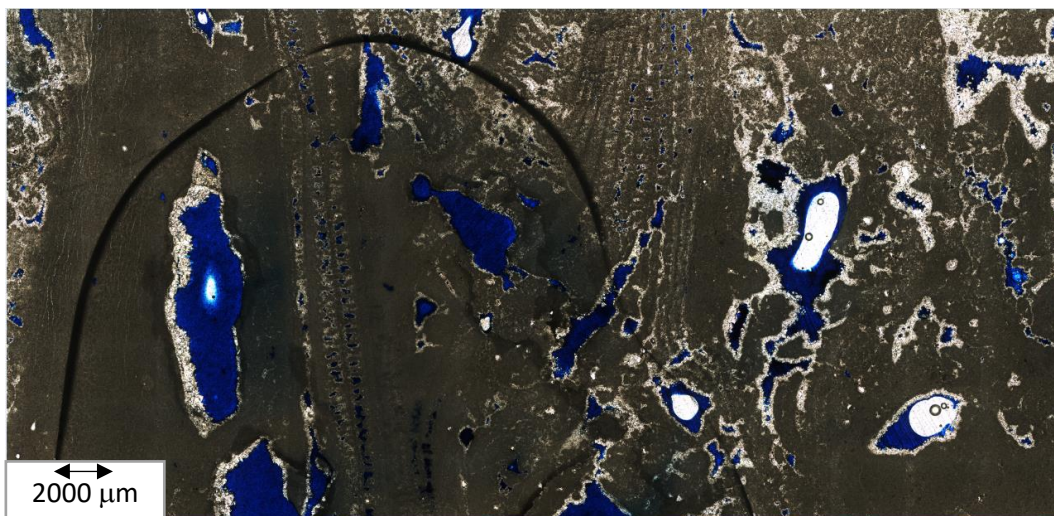


**Figura 31** Seção da lâmina 6 com poros grandes não preenchidos.

No andar A2 do bloco, a característica marcante observada também nas lâminas foi uma porosidade visivelmente maior do que em A1. Contudo, nas lâminas do andar A2, a maioria dos poros apresentou preenchimento parcial à total de calcita espática. Em geral, quanto maior o poro, maiores e mais bem formados os cristais de esparita. A observação macroscópica dos corpos de prova e inúmeros corpos de rejeito mostrou que no andar A2 os poros não somente eram maiores, como pareciam estar mais conectados. Esta observação foi reiterada na análise microscópica. Entretanto, também foi possível observar nas lâminas deste andar poros isolados, estes quase sempre sem borda ou preenchimento algum de esparita. Tal observação só reforçou a hipótese de percolação de fluidos termais, onde a esparita foi cristalizada somente nos poros em que o fluido pôde percolar. Cabe reiterar que, de uma forma geral no conjunto total de lâminas, os poros maiores e mais interconectados apresentaram formas mais alongadas. Já os poros isolados, formas mais subarredondadas.

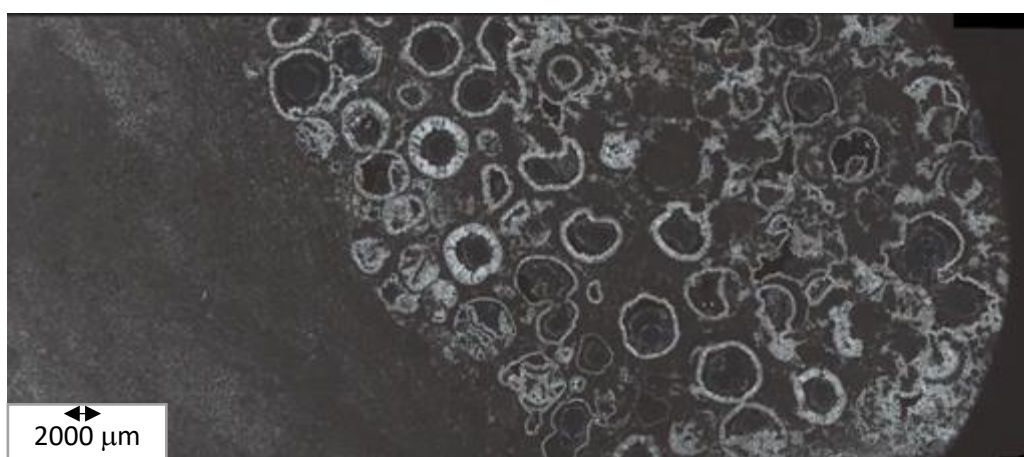
A Figura 32 ilustra o que foi exposto acima relacionado ao andar A2 do bloco de travertino Romano. Poros grandes e alongados, alinhados com o

acumulação e preenchidos parcial a totalmente por calcita espática. Observou-se também poros isolados sem nenhuma borda branca, isto é, sem esparita bordejando.



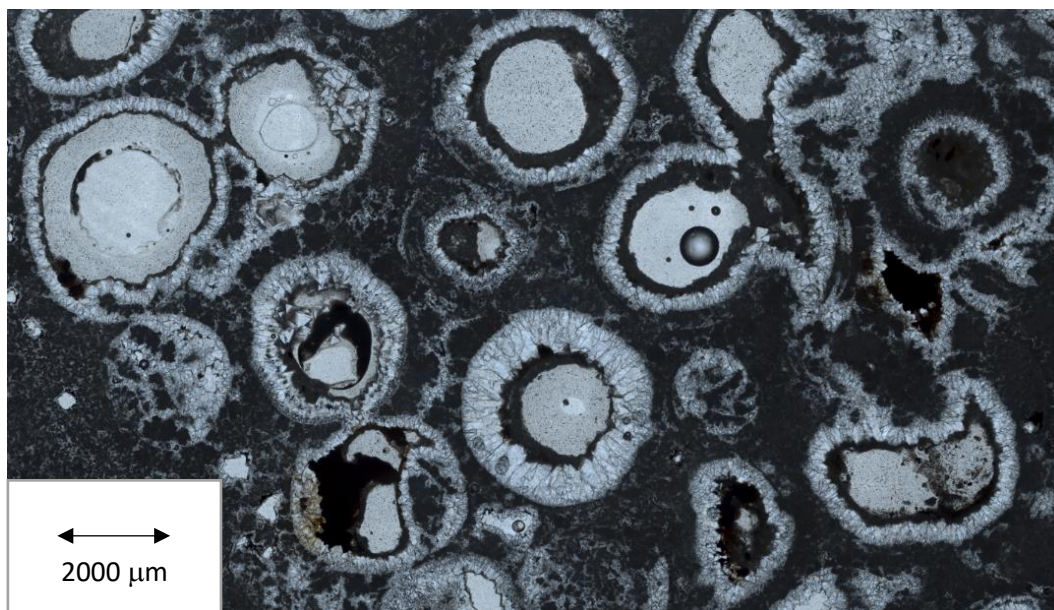
**Figura 32** Lâmina delgada de travertino Romano nº 4 com orientação ortogonal ao acamamento.

As áreas onde fluídos termais teriam percolado os poros deixaram não somente rastros de calcita espática, mas também moldes de preservação de bolhas de gás. Isto pode ser observado na lâmina 9 (Figura 33), com poros muito arredondados e preenchimento nas bordas de esparita com cristais muito bem desenvolvidos e crescendo de fora para dentro, o que indicaria que esta calcita espática foi depositada nos vazios após a formação da matriz microcristalina.



**Figura 33** Lâmina delgada de travertino Romano nº 9 com orientação paralela ao acamamento.

Contudo, observou-se nos poros maiores das lâminas 8 e 9 grãos relativamente grandes de um mineral escuro bordejado pelos grãos de esparita. Este foi identificado como magnetita, sendo inclusive atraído pelo imã de neodímio na lâmina 9, apesar da ínfima espessura do exemplar de rocha. A magnetita foi observada majoritariamente nos exemplares do andar A2, o mais poroso. Em geral, a magnetita quando presente ocorreu rodeada pelos grãos de calcita espática, o que indicaria a deposição do mineral magnético após a formação dos cristais de esparita, como pode ser visto na Figura 34.

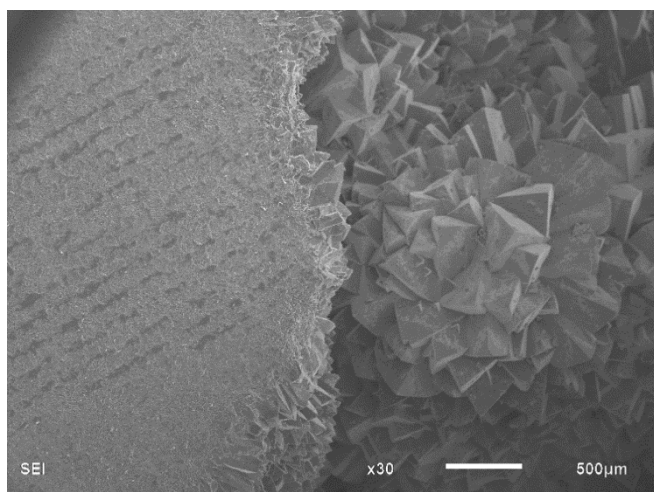


**Figura 34** Trecho com escala aumentada da lâmina delgada de travertino Romano nº 9 com orientação paralela ao acamamento.

A descrição completa de todas as doze lâminas, seguindo a mesma ordem da Tabela 9, é encontrada em Apêndice II.

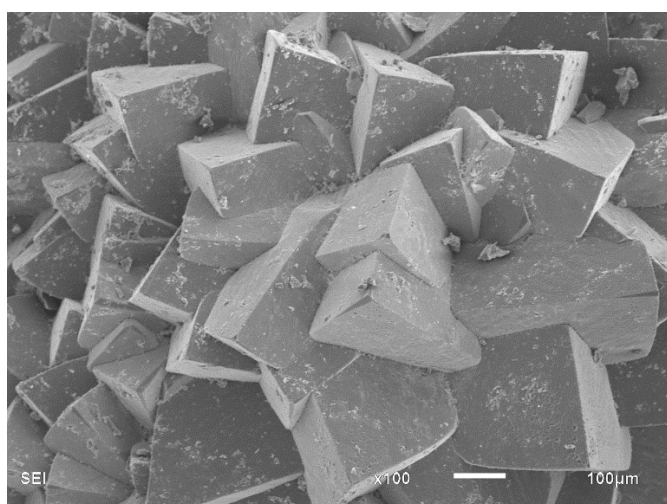
### 5.2.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O material branco à bege, com brilho terroso e vítreo foi observado em diversos pontos. O material de brilho vítreo, as drusas carbonáticas, correspondem a calcita espática observada nas lâminas delgadas. Neste material foi necessário pouco aumento na escala para observar a forma destes cristais. Ao passo que o material de brilho terroso, correspondente a calcita microcristalina, precisou de grandes aumentos na escala para ser possível observar os cristais de calcita. Esta diferença de escala foi observada no contato entre estes materiais, o qual é visto na Figura 35.



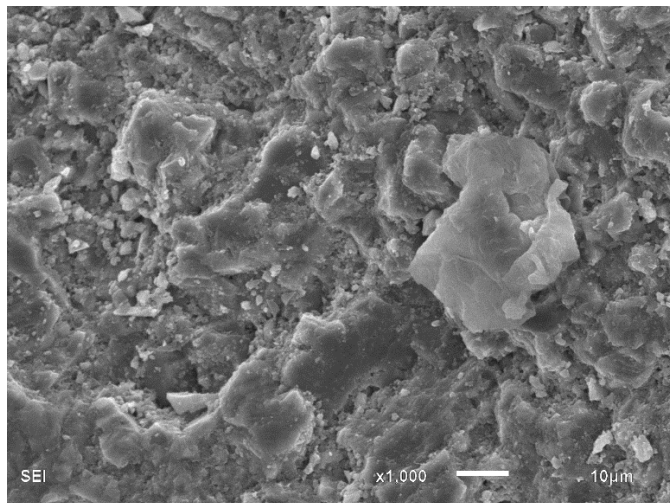
**Figura 35** Calcita microcristalina (esquerda) e espática (direita) com zoom de 30x.

As drusas carbonáticas ilustram perfeitamente as faces do cristal, porém foi possível observar microgrãos em contato com as faces destes cristais. Como já citado, a calcita espática teria sido formada a partir de fluidos termais percolando os vazios e as discontinuidades da rocha. Porém, este mesmo fluido, ou mais de um em eventos diferentes, poderia ter carregado constituintes *ex situ* ao ambiente deposicional carbonático. Um deles já foi identificado na macroscopia, o óxido de ferro (magnetita). Na figura 36 observa-se essa condição com possíveis contaminantes de óxido de ferro e/ou outra composição, detectada apenas nas análises químicas.



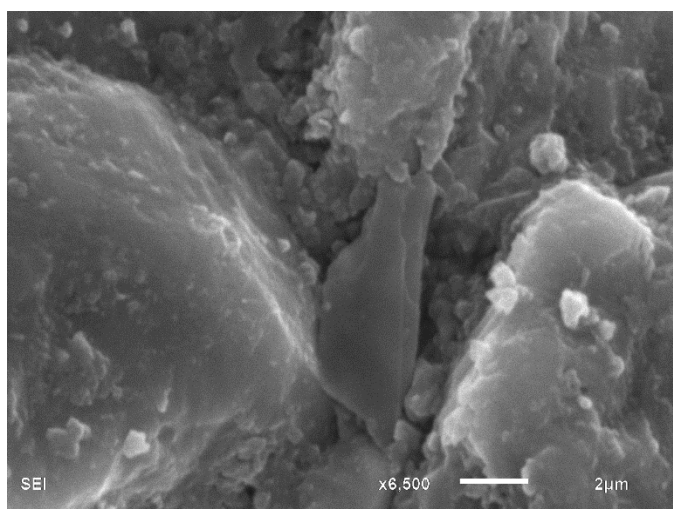
**Figura 36** Calcita espática com zoom de 100x e grãos de contaminantes.

As bordas dos cristais da calcita microcristalina, vista na Figura 37, foram observadas mesmo que parcialmente quando aumentado o *zoom* em mil vezes. Nela foi possível observar os cristais de micrita e, mesmo que parcialmente, suas bordas.



**Figura 37** Calcita microcristalina com zoom de 1000x.

Já na Figura 38 foi possível observar, além dos cristais de micrita, microgrãos esbranquiçados de material *ex situ* sobre e entre os grãos de calcita microcristalina. Como referido acima, uma das possibilidades de composição seria o óxido de ferro (magnetita), sendo a avaliação de outras composições possíveis apenas nas análises químicas, em especial na análise química pontual por energia dispersiva, o EDS, feita no próprio MEV.



**Figura 38** Calcita microcristalina com zoom de 6500x.

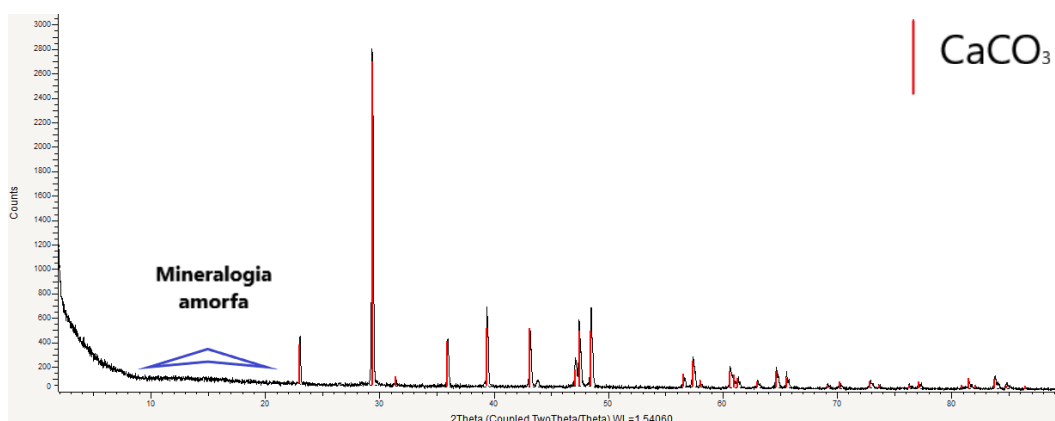
### 5.3. Caracterização química

#### 5.3.1. Difratometria de raios-x

Todos os gráficos foram interpretados utilizando o software Diffrac.Eva, versão 3.2, que dispõe de uma ampla base de dados para diversas mineralogias. Os resultados de todas as seis amostras praticamente não diferiram. Isto demonstrou que o predomínio mineralógico absoluto foi de calcita. Se houvesse aragonita, mesmo tendo fórmula química exatamente igual, esta análise seria capaz de distinguir.

Quaisquer outras mineralogias ou materiais *ex situ* com baixíssima porcentagem de ocorrência seriam melhor detectados através de análises pontuais. O único método que avalia composição química em áreas pontuais microscópicas utilizado neste trabalho foi o método por energia dispersiva (EDS).

Na figura 39 observa-se o gráfico de comportamento da calcita, o qual foi praticamente o mesmo para todos os seis exemplares testados.



**Figura 39** Gráfico de difração de raios-x do comportamento da calcita.

O trecho inicial do gráfico com diversos micro picos agrupados indica minerais amorfos, porém não há como identificar a composição. Possivelmente estaria relacionado ao material *ex situ*, que teria sido percolado pelos poros, e que foi observado nas faces dos cristais de calcita nas imagens do MEV. Já os picos de calcita, agudos e simétricos, indicam que o material foi bem cristalizado.

#### 5.3.2. Espectrometria de raios-x

A análise do material branco moído detectou a maior parte absoluta de cálcio (Ca), atribuído à calcita. Ressaltando que, nesta análise, carbono e oxigênio

não foram mensurados, apenas balanceados. Os percentuais de outros componentes, que não calcita, foram apenas residuais, portanto nenhum método que utilize amostra moída tende a identificar diferença na composição. Isto ficou evidente nas análises de difratometria de raios-x, que mesmo buscando uma separação maior dos materiais, praticamente não diferiu o resultado. Ainda assim, este método conseguiu identificar a presença de enxofre (S) e estrôncio (Sr), conforme Tabela 25.

**Tabela 25** Percentuais dos elementos químicos obtidos por espectrometria de raios-x.

Identificação da amostra	Elementos determinados (%)
Amostra testemunho	Ca = 99.422 S = 0.263 Sr = 0.315  O balanço de C e O não foi determinado. A amostra é essencialmente CaCO <sub>3</sub>
Executor do Ensaio (nome / CRQ)	Leila Fialho / 03415034 - 3ª região
Inspecionado por (nome / CRQ)	Ricardo Q. Aucelio

### 5.3.3. Determinação elementar de CHN

O material escuro, analisado na macroscopia apenas pelo teste do imã, indicou presença de magnetita, porém as manchas avermelhadas encontradas ao redor do material escuro mostravam que poderia haver mais do que apenas óxido de ferro, o que foi confirmado no resultado visto na Tabela 26.

**Tabela 26** Percentuais dos elementos químicos com a determinação elementar de CHN.

Analyte	Result		(Std. Dev.)	Proc.-Calc.	Line	Intensity
O	37.524	%	( 0.979)	Quant.-FP	O Ka	0.0754
Fe	27.859	%	( 0.040)	Quant.-FP	FeKa	137.1677
Ca	15.493	%	( 0.035)	Quant.-FP	CaKa	7.6996
Si	12.876	%	( 0.044)	Quant.-FP	SiKa	3.3925
Al	3.069	%	( 0.032)	Quant.-FP	AlKa	0.3985
K	1.631	%	( 0.014)	Quant.-FP	K Ka	0.6453
Na	0.732	%	( 0.057)	Quant.-FP	NaKa	0.0152
Tm	0.310	%	( 0.040)	Quant.-FP	TmLa	0.5773
Mn	0.274	%	( 0.006)	Quant.-FP	MnKa	1.1007
S	0.137	%	( 0.004)	Quant.-FP	S Ka	0.0991
Cr	0.074	%	( 0.004)	Quant.-FP	CrKa	0.2778
Sr	0.023	%	( 0.001)	Quant.-FP	SrKa	0.4531

A tabela acima ilustra os resultados obtidos. O primeiro componente, o oxigênio, não foi mensurado, mas sim balanceado para os outros constituintes

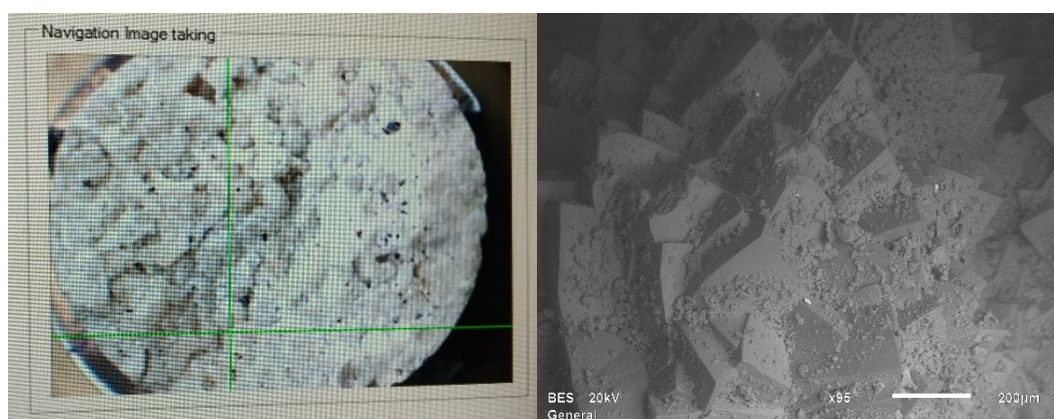
detectados. Foram detectados quantidades significativas de ferro (27,86%), cálcio (15,49%), silício (12,88%), alumínio (3,07%) e potássio (1,63%). Seguidos por decimais percentuais de sódio (0,73%), túlio (0,31%), manganês (0,27%) e enxofre (0,14%). E por último, centésimos residuais de percentagem de cromo (0,07%) e estrôncio (0,02%).

#### 5.3.4. Espectroscopia por energia dispersiva (EDS)

Além de apenas imagens feitas no MEV, foram analisados pontos e pequenas áreas da rocha a fim de esclarecer possíveis dúvidas quanto a composição química presente e possíveis mineralogias associadas. É sabido que o material é quase completamente formado por carbonato de cálcio. Porém, também foram visualizadas na análise macroscópica manchas acinzentadas, material escuro com forte atração magnética (magnetita) e, em alguns pontos, manchas avermelhadas ao redor de pontos escuros.

Analisou-se primeiramente a área branca, que já se sabia tratar-se de calcita, porém em exemplar com significativa porosidade, tons de branco variados, pontos escuros e manchas avermelhadas ao redor destes. Se se acredita na hipótese de percolação, seria justamente em áreas porosas e com variações de cores e tons que fluidos teriam percolado.

É o que se observa no exemplar da Figura 40. Em uma sessão de corte, de um corpo de rejeito poroso, analisou-se um ponto em que se observou a olho nu pequenos cristais de drusa e manchas brancas leitosas.

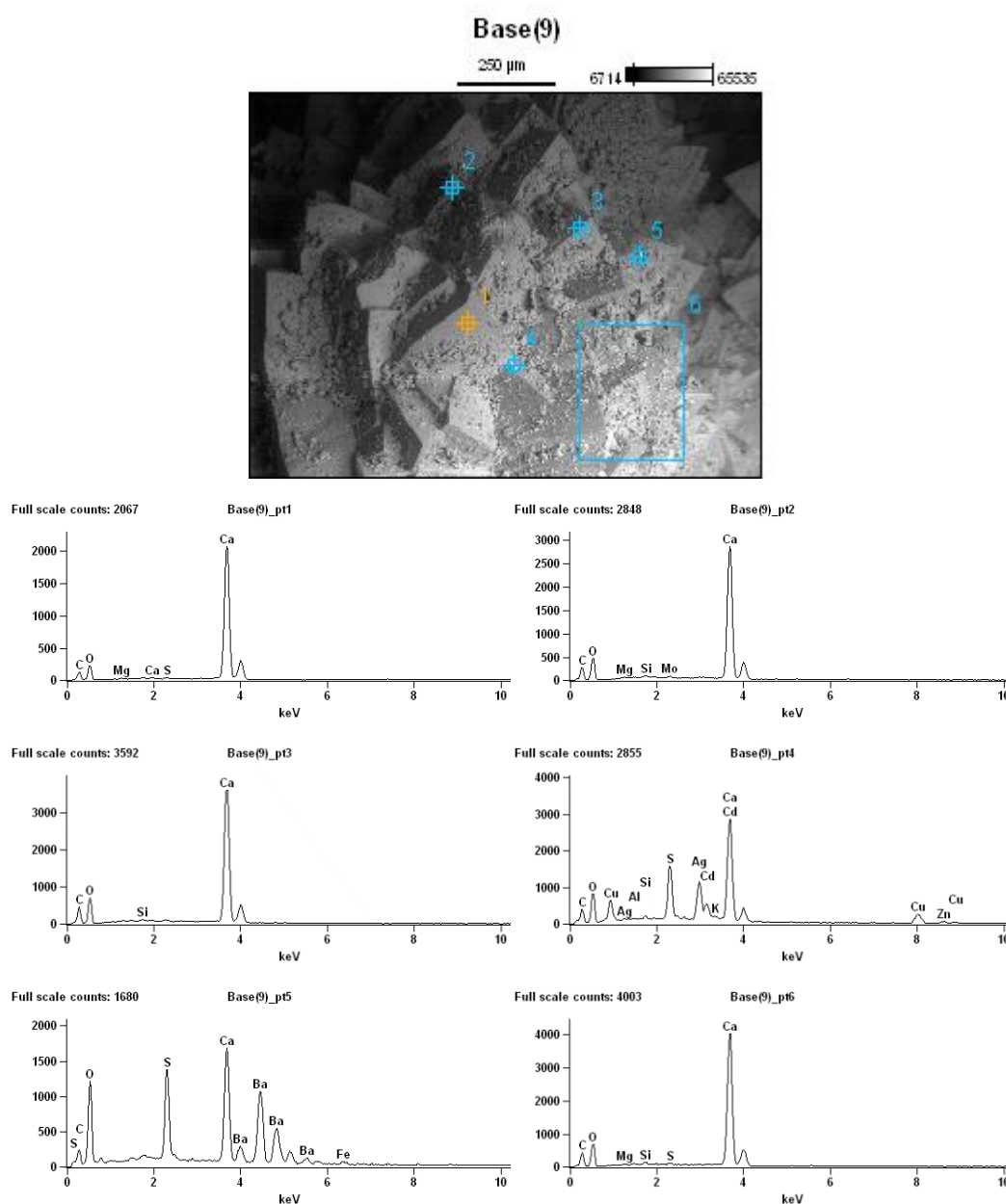


**Figura 40** Amostra analisada em poros de calcita (esq) e imagem do ponto no MEV (dir).

Foram analisados quimicamente com o EDS cinco pontos e uma pequena área, totalizando seis medições. A maioria dos pontos resultou em predomínio absoluto de cálcio. Esta maioria foi sobre cristais bem formados que se tratam da

calcita espática. Porém, os pontos 4 e 5 continham pequenos microgrãos espalhados sobre os cristais.

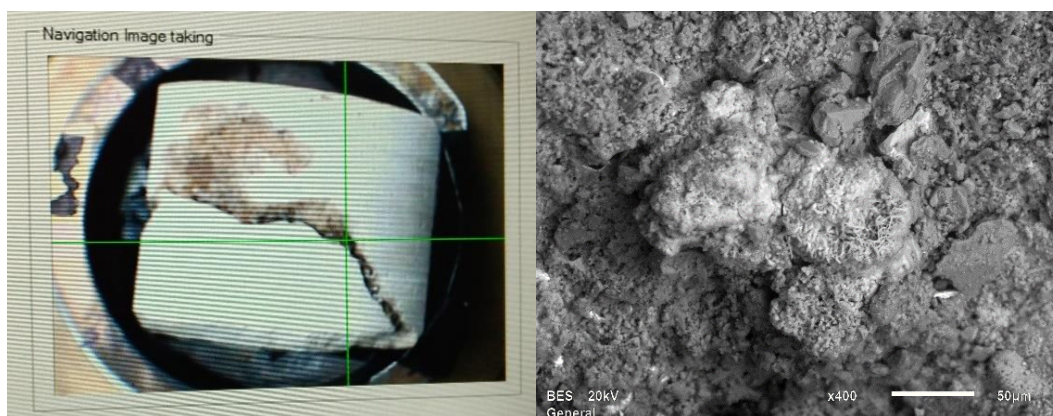
Observou-se grandes picos de bário (Ba), cádmio (Cd), enxofre (S), oxigênio (O) e prata (Ag). O primeiro elemento é um grande indicativo de hidrotermalismo em rochas sedimentares e o mesmo ocorre associado a moléculas de sulfato, que são compostas por enxofre e oxigênio. Estes tiveram picos altos e proporcionais ao do bário, portanto um indicativo claro da presença de sulfato de bário ( $\text{BaSO}_4$ ). Isto é observado na Figura 41.



**Figura 41** Pontos da amostra analisada e curvas químicas por EDS de cada um deles.

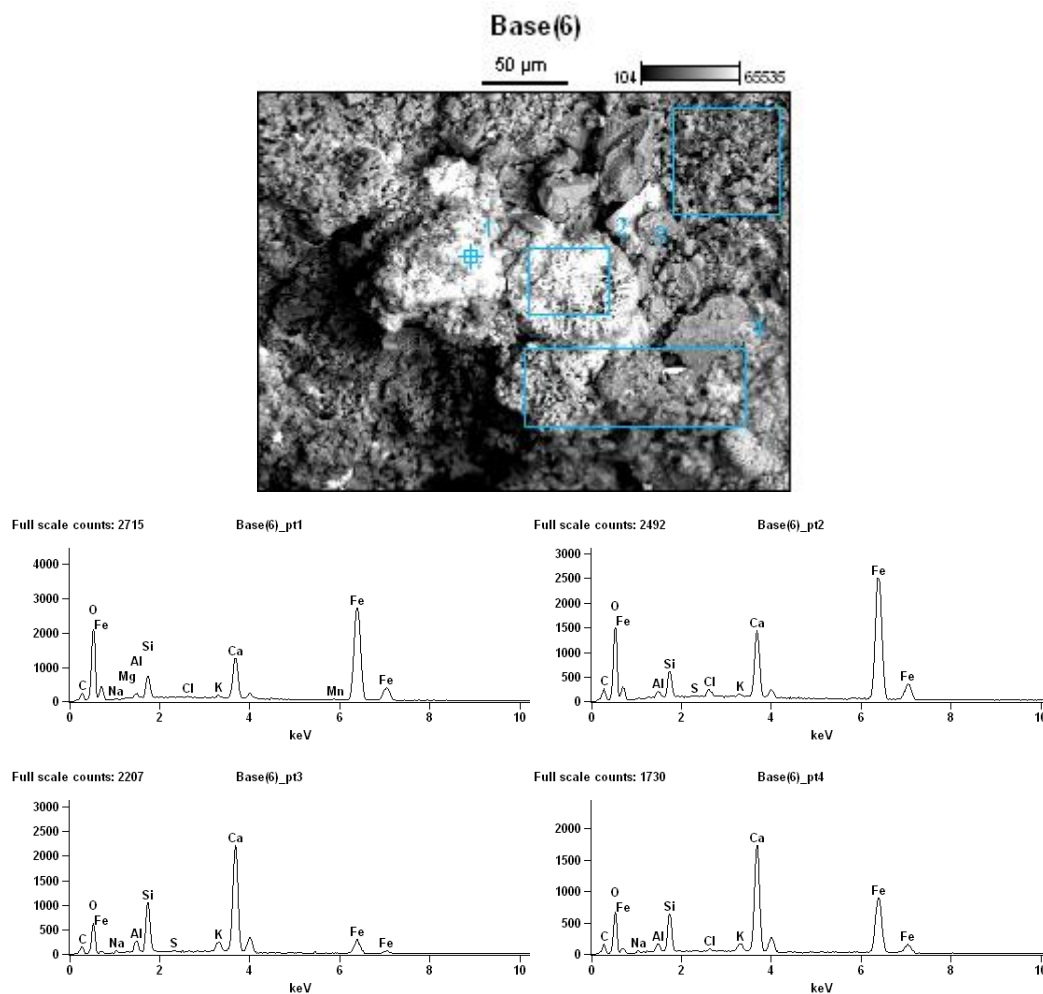
O cádmio ocorre apenas nesta análise, de muitas outras pontuais que foram feitas. Não há garantias quanto a ser nativo ou contaminação do equipamento de medição. Porém o mesmo ocorre em picos muito expressivos e proporcionais ao de enxofre. Existe um mineral com estes elementos, a greenockita ( $\text{CdS}$ ), quimicamente chamado de sulfeto de cádmio e que pode ocorrer naturalmente em ambientes carbonáticos. Este mineral encontra-se na natureza muitas vezes em comum ocorrência com a esfarelita, que é um sulfeto de zinco ( $\text{ZnS}$ ). Tanto o zinco ( $\text{Zn}$ ), como o enxofre ( $\text{S}$ ), apresentam pequenos picos de ocorrência. No entanto, estes se repetem em muitos outros pontos analisados, reiterando que neste caso, a esfarelita ou resíduos da mesma podem estar presentes no material. Quanto a esfarelita, sua ocorrência é muito comum em ambientes hidrotermais e vulcanogênicos, que seria exatamente o caso da área estudada.

Buscou-se analisar possíveis associações químicas com o material percolado já identificado. Portanto, foram analisados diversos pontos com manchas avermelhadas e escuras. No exemplar da figura 42 observa-se uma análise no ponto mais escuro de um pequeno veio de descontinuidade preenchida. Este material foi analisado macroscopicamente e não havia dúvida se tratar de magnetita. O objetivo em questão foi analisar a possível presença de outros elementos.



**Figura 42** Amostra analisada de material escuro (esq) e imagem do ponto no MEV (dir).

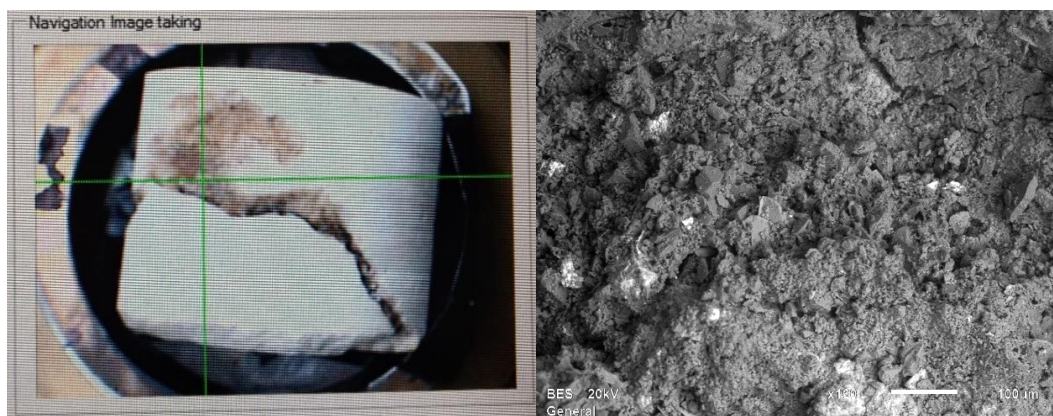
Foram analisados quatro pontos, sendo apenas o primeiro realmente uma análise pontual (Figura 43). Foi identificado predomínio de ferro nas áreas mais brancas da imagem no MEV, confirmando o que se sabia. O cálcio manteve picos expressivos mesmo com análise pontual na área branca identificada como ferro.



**Figura 43** Pontos da amostra analisada e curvas químicas por EDS de cada um deles.

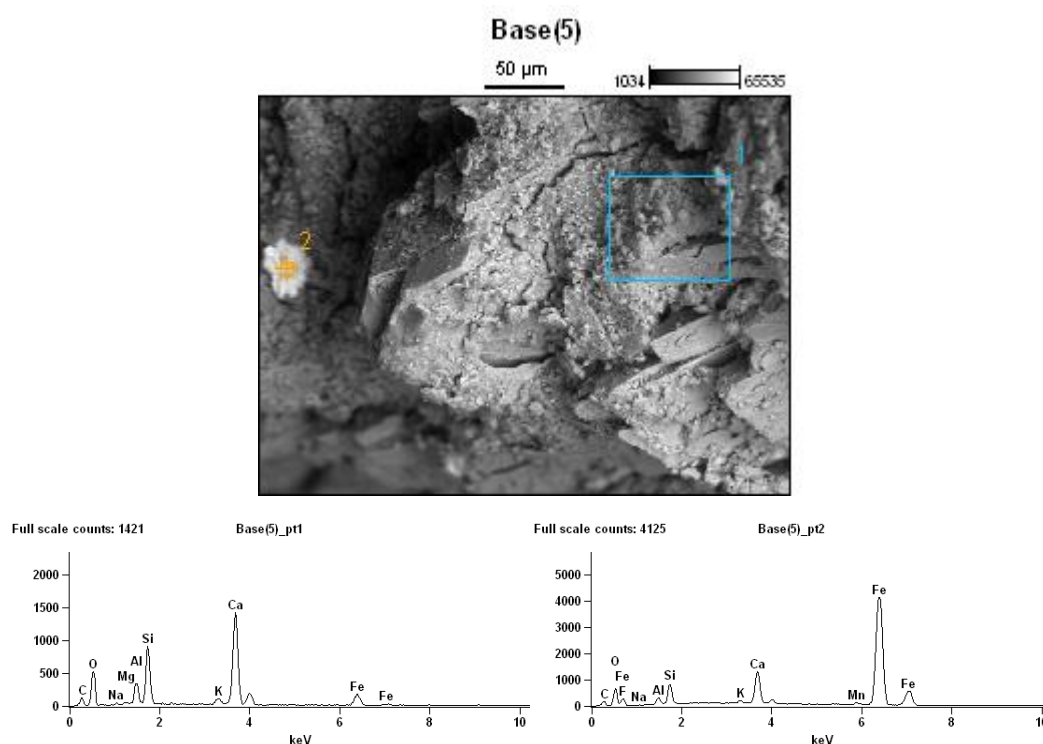
Apesar de diversos elementos identificados, o destaque vai para o alumínio (Al), silício (Si), potássio (K) e, mais raramente, o sódio (Na). Estes picos foram observados em muitas das amostras analisadas, em especial em áreas porosas, incluindo aquelas preenchidas, como é o caso desta análise. Isto indicaria o carregamento de material terrígeno. Possivelmente, o óxido de ferro (magnetita) e os elementos citados, que indicariam composição terrígena de aluminossilicatos, foram transportados por fluídos hidrotermais e depositados nos poros e descontinuidades da rocha. A origem destes, que não seriam naturais de ambiente carbonático, poderia ser explicada pela hipótese de hidrotermalismo, retratada no capítulo 2. Ou ainda pela grande rede de drenagens observada ao redor da área de influência, a qual poderia ter transportado grande quantidade de material terrígeno durante o Quaternário, período de muitas chuvas na história geológica, e idade de formação aproximada do travertino Romano.

No mesmo corpo de rejeito anterior foi analisado EDS de um ponto com tons mais cinzas. Na imagem do MEV foi possível notar a calcita microcristalina predominando, alguns minerais de esparita (forma cúbica) e pontos esbranquiçados que seriam contaminação de óxido de ferro, conforme Figura 44.



**Figura 44** Amostra analisada de material acinzentado (esq) e imagem no MEV (dir).

Os resultados da análise por EDS na região acinzentada podem ser vistos na Figura 45, para área 1 e ponto 2 e suas respectivas curvas químicas.



**Figura 45** Pontos da amostra analisada e curvas químicas por EDS de cada um deles.

O resultado para o grão branco, identificado na curva do ponto 2, foi o esperado. Predomínio de ferro com um pico significativo de cálcio e composição acessória.

Já na área 1 foi identificado, além de muito cálcio, novamente picos grandes de silício, alumínio, magnésio e, menos expressivo, sódio. A repetitiva presença

destes componentes reforça a hipótese de percolação de fluidos que teria depositado óxido de ferro e material aluminossilicático, o qual pode ser oriundo da alteração de minerais como o feldspato, mineral abundante na crosta, ou mesmo de argilominerais. Vale recordar que na coluna estratigráfica, vista no Capítulo 2, a litologia identificada logo abaixo do travertino foram exatamente argilas azuis, que poderiam ser as responsáveis pela composição aluminossilicática.

Em resumo, a investigação aqui constatou predomínio absoluto de cálcio (Ca), o que já era esperado. Grandes picos de ferro (Fe) ratificaram a magnetita já identificada na macroscopia. Foi observado em diversos gráficos a ocorrência de silício (Si), alumínio (Al), potássio (K) e, mais raramente, sódio (Na). Estes são possíveis materiais carregados em fluido, juntamente com o óxido de ferro, que seriam oriundos de rochas de composição aluminossilicática ou ainda de argilominerais. O cádmio (Cd), que foi observado em apenas uma amostra, em picos proporcionais ao de enxofre (S) poderia indicar greenockita, mas devido a somente esta aparição, concentra um grau de incerteza elevado. Já picos menores de zinco (Zn) e enxofre (S) foram observados muitas vezes e poderiam indicar presença de esfarelita (ZnS), a qual é comum em ambientes com greenockita, e em ambientes hidrotermais e vulcanogênicos. Outro elemento não tão raro foi a prata (Ag) que teve, em alguns casos, picos próximos ao do enxofre (S) e que formaria a Acanita ( $> 177^{\circ}\text{C}$ ) ou Argentita ( $< 177^{\circ}\text{C}$ ), ambos sulfetos de prata ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ). A presença deste componente reforçaria a hipótese de fluidos quentes que percolaram a rocha. O bário (Ba) por sua vez foi esclarecedor para o estudo. Na sua forma de sulfato de bário ( $\text{BaSO}_4$ ) é um forte indicador de hidrotermalismo, o qual foi observado com picos expressivos e que foi visto em mais de um ponto de análise. Existe a dúvida se o mesmo fluido termal que teria carregado íons de  $\text{CO}_2$  e depositado carbonato nos poros da rocha, proposto por Fillippis et al., (2013), seria o mesmo que carregou elementos terrígenos, possivelmente das encaixantes, para as discontinuidades. Quanto aos picos de magnésio (Mg) identificados, estes foram sempre pequenos e proporcionais aos de alumínio (Al) e silício (Si), o que indicaria que este faz parte da composição aluminossilicática e não se trataria de dolomitização.

Além destes citados, foram encontrados traços de manganês (Mn), cromo (Cr), titânio (Ti), níquel (Ni), cloro (Cl), molibdênio (Mo) e cobre (Cu). As análises não mostradas neste item são vistas em Apêndice III.

## **5.4.**

### **Caracterização da estrutura porosa**

#### **5.4.1.**

##### **Análise macroscópica**

A dureza e a deformabilidade são diretamente responsáveis pela resistência mecânica de qualquer material. Quanto mais duro, maior a tendência de resistir a esforços compressoriais. No entanto, a deformabilidade do mesmo, isto é, a

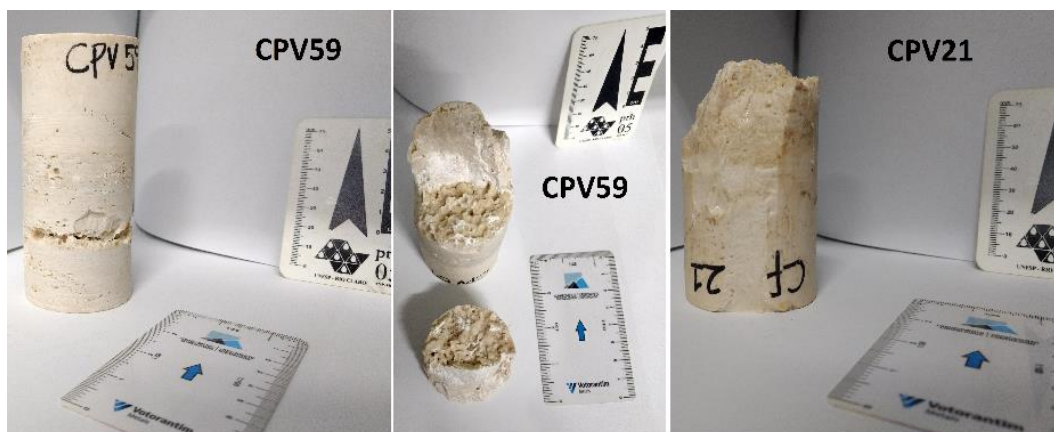
capacidade elasto-plástica quanto maior for, maior seria a resistência mecânica a compressão. Influenciando diretamente na deformabilidade, os vazios presentes no material tendem a aumentar a capacidade elasto-plástica deste, já que uma vez submetido a esforços de compressão, os vazios permitiriam uma maior deformação antes da ruptura. Então foi considerado para a interpretação dos resultados dos ensaios mecânicos a distribuição dos poros no travertino Romano segundo uma observação superficial dos corpos de prova.

O tamanho e a frequência predominante deste, além da forma podem influenciar diretamente na resistência mecânica. Porém o fator mais importante considerado aqui foi a distribuição dos poros, já que uma distribuição de poros mais uniforme tende a aumentar a resistência do travertino ao passo que uma concentração em determinada região do corpo de prova tende a criar uma região de maior fraqueza, levando o espécime ao colapso. Isto pode ser visto na Figura 46, onde em (A) a esquerda tem-se o corpo de prova CPV 11 com poucos e pequenos vazios e a direita o espécime CPV12 com alta concentração de poros. Já em (B) a esquerda nota-se também um exemplar com poucos vazios, enquanto a direita observa-se um espécime com poros bem distribuídos ao longo do corpo de prova.



**Figura 46** Amostras verticais 6 e 14 – (A) Amostra densa à esquerda e amostra com poros concentrados na região central à direita; (B) Amostra densa à esquerda e amostra com poros distribuídos ao longo do corpo de prova à direita.

Já seria esperado que quando um corpo de prova tivesse uma determinada região com poros concentrados, ocorreria um colapso de poros. No entanto, esta avaliação só foi possível ser feita através de observação da superfície dos espécimes, o que nem sempre retratava o que ocorria por dentro. Foi o caso dos corpos de prova CPV 59 e CPV 21, os quais pareciam exemplares densos, no entanto em ambos ocorreram colapsos de poros significativos, como mostra a Figura 47.



**Figura 47** Colapso de poros em CPV 59 e CPV 21.

Os poros foram observados nos corpos de prova, com tamanhos variando de milimétricos a centimétricos. Quando bem alongados em pelos menos duas direções, formaram *cavings*. Os poros menores apresentaram tendência de formas mais arredondadas, enquanto os vazios maiores apresentaram formato elíptico irregular. A maioria dos poros maiores apresentou forte tendência de se alongar paralelamente ao acamamento. Para os vazios de maneira geral, com tamanhos mais significativos e conexão para percolação de fluídos, independente da forma, cristalizaram as drusas de carbonato. Também tanto em poros maiores, como em discontinuidades, foi identificado preenchimento de material escuro (magnetita). Em função das baixíssimas porcentagens de óxido de ferro, acredita-se que a presença do mesmo em poros e pequenas discontinuidades não tenha qualquer influência na resistência da rocha. O mesmo não se pode dizer sobre as drusas nos poros maiores e discontinuidades. Esta é vastamente encontrada. No entanto, a drusa é da mesma composição do restante do material, calcita, tendo apenas como diferença o melhor desenvolvimento dos cristais. Se for pensado no campo da estrutura química, a calcita com uma estrutura cristalina bem formada e melhor interligada teria mais ligações químicas, mais fortes e com maior espaço intermolecular para sofrer deslocamento sob compressão do que a mesma calcita numa estrutura amorfa e desarranjada. Esta avaliação passaria ao campo molecular e seriam necessários muitos ensaios, com muitos espécimes tendo exatamente as mesmas propriedades macroscópicas para avaliar a fundo a influência do estado cristalino na resistência. Com um material como um todo heterogêneo e corpos de prova com ínfimas variações na altura e diâmetro, além de tamanhos e distribuição de poros completamente aleatórias, a presença de drusas não pôde ser considerado um fator determinante na resistência mecânica da rocha, porém sua maior ou menor presença pôde ser observada como parâmetro de comparação.

A avaliação visual da sessão dos corpos de prova de ensaio de carga pontual na direção horizontal (PLH) rompidos explica o que foi falado acima sobre a possível influência das drusas na resistência. Embora o raciocínio seja válido, o fator variação do tamanho de poros e sua distribuição é muito mais influente. Isto

pode ser visto na Figura 48, com exemplares de alta porosidade e distribuição de poros bastante irregular.



**Figura 48** Corpos de prova de alta porosidade rompidos em ensaios de PLH.

Já na Figura 49 é possível observar um contraste com o que foi visto na Figura 48. Corpos de prova de PLH com porosidade muito menor e uma melhor distribuição caracterizam exemplares com maior resistência mecânica.



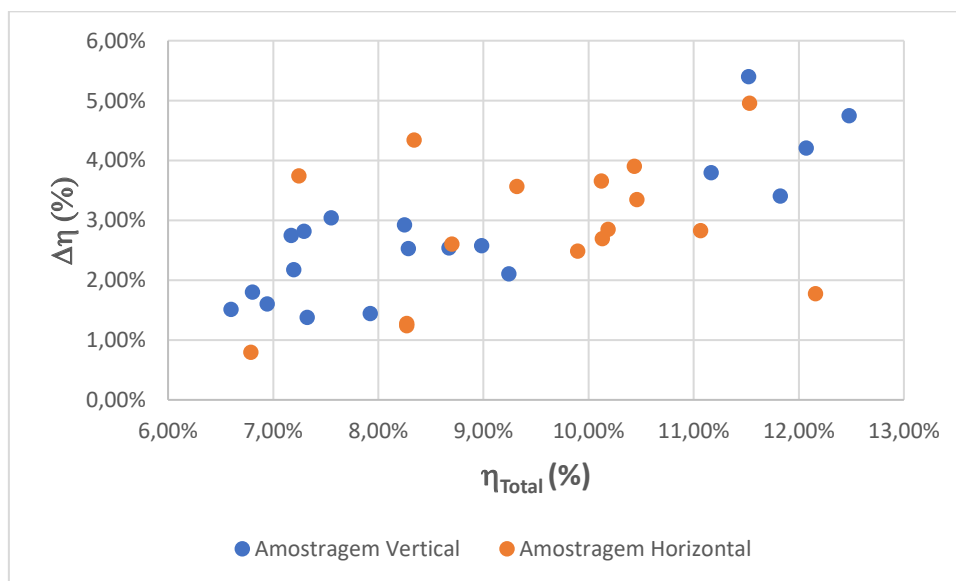
**Figura 49** Corpos de prova de baixa porosidade rompidos em ensaios de PLH.

Ainda na figura 49, o corpo de prova a esquerda (PLH 8) teve menor resistência que o da direita (PLH 6). Isto se deve ao fato de que, apesar de uma menor porosidade geralmente se correlacionar a uma maior resistência para um mesmo ensaio, o exemplar da esquerda é extremamente denso e quase não apresentou vazios. Este fator diminuiu a capacidade do corpo de sofrer deformações internamente. Já o da direita apresentou poros pequenos e mais bem distribuídos, o que representaria a condição ideal para resistências mecânicas mais elevadas em função de uma maior deformabilidade.

Por último, é importante salientar que poros isolados são parte fundamental da análise, mas o ideal é realizar a mesma em conjunto à interpretação dos ensaios triaxiais, considerando outros parâmetros ao mesmo tempo além das porosidades total e interconectada, como índice de vazios, massa específica seca, tensão de ruptura e comportamento da curva tensão x deformação após a ruptura.

Segundo Franklin (2018), uma maior quantidade de poros isolados em um espécime significa menos canais de comunicação passando pelo corpo de prova, isto é, menos vazios ao longo deste. Isto indicaria uma maior resistência mecânica. No entanto, como os canais de comunicação são bem mais finos que o tamanho dos poros, isto bem observado nas lâminas delgadas, além de mais bem distribuídos do que os próprios poros, estes canais poderiam agir como uma microporosidade espalhada ao longo do corpo que influenciariam numa maior capacidade do corpo de prova de se deformar e, dependendo das propriedades elasto-plásticas, aumentaria a resistência do material.

Apesar de um caráter heterogêneo e um comportamento difícil de prever, a porosidade isolada ( $\Delta\eta$ ) apresentou uma certa tendência de crescimento proporcional ao aumento da porosidade total ( $\eta_{\text{Total}}$ ), como pode ser visto na Figura 50.

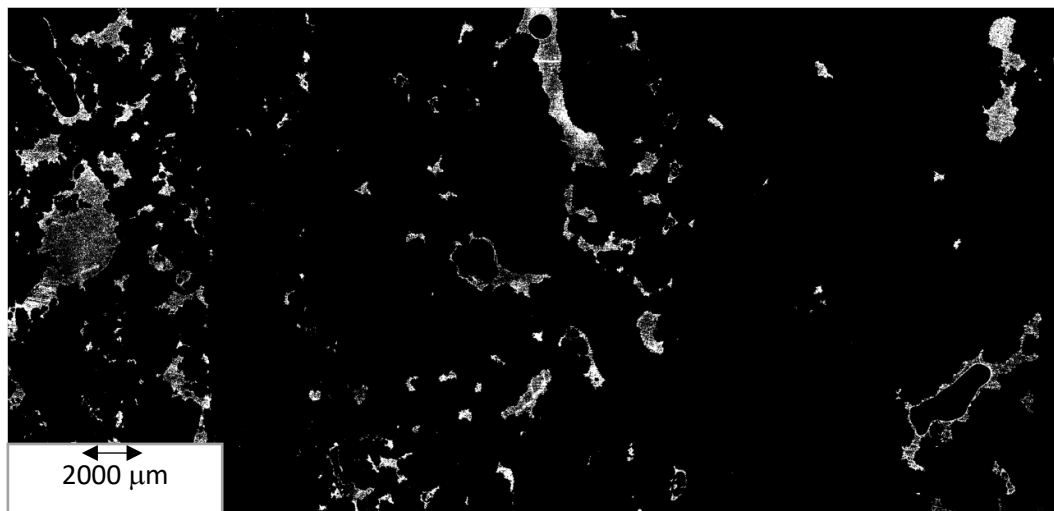


**Figura 50** Gráfico de Porosidade total x Porosidade isolada.

#### 5.4.2. Análise microscópica

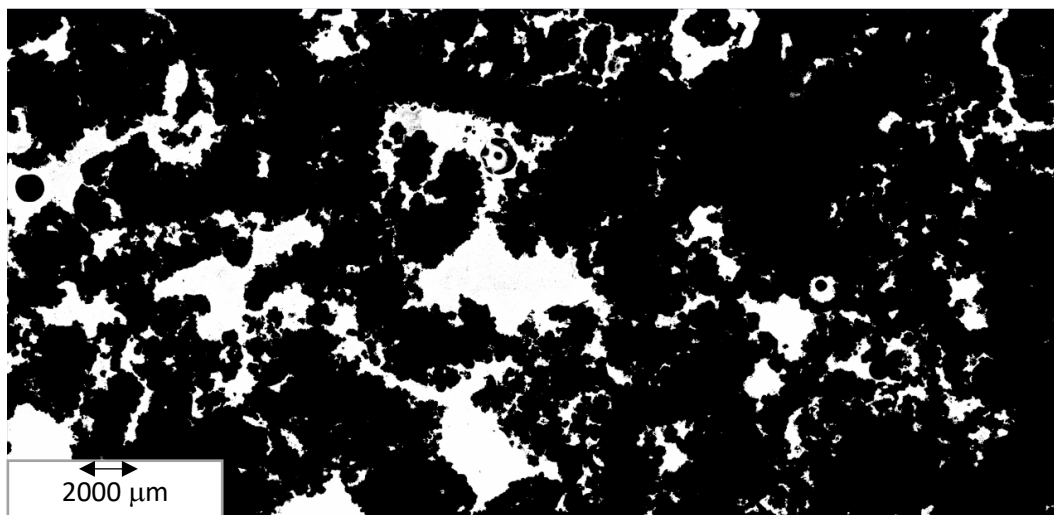
Utilizando-se as lâminas com corante azul de metileno nos poros, foram geradas imagens binárias, isto é, com contraste da área preenchida por minerais em preto e toda área de vazios em branco. As lâminas em questão foram as de número 2 e 6, correspondentes ao andar A1, lâmina 4, correspondente ao andar A2, e a lâmina 12 que abrange uma região intermediária entre estes dois andares. Esta análise pode conter alguns erros em função da dificuldade em diferenciar os poros de minerais, já que cores e tons são muito variáveis nas lâminas e os poros ficam mais difíceis de identificar conforme o seu tamanho reduz.

Na Figura 51 observa-se poros na direção ortogonal ao acamamento. Esta corresponde a um exemplar de baixa porosidade e que representa o que foi visto com frequência no andar A1, isto é, baixa porosidade, poros mais dispersos e isolados.



**Figura 51** Lâmina 2 (Ortogonal ao acamamento) – Binária – Porosidade Total de 3,03%.

Já na Figura 52 é possível observar um comportamento de exceção, mas que também ocorre em A1. Nela observa-se a lâmina 6, com orientação paralela ao acamamento e uma porosidade com valor até um pouco superior aos maiores encontrados nas amostras de ensaio triaxial. Porém esta lâmina é oriunda de um rejeito muito poroso, provavelmente próximo ao contato do andar A2. Isto mostra o grau de heterogeneidade da rocha, já que mesmo se observando clara diferença de porosidade nestes dois andares considerados, em alguns casos a porosidade no andar considerado mais denso pode ser tão alta quanto a do mais poroso.



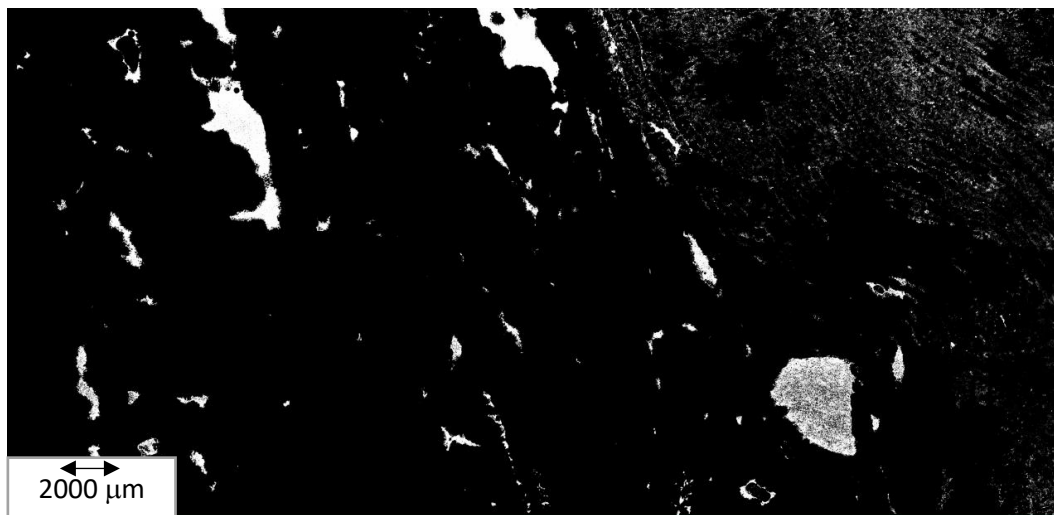
**Figura 52** Lâmina 6 (Paralela ao acamamento) – Binária – Porosidade Total de 15,85%.

A Figura 53 mostra a lâmina 4, correspondente ao andar A2, e com um valor de porosidade intermediário em relação aos valores encontrados. São observados poros mais alongados e alinhados com o acamamento, assim como alguns poros isolados.



**Figura 53** Lâmina 4 (Ortogonal ao acamamento) – Binária – Porosidade Total de 7,16%.

Finalmente, na Figura 54 é possível observar a imagem binária mostrando a porosidade de parte de cada um dos andares. A direita observa-se A1 com menos poros e formas mais subarredondadas. E a esquerda, em A2, maior concentração de poros, formas mais alongadas e alinhadas com o acamamento



**Figura 54** Lâmina 12 (Ortogonal ao acamamento) – Binária – Porosidade Total de 4,45%.

É importante ressaltar que a área de representatividade da lâmina em relação a uma seção de corte do bloco pode ser muito baixa, bem como a dificuldade de escolha de uma região que abranja a distribuição dos minerais e vazios o mais uniformemente possível pode resultar em valores muito abaixo ou acima do esperado. Além da já citada dificuldade em diferenciar poros dos minerais com imagem binária através de software. Portanto, os valores de porosidade aqui representados dão uma estimativa, mas não devem ser considerados a fundo devido aos fatores mencionados.

#### **5.4.3. Porosimetria por intrusão de mercúrio**

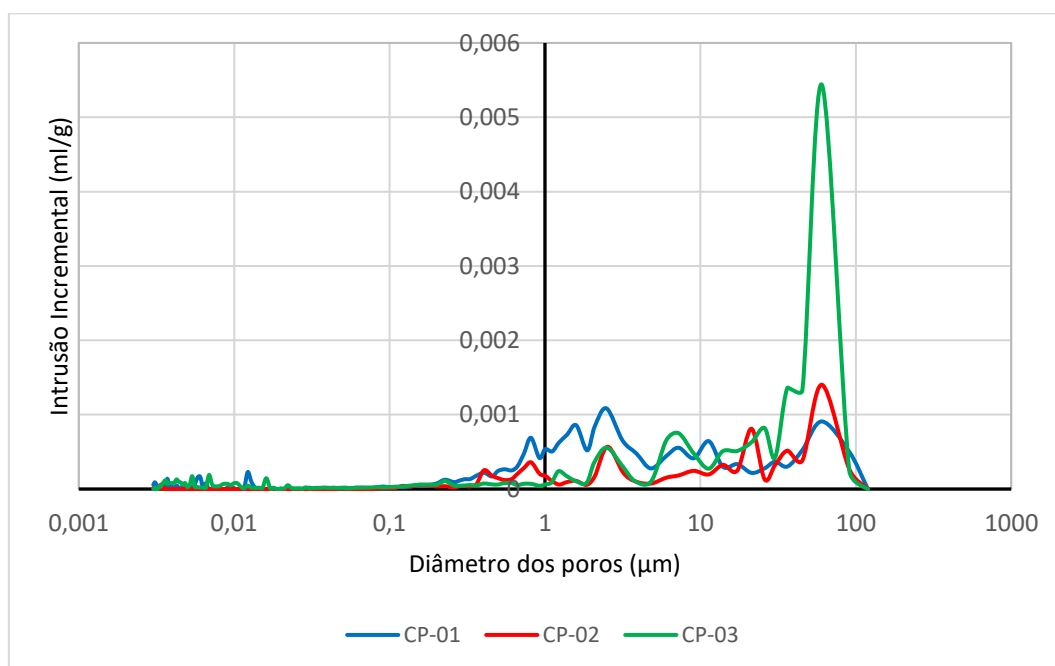
Apesar de dimensões próximas, com os exemplares variando entre 2,0 e 3,0 cm de aresta, os resultados variaram bastante e diferiram daquilo que o aspecto superficial dos mesmos sugeria. O diâmetro dos poros em volume foi cerca de doze vezes superior em CP-03, que foi considerado pelo aspecto externo de moderada porosidade, em relação a CP-01, de alta porosidade. Nos resultados de porosimetria, CP-03 acabou sendo a mais porosa e a mais permeável. CP-01, a segunda mais porosa, porém a menos permeável de todas. Já CP-02 seguiu o que seu aspecto superficial sugeria, sendo a menos porosa de todas, porém a segunda mais permeável. Embora não haja uma análise mais detalhada, os resultados de permeabilidade também foram bastante variados. A amostra que obteve a menor permeabilidade de todas foi justamente a com maior porosidade visual, a qual foi a segunda maior porosidade mensurada na porosimetria, CP-01.

Os resultados mais relevantes podem ser vistos na Tabela 27, que está em ordem de porosidade mais alta para mais baixa.

**Tabela 27** Dados de intrusão e da estrutura porosa – Porosimetria de mercúrio.

Dados de Intrusão		CP-03	CP-01	CP-02
Volume de Intrusão Total	ml/g	0,0199	0,0188	0,0094
Área Total dos Poros	m <sup>2</sup> /g	1,963	1,358	0,153
Diâmetro Médio dos Poros (Volume)	µm	23,5465	1,9614	10,1039
Diâmetro Médio dos Poros (Área)	µm	0,0044	0,0039	0,0034
Média dos Diâmetros dos Poros (4V/A)	µm	0,0405	0,0555	0,2467
Densidade Aparente (1,51 psi)	g/ml	2,5170	2,5325	2,5646
Densidade Esqueletal Aparente	g/ml	2,6498	2,6593	2,6282
<b>Porosidade</b>	%	<b>5,0079</b>	<b>4,7698</b>	<b>2,4226</b>
Volume de Mercúrio Utilizado / Volume de CP	%	81	18	48
Dados da Estrutura Porosa		CP-03	CP-01	CP-02
Pressão Limite de Entrada (Threshold)	psi	1,99	4,95	1,98
Comprimento Característico	µm	91,0543	36,5066	91,3361
Fator de Condutividade da Estrutura	-	0,011	0,007	0,003
Permeabilidade	mdarcy	407,4694	43,9951	122,0728

A distribuição, tamanho e volume dos poros pôde ser vista nos gráficos de intrusão de mercúrio. Por ser um fluido não molhante, precisa que seja aplicada pressão para percolar os poros do material. Esta pressão necessária para que o mercúrio alcance um poro de determinado diâmetro é representada pela intrusão incremental. Ela pode estar correlacionada a pressão necessária para adentrar cada diâmetro de poro. Como o tamanho dos poros é justamente o interesse, foi gerado um gráfico com a intrusão incremental variando com porosidade, como pode ser visto na Figura 55.

**Figura 55** Gráfico de porosimetria – Intrusão incremental x Diâmetro dos poros.

A fim de classificar o tamanho de poros, buscou-se um modelo de classificação, optando-se pela mesma classificação utilizada por Domingues (2011), proposta por Beiranvand (2003), como pode visto na Tabela 28.

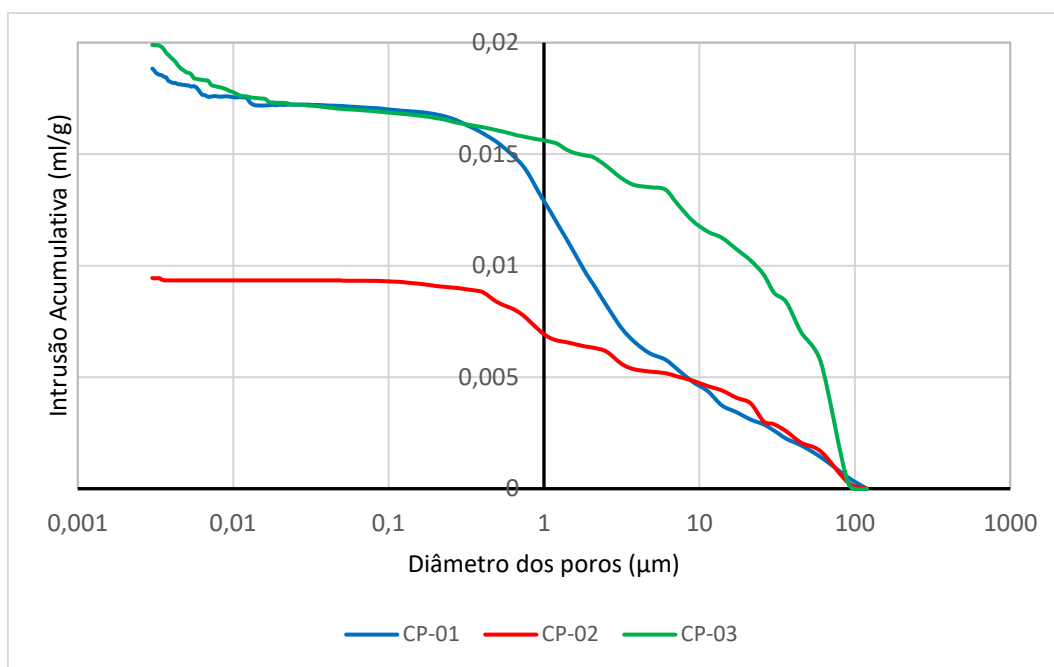
**Tabela 28** Classificação de tamanho dos poros. (Fonte: Domingues, 2011)

Classificação quanto ao tamanho dos poros (Beiranvand, 2003)	
Tamanho dos poros	Diâmetro dos poros ( $\mu\text{m}$ )
Nanoporos	< 0,2
Microporos	0,2 - 1,0
Mesoporos	1,0 – 4,0
Macroporos	4,0 – 20,0
Megaporos	> 20,0

É possível observar na Figura 55 que o maior pico de intrusão incremental é justamente na amostra mais porosa e permeável do trio (CP-03), predominando para as três amostras os tamanhos mega e mesoporos, respectivamente.

Já a facilidade com que esse material teve de passar pelos vazios após o incremento de pressão resultará numa quantidade acumulada de mercúrio utilizada, sendo este o segundo gráfico de importante avaliação.

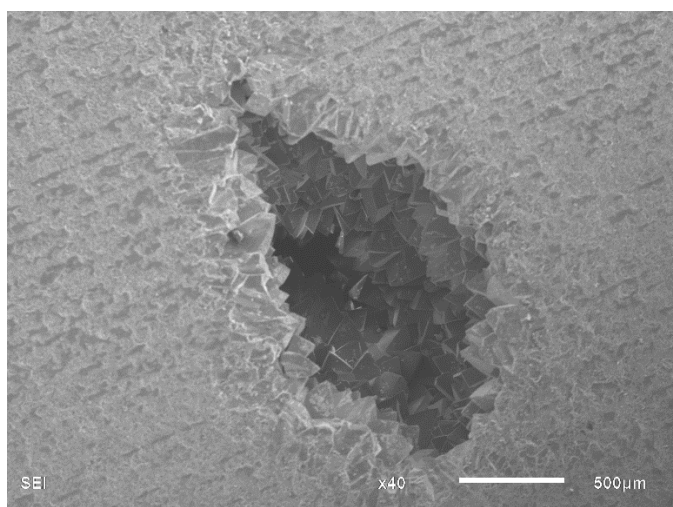
Como pode visto na Figura 56, o exemplar com maior porosidade e permeabilidade (CP-03) praticamente tem esse valor superior aos demais em todos os diâmetros de poros. O segundo mais poroso (CP-01) acompanha, mas cai drasticamente ao alcançar os mesóporos, chegando a apresentar uma intrusão acumulativa menor até que CP-02, a menos porosa, a partir dos megaporos.



**Figura 56** Gráfico de porosimetria – Intrusão acumulativa x Diâmetro dos poros.

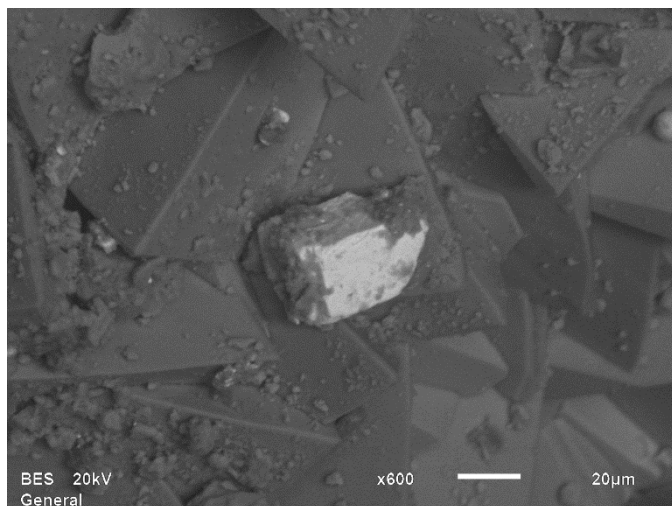
#### 5.4.4. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Neste tópico foram observadas as principais porosidades vistas em lâminas delgadas. Os poros fenestrais com preenchimento de calcita espática e poros com contaminantes. Na Figura 57 observou-se o contorno do poro, sua dimensão alongada de praticamente 1000 μm e grande quantidade de esparita preenchendo o mesmo.



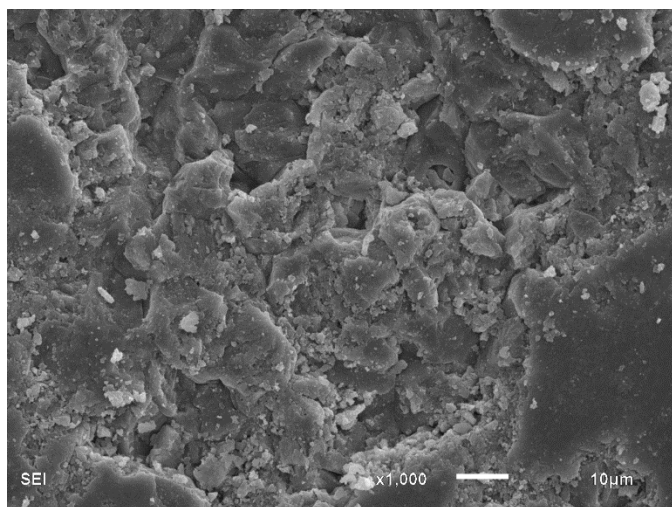
**Figura 57** Poro fenestral preenchido por calcita espática visto no MEV com zoom de 40x.

Condição similar à anterior foi observada na Figura 58, porém com *zoom* muito superior, onde não foi possível delimitar as bordas do poro. Nota-se o preenchimento de calcita espática e um possível grão de magnetita e outros elementos *ex situ* incrustados na superfície desta.



**Figura 58** Poro com preenchimento de esparita e magnetita incrustada visto no MEV em zoom de 600x.

Já a Figura 59 mostra uma pequena área com grãos de calcita microcristalina vistos sob *zoom* de mil vezes, onde foi possível observar o espaço entre os grãos de micrita, estes muitas vezes preenchido por material menor ainda, de coloração esbranquiçada e que possivelmente percolaram entre poros intergranulares através de fluidos termais.



**Figura 59** Microporos intergranulares na calcita microcristalina com preenchimento de material *ex situ* visto no MEV com zoom de 1000x.

## 5.5. Caracterização da resistência mecânica

### 5.5.1. Ensaio de carga pontual

O resultado dos ensaios de carga pontual com eixo axial do corpo de prova orientado verticalmente pode ser visto na Tabela 29. Infelizmente os resultados ficaram bastante distintos do resto da gama de ensaios feitos por outros autores e, mesmo para este trabalho, nenhum ensaio uniaxial atingiu valores tão altos para o travertino Romano. Também quando se comparou os valores resistência *versus* a porosidade, encontrou-se dados pouco consistentes. Por esta razão não foi feito o gráfico de *point load vertical* (PLV).

**Tabela 29** Resultados dos ensaios de carga pontual com eixo axial vertical.

Amostra	H	D	$\eta_{Total}$	P	$\Delta L$	A	$(D_e)^2$	$I_s$	$\sigma_R$
	(mm)	(mm)	(%)	(kgf)	(mm)	(mm <sup>2</sup> )	(mm)	(MPa)	(MPa)
PLV 6	20,5	50,31	<b>5,95%</b>	732	1,05	1031,36	1313,16	5,47	<b>98,43</b>
PLV 8	20,55	50,25	<b>6,93%</b>	625	1,72	1032,64	1314,79	4,66	<b>88,60</b>
PLV 1	26,33	50,28	<b>7,14%</b>	809	1,87	1323,87	1685,61	4,71	<b>84,75</b>
PLV 3	25,53	50,2	<b>8,31%</b>	654	1,37	1281,61	1631,79	3,93	<b>70,77</b>
PLV 4	19,13	50,24	<b>8,42%</b>	562	1,25	961,09	1223,70	4,51	<b>81,10</b>
PLV 7	21,08	50,28	<b>9,01%</b>	400	1,12	1059,90	1349,51	2,91	<b>52,34</b>
PLV 5	18,86	50,15	<b>9,11%</b>	527	0,93	945,83	1204,27	4,29	<b>77,27</b>
PLV 10	41,12	50,26	<b>12,33%</b>	984	-	2066,69	2631,39	3,67	<b>66,03</b>
PLV 11	39,56	50,33	<b>12,79%</b>	867	1,39	1991,05	2535,09	3,36	<b>60,39</b>
PLV 9	18,94	50,24	<b>12,89%</b>	484	0,83	951,55	1211,55	3,92	<b>68,58</b>
PLV 2	30,57	50,18	<b>17,47%</b>	385	0,86	1534,00	1953,15	1,93	<b>40,61</b>

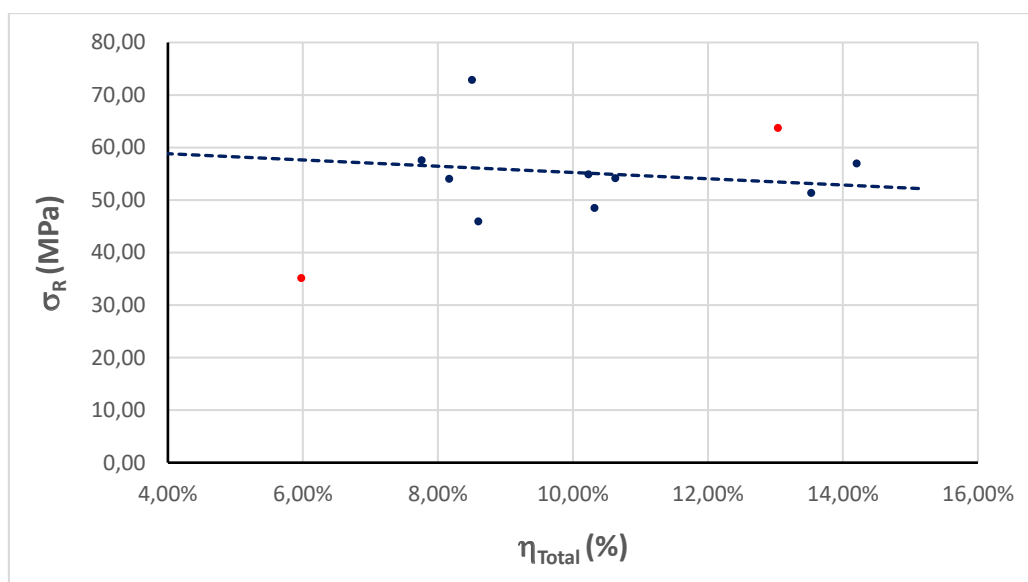
Já o resultado dos ensaios de carga pontual com eixo dos espécimes orientados horizontalmente pode ser visto na Tabela 30. Os exemplares PLH 3 e 11 apresentaram resultados um pouco fora da linha de tendência e por isto foram marcados como possíveis desvios. Este comportamento pode ser visto na Figura 60.

Com a eliminação dos dois ensaios citados acima, o resultado da linha de tendência de resistência uniaxial *versus* porosidade total apresentou alguma coerência, já que os valores foram coerentes e, apenas com a correção, a linha de tendência ficou decrescente.

Mesmo assim o ideal seria haver muito mais ensaios, especialmente para este tipo de rocha e de ensaio, em que podem ocorrer truncamentos e outros fatores que aumentam o erro. Os resultados para ensaio de carga pontual aqui presentes serviram apenas como uma noção. Todavia, esta metodologia representa uma forma simplificada para estimar valores de resistência uniaxial, tendo este ensaio sido bem executado neste trabalho.

**Tabela 30** Resultados dos ensaios de carga pontual com eixo axial horizontal.

Amostra	H (mm)	D (mm)	$\eta_{\text{Total}}$ (%)	P (kgf)	$\Delta L$ (mm)	$I_s$ (MPa)	$\sigma_R$ (MPa)
PLH 3	32,46	50,20	5,98%	392	0,89	1,53	35,10
PLH 7	37,83	50,06	7,76%	639	3,10	2,50	57,53
PLH 8	39,67	49,95	8,17%	597	1,15	2,35	53,99
PLH 5	35,86	50,34	8,51%	818	1,53	3,17	72,83
PLH 2	34,36	50,30	8,60%	515	2,31	2,00	45,93
PLH 10	52,03	50,29	10,23%	615	4,00	2,39	54,87
PLH 1	32,09	50,08	10,32%	539	2,34	2,11	48,49
PLH 4	37,21	50,33	10,63%	608	2,01	2,35	54,16
PLH 11	51,33	50,28	13,04%	714	3,15	2,77	63,72
PLH 9	41,15	50,31	13,53%	576	1,10	2,23	51,35
PLH 6	35,83	50,41	14,21%	641	2,46	2,47	56,91

**Figura 60** Point Load Horizontal – Resistência uniaxial x Porosidade total.

### 5.5.2. Ensaio Brasileiro

Neste ensaio, também chamado de resistência a tração indireta, utilizou-se exemplares oriundos de corpos de prova horizontais, ou seja, com orientação do eixo axial paralelo ao acamamento (direção de furo paralela ao eixo 'x'). Neste caso a orientação das amostras no equipamento influía diretamente no resultado. Optou-se por escolher aquela onde se espera a menor resistência, isto é, com o acamamento ortogonal aos esforços de tração. Ou, sob outro ponto de vista, com a orientação do acamamento paralela à linha de ruptura. O resultado é visto na Tabela 31.

**Tabela 31** Resultados dos ensaios brasileiros horizontais (EBH).

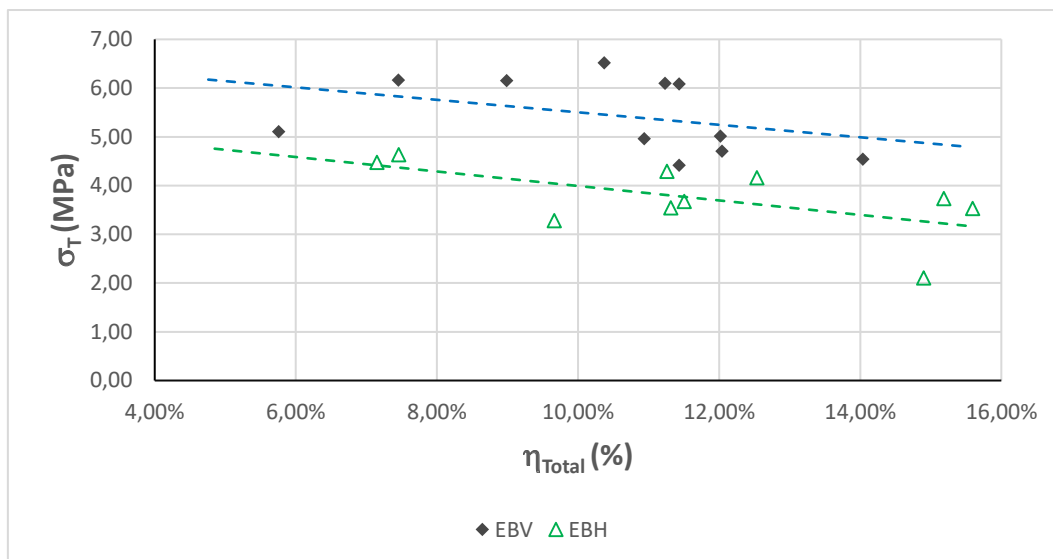
Amostra	H	D	$\eta_{Total}$	P	$\Delta L$	$\sigma_T$
	(mm)	(mm)	(%)	(kgf)	(mm)	(MPa)
EBH 7	28,05	50,40	7,15%	1015	0,40	4,48
EBH 1	30,38	50,16	7,46%	1133	0,49	4,64
EBH 3	27,75	50,21	9,66%	733	0,29	3,28
EBH 5	26,85	50,36	11,26%	930	0,24	4,29
EBH 4	29,05	50,12	11,31%	828	0,49	3,55
EBH 2	27,93	50,34	11,51%	829	0,40	3,68
EBH 8	27,69	50,37	12,54%	931	0,61	4,16
EBH 6	32,37	50,64	14,90%	554	0,36	2,11
EBH 9	28,32	50,33	15,18%	854	0,27	3,74
EBH 10	33,34	50,32	15,59%	949	0,68	3,53

Já a Tabela 32 mostra os resultados dos ensaios brasileiros com espécimes verticais (eixo axial ortogonal ao acamamento). Estes (EBV) com valores significativamente maiores do que nos ensaios brasileiros horizontais (EBH). Isto já era esperado, tendo em vista a escolha da orientação mais desfavorável das amostras no ensaio brasileiro horizontal.

**Tabela 32** Resultados dos ensaios brasileiros verticais (EBV).

Amostra	H	D	$\eta_{Total}$	P	$\Delta L$	$\sigma_T$
	(mm)	(mm)	(%)	(kgf)	(mm)	(MPa)
EBV 12	22,68	50,32	5,76%	935	0,16	5,11
EBV 1	25,84	50,26	7,45%	1284	0,60	6,17
EBV 8	31,27	50,34	8,99%	1552	0,24	6,15
EBV 10	27,38	50,32	10,10%	730	0,31	3,31
EBV 5	30,45	50,23	10,32%	932	0,44	3,80
EBV 2	26,55	50,30	10,37%	1396	0,23	6,52
EBV 9	26,41	50,17	10,94%	1054	0,45	4,96
EBV 7	26,67	50,37	11,23%	1314	0,59	6,10
EBV 11	27,99	50,22	11,43%	996	0,41	4,42
EBV 3	26,53	50,29	11,43%	1302	0	6,09
EBV 4	29,21	50,30	12,02%	1182	2,58	5,02
EBV 6	30,12	50,26	12,04%	1142	0,80	4,71
EBV 13	22,41	50,24	14,04%	820	0,32	4,54

A Figura 61 ilustra os resultados dos ensaios brasileiros em ambas as direções e suas respectivas linhas de tendência de resistência à tração na ruptura ( $\sigma_T$ ) versus a porosidade total ( $\eta_{Total}$ ).



**Figura 61** Resistência a tração na ruptura x Porosidade total.

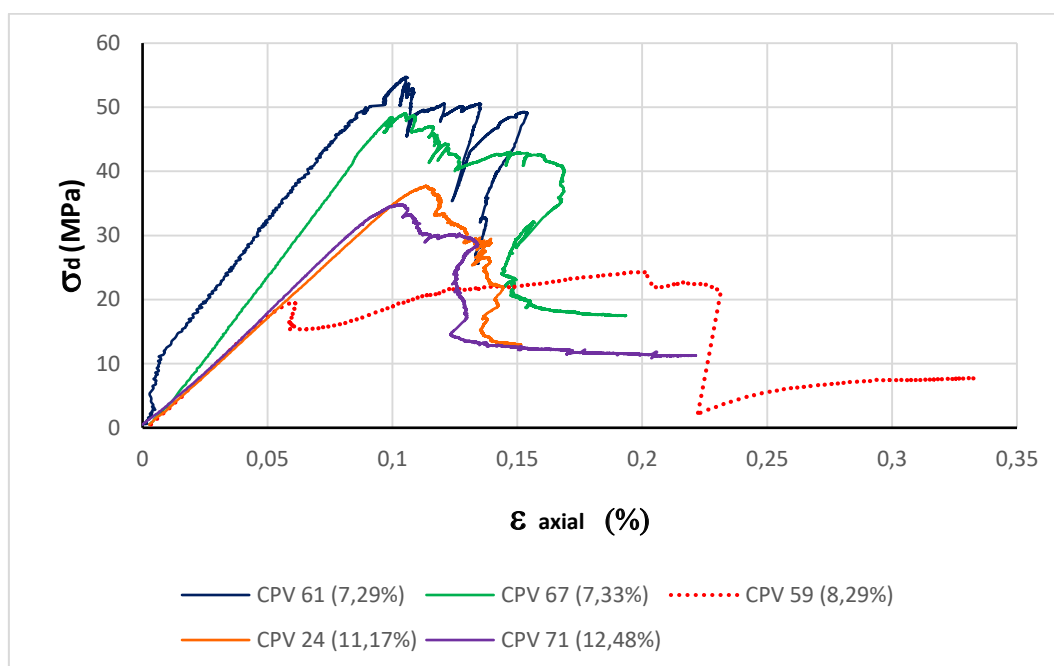
### 5.5.3.

#### Ensaio de compressão uniaxial

Os resultados dos ensaios uniaxiais foram plotados em gráficos compilados, variando com a porosidade total. Adotou-se para os ensaios uniaxiais uma mesma sequência de cores para todos os gráficos compilados a fim de facilitar a visualização e interpretação dos dados. Sempre nesta ordem, da menor para a maior porosidade total, as cores adotadas para ilustrar os ensaios foram: azul, verde, vermelho, laranja e roxo. Logicamente, esta sequência de cores se repete tanto nos gráficos de tensão desviadora *versus* deformação axial, quanto nos de deformação volumétrica *versus* deformação axial. A finalidade principal foi facilitar a interpretação quanto a expectativa de resultados, isto porque para um mesmo material, com as mesmas características e parâmetros físicos semelhantes, esperar-se-ia que a sua resistência a compressão simples fosse maior quanto menor fosse a sua porosidade total. Então, da mesma forma, esperou-se-que a sequência de cores citadas aparecesse nos gráficos de tensão desviadora *versus* deformação axial de cima para baixo, isto é, as primeiras cores correlacionadas às menores porosidades, respectivamente e, ao mesmo tempo, aos maiores valores de resistência. Em geral, esta lógica foi seguida. Quando não, coube avaliação dos resultados gráficos e dos corpos de prova junto a uma comparação baseada nos índices físicos calculados. Os parâmetros elásticos serviram de grande valia na interpretação dos ensaios. Aqui foram obtidos o módulo de elasticidade (E) e deformabilidade ( $E_{Def}$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e módulo de cisalhamento (G).

### 5.5.3.1. Ensaio uniaxial vertical

A Figura 62 ilustra os resultados. No geral dos ensaios respeitou-se a ideia de quanto menor a porosidade, maior a resistência, exceto no ensaio do corpo de prova CPV 59, que sofreu colapso de poros, apresentando uma resistência muito abaixo da esperada, bem menor até mesmo que a de outros exemplares com porosidades muito superiores.



**Figura 62** CPV - Tensão desviadora x Deformação axial (Ensaio uniaxial).

O comportamento durante o carregamento foi bastante similar para corpos de prova com porosidade acima de 7,33%, com módulo de elasticidade (E) em torno de 35 GPa. Já as duas menos porosas, com valores abaixo do citado, tiveram também um comportamento similar entre elas, porém com módulo de elasticidade em torno de 49 GPa. O coeficiente de Poisson foi muito próximo para todos. Já o módulo de cisalhamento (G) ficou próximo de 1,43 GPa para exemplares com vazios acima de 7,33% e em torno de 2 GPa para as duas com porosidade abaixo desta.

Os trechos pós-ruptura foram semelhantes, porém nas duas amostras de menor porosidade o comportamento se mostrou mais plástico, isto é, houve deformação negativa após a ruptura.

Já a Figura 63 mostra este ensaio em termos de deformação volumétrica *versus* axial. Todos os exemplares apresentaram comportamento extremamente

próximo, com um leve crescimento no volume durante o carregamento, isto é, aumento da deformação volumétrica, seguido de uma diminuição abrupta do volume após a ruptura.

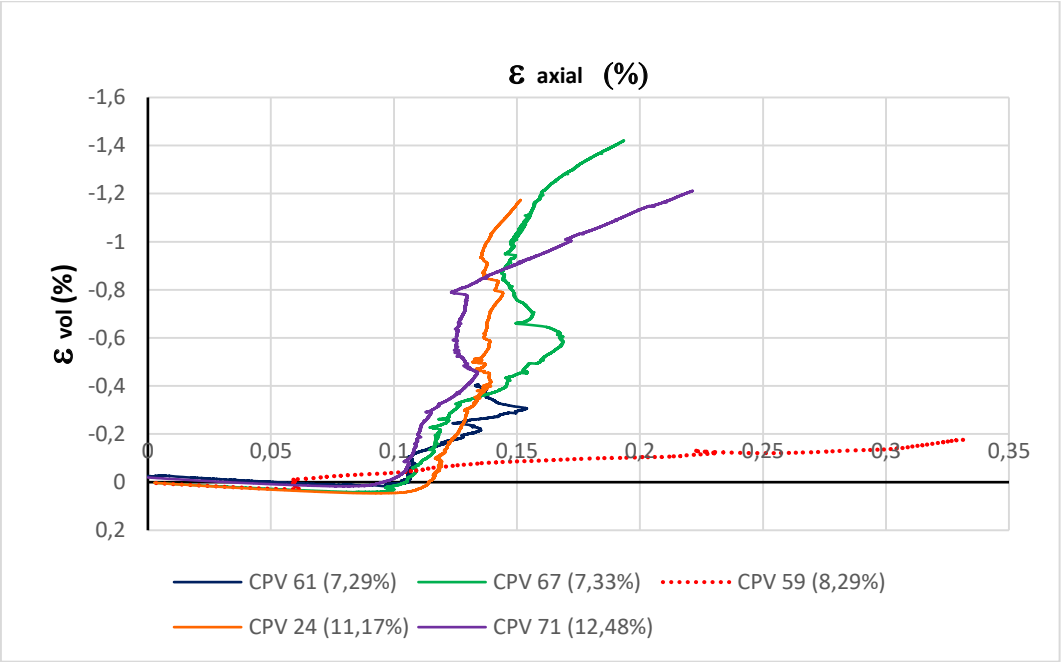


Figura 63 CPV - Deformação volumétrica x Deformação axial (Ensaio uniaxial).

Os índices físicos calculados para interpretação dos ensaios são vistos na Tabela 33. Já as propriedades da curva e parâmetros elásticos, na Tabela 34.

Tabela 33 CPV – Índices físicos (Ensaio uniaxial).

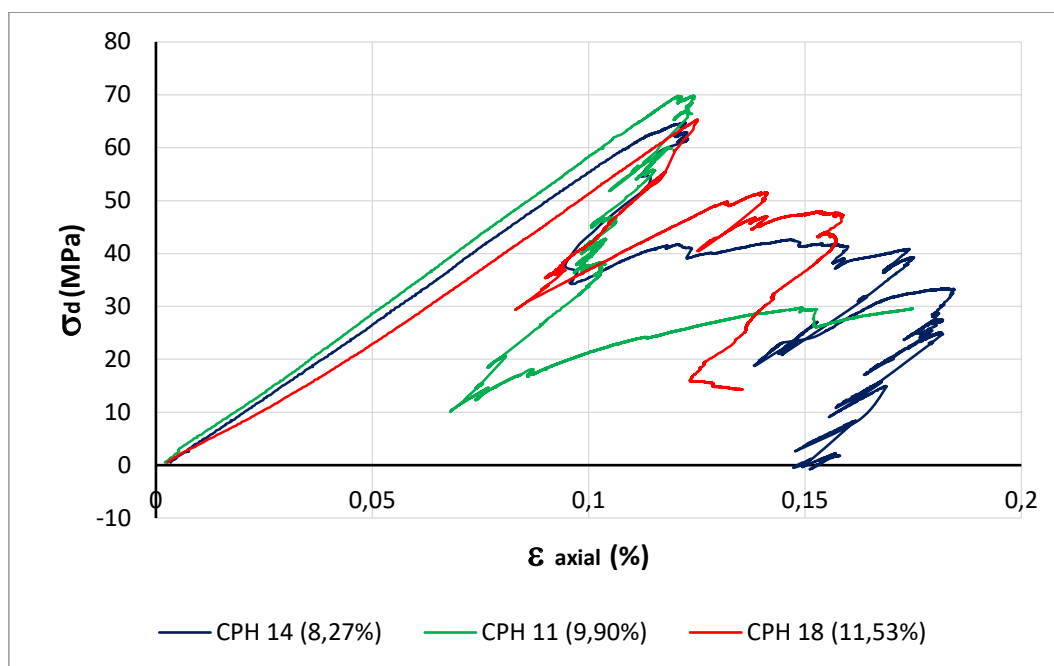
CP	Dimensional		Propriedades dos vazios								Massa específica	
	H	H / D	$\eta_{Total}$ (%)	e	$\eta_w$	$\eta_{wi}$	$\eta_{we}$	$R\eta_w$	$\Delta\eta$ (%)	$\eta_{Iso}$	$\rho_s$	$\rho_{Sat}$
	(mm)				(%)	(%)	(%)				(g/cm³)	(g/cm³)
CPV71	113,11	2,3	12,48	0,14	7,73	4,43%	3,30%	1,34	4,75	38,06%	2,36	2,44
CPV24	106,39	2,1	11,17	0,12	7,37	5,35%	2,02%	2,65	3,80	34,02%	2,40	2,47
CPV59	121,78	2,4	8,29	0,09	5,76	3,23%	2,53%	1,28	2,53	30,52%	2,48	2,53
CPV67	116,92	2,3	7,33	0,07	5,95	2,74%	3,21%	0,85	1,38	18,83%	2,50	2,56
CPV61	116,38	2,3	7,29	0,07	4,48	2,93%	1,55%	1,89	2,81	38,55%	2,50	2,55

Tabela 34 CPV – Propriedades da curva e parâmetros elásticos (Ensaio uniaxial).

CP	Propriedades da curva						Parâmetros elásticos			
	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$	Tipo de Ruptura	E	$E_{Def}$	$\nu$	G
	(MPa)	(%)	(%)	(%)	(MPa)		(GPa)	(GPa)	—	(GPa)
CPV71	34,79	0,11	0,07	0,02	34,79	Fendilhamento	36,33	36,34	0,25	1,45
CPV24	37,72	0,11	0,06	0,03	37,72	Fendilhamento	35,15	35,71	0,23	1,43
CPV59	19,46	0,06	0,02	0,03	24,32	Colapso de poros	35,18	35,12	0,23	1,43
CPV67	49,00	0,11	0,04	0,03	49,00	Fendilhamento	49,94	49,69	0,27	1,96
CPV61	54,72	0,10	0,04	0,03	54,72	Fendilhamento	49,62	49,72	0,24	2,01

### 5.5.3.2. Ensaio uniaxial horizontal

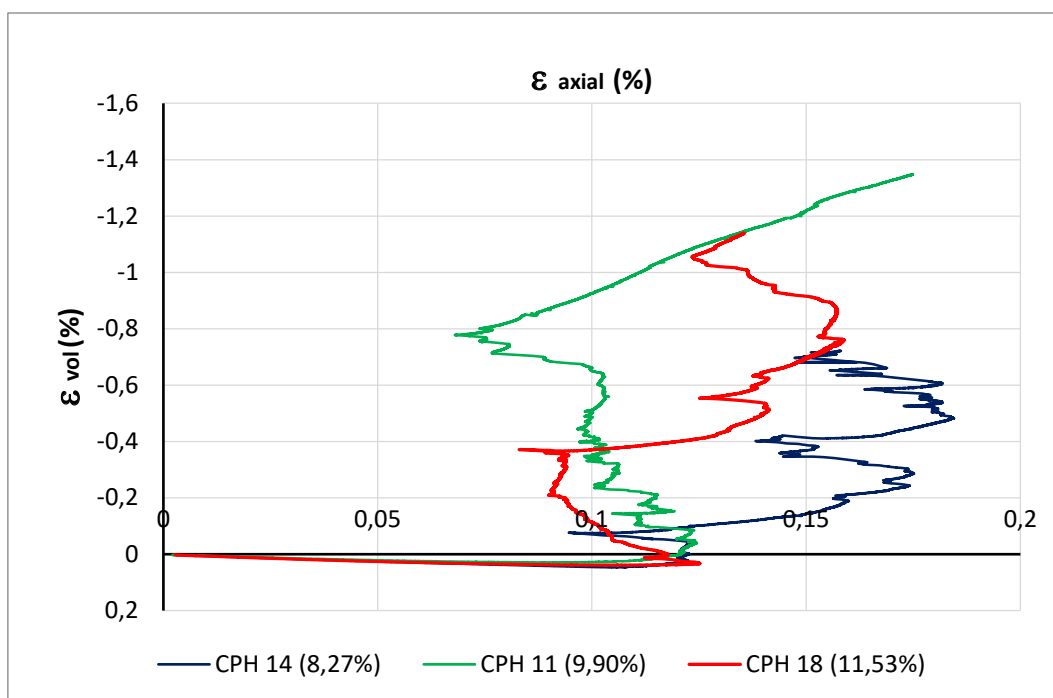
Na Figura 64 observa-se o gráfico compilado com três ensaios uniaxiais de corpos de prova horizontais variando a porosidade. Esperar-se-ia que a amostra de menor porosidade, CPH 14, tivesse a maior resistência.



**Figura 64** CPH - Tensão desviadora x Deformação axial (Ensaio uniaxial).

Os trechos pós ruptura seguiram padrões idênticos. Todos com alguma tendência de ciclos de aumento da resistência seguidos de quedas abruptas durante a fase residual. As amostras horizontais apresentaram um caráter mais plástico visto que todas apresentaram um padrão de deformação negativa no trecho pós-ruptura, algumas vezes quase paralelo a linha de carregamento.

A Figura 65 ilustra o comportamento da deformação axial *versus* volumétrica. Todos os exemplares apresentaram comportamento próximo, com um leve crescimento no volume durante o carregamento, seguido de uma diminuição abrupta do mesmo após a ruptura.



**Figura 65** CPH - Deformação volumétrica x Deformação axial (Ensaio uniaxial).

Os índices físicos calculados para interpretação dos ensaios são vistos na Tabela 35.

**Tabela 35** CPH – Índices físicos (Ensaio uniaxial).

CP	Dimensional		Propriedades dos vazios								Massa específica	
	H	H / D	$\eta_{Total}$	e	$\eta_w$	$\eta_{wI}$	$\eta_{wE}$	$R\eta_w$	$\Delta\eta$	$\eta_{Iso}$	$\rho_s$	$\rho_{Sat}$
	(mm)		(%)		(%)	(%)	(%)				(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )
CPH18	110,50	2,2	<b>11,53</b>	0,13	<b>6,57</b>	4,03%	2,55%	1,58	<b>4,96</b>	43,02%	2,39	2,45
CPH11	110,80	2,2	<b>9,90</b>	0,11	<b>7,41</b>	5,05%	2,36%	2,14	<b>2,49</b>	25,15%	2,43	2,51
CPH14	111,61	2,2	<b>8,27</b>	0,09	<b>7,04</b>	4,16%	2,88%	1,44	<b>1,23</b>	14,87%	2,48	2,55

Observando os corpos de prova superficialmente, CPH 14 quase não aparentava porosidade superficial, enquanto CPH 11 apresentou alguma porosidade distribuída com raros poros grandes. Já em CPH 18 foi observada uma grande quantidade de poros na superfície, incluindo poros grandes.

Com relação aos índices físicos, observou-se um forte aumento do percentual de poros isolados ( $\eta_{Iso}$ ) com o aumento da porosidade total. E que para CPH 11, o mais resistente, a razão entre as porosidades interconectadas ( $R\eta_w$ ) foi substancialmente maior.

É importante destacar que foi observada uma pequena porção lateral, de cor branco leitoso, extremamente densa, ao longo de toda altura de CPH 14. Este trecho

com uma porosidade aparente anormalmente baixa possivelmente foi o responsável pela resistência deste espécime ter sido inferior à CPH 11.

As propriedades da curva, bem como os parâmetros elásticos podem ser vistos na Tabela 36.

**Tabela 36** CPH – Propriedades da curva e parâmetros elásticos (Ensaio uniaxial).

CP	Propriedades da curva						Parâmetros elásticos			
	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$	Tipo de Ruptura	E	$E_{Def}$	$\nu$	G
	(MPa)	(%)	(%)	(%)	(MPa)		(GPa)	(GPa)	–	(GPa)
CPH18	65,32	0,12	0,05	0,03	65,32	Fendilhamento	47,78	50,23	0,26	1,90
CPH11	69,80	0,12	0,06	0,02	69,80	Fendilhamento	57,80	57,14	0,26	2,30
CPH14	64,75	0,12	0,05	0,03	64,75	Fendilhamento	57,30	57,42	0,24	2,30

O comportamento durante o carregamento foi similar nos três ensaios, com módulo de elasticidade (E) em torno de 48 GPa para amostra de maior porosidade, CPH 18. Já para as duas menos porosas, o módulo elástico ficou em torno de 58 GPa. O coeficiente de Poisson se manteve próximo de 0,25 em todos os ensaios uniaxiais, incluindo os verticais. Já o módulo de cisalhamento (G) foi de 1,90 GPa para o exemplar com a maior porosidade e igual a 2,30 GPa para as duas restantes.

É importante ressaltar desde já que tanto os ensaios uniaxiais verticais quanto os horizontais tiveram os parâmetros elásticos (E) e (G) bem próximos, com uma leve mudança de comportamento em um determinado valor de porosidade. Nos ensaios uniaxiais verticais, para algum valor de porosidade total acima de 7,33% os valores do módulo de elasticidade e cisalhamento diminuem cerca de 30%. E nos uniaxiais horizontais, uma redução de (E) e (G) em torno de 20% ocorre em algum valor de porosidade total acima de 9,90%.

#### 5.5.4. Ensaio de compressão triaxial

Os resultados dos ensaios triaxiais foram plotados em gráficos compilados de mesma tensão confinante, variando com a porosidade, igualmente feito para ensaios uniaxiais. Adotou-se a mesma sequência de cores citadas e utilizadas nos gráficos dos ensaios uniaxiais. A expectativa foi a mesma em relação a resistência à compressão. Esperou-se que esta fosse maior, quanto menor fosse a porosidade total, para uma mesma tensão de confinamento. Neste caso também esperaria-se um aumento da resistência com o aumento da tensão confinante.

Todos os parâmetros elásticos calculados nos ensaios uniaxiais foram calculados também neste tópico. Porém, aqui surgem duas variantes do módulo de deformação volumétrica (K). A primeira relacionada aos parâmetros elásticos da fase desviadora, calculado pela relação vista na equação 25 entre os Módulos de Elasticidade (E) e Poisson ( $\nu$ ), denominado ' $K_r$ '. E o segundo, calculado

diretamente no gráfico de tensão confinante *versus* deformação volumétrica, na fase hidrostática, também durante o descarregamento, representado por 'K'.

#### 5.5.4.1.

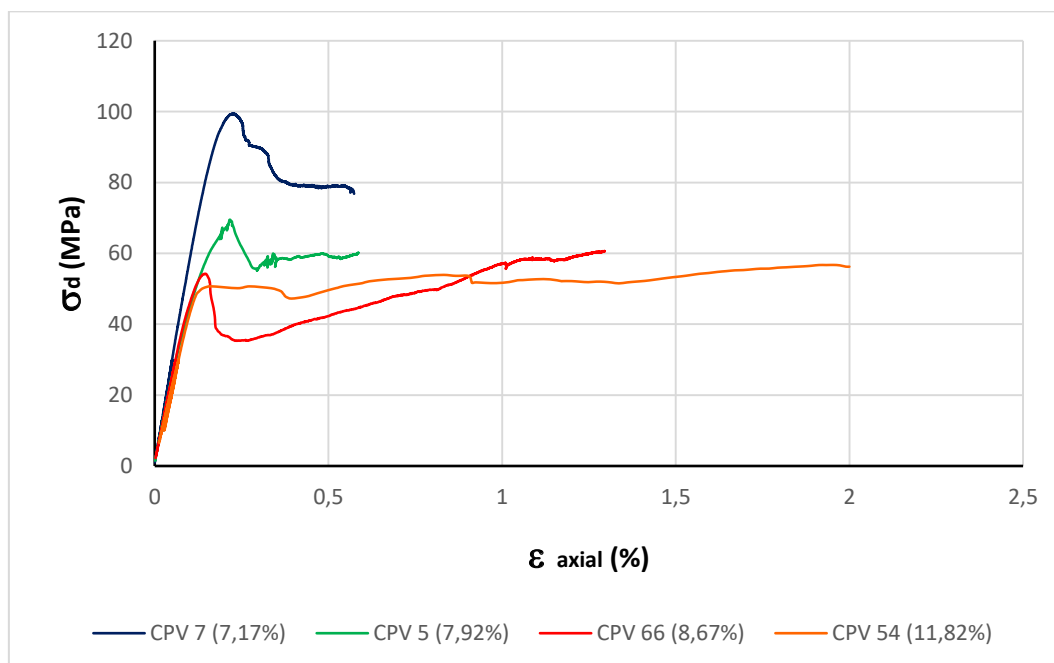
##### Ensaio triaxial vertical

Aqui foi avaliado o comportamento dos corpos de prova nos ensaios triaxiais, utilizando-se amostras verticais (CPV), com tensão confinante variando de 10 à 40 MPa, com incremento de 10 MPa entre cada grupo de tensão confinante. O travertino Romano mostrou-se um material bastante heterogêneo nas análises e ensaios mecânicos vistos até então, logo aqui as tabelas com índices físicos calculados e parâmetros elásticos serviram de grande valia para interpretar os resultados e tentar explicar eventuais mudanças de padrão, além é claro da observação dos aspectos dos corpos de prova.

#### 5.5.4.1.1.

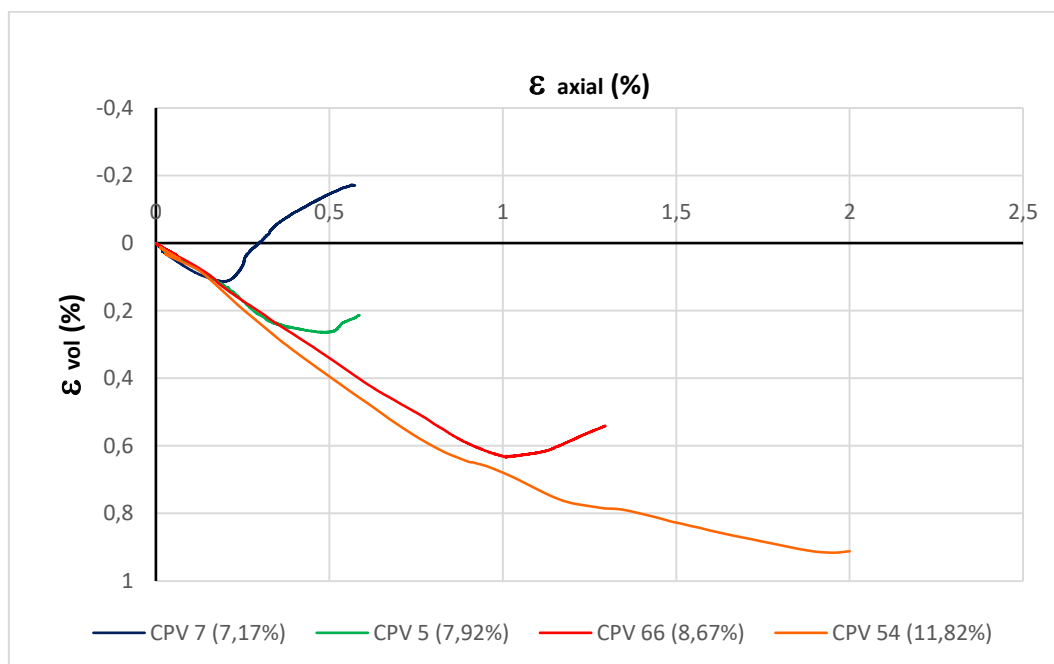
##### Ensaio triaxial vertical: $\sigma_c = 10$ MPa

Aqui os ensaios apresentaram um comportamento esperado, com os ensaios de maior resistência associados às menores porosidades. No entanto, apenas o ensaio de menor porosidade apresentou uma resistência significativamente maior, o que poderia indicar uma mudança de comportamento mecânico entre os valores de porosidade 7,17% (CPV 7) e 7,92% (CPV 5), como visto na Figura 66.



**Figura 66** CPV - Tensão desviadora x Deformação axial (Ensaio triaxial – 10 MPa).

Os trechos pós ruptura, em geral, seguiram com deformação positiva, diferente do que se observou nos ensaios uniaxiais. A amostra CPV 66 foi a única em que se evidenciou um claro aumento de resistência residual, similar ao visto nos ensaios uniaxiais. Já CPV 54 praticamente não apresentou pico, atingindo um limite de resistência e mantendo a curva constante. O gráfico que ilustra a deformação volumétrica *versus* deformação axial é visto na Figura 67.



**Figura 67** CPV – Deformação volumétrica x Deformação axial (Ensaio triaxial – 10 MPa).

Aqui todos apresentaram a mesma tendência no gráfico deformação volumétrica *versus* deformação axial, mas somente o exemplar de menor porosidade chegou a sofrer deformação volumétrica negativa, isto é, aumento de volume. Os índices físicos calculados deste grupo são vistos na Tabela 37.

**Tabela 37** CPV – Índices físicos (Ensaio triaxial – 10 MPa).

CP	Dimensional		Propriedades dos vazios								Massa específica	
	H	H / D	$\eta_{Total}$	e	$\eta_w$	$\eta_{wI}$	$\eta_{wE}$	$R\eta_w$	$\Delta\eta$	$\eta_{Iso}$	$\rho_s$	$\rho_{Sat}$
	(mm)		(%)		(%)	(%)	(%)		(%)		(g/cm³)	(g/cm³)
CPV54	106,94	2,1	11,82	0,13	8,42	4,65%	3,77%	1,23	3,40	28,76%	2,38	2,46
CPV66	115,18	2,3	8,67	0,09	6,13	3,17%	2,96%	1,07	2,54	29,30%	2,47	2,53
CPV5	110,09	2,2	7,92	0,08	6,48	3,28%	3,20%	1,03	1,44	18,18%	2,49	2,55
CPV7	109,01	2,2	7,17	0,07	4,42	3,24%	1,18%	2,75	2,75	38,35%	2,51	2,55

Já as propriedades da curva e parâmetros elásticos deste grupo de tensão confinante podem ser vistas na Tabela 38.

**Tabela 38** CPV – Propriedades da curva e parâmetros elásticos (Ensaio triaxial – 10 MPa).

CP	Propriedades da curva						Parâmetros elásticos					
	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$	Tipo de Ruptura	E	$E_{Def}$	$\nu$	G	$K_r$	K
	(MPa)	(%)	(%)	(%)	(MPa)		(GPa)	(GPa)	–	(GPa)	(GPa)	(GPa)
CPV54	50,69	0,13	0,04	0,11	56,73	Cisalhamento	49,02	46,16	0,28	1,91	37,22	20,53
CPV66	54,21	0,17	0,03	0,09	60,66	Cisalhamento / Colapso	48,85	46,67	0,25	1,95	32,56	20,42
CPV5	69,47	0,22	0,04	0,13	69,47	Cisalhamento	55,56	27,33	0,26	2,20	39,22	21,04
CPV7	99,40	0,22	0,06	0,11	99,40	Cisalhamento	63,13	59,09	0,20	2,62	35,44	24,55

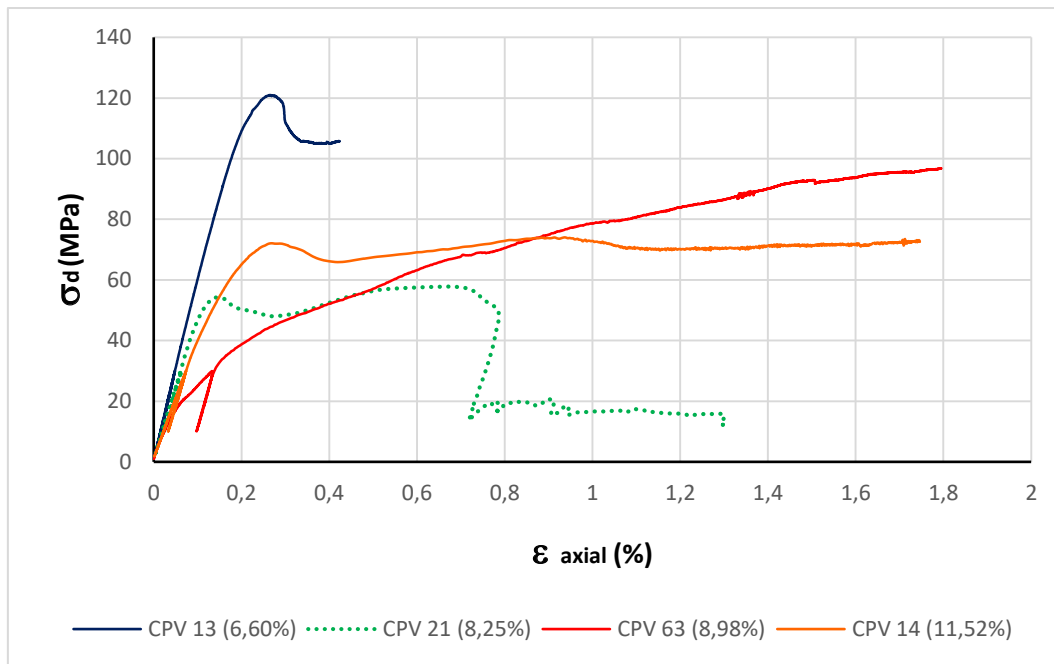
Durante o carregamento, todos os ensaios apresentaram comportamento similar, com módulo de elasticidade em torno de 50 MPa e módulo de cisalhamento pouco abaixo de 2,00 GPa, porém entre as amostras com porosidade 7,17% e 7,92% aconteceu uma mudança brusca destes parâmetros. No gráfico isto é mais perceptível apenas para a amostra de menor porosidade, que tem a maior inclinação durante o carregamento. Os módulos de cisalhamento (G) e deformação volumétrica (K) foram bem próximos entre os exemplares de maior porosidade e o mesmo aconteceu para os de menor porosidade. Porém, tanto (G), quanto (E), ( $K_r$ ) e mesmo (K) apresentaram alguma variação abrupta entre as amostras CPV 5 e CPV 7. Este comportamento já foi observado nos ensaios uniaxiais verticais, onde num intervalo de porosidade total bem próximo, entre 7 e 8%, ocorreu uma mudança brusca dos parâmetros elásticos.

#### 5.5.4.1.2.

##### Ensaio triaxial vertical: $\sigma_c = 20$ MPa

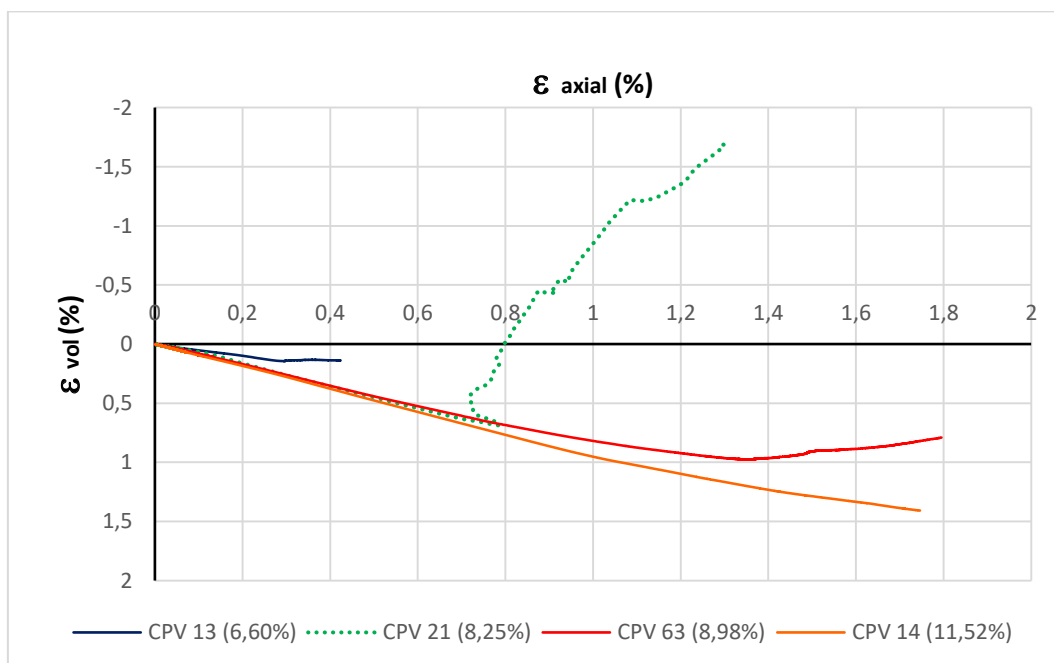
Neste grupo de confinamento foi possível observar, na Figura 68, a amostra CPV 21 com o mesmo padrão observado em CPV 59 (ensaio uniaxial vertical), além de uma resistência muito aquém do esperado, o que já indicaria a ocorrência de colapso de poros. A amostra CPV 14, a mais porosa deste grupo de confinamento, comportou-se similar a amostra mais porosa do ensaio triaxial vertical de confinante 10 MPa, porém com um suave pico. Já a amostra CPV 63 apresentou um comportamento observado exclusivamente nela para toda gama de ensaios, com aumento de deformação bem maior sob esforço menor que nos outros exemplares.

Todos os ensaios deste grupo apresentaram picos pouco pronunciados, exceto pela amostra de menor porosidade. O espécime CPV 13, além de apresentar um pico mais pronunciado, também apresentou uma resistência substancialmente maior do que as outras, o que poderia indicar uma mudança de comportamento no travertino entre os valores de porosidade 6,60% e 8,25%.



**Figura 68** CPV - Tensão desviadora x Deformação axial (Ensaio triaxial – 20 MPa).

Na Figura 69 observa-se o comportamento da deformação volumétrica para este grupo de confinamento (20MPa). Praticamente nenhuma sofreu aumento de volume, a não ser o exemplar que colapsou.



**Figura 69** CPV – Deformação volumétrica x Deformação axial (Ensaio triaxial – 20 MPa).

A Tabela 39 não mostrou alteração brusca nos valores dos índices físicos, a não ser pela razão de porosidades interconectadas de CPV13 que deu inferior a um. Isto significa que os a quantidade de vazios externos é maior do que internos, sendo esta disposição bastante rara no conjunto de corpos de prova. No entanto, este fator não provocou modificações na resistência, sendo inclusive este exemplar o mais resistente e com a curva de ensaio mais coerente.

**Tabela 39** CPV – Índices físicos (Ensaio triaxial – 20 MPa).

CP	Dimensional		Propriedades dos vazios								Massa específica	
	H	H / D	$\eta_{Total}$	e	$\eta_w$	$\eta_{wI}$	$\eta_{wE}$	$R\eta_w$	$\Delta\eta$	$\eta_{Iso}$	$\rho_s$	$\rho_{Sat}$
	(mm)		(%)		(%)	(%)	(%)		(%)		(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )
CPV14	107,40	2,1	11,52	0,13	6,12	4,71%	1,41%	3,34	5,40	46,88%	2,39	2,45
CPV63	113,37	2,3	8,98	0,09	6,41	2,87%	3,53%	0,81	2,57	28,62%	2,46	2,52
CPV21	107,38	2,1	8,25	0,08	5,33	3,45%	1,88%	1,84	2,92	35,39%	2,48	2,53
CPV13	109,00	2,2	6,60	0,07	5,09	2,45%	2,64%	0,93	1,51	22,88%	2,52	2,57

As propriedades dos ensaios deste grupo de confinamento, bem como os parâmetros elásticos são vistos na Tabela 40. O módulo de elasticidade sofreu uma mudança abrupta entre as amostras CPV 21 e CPV 13. O mesmo ocorreu para o módulo de cisalhamento e módulo volumétrico das duas fases, porém estes também sofrem outra mudança brusca entre CPV 14 e CPV 63.

**Tabela 40** CPV – Propriedades da curva e parâmetros elásticos (Ensaio triaxial – 20 MPa).

CP	Propriedades da curva						Parâmetros elásticos					
	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$	Tipo de Ruptura	E	$E_{Def}$	$\nu$	G	$K_r$	K
	(MPa)	(%)	(%)	(%)	(MPa)		(GPa)	(GPa)	–	(GPa)	(GPa)	(GPa)
CPV14	71,96	0,28	0,01	0,25	74,03	Cisalhamento	49,50	36,84	0,05	2,36	18,33	36,09
CPV63	96,79	1,5	0,30	0,80	96,79	Cisalhamento	50,00	10,42	0,22	2,05	30,00	24,10
CPV21	54,20	0,17	0,04	0,16	57,81	Colapso de poros	50,03	46,80	0,24	2,02	31,76	24,32
CPV13	120,99	0,27	0,06	0,14	120,99	Cisalhamento	68,97	59,79	0,29	2,67	55,56	23,41

Novamente os parâmetros elásticos voltaram a sofrer mudanças abruptas em algum intervalo de porosidade total entre 7 e 8%. Neste caso, entre 6,60% (CPV 13) e 8,25% (CPV 21). O intervalo citado também marcou uma significativa diferença de resistência mecânica entre o espécime menos poroso e os outros.

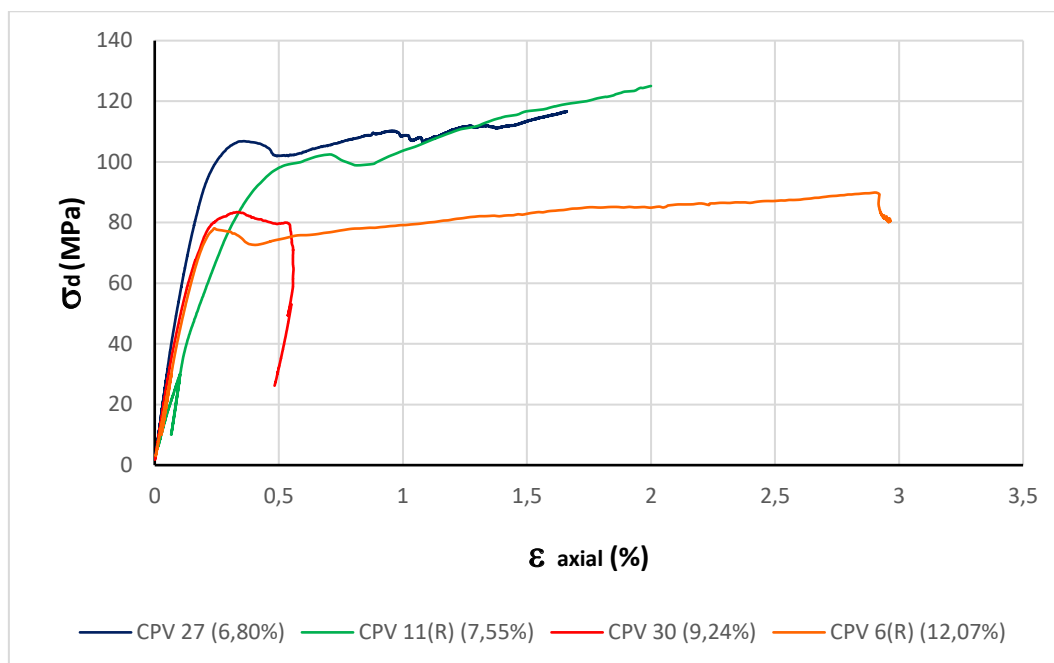
#### 5.5.4.1.3.

##### Ensaio triaxial vertical: $\sigma_c = 30$ MPa

Em ambos ensaios triaxiais de 30 MPa, amostragem horizontal e vertical, houve uma pequena mudança que poderá fornecer uma noção quanto à influência da velocidade de carregamento no ensaio. Em todos os ensaios uni e triaxiais a taxa

de carregamento foi de 0,05% por minuto. Porém, nos triaxiais deste grupo de confinamento, esta mesma taxa foi adotada por segundo, ou seja, um aumento de 60 vezes na velocidade. Para efeito de comparação, foram realizados dois ensaios com cada taxa de carregamento. Aos espécimes carregados com a taxa mais alta foi adicionada a sigla 'R', referindo-se que o ensaio foi mais rápido que os demais.

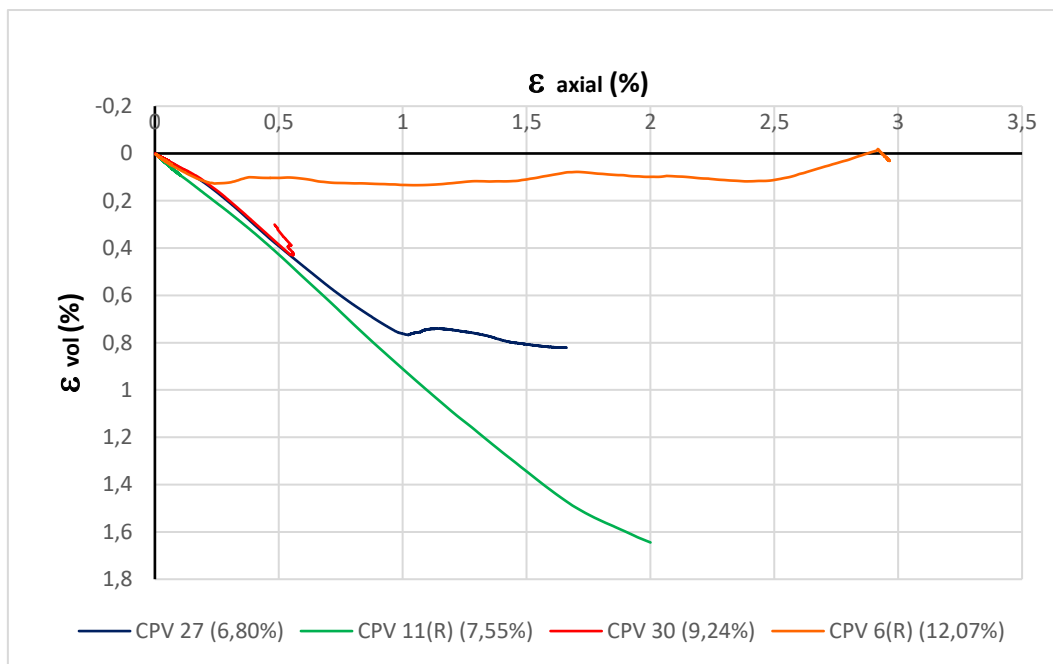
A Figura 70 mostra que a inclinação dos carregamentos foi um pouco mais dispersa que nos outros casos, com módulos de elasticidade (E) ainda na mesma faixa dos outros ensaios analisados, isto é, próximo de 50MPa para a maioria deles, e, somente para o espécime de menor porosidade, próximo de 65 MPa.



**Figura 70** CPV - Tensão desviadora x Deformação axial (Ensaio triaxial – 30 MPa).

Nota-se que houve rompimento da membrana em CPV 30 devido à queda abrupta a partir de um ponto. Todas os ensaios formaram picos suaves e apresentaram tendência de aumento da resistência residual, independente da porosidade. Isto poderia indicar que o material, após sofrer ruptura, sofreu um rearranjo interno que, possivelmente auxiliado pelo preenchimento interno de pó de travertino e argamassa nas bordas, além da tensão confinante maior, apresentou um caráter mais plástico. Entretanto, cabe ressaltar que esse comportamento também foi visto nos ensaios uniaxiais, os quais não tiveram preenchimento algum.

A Figura 71 ilustra a deformação volumétrica *versus* deformação axial e nota-se que, até onde o ensaio foi mantido, apenas o espécime de maior porosidade chegou a sofrer um pequeno aumento de volume.



**Figura 71** CPV – Deformação volumétrica x Deformação axial (Ensaio triaxial – 30 MPa).

Ao analisar os ensaios de porosidades mais altas e mais baixas, cada par sob a mesma taxa de carregamento, ainda se observou a maior resistência nas menores porosidades. Também foi observada uma pequena influência da taxa de carregamento nos resultados quando comparadas curvas de menores ou de maiores porosidades sob taxas distintas. Frente a heterogeneidade do material poroso, esta diferença foi pouco expressiva.

A Tabela 41 mostra os índices físicos calculados para comparação de propriedades.

**Tabela 41** CPV – Índices físicos (Ensaio triaxial – 30 MPa).

CP	Dimensional		Propriedades dos vazios								Massa específica	
	H	H/D	$\eta_{Total}$	e	$\eta_w$	$\eta_{wI}$	$\eta_{wE}$	$R\eta_w$	$\Delta\eta$	$\eta_{Iso}$	$\rho_s$	$\rho_{sat}$
	(mm)		(%)		(%)	(%)	(%)		(%)		(g/cm³)	(g/cm³)
CPV6 R	106,70	2,1	<b>12,07</b>	0,13	<b>7,86</b>	4,34%	3,52%	1,23	<b>4,21</b>	34,88%	2,37	2,45
CPV30	107,06	2,1	<b>9,24</b>	0,10	<b>7,14</b>	3,77%	3,37%	1,12	<b>2,10</b>	22,73%	2,45	2,52
CPV11 R	106,32	2,1	<b>7,55</b>	0,08	<b>4,51</b>	3,60%	0,91%	3,96	<b>3,04</b>	40,26%	2,50	2,54
CPV27	108,58	2,2	<b>6,80</b>	0,07	<b>5,00</b>	3,53%	1,47%	2,40	<b>1,80</b>	26,47%	2,52	2,57

Observa-se na Tabela 42 as propriedades das curvas e parâmetros elásticos. O espécime CPV 11 apresentou uma deformação axial bastante superior aos outros. Isto pode estar associado ao fato de que foi o que também mais aumentou sua resistência residual. Novamente, entre as amostras menos e mais porosas, com ambas as taxas de carregamento, foi observada uma variação abrupta no módulo de elasticidade (E) e cisalhamento (G) na faixa de porosidade total em torno de 7%.

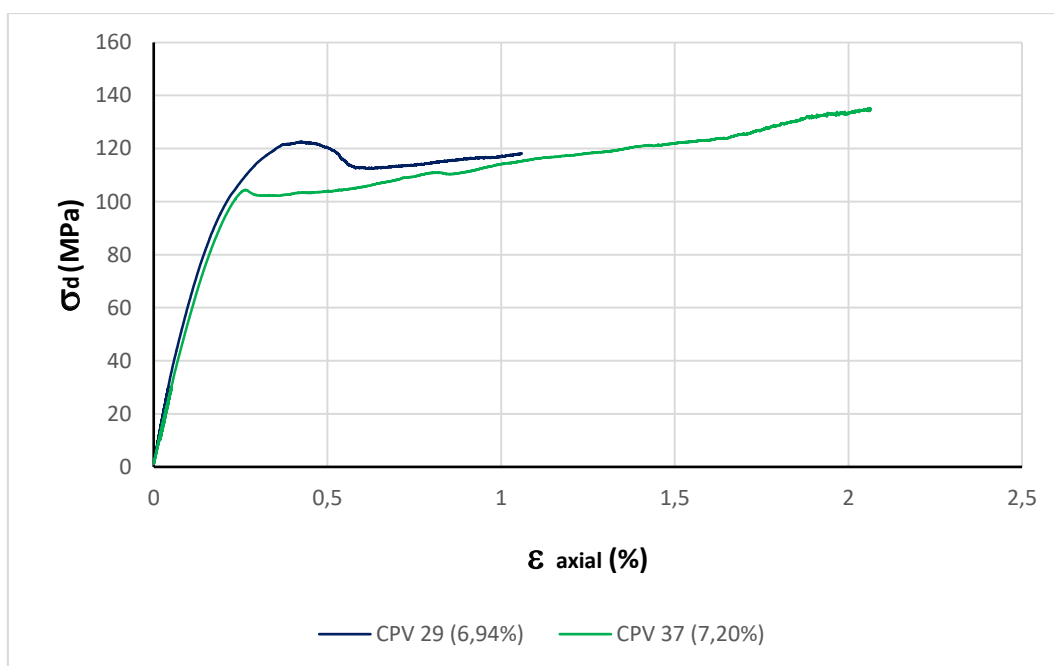
**Tabela 42** CPV – Propriedades da curva e parâmetros elásticos (Ensaio triaxial – 30 MPa).

CP	Propriedades da curva						Parâmetros elásticos					
	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$	Tipo de Ruptura	E	$E_{Def}$	$\nu$	G	$K_r$	K
	(MPa)	(%)	(%)	(%)	(MPa)		(GPa)	(GPa)	–	(GPa)	(GPa)	(GPa)
CPV6 R	78,11	0,26	0,09	0,13	89,88	Cisalhamento	48,57	38,46	0,23	1,98	29,57	24,63
CPV30	83,45	0,28	0,05	0,17	83,45	Cisalhamento	54,05	41,62	0,26	2,15	37,04	23,59
CPV11 R	102,47	0,67	0,04	0,62	125,04	Cisalhamento	46,83	21,04	0,24	1,88	30,48	25,39
CPV27	106,84	0,37	0,05	0,25	116,67	Cisalhamento	64,52	46,90	0,23	2,63	39,22	25,89

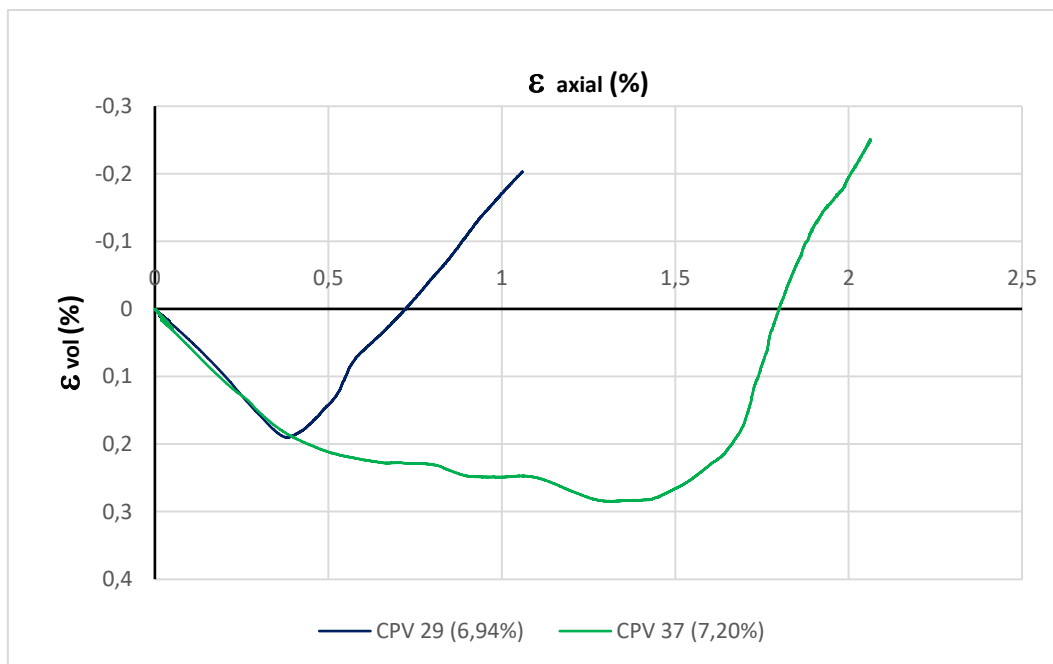
#### 5.5.4.1.4.

#### Ensaio triaxial vertical: $\sigma_c = 40$ MPa

No grupo de confinamento 40 MPa, somente houve dois ensaios triaxiais. Apesar de menos curvas para comparação, o carregamento foi similar em ambos, com módulo de elasticidade em torno de 65 MPa. A diferença de porosidade entre elas foi muito pequena e, mesmo assim, os valores de resistência e comportamento das curvas mostraram significativas diferenças, com a amostra menos porosa apresentando um pico de ruptura mais expressivo e aumento de resistência residual menor do que a mais porosa, como pode ser visto na Figura 72.

**Figura 72** CPV - Tensão desviadora x Deformação axial (Ensaio triaxial – 40 MPa).

Ambas sofreram variação de volume positivo após determinado momento de crescimento da resistência residual, contudo CPV 37 deformou no eixo axial expressivamente mais do que CPV 29, conforme visto na Figura 73.



**Figura 73** CPV – Deformação volumétrica x Deformação axial (Ensaio triaxial – 40 MPa).

A Tabela 43 mostra os índices físicos deste grupo de ensaios. As porosidades totais foram muito próximas, junto a índice de vazios idênticos, porosidade interna e externa próximas, porosidade isolada similar e massa específica seca idêntica. Ambos os espécimes apresentaram porosidade, observada na superfície, concentrada na base, porém CPV 29 também distribuída ao centro e com poros mais arredondados.

**Tabela 43** CPV – Índices físicos (Ensaio triaxial – 40 MPa).

CP	Dimensional		Propriedades dos vazios								Massa específica	
	H	H / D	$\eta_{Total}$	e	$\eta_w$	$\eta_{wi}$	$\eta_{we}$	$R\eta_w$	$\Delta\eta$	$\eta_{Iso}$	$\rho_s$	$\rho_{sat}$
	(mm)		(%)		(%)	(%)	(%)		(%)		(g/cm³)	(g/cm³)
CPV 37	109,02	2,2	<b>7,20</b>	0,07	<b>5,02</b>	3,12%	1,90%	1,64	<b>2,18</b>	30,28%	2,51	2,54
CPV29	107,52	2,1	<b>6,94</b>	0,07	<b>5,34</b>	3,71%	1,63%	2,28	<b>1,60</b>	23,05%	2,51	2,55

A Tabela 44 mostra as propriedades e parâmetros elásticos deste grupo. Não houve nenhuma mudança abrupta de nenhum parâmetro, a não ser  $K_r$ , o que não é muito significativo. Contudo, a maior porosidade aqui foi de 7,20%. Nos ensaios anteriores haviam maiores. Ainda assim, até agora foi percebido que aproximadamente entre 7 e 8% ocorreu uma variação brusca em alguns parâmetros elásticos, em especial módulo de elasticidade (E) de cisalhamento (G). Este valor limite poderia estar então entre 7,20% e 8,00%, o que explicaria uma mudança abrupta de valores entre porosidades tão próximas.

**Tabela 44** CPV – Propriedades da curva e parâmetros elásticos (Ensaio triaxial – 40 MPa).

CP	Propriedades da curva						Parâmetros elásticos					
	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$	Tipo de Ruptura	E	$E_{Def}$	$\nu$	G	$K_r$	K
	(MPa)	(%)	(%)	(%)	(MPa)		(GPa)	(GPa)	–	(GPa)	(GPa)	(GPa)
CPV 37	104,36	0,25	0,08	0,14	135,18	Cisalhamento	64,52	42,35	0,26	2,56	44,44	20,62
CPV29	122,60	0,40	0,10	0,18	122,60	Cisalhamento	67,33	57,50	0,33	2,53	67,33	20,62

Os valores encontrados dos parâmetros elásticos, como módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, para amostragem vertical foram muito próximos dos encontrados por Luza (2014) e Kiewiet (2015).

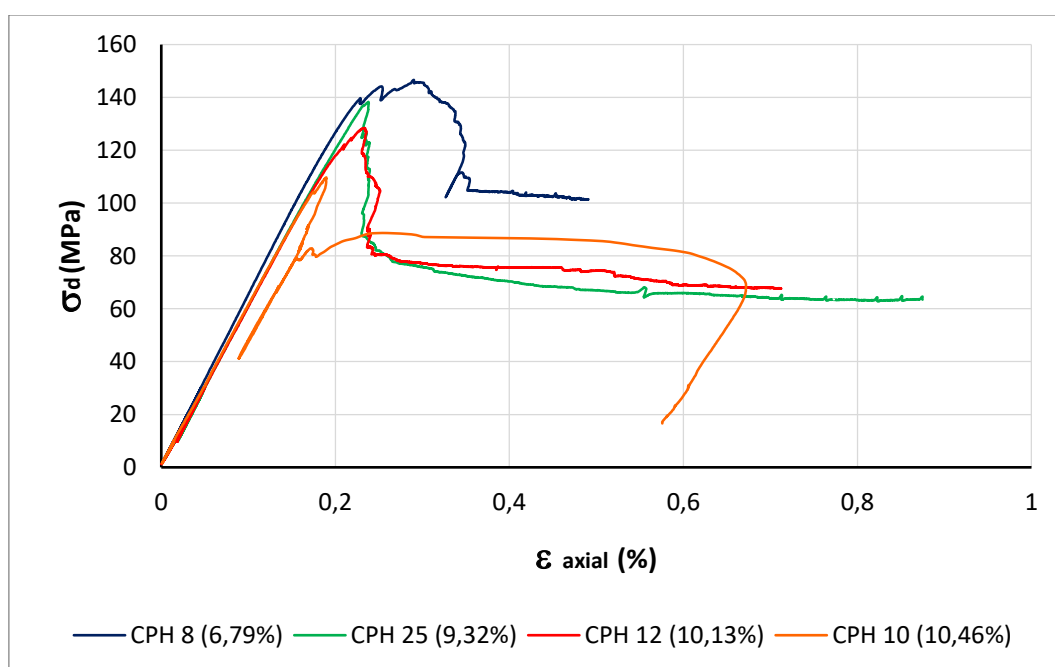
### 5.5.4.2.

#### Ensaio triaxial horizontal

#### 5.5.4.2.1.

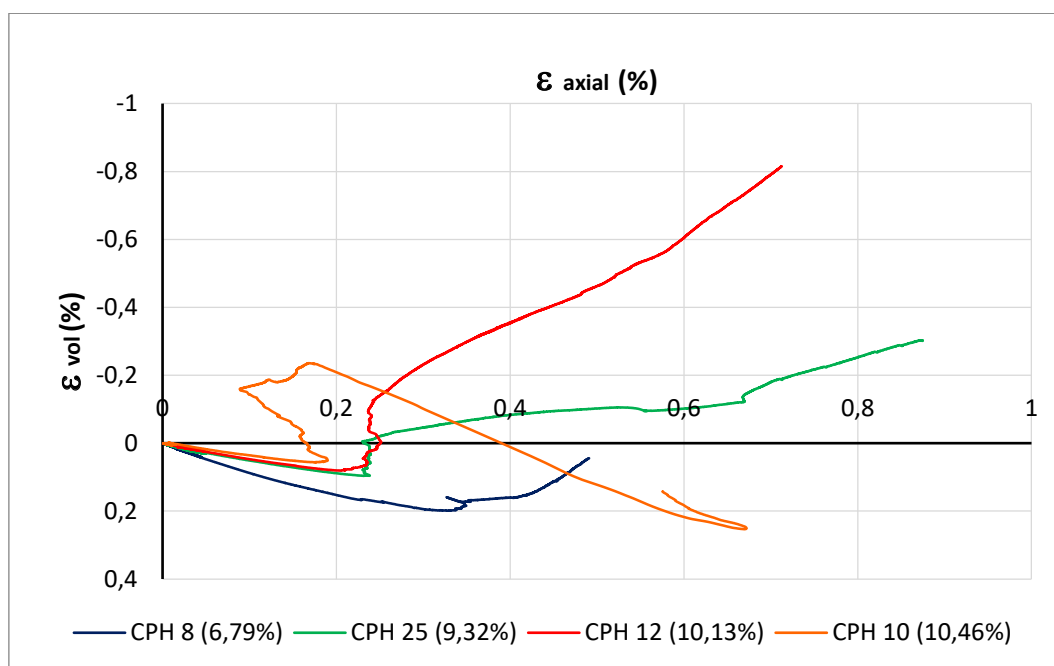
#### Ensaio triaxial horizontal: $\sigma_c = 10$ MPa

Aqui também houve proporcionalidade quanto a maior resistência associada à menor porosidade, sob a mesma tensão confinante. As porosidades foram bem próximas entre os exemplares, exceto por CPH 8 que apresentou uma diferença mais significativa. A Figura 74 mostra estes resultados na curva de tensão desviadora *versus* deformação axial. O comportamento durante o carregamento foi bem parecido, com módulos de elasticidade em torno de 65 MPa, exceto para CPH10 que apresentou um valor cerca de 30% menor. Tanto o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), como o módulo de cisalhamento (G) apresentaram valores muito fora do padrão para os espécimes CPH 10 e CPH 8.

**Figura 74** CPH - Tensão desviadora x Deformação axial (Ensaio triaxial – 10 MPa).

Os picos em geral foram acentuados e o trecho de deformação após a ruptura foi subvertical, exceto pelas amostras mais e menos porosas que apresentaram um comportamento mais plástico. Não se observou aumento da resistência na fase residual neste grupo de confinamento. Observou-se a ocorrência de furo na membrana, em CPH 10, no final do ensaio, pouco depois da deformação axial 0,6%.

A Figura 75 mostra a deformação volumétrica *versus* deformação axial. Praticamente todos apresentaram algum aumento de volume pouco depois da ruptura. O recuo no final da curva de CPH 10 foi devido ao vazamento após a ruptura parcial da membrana.



**Figura 75** CPH – Deformação volumétrica x Deformação axial (Ensaio triaxial – 10 MPa).

A Tabela 45 mostra os índices físicos calculados deste grupo de ensaios. Nenhuma mudança brusca de valores foi observada e os dados foram coerentes com os resultados de resistência apresentados.

**Tabela 45** CPH – Índices físicos (Ensaio triaxial – 10 MPa).

CP	Dimensional		Propriedades dos vazios								Massa específica	
	H	H / D	$\eta_{Total}$	e	$\eta_w$	$\eta_{wI}$	$\eta_{wE}$	$R\eta_w$	$\Delta\eta$	$\eta_{iso}$	$\rho_s$	$\rho_{Sat}$
	(mm)		(%)		(%)	(%)	(%)		(%)		(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )
CPH10	108,31	2,2	<b>10,46</b>	0,11	<b>7,11</b>	4,84%	2,27%	2,13	<b>3,35</b>	32,03%	2,42	2,49
CPH12	109,51	2,2	<b>10,13</b>	0,11	<b>7,44</b>	4,14%	3,30%	1,25	<b>2,69</b>	26,55%	2,43	2,50
CPH25	108,72	2,2	<b>9,32</b>	0,10	<b>5,75</b>	4,03%	1,72%	2,34	<b>3,57</b>	38,30%	2,45	2,51
CPH8	109,72	2,2	<b>6,79</b>	0,07	<b>5,99</b>	3,11%	2,89%	1,08	<b>0,80</b>	11,78%	2,52	2,58

Os parâmetros elásticos e propriedades das curvas podem ser observados na Tabela 46. Como citado, há dúvidas quanto à confiabilidade de alguns parâmetros elásticos calculados neste grupo, em especial das amostras mais e menos porosas. No entanto, o módulo de elasticidade apresentou boa confiabilidade e coerência, já que os resultados mais fora dos padrões foram justamente os da curva de deformação volumétrica. Mesmo assim, observou-se uma alteração brusca nos parâmetros elásticos de CPH 10, em especial módulo de elasticidade (E) e de cisalhamento (G) para o restante, em torno da porosidade total 10%.

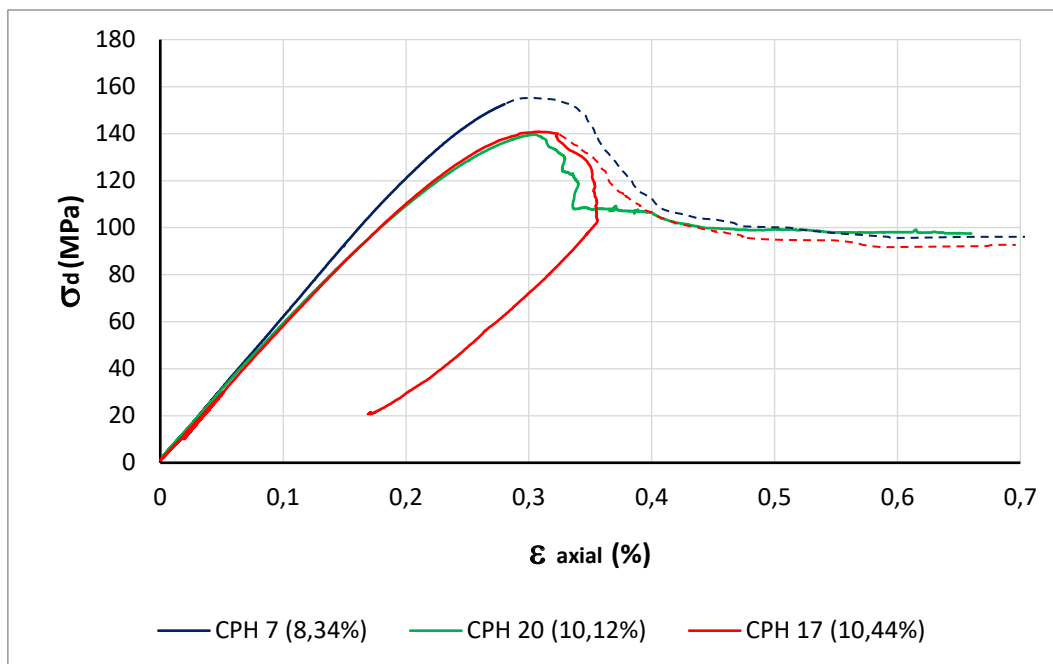
**Tabela 46** CPH – Propriedades da curva e parâmetros elásticos (Ensaio triaxial - 10 MPa).

CP	Propriedades da curva						Parâmetros elásticos					
	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$	Tipo de Ruptura	E	$E_{Def}$	$\nu$	G	$K_r$	K
	(MPa)	(%)	(%)	(%)	(MPa)		(GPa)	(GPa)	—	(GPa)	(GPa)	(GPa)
CPH10	109,74	0,18	0,07	0,05	109,74	Fendilhamento / Cisalhamento	41,07	48,08	0,15	1,79	19,30	20,01
CPH12	128,41	0,22	0,09	0,08	128,41	Cisalhamento	65,62	56,39	0,28	2,56	49,90	18,91
CPH25	138,31	0,22	0,07	0,10	138,31	Cisalhamento	65,53	60,76	0,23	2,67	39,94	21,05
CPH8	146,64	0,28	0,06	0,18	146,64	Cisalhamento	68,02	66,55	0,06	3,22	25,50	39,56

#### 5.5.4.2.2.

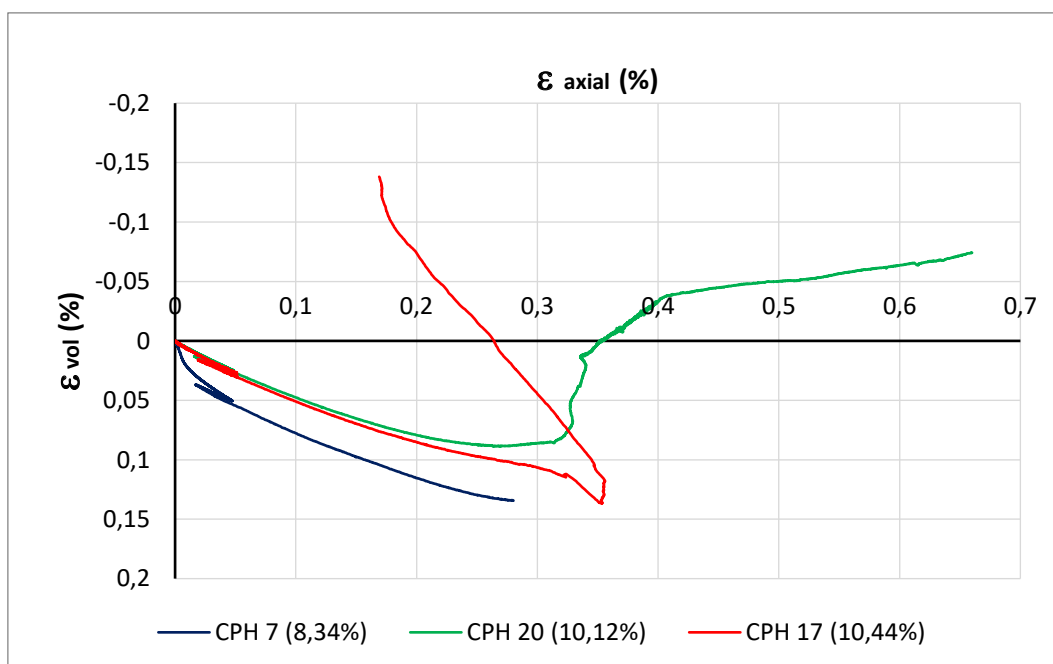
#### Ensaio triaxial horizontal: $\sigma_c = 20$ MPa

A Figura 76 ilustra as curvas de tensão desviadora *versus* deformação axial neste grupo. Infelizmente dois ensaios sofreram perfuração na membrana, porém em um deles a trajetória foi satisfatória e a resistência pode ser inferida, e no outro foi medida, uma vez que o vazamento ocorreu após a ruptura. Os valores de porosidade foram semelhantes, exceto por CPH 7, que apresentou um valor de porosidade significativamente menor do que os outros dois espécimes, enquanto a inclinação do carregamento e o valor de resistência na ruptura foram superiores. As linhas tracejadas representam a inferência, cada uma na cor da amostra correspondente, da curva tensão *versus* deformação.



**Figura 76** CPH - Tensão desviadora x Deformação axial (Ensaio triaxial – 20 MPa).

A Figura 77 mostra a curva deformação volumétrica *versus* deformação axial, onde não fosse o vazamento, provavelmente as outras duas curvas acompanhariam o mesmo trajeto observado em CPH 20, evidentemente, nas devidas proporções. Neste grupo de ensaios houve uma tendência de aumento de volume observado no intervalo aproximado entre as deformações axiais 0,3 e 0,6%.



**Figura 77** CPH – Deformação volumétrica x Deformação axial (Ensaio triaxial – 20 MPa).

A Tabela 47 apresenta os índices físicos calculados. Chama atenção a enorme diferença de poros internos em relação aos externos em CPH 7, de quase dez vezes. Uma diferença tão grande de poros internos não foi observada em outros ensaios, no entanto o valor de resistência à ruptura foi maior em coerente proporção com a diminuição de porosidade, como ocorreu nos outros ensaios observados. Isto indicaria que a diferença de poros internos e externos não foi de grande relevância para a resistência da rocha.

**Tabela 47** CPH – Índices físicos (Ensaio triaxial – 20 MPa).

CP	Dimensional		Propriedades dos vazios								Massa específica	
	H	H/D	$\eta_{Total}$	e	$\eta_w$	$\eta_{wI}$	$\eta_{wE}$	$R\eta_w$	$\Delta\eta$	$\eta_{iso}$	$\rho_s$	$\rho_{sat}$
	(mm)		(%)		(%)	(%)	(%)		(%)		(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )
CPH17	110,86	2,2	<b>10,44</b>	0,11	<b>6,53</b>	3,54%	2,99%	1,18	<b>3,91</b>	37,45%	2,42	2,48
CPH20	110,91	2,2	<b>10,12</b>	0,11	<b>6,47</b>	3,55%	2,91%	1,22	<b>3,65</b>	36,07%	2,43	2,49
CPH7	107,49	2,1	<b>8,34</b>	0,09	<b>4,00</b>	3,61%	0,39%	9,26	<b>4,34</b>	52,04%	2,47	2,51

Observou-se nos corpos de prova que CPH 7 apresentou uma região de cor mais leitosa, bem mais densa que o restante do corpo. Isto indicaria que, apesar de ser a amostra menos porosa e mais resistente, a sua tensão na ruptura em condições de porosidade mais bem distribuídos poderia ser maior. Já CPH 17 foi muito pouco superior em porosidade a CPH 20, ainda assim teve uma leve superioridade na resistência. Observando os corpos de prova, notou-se que CPH 20 apresentou poros mais concentrados na base, enquanto em CPH 17 predominaram poros de tamanhos variados, porém bem distribuídos ao longo do espécime. A melhor distribuição dos poros em CPH 17 possivelmente foi a causa de sua maior resistência.

A Tabela 48 ilustra os parâmetros elásticos e propriedades da curva. Observou-se uma significativa variação nos módulos de elasticidade (E), cisalhamento (G) e volumétrico (K) de CPH 20 para CPH 7, o que poderia indicar alguma mudança de comportamento mecânico entre os valores de porosidade total 8,34 e 10,12%.

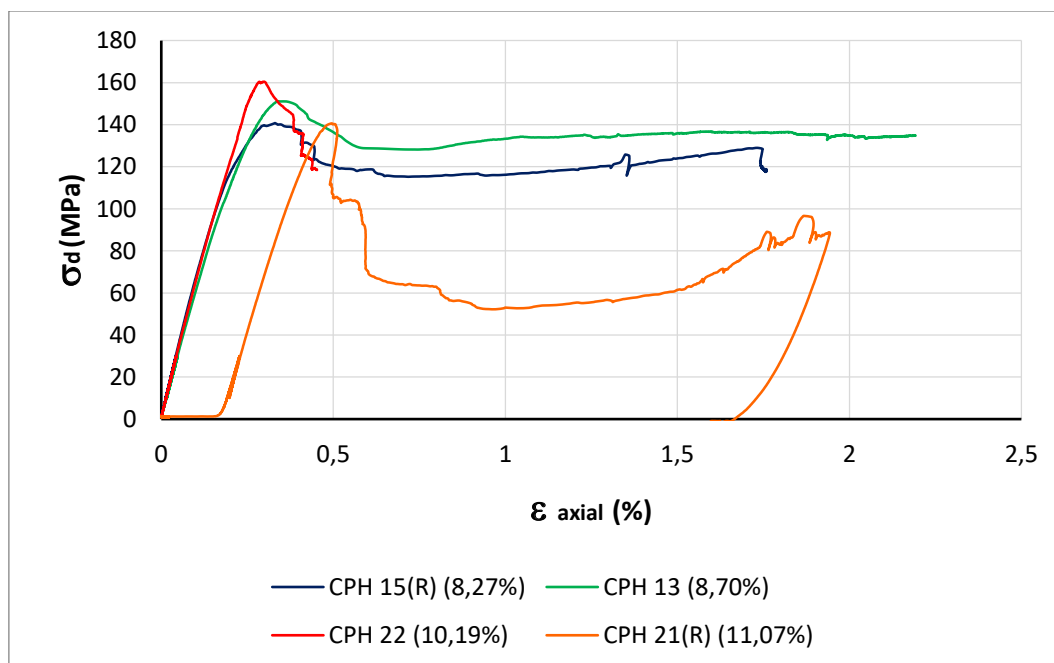
**Tabela 48** CPH – Propriedades da curva e parâmetros elásticos (Ensaio triaxial - 20 MPa).

CP	Propriedades da curva						Parâmetros elásticos					
	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$	Tipo de Ruptura	E	$E_{Def}$	$\nu$	G	$K_r$	K
	(MPa)	(%)	(%)	(%)	(MPa)		(GPa)	(GPa)	—	(GPa)	(GPa)	(GPa)
CPH17	<b>140,84</b>	0,32	0,09	0,11	140,84	Fendilhamento / Cisalhamento	61,54	59,93	0,28	2,40	47,62	20,83
CPH20	<b>139,63</b>	0,31	0,12	0,08	139,63	Cisalhamento	61,35	59,09	0,31	2,34	53,33	19,61
CPH7	<b>152,55</b>	0,27	0,07	0,13	152,55	Cisalhamento	65,36	62,50	0,26	2,60	44,74	28,86

### 5.5.4.2.3.

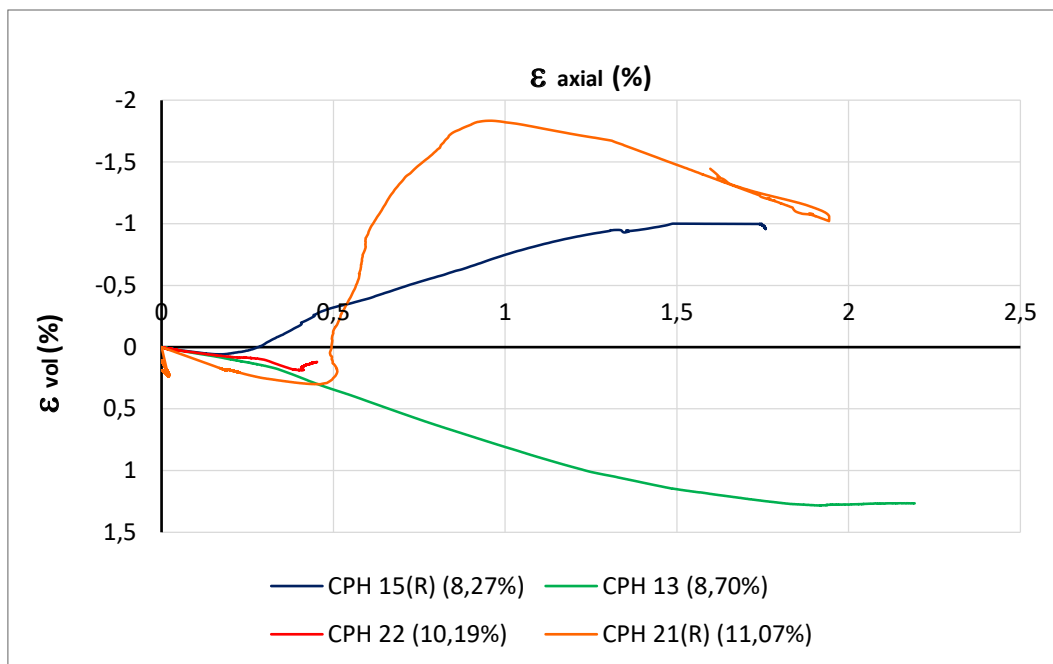
#### Ensaio triaxial horizontal: $\sigma_c = 30$ MPa

A Figura 78 mostra o comportamento tensão *versus* deformação para este grupo. Não se observou maior resistência proporcional a menor porosidade. Aqui, como nos triaxiais de 30 MPa verticais, houve ensaios com a taxa de carregamento padrão para todos, 0,05% por minuto, e ensaios com esta taxa aumentada em 60 vezes, nos quais os exemplares são identificados pela sigla ‘R’. Apesar de muito próximos os resultados, as maiores resistências foram justamente nos espécimes de porosidade mais alta, isto é, comparando entre espécimes de mesma taxa de carregamento. O comportamento durante o carregamento foi similar, com o módulo de elasticidade em torno de 65 MPa. Os picos mais acentuados foram nos exemplares de maior porosidade, onde houve pouca tendência de aumento da resistência residual no trecho pós-ruptura.



**Figura 78** CPH - Tensão desviadora x Deformação axial (Ensaio triaxial – 30 MPa).

A Figura 79 mostra o comportamento da deformação volumétrica *versus* deformação axial, onde se observou que apenas as amostras de ensaio com taxa de carregamento rápido chegaram a sofrer aumento de volume.



**Figura 79** CPH – Deformação volumétrica x Deformação axial (Ensaio triaxial – 30 MPa).

A Tabela 49 mostra os índices físicos. Ressalta-se aqui mais um raro caso onde a porosidade externa foi maior do que a interna, em CPH 15. Porém, neste caso, foi a menor resistência apurada e ainda para o espécime de menor porosidade. O percentual de poros isolados ( $\eta_{\text{Iso}}$ ) também foi significativamente menor para este corpo de prova em relação aos outros.

**Tabela 49** CPH – Índices físicos (Ensaio triaxial – 30 MPa).

CP	Dimensional		Propriedades dos vazios								Massa específica	
	H	H / D	$\eta_{\text{Total}}$	e	$\eta_w$	$\eta_{wI}$	$\eta_{wE}$	$R\eta_w$	$\Delta\eta$	$\eta_{\text{Iso}}$	$\rho_s$	$\rho_{\text{Sat}}$
	(mm)		(%)		(%)	(%)	(%)				(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )
CPH21 R	108,55	2,2	<b>11,07</b>	0,12	<b>8,24</b>	4,22%	4,02%	1,05	<b>2,83</b>	25,56%	2,40	2,48
CPH22	110,00	2,2	<b>10,19</b>	0,11	<b>7,33</b>	5,30%	2,03%	2,61	<b>2,86</b>	28,07%	2,42	2,50
CPH13	107,15	2,1	<b>8,70</b>	0,09	<b>6,10</b>	4,69%	1,41%	3,33	<b>2,60</b>	29,89%	2,47	2,53
CPH15 R	109,75	2,2	<b>8,27</b>	0,09	<b>7,00</b>	3,03%	3,96%	0,77	<b>1,27</b>	15,36%	2,48	2,55

Na Tabela 50 são vistos os parâmetros elásticos e propriedades das curvas analisadas. Observou-se uma pequena, porém significativa, mudança no módulo de elasticidade (E) e cisalhamento (G) de CPH 13 para CPH 22. Isto é, alguma possível mudança na propriedade da rocha, sob orientação horizontal, entre 8,70% e 10,19% de porosidade total. Destacam-se também os valores de deformação na ruptura muito superiores em CPH 21, a mais porosa do grupo.

**Tabela 50** CPH – Propriedades da curva e parâmetros elásticos (Ensaio triaxial - 30 MPa).

CP	Propriedades da curva						Parâmetros elásticos					
	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$	Tipo de Ruptura	E	$E_{Def}$	$\nu$	G	$K_r$	K
	(MPa)	(%)	(%)	(%)	(MPa)		(GPa)	(GPa)	–	(GPa)	(GPa)	(GPa)
CPH21 R	140,65	0,50	0,18	0,35	140,65	Cisalhamento	68,40	50,63	0,24	2,75	44,69	36,59
CPH22	160,46	0,28	0,09	0,10	160,46	Cisalhamento	67,15	66,39	0,29	2,60	53,79	22,15
CPH13	151,17	0,37	0,08	0,19	151,17	Cisalhamento	62,89	58,95	0,29	2,43	50,89	23,04
CPH15 R	140,77	0,38	0,20	0,03	140,77	Cisalhamento	64,61	63,51	0,32	2,45	58,70	21,43

Analizando os ensaios sob menor taxa de carregamento, os índices físicos foram muito próximos ou proporcionais a pequena variação de porosidade entre eles. Macroscopicamente observou-se que CPH 13 era bastante denso, com pouquíssima porosidade externa e poros mais arredondados. Já CPH 22 apresentou grande porosidade superficial com poros alongados e alguns até bastante largos e profundos.

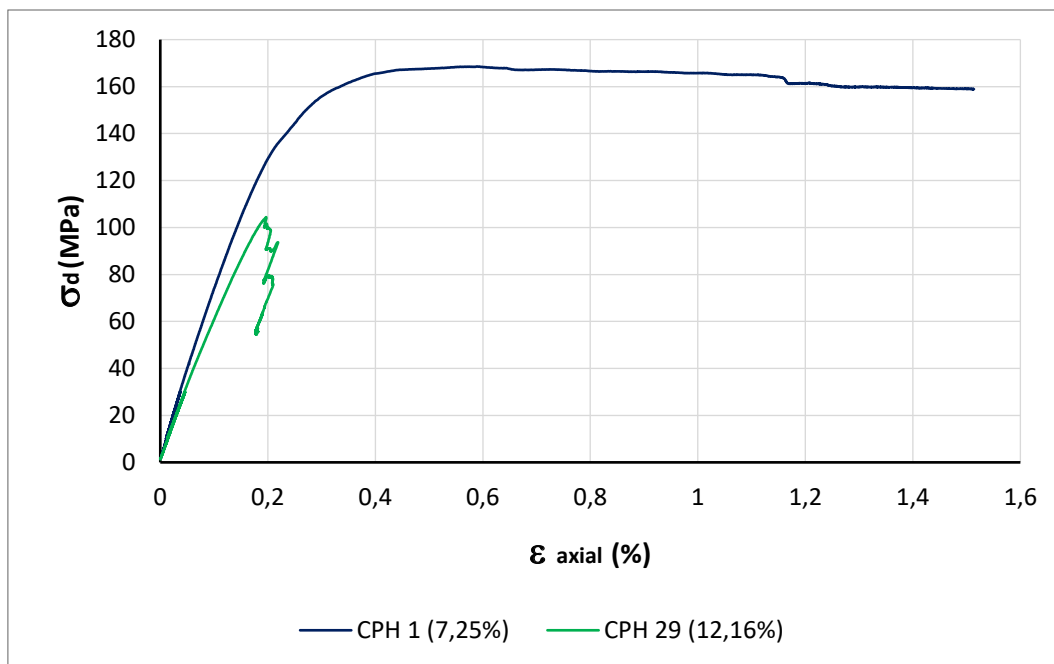
No caso dos ensaios com maior taxa de carregamento, o enredo do parágrafo anterior foi o mesmo. A amostra menos porosa, CPH 15 R, apresentou baixíssima porosidade superficial e poros arredondados, enquanto notou-se em CPH 21 R alta porosidade na superfície, com poros grandes e alongados.

Entretanto, observando os corpos de prova já rompidos, foi possível notar exatamente nos espécimes de menor porosidade, tanto no caso do ensaio lento (CPH 13), quanto do rápido (CPH 15 R), uma pequena porção lateral muito densa que se estendia por toda altura do corpo. Isto já foi observado anteriormente em CPH 14, onde o corpo de prova com baixa porosidade e bem distribuída apresentou resistência bem aquém do esperado. Esta variação brusca na porosidade total, com uma porção densa ao longo de toda altura do corpo de prova, mostrou-se um fator determinante para alguns valores de resistência abaixo do esperado.

#### 5.5.4.2.4.

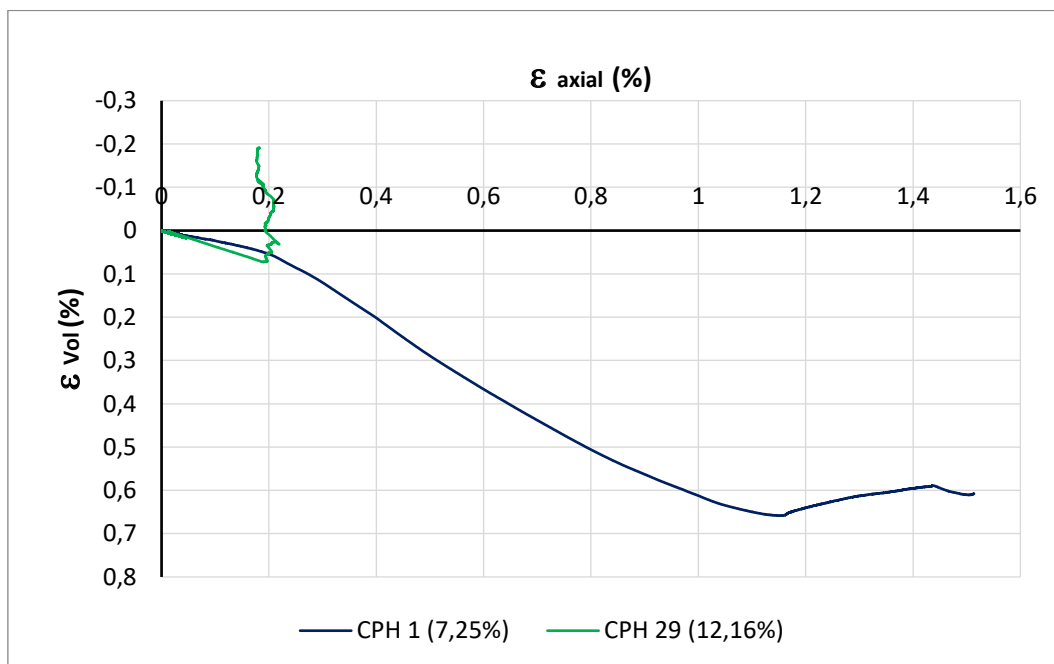
#### Ensaio triaxial horizontal: $\sigma_c = 40$ MPa

Na Figura 80 é possível observar as curvas de tensão *versus* deformação axial deste grupo. O comportamento do carregamento foi relativamente distinto, com o módulo de elasticidade variando 25% entre os ensaios. A amostra de menor porosidade, CPH 1, formou pico acentuado e o comportamento pós-ruptura foi ligeiramente plástico, enquanto CPH 29, a de maior porosidade, praticamente não apresentou pico e a resistência residual foi constante.



**Figura 80** CPH - Tensão desviadora x Deformação axial (Ensaio triaxial – 40 MPa).

Na Figura 81 observa-se a deformação volumétrica *versus* a deformação axial, onde somente a amostra mais porosa (CPH 29) sofreu aumento de volume, ao passo que na amostra menos porosa ocorreu uma acentuada deformação volumétrica, com redução de volume.



**Figura 81** CPH – Deformação volumétrica x Deformação axial (Ensaio triaxial – 40 MPa).

Na Tabela 51, de índices físicos, chamou atenção a enorme proporção de poros internos em relação aos externos, bem como o elevadíssimo percentual de poros isolados. Porém não foi possível correlacionar estes fatores à alta resistência apresentada por CPH 1, uma vez que este espécime é de baixa porosidade e muitos outros repetiram tal comportamento sem índices calculados tão distintos. A diferença de porosidade total entre as amostras também foi alta.

**Tabela 51** CPH – Índices físicos (Ensaio triaxial – 40 MPa).

CP	Dimensional		Propriedades dos vazios								Massa específica	
	H	H / D	$\eta_{Total}$	e	$\eta_w$	$\eta_{wI}$	$\eta_{wE}$	$R\eta_w$	$\Delta\eta$	$\eta_{Iso}$	$\rho_s$	$\rho_{sat}$
	(mm)		(%)		(%)	(%)	(%)		(%)		(g/cm³)	(g/cm³)
CPH29	110,84	2,2	<b>12,16</b>	0,13	<b>10,38</b>	8,42%	1,96%	4,30	<b>1,78</b>	14,64%	2,37	2,48
CPH1	115,09	2,3	<b>7,25</b>	0,07	<b>3,50</b>	3,43%	0,07%	49,00	<b>3,75</b>	51,72%	2,50	2,54

Na Tabela 52 são vistos os parâmetros elásticos e propriedades das curvas neste grupo de ensaios.

**Tabela 52** CPH – Propriedades da curva e parâmetros elásticos (Ensaio triaxial - 40 MPa).

CP	Propriedades da curva						Parâmetros elásticos					
	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$	Tipo de Ruptura	E	$E_{Def}$	$\nu$	G	$K_r$	K
	(MPa)	(%)	(%)	(%)	(MPa)		(GPa)	(GPa)	—	(GPa)	(GPa)	(GPa)
CPH29	<b>104,43</b>	0,19	0,06	0,07	104,43	Cisalhamento	60,42	58,54	0,27	2,38	44,15	19,16
CPH01	<b>168,55</b>	0,40	0,11	0,20	168,55	Cisalhamento	79,76	72,39	0,37	2,92	98,53	21,05

## 5.5.5.

### Parâmetros de resistência – Ensaio uniaxial e triaxial

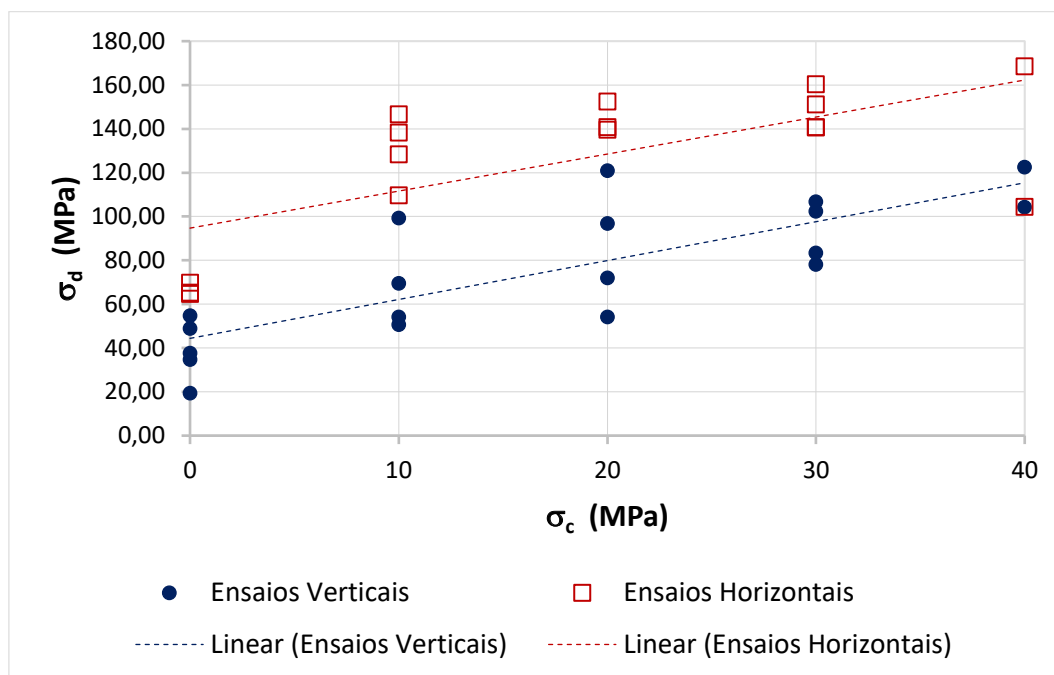
#### 5.5.5.1.

#### Porosidade intermediária

Com base nas análises dos ensaios uniaxiais e triaxiais observou-se a ocorrência de mudanças abruptas nos parâmetros elásticos em torno de algum valor de porosidade total, que ficou restrito à um curto intervalo, para todos os grupos de tensão confinante. Os mais comuns observados foram os módulos de elasticidade (E), de cisalhamento (G) e Volumétrico (K), os quais sofreram variações bruscas em ensaios triaxiais com valores de porosidade total em torno de 7%, para os ensaios verticais, e 10%, para horizontais. Esta variação brusca em todos os grupos de tensão confinante, incluindo os ensaios uniaxiais, em torno de valores muito próximos para amostragens com a mesma orientação pode indicar a ocorrência de uma mudança no comportamento do material a partir de algum valor de porosidade total, sendo este diferente entre amostragens verticais e horizontais.

O presente estudo buscava como ideia inicial separar a resistência em grupos de porosidade maiores e menores para cada direção de furo, porém criando um limite entre estes grupos através de uma média aritmética. Ainda que esta média fosse feita em separado para cada grupo.

No entanto, a observação em um gráfico de dispersão de todos os ensaios triaxiais, incluindo uniaxiais, com tensão desviadora na ruptura *versus* a tensão confinante, levou a uma outra interpretação para este valor limite entre alta e baixa porosidades. Este gráfico pode ser visto na Figura 82.



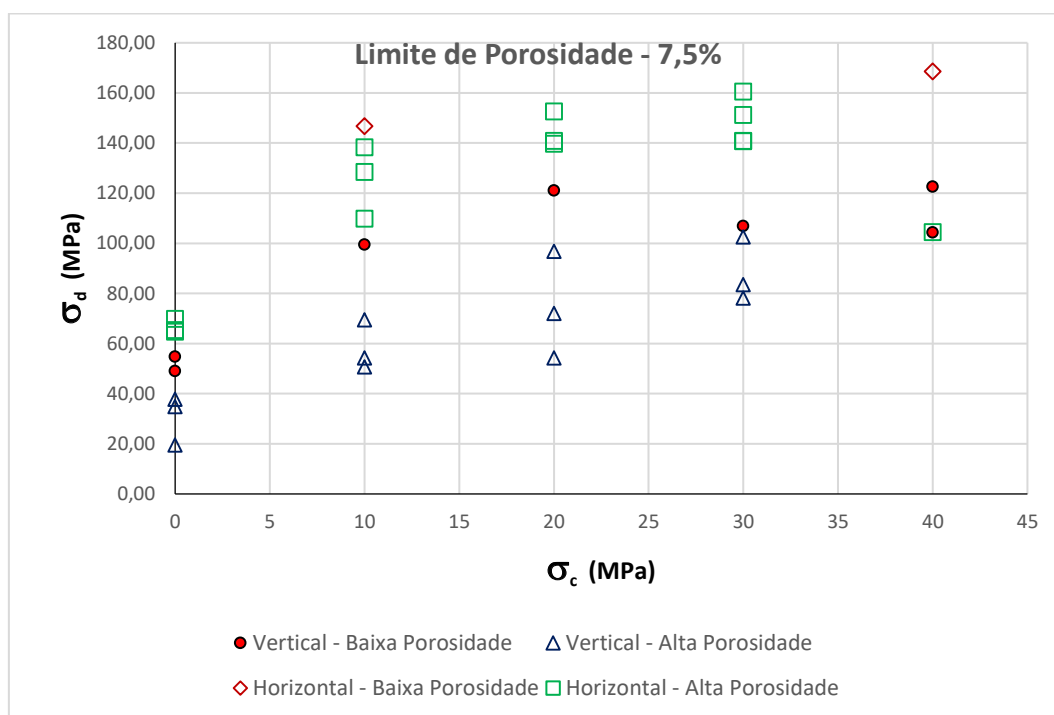
**Figura 82** Ensaios triaxiais - Tensão desviadora na ruptura x Tensão confinante.

No gráfico acima foram plotados todos os ensaios uniaxiais e triaxiais. Mesmo considerando possíveis desvios nas linhas de tendência causados por ensaios com resultados não representativos, como exemplo os que sofreram colapsos de poros, a Figura 80 demonstra que em todos os casos de confinamento a tensão desviadora na ruptura foi predominantemente maior para amostragem horizontal. Isto ajuda a compreender o porquê de os valores limites de porosidade total estimados diferirem tanto entre amostragens vertical e horizontal.

Ainda segundo a Figura 80, foram plotados diversos gráficos iguais, porém separando os ensaios em dois grupos - porosidades alta e baixa - de acordo com um valor limite estipulado. Como critério para encontrar este limite, testou-se valores entre 7,0% e 11,0%. Foram produzidos gráficos dentro deste intervalo com variação de 0,5% entre eles. Para cada gráfico com um valor limite definido as amostras foram separadas em alta porosidade, para valores acima deste, e baixa porosidade, para valores abaixo deste. Isso foi feito para as duas direções de amostragens.

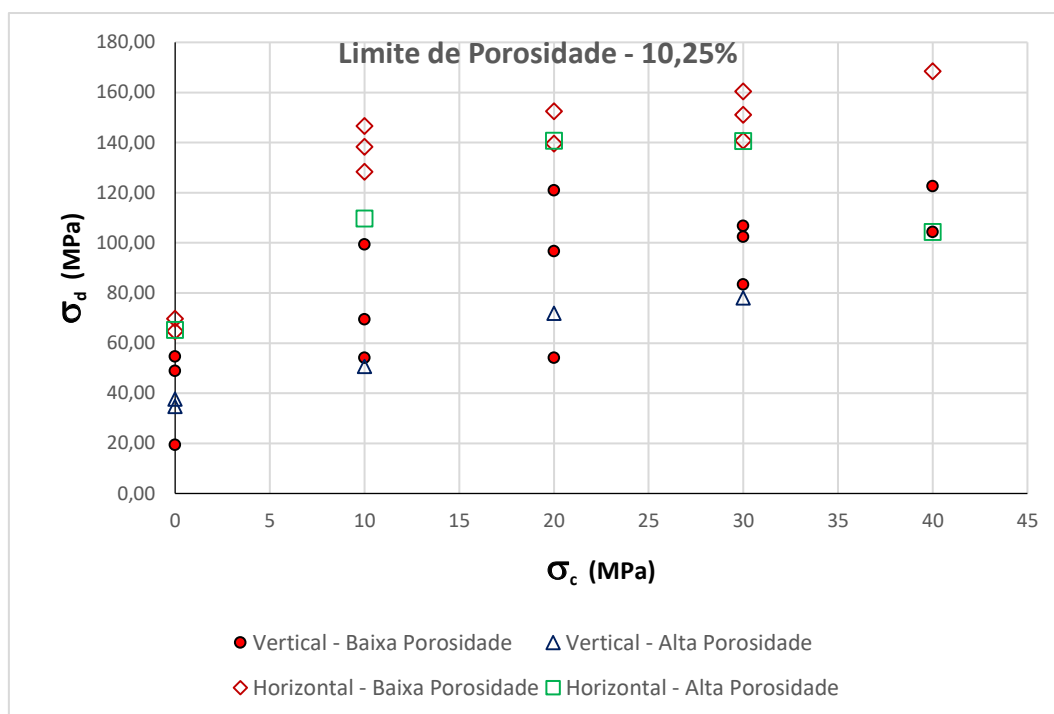
As considerações mais importantes para a escolha do gráfico com o valor limite mais apropriado foram: a ordem dos grupos, onde amostragens do grupo de menor porosidade sempre estariam acima do de maior. E, como segundo critério, a ocorrência de ambos os grupos de amostragem (vertical e horizontal), distribuídos o mais uniformemente possível entre alta e baixa porosidade, ocorrendo em todos os valores de tensão confinante sempre que possível.

Considerando as condições acima citadas, o melhor valor limite encontrado para separar amostras de alta e baixa porosidade na amostragem vertical foi de 7,5%, o que se enquadra na faixa de mudança brusca observada nos parâmetros elásticos verticais. A Figura 83 mostra esta condição. Todos os marcadores descritos como baixa porosidade estão acima dos de alta e a distribuição entre alta e baixa porosidade foi a mais equilibrada possível.



**Figura 83** CPV – Tensão desviadora x Tensão confinante – Limite de porosidade.

Já a Figura 84 mostra o melhor valor encontrado no gráfico de dispersão para limite de porosidade dos ensaios horizontais. Valores limite abaixo de 10% sempre misturavam ensaios de alta e baixa porosidade. Por esta razão não seriam coerentes. O valor limite de 10,25% foi o menor encontrado em que foi possível observar uma distribuição razoavelmente equilibrada e sempre com os exemplares de baixa porosidade graficamente acima dos de alta.



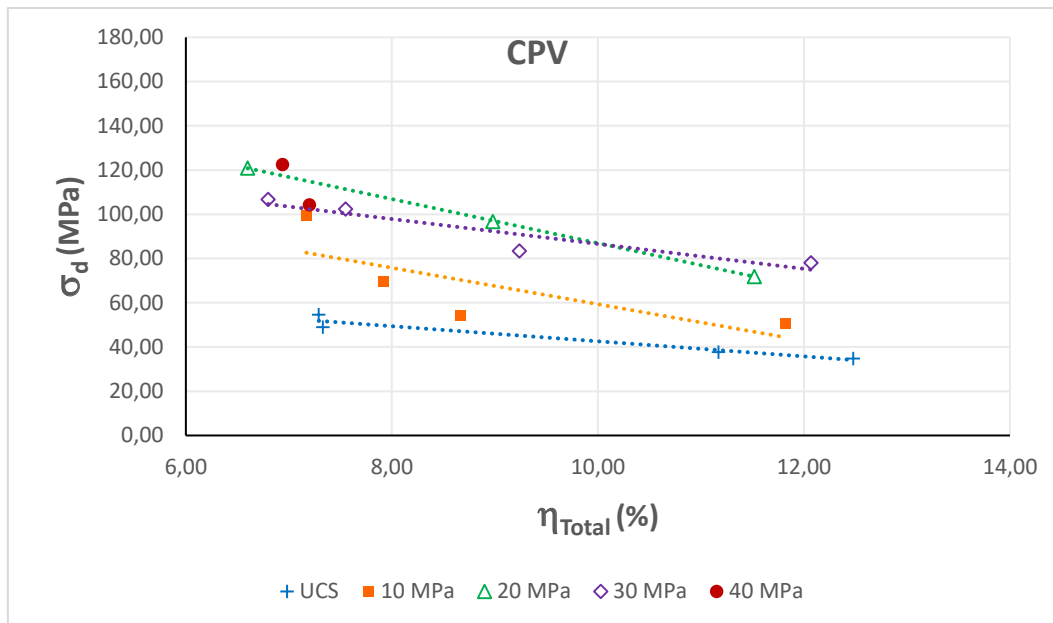
**Figura 84** CPH – Tensão desviadora x Tensão confinante – Limite de porosidade.

#### 5.5.5.2.

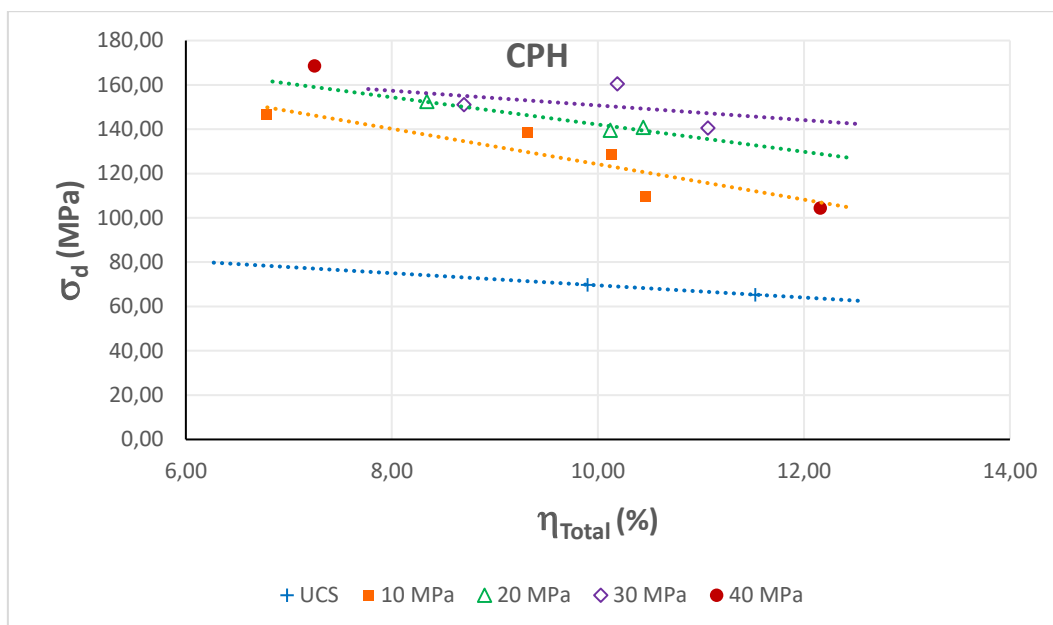
#### Influência da tensão confinante nos ensaios

Assim como foi feito para os resultados dos ensaios de carga pontual (PLT) e ensaios Brasileiro (EB), foram plotados os valores de tensão desviadora na ruptura *versus* a porosidade total para todos os grupos de confinamento, de ambas amostragens, verticais e horizontais. Não foi possível traçar uma linha de tendência para o grupo de confinamento 40 MPa em nenhum caso, já que houve apenas dois ensaios para cada grupo de amostragem. Mesmo assim observou-se um comportamento similar em ambas as direções de amostragem. Tanto nos ensaios verticais quanto horizontais, a inclinação da linha de tendência dos grupos de confinamento 10 e 20 MPa foi mais acentuada e relativamente paralelas entre si. Já a linha de UCS foi menos inclinada do que as citadas e subparalela a do grupo de 30 MPa. Também nos dois grupos de amostragem, a linha de tendência deste grupo de confinamento (30MPa) ficou muito próxima do grupo imediatamente anterior (20MPa), chegando a se cruzarem em algum ponto. E, embora não haja linha de tendência, os pontos dos ensaios de 40 MPa também ficaram muito próximos aos de 30 MPa. Este comportamento leva a crer que se forem elevadas as tensões de confinamento em testes triaxiais, as linhas de tendência superiores ficariam cada vez mais próximas e subparalelas as de UCS e 30 MPa.

Isto pode ser visto na Figura 85, para amostragem vertical (CPV), e Figura 86, para amostragem horizontal (CPH).



**Figura 85** CPV – Tensão desviadora x Porosidade total.



**Figura 86** CPH – Tensão desviadora x Porosidade total.

As linhas de tendência de UCS representaram com maior fidelidade o comportamento frágil (rúptil) do material, já que não houve interferência de confinamento. Com o aumento da tensão confinante, o material apresentou uma tendência a um elevado incremento de resistência mecânica. Porém, isto durou até um determinado limite, no qual seu comportamento começou a mudar para um caráter mais plástico, isto é, dúctil. A partir daí o ganho de resistência mecânica com o incremento do confinamento foi cada vez menor, até atingir um limite.

Foi o que se observou nas Figuras 85 e 86. As linhas de tendência de UCS, em ambas as direções de amostragem, apresentaram uma inclinação suave, ilustrando o incremento da resistência com a diminuição da porosidade. As linhas de 30 MPa tenderam ao paralelismo com UCS. Porém, as linhas de 10 e 20 MPa foram as mais inclinadas e paralelas entre si. Isto indicaria que o incremento de tensão confinante produziu um significativo aumento da resistência mecânica. Contudo, este comportamento começou a mudar no intervalo de confinamento entre 20 e 30 MPa, onde a mudança de comportamento rúptil para dúctil ocorreria em algum ponto do referido intervalo.

A Figura 85 mostrou que o intervalo de tensões na ruptura para todos os grupos de confinamento variou entre cerca de 40 a 120 MPa. As linhas de tendência ficaram todas relativamente próximas e a linha de 30 MPa cruzou a de 20 MPa precocemente, revelando uma tendência de resistência menor para uma grande faixa de porosidade.

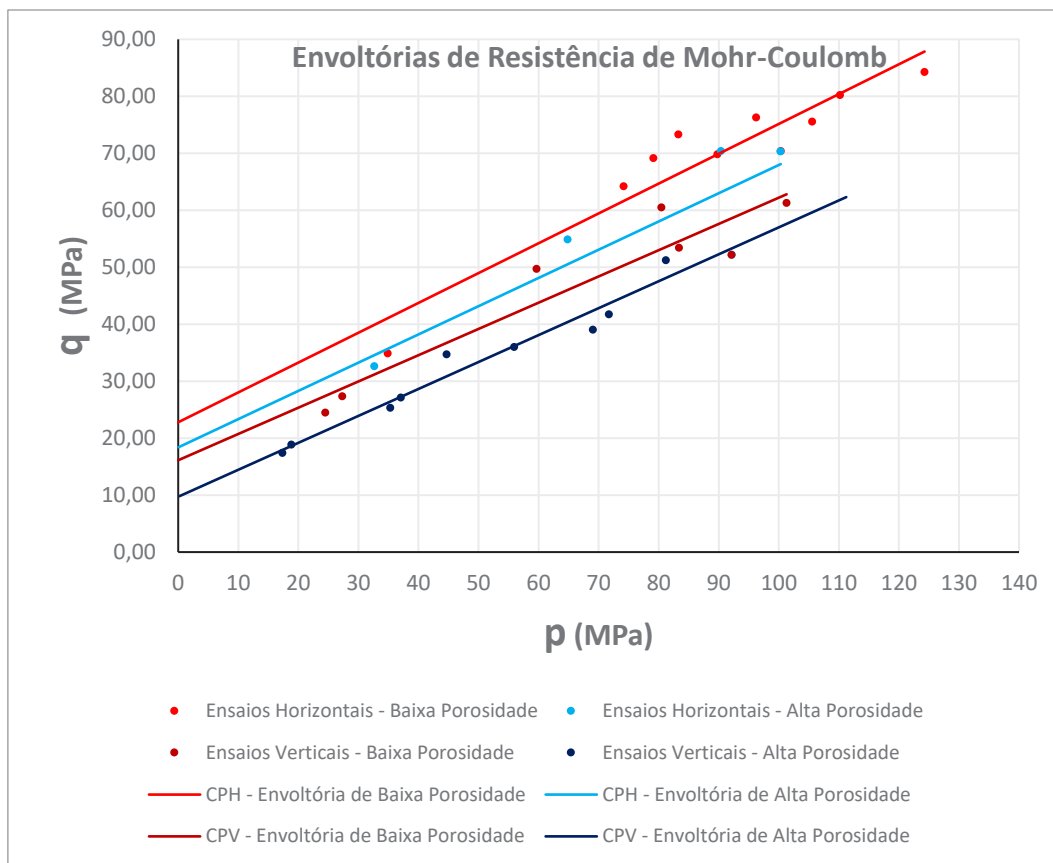
Já a Figura 86 mostrou um intervalo de tensões na ruptura para todos os grupos de confinamento entre cerca de 80 e 160 MPa. É possível observar que a linha de UCS ficou bastante afastada das outras três, ficando estas mais próximas do que observado em CPV. E a linha de 30 MPa cruzou a de 20 MPa quase no extremo, o que indicaria que, para as amostragens horizontais, o grupo de confinamento 30 MPa apresentou uma resistência relativamente maior do que o de confinamento de 20 MPa, o que não foi observado nas amostras verticais.

### **5.5.5.3. Critério de Mohr-Coulomb**

Para traçar a envoltória de Mohr-Coulomb e se obter os parâmetros de resistência foi escolhido o gráfico  $p \times q$  em função da grande quantidade de ensaios, que ainda foram divididos em grupos de porosidade baixa e alta, em duas direções de amostragem. Assim, observando apenas o ponto do topo de cada círculo, foi possível uma melhor interpretação e traçar as envoltórias com maior precisão, comparando os resultados em função da variação de porosidade.

A Figura 87 ilustra o gráfico  $p \times q$ , com os marcadores representando o topo de cada círculo de Mohr de todos os ensaios, verticais e horizontais, separados por grau de porosidade conforme item 5.5.5.1, alto e baixo.

Este gráfico foi feito com as quatro envoltórias no mesmo diagrama com a intenção de se poder avaliar a influência da direção do acamamento e do grau de porosidade na resistência do travertino Romano.



**Figura 87** Gráfico  $p \times q$  – Critério de Mohr-Coulomb (Envoltórias de resistência).

Observando este gráfico conclui-se que a resistência mecânica da amostragem horizontal foi maior nos dois graus de porosidades definidos. Mesmo a envoltória de resistência da amostragem horizontal de alta porosidade ficou acima da envoltória da amostragem vertical de baixa porosidade.

Os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb foram calculados separadamente em cada envoltória, onde obtiveram-se a coesão efetiva e o ângulo de atrito efetivo do gráfico  $p \times q$ ,  $a'$  e  $\alpha'$ , respectivamente. Estes são correlacionados com a coesão efetiva ( $c'$ ) e o ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ) do gráfico  $\sigma \times \tau$ .

A partir dos parâmetros de resistência medidos no gráfico  $p \times q$ , foram calculados os mesmos no gráfico  $\sigma \times \tau$ . Os resultados da coesão efetiva ( $c'$ ) e ângulo de atrito ( $\phi'$ ) são vistos na Tabela 53, para amostragem vertical (CPV), e na Tabela 54, para amostragem horizontal (CPH).

**Tabela 53** CPV – Parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb.

Parâmetros de Mohr-Coulomb	Vertical	Parâmetros de Mohr-Coulomb	Vertical
<b>Baixa Porosidade</b>	< 7,5%	<b>Alta Porosidade</b>	> 7,5%
Gráfico: $p \times q$		Gráfico: $p \times q$	
$a' = 16,12$ MPa	$\alpha' = 24,74^\circ$	$a' = 9,72$ MPa	$\alpha' = 25,30^\circ$
Gráfico: $\sigma \times \tau$		Gráfico: $\sigma \times \tau$	
$c' = 18,16$ MPa	$\phi' = 27,44^\circ$	$c' = 11,03$ MPa	$\phi' = 28,21^\circ$
$y = 0,4608x + 16,121$		$y = 0,4727x + 9,7196$	

**Tabela 54** CPH – Parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb.

Parâmetros de Mohr-Coulomb	Horizontal	Parâmetros de Mohr-Coulomb	Horizontal
<b>Baixa Porosidade</b>	< 10,25%	<b>Alta Porosidade</b>	> 10,25%
Gráfico: $p \times q$		Gráfico: $p \times q$	
$a' = 22,79$ MPa	$\alpha' = 27,64^\circ$	$a' = 18,38$ MPa	$\alpha' = 26,37^\circ$
Gráfico: $\sigma \times \tau$		Gráfico: $\sigma \times \tau$	
$c' = 26,74$ MPa	$\phi' = 31,57^\circ$	$c' = 21,16$ MPa	$\phi' = 29,72^\circ$
$y = 0,5236x + 22,785$		$y = 0,4957x + 18,379$	

Observou-se nas tabelas 53 e 54 significativas diferenças nos parâmetros de resistência de uma mesma amostragem, de acordo com o grau de porosidade. Porém, esta diferença foi maior para a coesão efetiva ( $c'$ ) na amostragem vertical. Já para o ângulo de atrito ( $\phi'$ ), esta diferença foi maior na amostragem horizontal.

Os parâmetros de resistência para amostragem vertical ficaram próximos dos encontrados por Luza (2014) e Kiewiet (2015), embora o ângulo de atrito encontrado por estes autores tenha ficado mais próximo dos valores encontrados neste trabalho para amostragem horizontal.

#### 5.5.5.4. Critério de Lade & Kim

Este critério se utilizou do modelo simplificado proposto por Lade & Kim (1988), onde as envoltórias de resistência dependem de parâmetros adimensionais,  $\eta_1$  e  $m$ , e da pressão atmosférica ( $P_a$ ).

Os parâmetros adimensionais, obtidos através dos invariantes das tensões principais, além da pressão atmosférica, podem ser vistos na Tabela 55, para amostragem vertical (CPV), e na Tabela 56, para amostragem horizontal (CPH).

Aqui estes parâmetros também foram calculados seguindo o conceito de grau de porosidade visto no item 5.5.5.1. Utilizou-se amostras de cada grupo de porosidade e de cada direção de amostragem separadamente a fim de se obter as envoltórias de resistência das amostragens verticais e horizontais, separadas cada uma pelo grau de porosidade, alto e baixo.

**Tabela 55** CPV – Parâmetros adimensionais de Lade & Kim e pressão atmosférica.

VERTICAL			
Alta Porosidade		Baixa Porosidade	
$P_a$	0,10 atm	$P_a$	0,10 atm
$m$	1,1507	$m$	2,5552
$n_1$	1,13E+05	$n_1$	1,00E+10

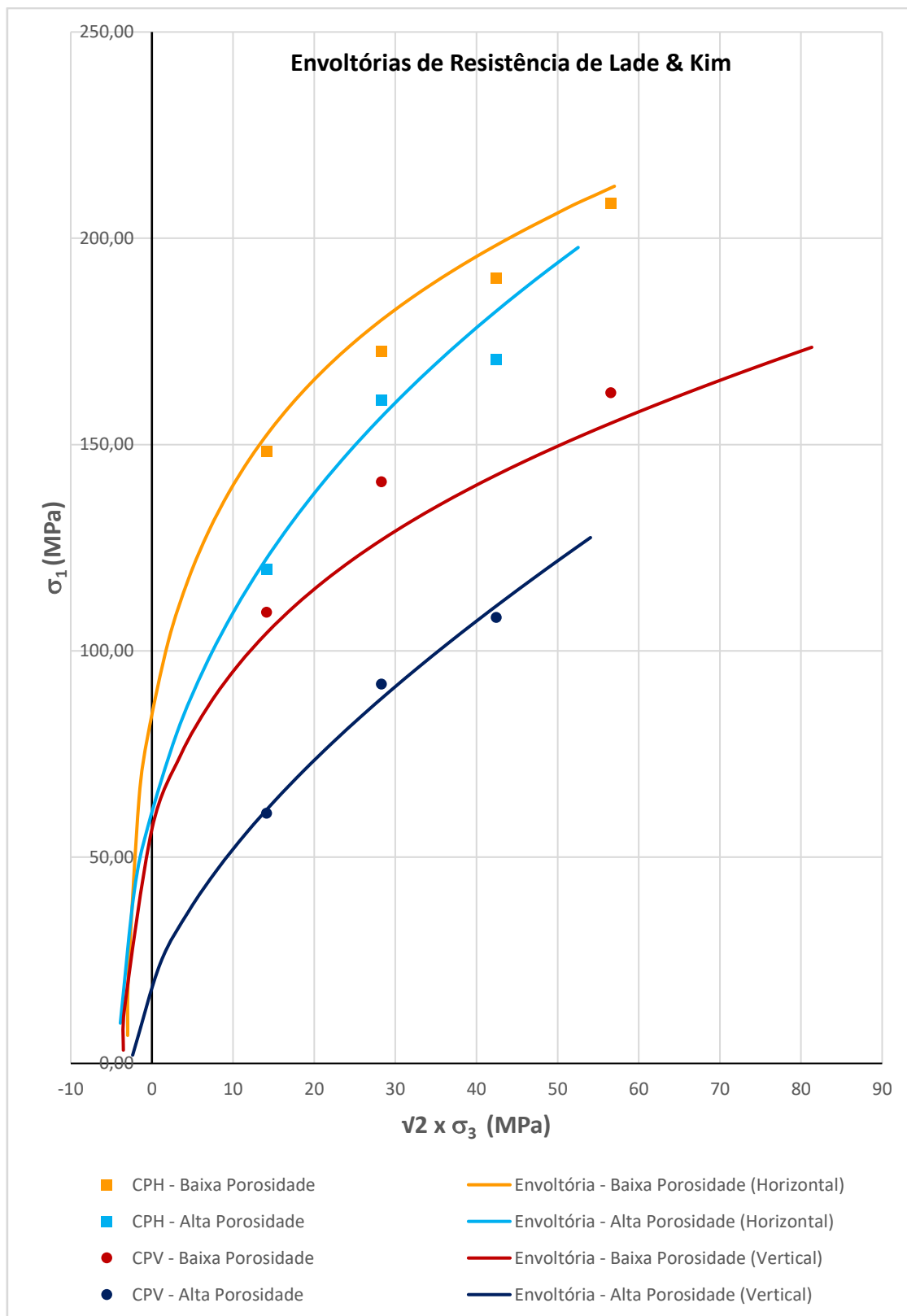
**Tabela 56** CPH – Parâmetros adimensionais de Lade & Kim e pressão atmosférica.

HORIZONTAL			
Alta Porosidade		Baixa Porosidade	
$P_a$	0,10 atm	$P_a$	0,10 atm
$m$	1,9403	$m$	3,0293
$n_1$	2,00E+08	$n_1$	1,00E+12

A partir dos parâmetros adimensionais obtidos para cada grau de porosidade e direção do eixo axial foram traçadas quatro envoltórias de resistência, no mesmo gráfico, a fim de se comparar a variação da resistência no travertino Romano conforme variada a direção do acamamento da rocha e sua quantidade de vazios.

O resultado é visto na Figura 88, onde as envoltórias das amostragens verticais ficaram mais distantes entre si quando comparadas às amostragens horizontais.

Os resultados apresentaram uma boa coerência com os parâmetros adimensionais encontrados por Luza (2014) para amostragem vertical. As envoltórias de ruptura apresentaram uma boa proximidade com os ensaios utilizados no cálculo dos parâmetros adimensionais, o que indicou um bom refinamento dos dados utilizados. Por último, os valores observados no campo de tração das envoltórias de Lade & Kim coincidiram perfeitamente com o intervalo de resistência à tração encontrado nos Ensaios Brasileiros, ficando aproximadamente entre 2,0 e 7,0 MPa.



**Figura 88** Critério de Lade & Kim (Envoltórias de resistência).

### 5.5.5.5. Média dos parâmetros elásticos

Para termos de comparação, foram calculadas as médias de todos os parâmetros elásticos com valores coerentes.

Na Tabela 57 foram apresentados os resultados de todas as médias dos parâmetros elásticos, separados por grupo de tensão confinante e grau de porosidade, para amostragem vertical.

**Tabela 57** CPV – Média dos parâmetros elásticos separados por grupo de tensão confinante e grau de porosidade.

CPV	E	E <sub>Def</sub>	$\nu$	G	K <sub>r</sub>	K
	(GPa)	(GPa)		(GPa)	(GPa)	(GPa)
UCS (Baixa Porosidade)	49,78	49,71	0,25	1,99	-	-
UCS (Alta Porosidade)	35,55	35,73	0,24	1,44	-	-
10 MPa (Baixa Porosidade)	63,13	59,09	0,20	2,62	35,44	24,55
10 MPa (Alta Porosidade)	51,14	40,05	0,26	2,02	36,33	20,66
20 MPa (Baixa Porosidade)	68,97	59,79	0,29	2,67	55,56	23,41
20 MPa (Alta Porosidade)	49,84	31,35	0,23	2,14	26,70	28,17
30 MPa (Baixa Porosidade)	64,52	46,90	0,23	2,63	39,22	25,89
30 MPa (Alta Porosidade)	49,82	33,71	0,24	2,00	32,36	24,54
40 MPa (Baixa Porosidade)	65,92	49,93	0,30	2,54	55,89	20,62
40 MPa (Alta Porosidade)	-					

Já na Tabela 58 encontram-se os resultados das médias dos parâmetros elásticos, também separados por grupo de tensão confinante e grau de porosidade, para amostragem horizontal.

Entretanto, cabe ressaltar que tanto na Tabela 57, quanto na Tabela 58, somente foram utilizados valores de ensaios coerentes. Os que sofreram colapso de poros ou apresentaram comportamento anômalo não foram considerados nas médias dos parâmetros elásticos.

**Tabela 58** CPH – Média dos parâmetros elásticos separados por grupo de tensão confinante e grau de porosidade.

CPH	E	E <sub>Def</sub>	$\nu$	G	K <sub>r</sub>	K
	(GPa)	(GPa)		(GPa)	(GPa)	(GPa)
UCS (Baixa Porosidade)	57,55	57,28	0,25	2,30	-	-
UCS (Alta Porosidade)	47,78	50,23	0,26	1,90	-	-
10 MPa (Baixa Porosidade)	66,39	61,23	0,25	2,82	38,45	26,51
10 MPa (Alta Porosidade)	41,07	48,08	0,15	1,79	19,30	20,01
20 MPa (Baixa Porosidade)	65,36	62,50	0,26	2,60	44,74	28,86
20 MPa (Alta Porosidade)	61,44	59,51	0,30	2,37	50,48	20,22
30 MPa (Baixa Porosidade)	63,75	61,23	0,31	2,44	54,80	22,24
30 MPa (Alta Porosidade)	67,77	58,51	0,27	2,67	49,24	29,37
40 MPa (Baixa Porosidade)	79,76	72,39	0,37	2,92	98,53	21,05
40 MPa (Alta Porosidade)	60,42	58,54	0,27	2,38	44,15	19,16

#### 5.5.5.5.1. Relações importantes na indústria do petróleo

Para finalizar, foram feitas algumas relações fundamentais utilizadas na indústria do petróleo e que auxiliam no entendimento do comportamento geomecânico da rocha.

A razão do módulo de deformabilidade ( $E_{Def}$ ) pela resistência à compressão axial simples (UCS) é considerada por autores como Goodman e bastante utilizada em estudos de resistência de reservatórios. Foi feita também a razão do módulo de elasticidade ( $E$ ) por UCS. Assim foi possível comparar não só a diferença na anisotropia pela direção do acamamento, como comparar os valores desta razão entre os módulos de elasticidade e deformabilidade.

Foi perceptível a baixa variação destas razões quando comparadas entre os módulos de elasticidade e deformabilidade, que na maioria das vezes tiveram valores muito próximos. Porém, tal como estes parâmetros elásticos variaram de acordo com o grau de porosidade nos ensaios mecânicos, foi possível também notar transições bruscas entre as razões dos espécimes de baixa e alta porosidade, o que é visto na Tabela 59, onde as amostras de alta porosidade encontram-se com fundo azul e, as de baixa, com fundo laranja claro.

**Tabela 59** Razão entre os módulos de elasticidade (E) e deformabilidade ( $E_{Def}$ ) com a resistência à compressão simples nas duas direções de acamamento (CPV e CPH).

CPV	E	$E_{Def}$	CPH	E	$E_{Def}$
	UCS	UCS		UCS	UCS
CPV71	1044,24	1044,60	CPH18	731,44	769,02
CPV24	931,91	946,83	CPH11	828,15	818,67
CPV59	1807,90	1804,83	CPH14	884,90	886,81
CPV67	1019,24	1014,17			
CPV61	906,85	908,69			

Os valores encontrados na Tabela 59 coincidem perfeitamente com os encontrados por Luza (2014) em porosidades similares de amostras verticais.

Por fim, avaliou-se a relação entre a resistência a compressão axial simples e a resistência à tração. Como foram realizados ensaios de tração indireta (Ensaio Brasileiro) utilizando tanto corpos de prova verticais, quanto horizontais, esta relação foi feita separada pela orientação do acamamento e novamente pelo grau de porosidade, ficando as amostras menos porosas com o fundo em laranja claro, e as amostras mais porosas com fundo azul.

Utilizou-se o valor de tensão de ruptura para cada ensaio uniaxial e foi feita a razão deste valor com a resistência à tração obtida no ensaio. Na Tabela 60 é possível observar os valores desta relação para amostragem vertical, onde se observou alguns valores um pouco fora do padrão, mas em geral com uma certa constância.

**Tabela 60** CPV - Razão entre a resistência à compressão simples (UCS) e a resistência à tração ( $\sigma_T$ ), separados por grau de porosidade.

UCS / $\sigma_T$	CPV61	CPV67	CPV24	CPV71
EBV 12	10,71	9,59	7,38	6,81
EBV 1	8,87	7,94	6,11	5,64
EBV 8	8,90	7,97	6,13	5,66
EBV 10	16,55	14,82	11,41	10,52
EBV 5	14,39	12,89	9,92	9,15
EBV 2	8,39	7,51	5,78	5,33
EBV 9	11,03	9,87	7,60	7,01
EBV 7	8,97	8,03	6,18	5,70
EBV 11	12,38	11,08	8,53	7,87
EBV 3	8,99	8,05	6,20	5,71
EBV 4	10,90	9,76	7,51	6,93
EBV 6	11,63	10,41	8,01	7,39
EBV 13	12,04	10,78	8,30	7,66

Já na Tabela 61 observa-se os valores desta relação para amostragem horizontal. Como em todos os casos vistos, aqui também os valores obtidos nas amostragens horizontais foram maiores do que os visto nas amostragens verticais.

**Tabela 61** CPH - Razão entre a resistência à compressão simples (UCS) e a resistência à tração ( $\sigma_T$ ), separados por grau de porosidade.

UCS / $\sigma_T$	CPH11	CPH18
EBH 7	15,58	14,58
EBH 1	15,05	14,08
EBH 3	21,27	19,90
EBH 5	16,27	15,22
EBH 4	19,67	18,41
EBH 2	18,97	17,76
EBH 8	16,76	15,68
EBH 6	33,10	30,98
EBH 9	18,67	17,47
EBH 10	19,78	18,51

## 6 Conclusão

A rocha analisada se enquadrou em quase todos os modelos de classificação citados no Capítulo 2. Na classificação de Folk (1959/1962) se adequaria ao tipo 3, grãos aloquímicos transportados (esparita e contaminantes) em matriz micrítica. Na de Dunham (1962), supondo que se conhece a textura deposicional, como *mudstone*. O modelo de Embry e Klovan (1971) também classificaria o travertino como *mudstone*. No modelo de Riding (2002) se enquadraria na classificação *Tufa/Travertine Cement*. O modelo de Wright (1993), considerando o aspecto deposicional, também classifica esta rocha como *mudstone*, que é matriz suportada por calcita microcristalina. E por último, utilizando uma classificação dedicada especificamente à travertinos, Pentecost & Viles (1994) englobariam este material como Termal ou Termógeno, de feições de pequena escala e provavelmente autóctone, apesar da presença de contaminantes possivelmente externos a bacia.

Na caracterização petrográfica confirmou-se tratar de rocha constituída essencialmente por calcita microcristalina (micrita), que foi percolada por fluidos hidrotermais, que teriam depositado a calcita espática (esparita) e os elementos *ex situ*, oriundo das encaixantes, nas descontinuidades e poros do travertino Romano.

A calcita microcristalina foi interpretada como a matriz da rocha, ocorrendo esta mineralogia na disposição matriz-suportada. Já a calcita espática normalmente é interpretada como cimento da rocha carbonática. Este até poderia ser um argumento válido para este material de estudo, no entanto, observou-se em quase todas as lâminas que a calcita espática ocorria essencialmente bordejando poros, em especial poros maiores. Praticamente todas as lâminas mostraram os grãos deste mineral crescendo da borda do poro para o centro, o que significaria que este material espático foi depositado ali após a formação e cristalização da matriz microcristalina. Soma-se a isso o fato de que o predomínio de calcita espática bordejando os poros foi no trecho definido como andar A2, que demonstrou ser muito mais poroso e aparentemente mais permeável. Já em lâminas do andar A1, mais denso, identificou-se raros poros grandes, com raro ou nenhum preenchimento por esparita. Este cenário indica fortemente que a calcita espática, que funciona como agente cimentante, foi depositada por percolação de fluidos, já que esta predominou em regiões porosas e permeáveis. Ainda na análise microscópica, outro material observado incrustado nos poros foi a magnetita, cuja ocorrência majoritária foi bordejada pela calcita espática.

As análises químicas espectrométrica e elementar auxiliaram na identificação de diversos elementos presentes na rocha, porém devido a percentuais ínfimos, a metodologia mais eficiente foi por energia dispersiva (EDS) na microscopia eletrônica de varredura (MEV). Nela foi possível indicar alguns

constituintes indicativos de hidrotermalismo, com destaque para a barita ( $\text{BaSO}_4$ ). A ocorrência de sulfetos também esclarece alguns pontos, como a esfarelita ( $\text{ZnS}$ ), que é comum em ambientes hidrotermais e vulcanogênicos, bem como a Acantita ou Argentita ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ), formada sob elevadas temperaturas.

Ressalta-se que foram observados zonas avermelhadas em bordas de pontos escuros. Esta foi outra evidência, neste caso macroscópica, de que houve percolação de fluídos. Portanto, a combinação destas análises confirmou o que foi descrito no Capítulo 2, nos itens 2.2.1.3 e 2.2.1.4. Ocorreram percolação de fluidos termais que percolaram o travertino Romano, ao longo das descontinuidades e poros, depositando calcita espática ao longo destes e também na superfície, através da desgaseificação. Os elementos *ex situ*, como a magnetita, teriam sido carregados pelo fluído oriundo das rochas encaixantes.

Quanto a estrutura porosa, tanto em escala macro, quanto microscópica, apresentou uma grande heterogeneidade, com poros ocorrendo em tamanhos bastante variados, mesmo quando observados em lâmina delgada, formas variando desde arredondadas a alongadas, e distribuição completamente irregular. Em escala macroscópica, observou-se poros de tamanho milimétricos até alguns pequenos *cavings* de alguns centímetros. Esta grande variação nas dimensões dos poros e, principalmente, sua distribuição completamente irregular ao longo do corpo de prova foram a principal causa da variação de resistência na rocha. Foram observados também alguns casos de poros em formas perfeitamente arredondadas e profundas em relação a dimensão do mesmo, o que poderia sugerir a preservação de bolhas. Este foi mais um indicativo de que fluidos quentes percolaram pelos vazios e descontinuidades do travertino. Na observação microscópica, estes mesmos poros arredondados encontraram-se preenchidos por calcita espática, com grãos muito bem desenvolvidos, crescendo de fora para dentro.

Na interpretação do comportamento geomecânico, os índices físicos auxiliaram na interpretação, porém não se observou relação direta entre a resistência da rocha com a razão de poros internos e externos, mesmo quando esta relação forneceu valores bastante diferenciados. Também não foi possível traçar uma correlação direta com o percentual de poros isolados, que foi dado pela razão de poros isolados com a porosidade total, e a resistência do travertino. Este apresentou valores de tensão na ruptura proporcionais a porosidade total, mas sem nenhuma relação de aumento ou diminuição da resistência com o percentual de vazios isolados. Isto não quer dizer que poros isolados não influenciem na resistência da rocha, mas sim que a heterogeneidade dos tamanhos e, principalmente, da distribuição de poros tornaram este fator menos relevante.

Os valores de deformação axial em geral aumentaram conforme se aumentou a tensão confinante nos ensaios, ao passo que a deformação radial pouco mudou ao longo dos ensaios. A amostragem horizontal apresentou resistência à compressão superior a amostragem vertical em todos os grupos de confinamento. Nos ensaios em que se observou colapso de poros, houve uma diminuição de cerca de 50% na resistência.

Até certo ponto antes da ruptura o travertino apresentou um comportamento elástico. Isto foi observado em quase todos os gráficos tensão desviadora *versus* deformação axial de todos os ensaios triaxiais, onde o ciclo de descarregamento/re carregamento foi quase imperceptível, tendo sido necessário um elevado *zoom* para cálculo de parâmetros elásticos como (E) e (K).

Os tipos de ruptura predominante foi o cisalhamento, que seguiu as regiões mais porosas dos corpos de prova e por consequência apresentou uma variação da propagação da superfície de cisalhamento de acordo com a distribuição de poros, sendo observadas algumas superfícies destas concentradas na base, enquanto em outros corpos de prova, ao longo do mesmo. O fendilhamento predominou nos ensaios uniaxiais. E, onde houve concentração de poros em uma pequena área, houve colapso.

Quanto aos parâmetros elásticos, os valores do módulo de elasticidade (E) mantiveram-se próximos para todos os grupos de confinamento e mesmo grau de porosidade (alta ou baixa), exceto para uniaxiais que sempre apresentaram valores menores. O módulo de deformabilidade ( $E_{Def}$ ) em geral foi próximo dos valores obtidos nos módulos de elasticidade, ficando algumas vezes abaixo. O módulo de cisalhamento (G) variou pouco entre grupos de confinamento de mesmo grau de porosidade, diminuindo substancialmente para amostragens de baixa porosidade. O módulo volumétrico obtido por correlação ( $K_r$ ) apresentou grande variação e difícil determinação de comportamento, ao passo que o módulo volumétrico (K) variou muito pouco ao longo da grande maioria dos ensaios.

Concluiu-se também que existe um valor limite de porosidade onde o comportamento mecânico da rocha se altera significativamente quando se cruza por este valor. Apesar de neste trabalho terem sido considerados apenas dois intervalos, alta e baixa porosidade, isto indicaria que existem faixas de porosidade onde se esperaria que o travertino se comportasse mecanicamente muito próximo, desde que a condição de distribuição e tamanho dos poros também seja similar.

Os gráficos de tensão desviadora na ruptura *versus* porosidade total, tanto para amostragens verticais, quanto horizontais, confirmaram que no intervalo de tensão confinante entre 20 e 30 MPa foi onde o travertino Romano mudou o seu comportamento de rútil (frágil) para dútil, onde os valores de deformação aumentavam cada vez mais conforme se aumentava o confinamento, porém o valor da resistência na ruptura pouco se alterava. Estes gráficos também sugeriram que, apesar de estar na mesma faixa, este valor de mudança de comportamento é menor para amostras verticais, já que a linha de tendência de 30 MPa cruza a de 20 MPa muito antes no gráfico CPV do que em CPH.

## 6.1.

### Sugestões para trabalhos futuros

Para complementar este estudo seria indicado que fossem realizados mais ensaios triaxiais, priorizando as altas tensões de confinamento. Recomenda-se utilizar este e outros trabalhos anteriores para obter os dados de ensaios uniaxiais e triaxiais com 10 MPa de confinamento. Priorizar os ensaios de 20, 30 e 40 MPa de confinamento. Ressalta-se, no entanto, que é de vital importância produzir corpos de prova geometricamente adequados e bem retificados, o que implicará na obtenção de resultados de maior confiabilidade. Também é importante que sejam produzidos muitos espécimes a fim que seja calculada a porosidade total de todos e que cada grupo de tensão de confinamento tenha amostras com intervalos de porosidade similares. Esta avaliação poderia ajudar a complementar o gráfico de tensão desviadora na ruptura *versus* porosidade total, aumentando a quantidade de dados e aperfeiçoando o mesmo.

No caso de haver fatura do material de estudo, recomenda-se também este estudo com amostras com acamamento inclinado. Outro caso que necessitaria de muitos exemplares seria estudar a anisotropia em três direções, isto implicaria em corpos de prova com orientação do acamamento ortogonal ao furo, e corpos de prova nas outras duas direções de furo, necessariamente paralelas ao acamamento.

Estudo de reativação de falha também é interessante, onde espécimes com pelo menos duas direções de furo poderiam ser cisalhados, cimentados por algum material frágil e submetidos à ensaios triaxiais.

Se houver recursos, priorizar um grupo de amostras com porosidade similar, medidas pelo método de saturação, e realizar tomografia em todos os corpos de prova antes e depois do ensaio triaxial, de preferência sob confinamentos maiores do que 10 MPa. Com isso tentar criar um modelo digital estimando a distribuição de poros e a deformação dos mesmos.

Por último, uma interpretação que pode ser feita sozinha ou em conjunto com alguma das sugestões acima. Orientar todo o bloco e marcar a posição exata de cada espécime a ser perfurado, tanto em termos de localidade no bloco, como em termos de posição de giro. Produzir fotografias panorâmicas de cada corpo de prova em toda sua extensão lateral e tentar estimar estatisticamente por imagem o tamanho, forma e distribuição dos poros em cada corpo de prova. Feito isto para todas, correlacionar entre todos os corpos de prova subsequentes, criando um mosaico da distribuição de poros, que poderia representar trechos do bloco antes de ser perfurado. Realizar ensaios triaxiais em todos os espécimes com intervalos de porosidades similares para cada grupo de confinamento.

ACOCELLA, V.; FUNICIELLO, R. Transverse systems along the extensional Tyrrhenian margin of central Italy and their influence on volcanism. **Tectonics**, v. 25, TC2003. doi:10.1029/2005TC001845, 2006.

ACOCELLA, A.; TURRINI, D. **Formation, appearance and characterization of travertine**: in Sienese travertine. Alinea, Florence, 2010, 303p. 2014.

ADAMS, A. E.; MACKENZIE, W. S.; GUILFORD, C. **Atlas of Sedimentary rock under the microscope**. 1.ed. Great Britain: ELBS, 108p, 1988.

AHR, W. M.; ALLEN, D.; BOYD A.; BACHMAN, H. N.; CLERKE, E. A.; SMITHSON, T.; GZARA, K.; HASSALL, J.; MURTY, C.; ZUBARI, H.; RAMAMOORTHY, R. **Confronting the carbonate conundrum**. Schlumberger Oil field Rev. p. 18 – 29, 2005.

AHR, W. M. **Geology of Carbonate Reservoirs: the identification, description, and characterization of hydrocarbon reservoirs in carbonate rocks**. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 277p, 2008.

AKBAR, M. ALGHAMDI, H.; ALLEN, D.; CARNEGIE, A.; DUTTA, D.; OLESEN, J. R.; CHOURASIYA, R. D.; LOGAN, D.; STIEF, D.; NETHERWOOD, R.; RUSSEL, S. D.; SAXEMA, M. **Evaluation of carbonate reservoirs**. **Oilfield Review**, p. 20 - 43, 2001.

AL-KHARUSI, A. S. Z.; **Pore-scale characterization of rocks carbonates**. London. Thesis of doctor of philosophy - Imperial College London, Department of earth science and engineering, 275p, 2007.

ALONZO-ZARZA, A. M., TANNER, L. H.; **Carbonates in Continental Settings. Facies, environments and processes**. UK. 1ed, Vol. 61, 381p, 2010.

ALONZO-ZARZA, A. M., TANNER, L. H.; **Carbonates in Continental Settings. Geochemistry, diagenesis and applications**. UK. 1ed. Vol. 62. 321p. 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2938-95** - Standard Practices for Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances. United States, West Conshohocken, Pennsylvania, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4543-08** - Standard Practices for Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances. United States, West Conshohocken, Pennsylvania, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D7012-13**, Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures. United States, West Conshohocken, Pennsylvania, 2013.

AZEVEDO, I. C. D.; MARQUES, E. A. G. **Introdução a Mecânica das Rochas**. 1.ed. Viçosa, MG: UFV, 363p, 2002.

BARGAR, K. E. **Geology and thermal history of Mammoth Hot Springs, Yellowstone**, 1978.

BENAVENTE, D.; LAPEÑA, F. J.; MARTÍNEZ, J. M.; CUETO, N.; GARCÍA-DEL-CURA, M. Á. **Influencia de la petrografía en las propiedades petrofísicas y de durabilidad del Travertino Clásico**. Valoración de su anisotropía. *Geogaceta*, v.46, p. 147- 150, 2009.

BEIRANVAND, B. Quantitative Characterization of Carbonate Pore Systems by Mercury-Injection Method and Image Analysis in a Homogeneous Reservoir. Society of Petroleum Engineers. **SPE 81479**, p.1-9, 2003.

BIENIAWSKI, Z. T.; BERNEDE, M. J. **Suggested Method for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, v. 16, n. 2, p. 135-140, 1979.

BILLI, A.; TIBERTI, M. M. Possible causes of arc development in the Apennines, central Italy. Geological Society of America. **Bulletin 121**, 1409–1420, 2009.

CAPEZZUOLI, E.; BROGI, A.; RICCI, M.; BERTINI, A. **Travertines and Calcareous Tufa in Southern Tuscany (Central Italy)**. University of Siena and Florence. Department of Earth Sciences (Italy). Field Trip Guide Book, 71p, 2011.

CAVINATO, G. P.; DECELLES, P. G. **Extensional Basins in the Tectonically Bimodal Central Apennines Fold-thrust Belt, Italy: Response to Corner Flow Above a Subducting Slab in Retrograde Motion**. *Geology* 27, 955–958, 1999.

CERULEO, P. **L'ecosistema Preistorico Della Regione, Delle Acque Albule E Della Bassa Valle Dell'aniene**. p. 34-57, 2005.

CHAFETZ, H. S.; FOLK, R. L. **Travertines: Depositional Morphology and the Bacterially Constructed Constituents**. *Journal of Sedimentology Petrology*, v. 54, p. 289– 316, 1984.

CHIODINI, G.; TASSI, F.; CALIRO, S.; CHIARABBA, C.; VASELLI, O.; ROUWET, D. **Time-dependent CO<sub>2</sub> Variations in Lake Albano Associated With Seismic Activity**. *Volcanology*, v. 74, p. 861–871, 2012.

CHOQUETTE, P. W.; PRAY, L. C. **Geologic Nomenclature and Classification of Porosity in Sedimentary Carbonates**, 1970: in A Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks: Grains, textures, porosity, diagenesis. AAPG Memoir 77, p. 294-302, 2003.

COSENTINO, D.; PAROTTO, M. **Assetto Strutturale dei Monti Lucretili Settentrionali (Sabina)**: Nuovi Dati e Schema Tettonico Preliminare. *Geologica Romana* 25, 73–90, 1986.

CPRM, Redes Institucionais, Bibliotecas – Rede Ametista, 2018.

CROSSEY, L. J.; FISHCER, T. P.; PATCHETT, P. J.; KARLSTROM, K. E.; HILTON, D. R.; NEWELL, D. L.; HUNTOON, P.; REYNOLDS, A. C.; DE LEEUW, G. A. M. **Dissected Hydrologic System at The Grand Canyon: Interaction Between Deeply Derived Fluids and Plateau Aquifer Waters in Modern Springs and Travertine**. *Geology* 34, 25–28, 2006.

DANA, J. D.; HURLBUT C. S. **Manual de Mineralogia**, vol. 2, ed. Mexico: Reverté, 578p, 1960.

DE BENEDETTI, A.A.; FUNICIELLO, R.; GIORDANO, G.; DIANO, G.; CAPRILLI, E.; PATERNE, M. **Volcanology, History and Myths of the Lake Albano Maar (Colli Albani Volcano, Italy)**. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 176, 387–406, 2008.

DEERE, D. U.; MILLER, R. P. Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock. Air Force Weapons Lab., Kirtland Air Force Base, New Mexico, 1966.

DOMINGUES, D. L. P. **Caracterização Geológica e Geomecânica de Travertinos**. Rio de Janeiro, 2011. 315p. Dissertação de mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

DUNHAM, R. J. **Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Texture**. In: Ham, W. E. (Ed.). *Classification of carbonate rocks*. American Association of Petroleum Geology Memoir 1, p. 108–121, 1962.

EMBRY, A. F.; KLOVAN, J. E. A. **Late Devonian Reef Tract on Northeastern Banks Island, N.W.T.** *Bulletin of Canadian Petroleum Geologists*, vol. 19, p. 730–781, 1971.

FACCENNA, C.; FUNICIELLO, R.; BRUNI, A.; MATTEI, M.; SAGNOTTI, L. **Evolution of a Transfer Related Basin: the Ardea Basin (Latium, Central Italy)**. *Basin Research*, v. 5, p. 1–11, 1994.

FACCENNA, C.; SOLIGO, M.; BILLI, A.; FILIPPIS, L.; FUNICIELLO, R.; ROSSETTI, C.; TUCCIMEI, P. **Late Pleistocene Depositional Cycles of The Lapis Tiburtinus Travertine (Tivoli, Central Italy)**: Possible influence of Climate and Fault Activity. *Global and Planetary Change*, v. 63, p. 299–308, 2008.

FALCÃO, F. O. L.; **Simulação Hidromecânica de Reservatório Carbonático de Petróleo Através do Pseudoacoplamento**. 2013. 201p. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

FILIPPIS, L.; ANZALONE, E.; BILLI, A.; FACCENNA, C.; PONCIA, P. P.; SELLA, P. **The Origin and Growth of a Recently-Active Fissure Ridge Travertine Over a Seismic Fault, Tivoli, Italy**. *Geomorphology*. v. 195, p. 13–26, 2013a.

FILIPPIS, L.; RANIERO, M. N.; **Il travertino delle Acque Albule (Tivoli): Aspetti Geologici ed Ambientali**. Estratto dal Bollettino SIGEA, 10p, 1998.

FILIPPIS, L.; ROSSETTI, C.; BILLI, A.; FACCENNA, C. **Uomo, Georisorse e Faglie Nel Bacino delle Acque Albule, Italia centrale**. *Società Geologica Italiana*, v. 27, p. 86–97, 2013b.

FOLK, R. L. Practical Petrographic Classification of Limestones. **American Association Petroleum Geology Bulletin**, v. 43, p.1– 38, 1959.

FOLK, R. L. **Spectral Subdivision of Limestone Types**. *Symposium American Association Petroleum Geologists Memoir*, 1962, p. 62–84.

FORD, T.D.; PEDLEY, H. M. A Review of Tufa and Travertine Deposits of The World. **Earth-Science Reviews**, v. 41, p. 117-175, 1996.

FRANKLIN J. A. **Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression**: Revised Version. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, v. 20, n. 6, p. 285–290, 1983.

FRANKLIN, J. A.; VOGLER, U. W.; SZLAVIN, J.; EDMOND, J. M.; BIENIAWSKI, Z.T. Suggested Methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake-durability Index Properties: in The complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: **1974-2006**. 2007. p. 83-98.

FRANKLIN, S. A. Comunicação pessoal, 2018.

FUNICIELLO, R.; GIORDANO, G.; DE RITA, D. The Albano Maar Lake (Colli Albani Volcano, Italy): Recent Volcanic Activity and Evidence of Pre-Roman Age Catastrophic Lahar Events. **Journal of Volcanology of Geothermal Research**, v. 123, p. 43–61, 2003.

GARCÍA-DEL-CURA, M. Á.; BENAVENTE, D.; MARTÍNEZ, J.; CUETO, N. **Sedimentary Structures and Physical Properties of Travertine and Carbonate Tufa Building Stone**. Construction and Building Materials, v. 28, p. 456–467, 2012.

GASPARINI C.; DI MARO, R.; PAGLIUCA, N. M.; PIRRO, M.; MARCHETTI, A. Recent Seismicity of The Acque Albule Travertine Basin. **Annals of Geophysics**, v. 45, N. 3/4, p. 537 – 550, 2002.

GOODMAN, R. E. **Introduction to Rock Mechanics**. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1989, 562p.

GRABAU, A. W. **Principles of Stratigraphy**. New York: Dover Publications, in two volumes, 1960. 1185 p. Reprinted from 1924 Edition.

GUO, L.; RIDING, R. Hot-spring travertine facies and sequences, Late Pleistocene, Rapolano Terme, Italy. **Sedimentology**. v. 45, p. 163 – 180, 1998.

JAEGER J. G.; COOK N. G. W.; ZIMMERMAN R. W. **Fundamentals of Rock Mechanics**. 4.ed. USA: Blackwell, 2007. 475p.

JORDAN, G. Comunicação pessoal, 2018.

KIM M. K.; LADE P. V. Modelling Rock Strength in Three Dimensions. **Journal Rock Mechanics Mining. Sciences. & Geomechanics**. v. 21, n. 1, p. 21-33, 1984.

KIEWIET, M. C. D. N. **Comportamento Hidromecânico de Zonas de Falha em Travertino**: Estudo Experimental e Numérico Sobre o Impacto da Reativação Estrutural na Produção de Reservatórios. 2015. 561p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

LOPES, J. N. **Faciologia e Gênese dos Carbonatos do Grupo Bambuí na Região de Arcos, Estado de Minas Gerais**. São Paulo. 1995. 166p. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.

LUZA, C. A. H. **Estudo Experimental do Comportamento Geomecânico do Travertino**. 2014. 149p. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

MILANI, E. Desafios Geocientíficos para a Exploração e Produção de Petróleo nos Carbonatos do Pré-sal. Sessão Especial – Tecnologia Geofísica para os Reservatórios de Pré-sal. **Simpósio Brasileiro de Geofísica**, Brasília, 2010.

PALCHIK, V. Technical note: On the Ratios between Elastic Modulus and Uniaxial Compressive Strength of Heterogeneous Carbonate Rocks. *Rock. Mech. Rock. Eng. Springer*, v. 44, p. 121 – 128, 2011.

PATACCA, E.; SARTORI, R.; SCANDONE, P. Tyrrhenian Basin and Apenninic Arcs: Kinematic Relations Since Late Tortonian Times. **Memorie della Società Geologica Italiana** 45, 425–451, 1992.

PENTECOST, A. **Travertine**. 1.ed. Netherlands: Springer, 2005. 445p.

PENTECOST, A.; VILES, H. A Review and Reassessment of Travertine Classification. **Géographie Physique et Quaternaire**, v. 48, n. 3, p. 305-314, 1994.

PETUNIN V. V.; YIN, X.; TUTUNCU, A. N. Porosity and Permeability Changes in Sandstone and Carbonates Under Stress and Their Correlation to Rock Texture. **Society of Petroleum Engineers**, p. 1-14, 2011.

PIMENTEL, E. M. **Influência da Variação da Permeabilidade na Estabilidade de Poços de Petróleo**. Rio de Janeiro, 2002. 115p. Dissertação de mestrado - Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro.

PROTHERO, D. R.; SCHWAB, F. **Sedimentary Geology, An Introduction to Sedimentary Rocks and Stratigraphy**. New York. 574p, 3 ed, 2013.

RIDING, R. Structure and Composition of Organic Reefs and Carbonate Mud Mounds: Concepts and Categories. **Earth-Science Reviews**, v. 58, p.163-231, 2002.

RONCHI, P.; CRUCIANI, F. Continental Carbonates as a Hydrocarbon Reservoir, an Analog Case Study from The Travertine of Saturnia, Italy. **AAPG Bulletin**, v. 99, no. 4 (2015), pp. 711–734.

SCHOLLE, P. A.; ULMER-SCHOLLE, D. S. A. **Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks**: Grains, Textures, Porosity, Diagenesis. Tulsa: AAPG Memoir 77, 2003.

SMITS A. M. M.; DE WASL J. A.; VAN KOOTEN J. F. C. Prediction of Abrupt Reservoir Compaction and Surface Subsidence Caused By Pore Collapse in Carbonates. **Society of Petroleum Engineers**, p. 340-346, 1986.

SOARES, A. C. **Estudo Experimental para Definição de Colapso de Poros em Rochas Carbonáticas**. São Paulo, 2003. 80p. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo.

SUGUIO, K. **Geologia Sedimentar**. São Paulo: Edgar Blücher, 416 p, 2003.

TERRA, G. J. S.; SPADINI, A.; FRANÇA, A.; SOMBRA, C.; ZAMBONATO, E.; JUSCHAKS, L. C.; ARIENTI, L.; ERTHAL, M.; BLAUTH, M.; FRANCO, M. Classificação de Rochas Carbonáticas Aplicável as Bacias Sedimentares Brasileiras, **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 1, p. 9-29, maio 2010.

TÖRÖK, Á.; VÁSÁRHELYI, B. **The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary**. *Engineering Geology*, v. 115, p. 237–245, 2010.

TÖRÖK, Á.; **Influence of fabric on the physical properties of limestone**, in: Fracture and Failure of Natural Building Stone. Springer, Dordrecht. 2006 p. 487–495

TUCKER, M. E.; WRIGHT, V. P. **Carbonate Sedimentology**. 1.ed. London: Blackwell, 1990. 482p.

TUCKER, M. E.; **Sedimentary Petrology**. Department of Geological Sciences. University of Durham. 2001. 3<sup>rd</sup> ed. 251p.

UNESP, **Atlas de Minerais e Rochas** – Museu Heinz Ebert, 2018.

WRIGHT, V. P. **A Revised Classification of Limestones**. Sedimentary Geology, v. 76, p.177 – 185, 1992.

## 8 Apêndices

Neste item são apresentados complementos dos estudos e análises realizadas, os quais ocupariam muito espaço se ficassem junto ao texto principal.

Em Apêndice I encontram-se compilados todos os índices físicos, de todos os corpos de prova, incluindo aqueles não ensaiados mecanicamente. Foram separados apenas em duas tabelas para corpos de prova verticais e horizontais, respectivamente.

No Apêndice II encontra-se a descrição completa de todas as doze lâminas delgadas da análise microscópica.

Já no Apêndice III encontram-se os gráficos das análises químicas por energia dispersiva (EDS) não inclusas no texto principal.

No Apêndice IV observa-se uma descrição do tipo de ruptura e das propriedades dos poros de cada corpo de prova após o ensaio triaxial .

Em Apêndice V compilaram-se as tabelas de índices físicos e parâmetros elásticos em uma mesma página para facilitar a comparação dos resultados entre cada grupo de confinamento.

E no Apêndice VI são mostrados os parâmetros elásticos em função da porosidade (total e interconectada) e da tensão (desviadora e confinante). Esta é uma forma de avaliar as médias dos valores através de linhas de tendência, onde foi possível observar a distribuição de cada parâmetro e sua variação com o grau de porosidade, além de comparar os resultados entre amostras verticais e horizontais.

## 8.1.

### Apêndice I

### Índices físicos de todos os corpos de prova

**Apêndice I (A)** Tabela com índices físicos de todos os corpos de prova verticais.

CP	V <sub>Total</sub> (cm³)	H/D	w <sub>R</sub>	VERTICAL			M <sub>Sat</sub> (g)	VERTICAL										VERTICAL									
				V <sub>Ve</sub> M <sub>Ve</sub>	V <sub>Vi</sub> M <sub>Vi</sub>	V <sub>w</sub> M <sub>w</sub>		η <sub>wi</sub> (%)	η <sub>wE</sub> (%)	η <sub>w</sub> (%)	Rη <sub>w</sub> (%)	V <sub>s</sub> (cm³)	V <sub>v</sub> (cm³)	η <sub>Total</sub> (%)	Δη (%)	η <sub>iso</sub> (%)	e (%)	ρ <sub>s</sub> (g/cm³)	ρ <sub>Sat,Ap</sub> (g/cm³)	ρ <sub>Sat</sub> (g/cm³)	γ <sub>s</sub> (kN/m³)	γ <sub>Sat,Ap</sub> (kN/m³)	γ <sub>Sat</sub> (kN/m³)	γ <sub>Sub</sub> (kN/m³)			
-	-	(%)	(g) - (ml)	(g) - (ml)	(g) - (ml)	(g)	(%)	(%)	(%)	-	(cm³)	(cm³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)				
CPV5	218.59	2.2	0.47%	6.99	7.18	14.17	557.59	3.28%	3.20%	6.48%	1.03	201.27	17.32	7.92%	1.44%	18.20%	0.08	2.49	2.52	2.55	24.36	24.69	25.00	15.33			
CPV6	212.28	2.1	1.16%	7.48	9.21	16.69	520.66	4.34%	3.52%	7.86%	1.23	186.66	25.62	12.07%	4.21%	34.87%	0.13	2.37	2.42	2.45	23.27	23.69	24.04	14.47			
CPV7	216.36	2.2	0.32%	2.56	7.01	9.57	551.84	3.24%	1.18%	4.42%	2.74	200.84	15.52	7.17%	2.75%	38.34%	0.07	2.51	2.54	2.55	24.56	24.88	25.00	15.47			
CPV8	210.88	2.1	1.01%	8.68	14.35	23.03	517.80	6.80%	4.12%	10.92%	1.65	183.25	27.63	13.10%	2.18%	16.65%	0.15	2.35	2.41	2.46	22.99	23.66	24.06	14.49			
CPV9	214.25	2.1	0.22%	7.85	6.41	14.26	545.09	2.99%	3.67%	6.66%	0.82	196.60	17.65	8.24%	1.58%	19.18%	0.09	2.48	2.51	2.54	24.28	24.57	24.93	15.26			
CPV10	214.00	2.1	0.91%	0.40	12.46	12.86	524.39	5.82%	0.19%	6.01%	31.20	189.46	24.54	11.47%	5.46%	47.61%	0.12	2.39	2.45	2.45	23.43	24.00	24.01	14.75			
CPV11	211.02	2.1	0.36%	1.92	7.60	9.52	536.24	3.60%	0.91%	4.51%	0.96	195.08	15.94	7.55%	3.04%	40.27%	0.08	2.50	2.53	2.54	24.46	24.81	24.90	15.54			
CPV13	216.51	2.2	0.37%	5.71	5.30	11.01	557.01	2.45%	2.64%	5.09%	0.93	202.22	14.29	6.60%	1.51%	22.94%	0.07	2.52	2.55	2.57	24.71	24.95	25.21	15.58			
CPV14	213.42	2.1	1.21%	3.02	10.05	13.07	522.89	4.71%	1.41%	6.12%	3.33	188.82	24.60	11.52%	5.40%	46.87%	0.13	2.39	2.44	2.45	23.41	23.87	24.01	14.52			
CPV18	220.05	2.2	0.35%	7.95	8.84	16.79	548.93	4.02%	3.61%	7.63%	1.11	197.09	22.96	10.43%	2.80%	26.88%	0.11	2.42	2.46	2.49	23.70	24.09	24.45	14.82			
CPV19	212.07	2.1	0.39%	6.97	6.75	13.72	538.75	3.18%	3.29%	6.47%	0.97	194.46	17.62	8.31%	1.84%	22.11%	0.09	2.48	2.51	2.54	24.26	24.57	24.90	15.29			
CPV20	216.76	2.2	0.64%	6.86	11.11	17.97	531.22	5.13%	3.17%	8.29%	1.62	190.09	26.67	12.30%	4.01%	32.61%	0.14	2.37	2.42	2.45	23.20	23.71	24.02	14.61			
CPV21	212.70	2.1	0.59%	4.00	7.33	11.33	538.24	3.45%	1.88%	5.33%	1.83	195.15	17.55	8.25%	2.92%	35.44%	0.09	2.48	2.51	2.53	24.28	24.61	24.80	15.23			
CPV22	217.78	2.2	1.06%	7.18	16.71	23.89	530.40	7.67%	3.30%	10.97%	2.33	187.60	30.19	13.86%	2.89%	20.85%	0.16	2.33	2.40	2.44	22.79	23.54	23.87	14.35			
CPV24	212.08	2.1	0.48%	4.28	11.35	15.63	524.31	5.35%	2.02%	7.37%	2.65	188.40	23.68	11.17%	3.80%	33.99%	0.12	2.40	2.45	2.47	23.51	24.03	24.23	14.75			
CPV27	215.16	2.2	0.29%	3.16	7.60	10.76	552.18	3.53%	1.47%	5.00%	2.40	200.53	14.64	6.80%	1.80%	26.47%	0.07	2.52	2.55	2.57	24.66	25.01	25.15	15.61			
CPV29	213.57	2.1	0.23%	3.47	7.93	11.40	548.01	3.71%	1.63%	5.34%	2.28	198.74	14.83	6.94%	1.60%	23.10%	0.07	2.51	2.55	2.57	24.62	24.99	25.15	15.62			
CPV30	213.59	2.1	0.31%	7.19	8.06	15.25	538.63	3.77%	3.37%	7.14%	1.12	193.84	19.74	9.24%	2.10%	22.77%	0.10	2.45	2.49	2.52	24.01	24.38	24.71	15.07			
CPV35	214.36	2.1	0.28%	3.16	7.19	10.35	548.03	3.35%	1.47%	4.83%	2.28	199.14	15.22	7.10%	2.27%	32.00%	0.07	2.51	2.54	2.56	24.58	24.91	25.05	15.70			
CPV36	217.52	2.2	0.47%	6.42	10.75	17.17	541.37	4.94%	2.95%	7.89%	1.67	194.15	23.37	10.74%	2.85%	26.54%	0.12	2.41	2.46	2.49	23.62	24.10	24.39	14.93			
CPV37	215.60	2.2	0.58%	4.10	6.72	10.82	551.06	3.12%	1.90%	5.02%	1.64	200.09	15.52	7.20%	2.18%	30.24%	0.07	2.51	2.54	2.56	24.56	24.86	25.05	15.46			
CPV39	205.90	2.1	0.31%	1.40	3.94	5.34	525.75	1.91%	0.68%	2.59%	2.82	192.74	13.15	6.39%	3.80%	59.43%	0.06	2.53	2.55	2.55	24.77	24.96	25.02	15.57			
CPV45	215.98	2.2	0.53%	5.68	9.60	15.28	549.70	4.44%	2.63%	7.07%	1.69	197.93	18.05	8.36%	1.28%	15.33%	0.09	2.47	2.52	2.55	24.75	24.68	24.94	15.39			
CPV51	235.11	2.4	0.33%	6.51	7.39	13.90	603.65	3.14%	2.77%	5.91%	1.14	218.43	16.68	7.09%	1.18%	16.69%	0.07	2.51	2.54	2.57	24.58	24.89	25.16	15.54			
CPV54	212.50	2.1	0.61%	8.00	9.89	17.89	523.81	4.65%	3.77%	8.42%	1.24	187.38	25.13	11.82%	3.40%	28.78%	0.13	2.38	2.43	2.46	23.33	23.79	24.16	14.59			
CPV59	241.42	2.4	0.37%	6.12	7.79	13.91	611.72	3.23%	2.53%	5.76%	1.27	221.41	20.00	8.29%	2.53%	30.49%	0.09	2.48	2.51	2.53	24.27	24.58	24.83	15.27			
CPV60	226.63	2.3	0.53%	7.13	7.33	14.46	576.21	3.23%	3.15%	6.38%	1.03	208.06	18.58	8.20%	1.82%	22.15%	0.08	2.48	2.51	2.54	24.29	24.61	24.92	15.34			
CPV61	231.08	2.3	0.27%	3.58	6.77	10.35	588.76	2.93%	1.55%	4.48%	1.89	214.23	16.85	7.29%	2.81%	38.59%	0.07	2.50	2.53	2.55	24.53	24.82	24.97	15.45			
CPV63	224.12	2.3	0.55%	7.92	6.44	14.36	565.12	2.87%	3.53%	6.41%	0.81	203.99	20.13	8.98%	2.58%	28.68%	0.09	2.46	2.49	2.52	24.08	24.36	24.71	15.15			
CPV66	229.70	2.3	0.46%	6.80	7.29	14.09	580.48	3.17%	2.96%	6.13%	1.07	209.77	19.92	8.67%	2.54%	29.29%	0.09	2.47	2.50	2.53	24.16	24.48	24.77	15.21			
CPV67	232.15	2.3	0.36%	7.45	6.36	13.81	594.70	2.74%	3.21%	5.95%	0.85	215.14	17.01	7.33%	1.38%	18.79%	0.07	2.50	2.53	2.56	24.52	24.79	25.10	15.46			
CPV69	229.57	2.3	0.30%	2.17	9.08	11.25	584.51	3.96%	0.94%	4.90%	4.19	212.32	17.25	7.51%	2.61%	34.79%	0.08	2.50	2.54	2.55	24.47	24.86	24.95	15.52			
CPV71	224.50	2.3	1.32%	7.40	9.95	17.35	547.86	4.43%	3.29%	7.73%	1.35	196.49	28.01	12.48%	4.75%	38.07%	0.14	2.36	2.41	2.44	23.16	23.59	23.92	14.35			

**Apêndice I (B)** Tabela com índices físicos de todos os corpos de prova horizontais.

CP	V <sub>Total</sub> (cm <sup>3</sup> )	H/D	w <sub>R</sub> (%)	HORIZONTAL				HORIZONTAL										HORIZONTAL									
				V <sub>Ve</sub> M <sub>wE</sub>	V <sub>Vi</sub> M <sub>wi</sub>	V <sub>w</sub> M <sub>w</sub>	M <sub>Sat</sub> (g)	η <sub>wi</sub> (%)	η <sub>wE</sub> (%)	η <sub>w</sub> (%)	Rη <sub>w</sub>	V <sub>s</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>w</sub> (cm <sup>3</sup> )	η <sub>Total</sub> (%)	Δη (%)	η <sub>Iso</sub> (%)	e	ρ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>Sat</sub> Ap (g/cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>Sat</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>s</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	γ <sub>Sat</sub> Ap (kN/m <sup>3</sup> )	γ <sub>Sat</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	γ <sub>Sub</sub> (kN/m <sup>3</sup> )			
	-	(g) - (ml)	(g) - (ml)	(g) - (ml)	(%)	(%)	(%)	-	(cm <sup>3</sup> )	(cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	-	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )				
CPH1	227,16	2,3	0,65%	0,16	7,80	7,96	576,84	3,43%	0,07%	3,50%	50,22	210,70	16,46	7,25%	3,74%	51,67%	0,07	2,50	2,54	2,54	24,54	24,88	24,89	15,44			
CPH7	213,43	2,1	0,61%	0,83	7,71	8,54	536,72	3,61%	0,39%	4,00%	9,33	195,62	17,80	8,34%	4,34%	52,05%	0,09	2,47	2,51	2,51	24,25	24,61	24,64	15,22			
CPH8	218,20	2,2	0,46%	6,30	6,78	13,08	562,23	3,11%	2,89%	5,99%	1,08	203,39	14,81	6,79%	0,79%	11,69%	0,07	2,52	2,55	2,58	24,66	24,97	25,25	15,60			
CPH9	219,39	2,2	0,63%	1,49	3,84	5,33	563,79	1,75%	0,68%	2,43%	2,57	206,84	12,56	5,72%	3,29%	57,52%	0,06	2,55	2,56	2,57	24,95	25,12	25,18	15,70			
CPH10	214,88	2,2	0,48%	4,88	10,40	15,28	534,78	4,84%	2,27%	7,11%	2,13	192,41	22,48	10,46%	3,35%	32,00%	0,11	2,42	2,47	2,49	23,69	24,17	24,39	14,83			
CPH11	220,00	2,2	0,52%	5,20	11,11	16,31	551,52	5,05%	2,36%	7,41%	2,14	198,23	21,77	9,90%	2,48%	25,10%	0,11	2,43	2,48	2,51	23,84	24,34	24,57	14,94			
CPH12	217,78	2,2	0,49%	7,18	9,02	16,20	544,63	4,14%	3,30%	7,44%	1,26	195,71	22,07	10,13%	2,69%	26,58%	0,11	2,43	2,47	2,50	23,78	24,18	24,51	14,94			
CPH13	212,50	2,1	0,32%	3,00	9,96	12,96	536,79	4,69%	1,41%	6,10%	3,32	194,01	18,49	8,70%	2,60%	29,91%	0,09	2,47	2,51	2,53	24,16	24,62	24,76	15,18			
CPH14	221,78	2,2	0,46%	6,38	9,22	15,60	564,88	4,16%	2,88%	7,04%	1,44	203,44	18,35	8,27%	1,24%	14,95%	0,09	2,48	2,52	2,55	24,27	24,68	24,96	15,32			
CPH15	217,83	2,2	0,47%	8,63	6,61	15,24	554,72	3,03%	3,96%	7,00%	0,77	199,81	18,02	8,27%	1,28%	15,44%	0,09	2,48	2,51	2,55	24,27	24,57	24,96	15,21			
CPH16	214,57	2,2	0,99%	4,67	6,42	11,09	537,89	2,99%	2,17%	5,17%	1,38	195,11	19,46	9,07%	3,90%	43,02%	0,10	2,46	2,49	2,51	24,06	24,35	24,57	14,97			
CPH17	220,29	2,2	1,29%	6,59	7,80	14,39	547,10	3,54%	2,99%	6,53%	1,18	197,30	22,99	10,44%	3,90%	37,40%	0,11	2,42	2,45	2,48	23,70	24,05	24,34	14,70			
CPH18	219,49	2,2	1,47%	5,59	8,84	14,43	538,71	4,03%	2,55%	6,57%	1,58	194,18	25,31	11,53%	4,96%	42,99%	0,13	2,39	2,43	2,45	23,41	23,80	24,05	14,43			
CPH20	220,22	2,2	1,24%	6,42	7,82	14,24	548,63	3,55%	2,91%	6,47%	1,22	197,92	22,29	10,12%	3,66%	36,14%	0,11	2,43	2,46	2,49	23,78	24,13	24,41	14,70			
CPH21	214,93	2,2	1,15%	8,63	9,08	17,71	533,80	4,22%	4,02%	8,24%	1,05	191,14	23,79	11,07%	2,83%	25,54%	0,12	2,40	2,44	2,48	23,53	23,95	24,34	14,54			
CPH22	218,24	2,2	0,46%	4,44	11,57	16,01	545,23	5,30%	2,03%	7,33%	2,61	196,01	22,23	10,19%	2,85%	27,99%	0,11	2,42	2,48	2,50	23,76	24,28	24,48	15,04			
CPH23	216,95	2,2	0,53%	13,55	8,79	22,34	535,52	4,05%	6,25%	10,30%	0,65	190,07	26,89	12,39%	2,09%	16,90%	0,14	2,37	2,41	2,47	23,18	23,58	24,19	14,53			
CPH24	215,54	2,2	0,34%	3,34	9,51	12,85	538,81	4,41%	1,55%	5,96%	2,85	194,80	20,74	9,62%	3,66%	38,05%	0,10	2,44	2,48	2,50	23,91	24,35	24,50	15,09			
CPH25	216,13	2,2	0,39%	3,73	8,71	12,44	541,61	4,03%	1,72%	5,75%	2,34	195,99	20,14	9,32%	3,56%	38,24%	0,10	2,45	2,49	2,51	23,99	24,39	24,56	15,13			
CPH26	218,34	2,2	0,37%	2,24	9,40	11,64	548,36	4,31%	1,03%	5,33%	4,19	198,79	19,56	8,96%	3,62%	40,47%	0,09	2,46	2,50	2,51	24,09	24,51	24,61	15,18			
CPH27	218,06	2,2	0,37%	4,56	7,96	12,52	545,57	3,65%	2,09%	5,74%	1,74	197,43	20,64	9,46%	3,72%	39,32%	0,10	2,44	2,48	2,50	23,96	24,31	24,52	14,99			
CPH28	210,84	2,1	1,12%	6,04	8,76	14,80	519,94	4,15%	2,86%	7,02%	1,45	187,09	23,75	11,26%	4,25%	37,69%	0,12	2,40	2,44	2,47	23,48	23,89	24,17	14,58			
CPH29	220,43	2,2	1,33%	4,33	18,56	22,89	545,68	8,42%	1,96%	10,38%	4,29	193,63	26,80	12,16%	1,78%	14,60%	0,13	2,37	2,46	2,48	23,24	24,07	24,26	14,77			
CPH30	220,91	2,2	1,11%	15,11	11,34	26,45	537,89	5,13%	6,84%	11,97%	0,75	189,42	31,48	14,25%	2,28%	16,00%	0,16	2,32	2,37	2,43	22,69	23,19	23,86	14,09			

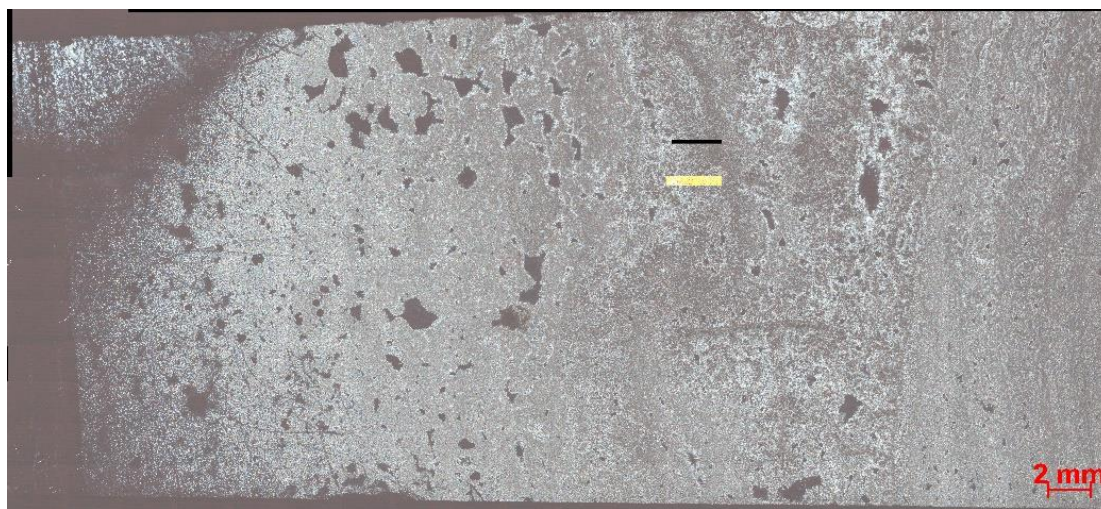
## 8.2.

### Apêndice II

### Análise Microscópica

A descrição das lâminas seguiu a mesma ordem vista na Tabela 9, pois esta foi feita de acordo com andar do grau de porosidade e magnitude da mesma.

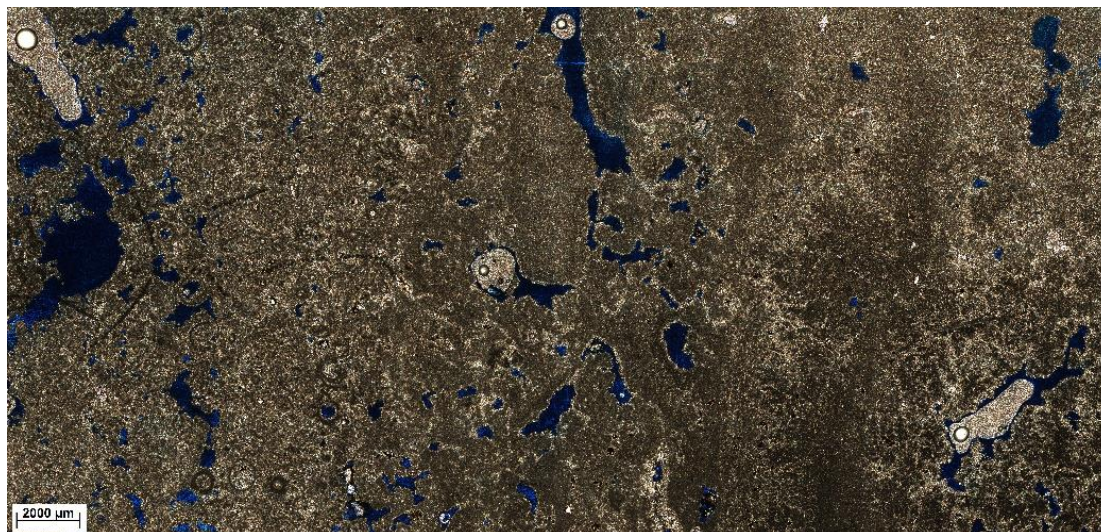
#### Lâmina 1 (ortogonal) – baixa porosidade



**Apêndice II (A)** Foto mosaico da lâmina 1 com orientação ortogonal ao acamamento.

Grande quantidade de mineralogia carbonática microcristalina, ocorrendo com muitos poros fenestrais bordejados por calcita espática. Observou-se alguns poros vulgares (isolados) com quase ou nenhum preenchimento, em maioria arredondados. Os poros fenestrais apresentaram forma subarredondada a alongada, até 3 mm de largura, e com grãos de esparita mais bem formados apenas nos poros maiores. Pequenos grãos de calcita espática preenchem os poros de canal e são observáveis por toda área, inclusive se interligando ao preenchimento dos poros maiores. Na lâmina como um todo, em especial na porção extrema-direita, observa-se com exatidão a orientação do acamamento, a maioria dos poros alongados acompanha esta direção.

### Lâmina 2 (ortogonal) – baixa porosidade



**Apêndice II (B)** Foto mosaico da lâmina 2 com orientação ortogonal ao acamamento.

Predomínio absoluto de micrita, com poros fenestrais alongados à subarredondados de até 4 mm de largura. Ocorrência de poros de canal preenchidos parcial a totalmente pela calcita espática com grãos muito pequenos. Presença de grãos escuros, que podem ser magnetita, desde totalmente sozinhos a ocorrendo junto com microgrãos de esparita. Poros vulgares subarredondados se encontram espalhados pela lâmina, mas com baixa frequência. E observou-se microgrãos de calcita espática ao longo de toda área espalhados pelos poros de canal.

### Lâmina 7 (ortogonal) – baixa porosidade



**Apêndice II (C)** Foto mosaico da lâmina 7 com orientação ortogonal ao acamamento.

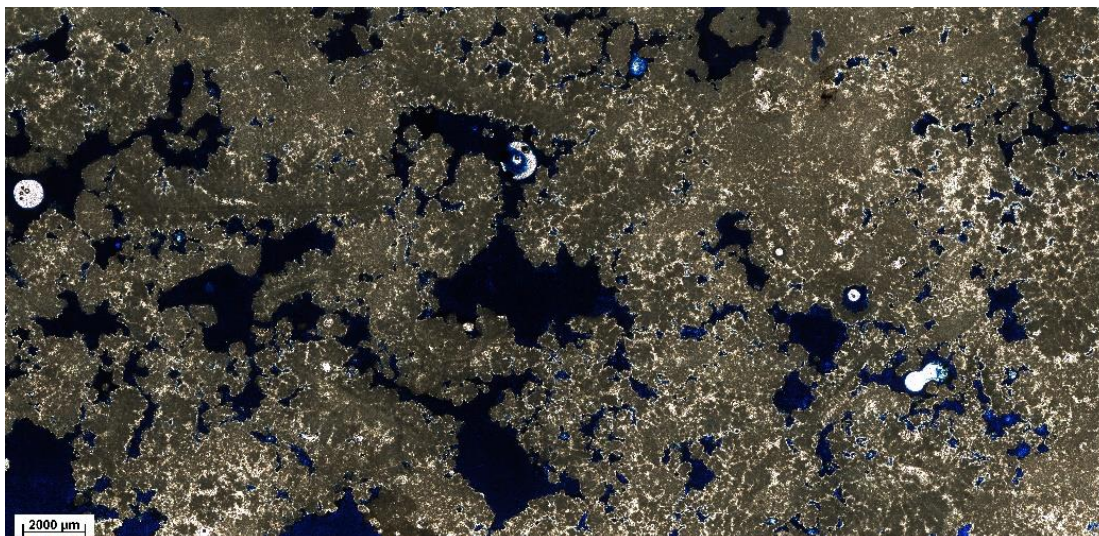
Predomínio de calcita microcristalina. Observou-se orientação do acamamento com poros alongados de cerca de 1 mm de largura e uma descontinuidade na mesma direção que cruza toda lâmina com mais de 20 mm de comprimento. Nas bordas e no centro da lâmina somente calcita microcristalina orientadas. Ao centro desta lâmina, poros alongados paralelos ao acamamento e de quase a totalmente preenchidos por grãos muito pouco desenvolvidos de esparita. Notou-se grãos de calcita espática bem desenvolvidos apenas em algumas regiões de borda da descontinuidade.

#### **Lâmina 5 (paralela) – alta porosidade**



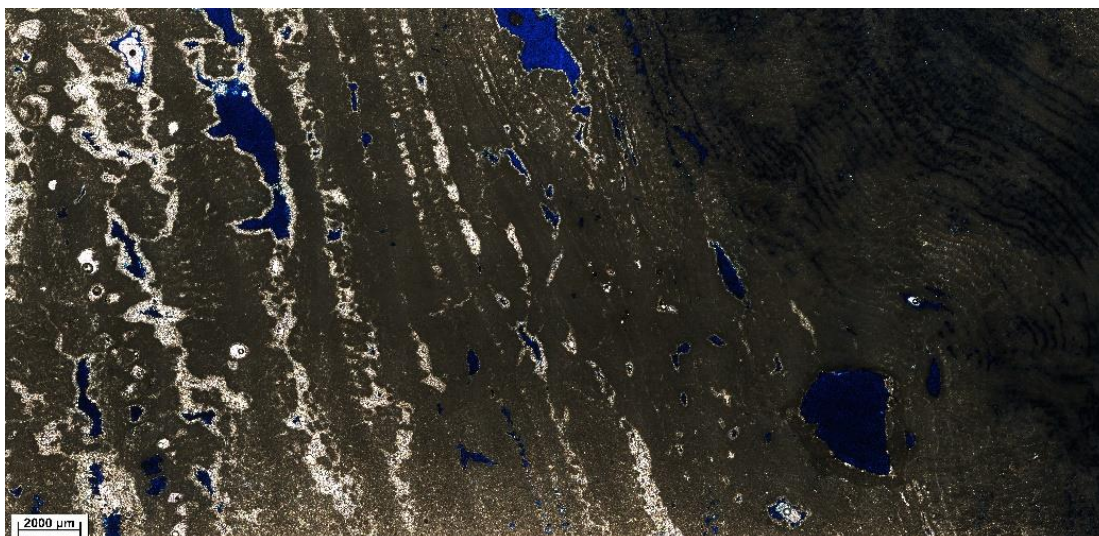
**Apêndice II (D)** Foto mosaico da lâmina 5 com orientação paralela ao acamamento.

Predomínio de calcita espática e pouca ocorrência de calcita microcristalina. Baixa porosidade com maioria de poros alongados. Aparentemente é contrastante a classificação de alta porosidade para esta lâmina, visto o que se observa na foto, mas vale ressaltar que esta foi cortada da sessão de um rejeito em que sua superfície era de alta porosidade. Não menos importante, a esparita ocorreu em muitos casos preenchendo poros em quase todas as lâminas observadas. Nesta por sinal a esparita (calcita espática) predominou em absoluto, ou seja, possivelmente a maior parte dos poros está preenchida.

**Lâmina 6 (paralela) – alta porosidade**

**Apêndice II (E)** Foto mosaico da lâmina 6 com orientação paralela ao acamamento.

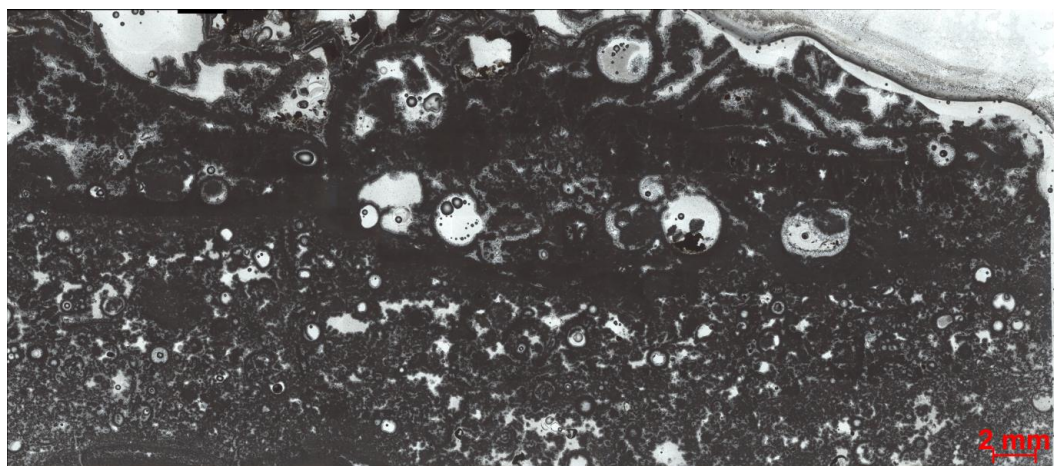
Predomínio de calcita microcristalina e poros grandes alongados. A calcita espática foi observada em toda lâmina preenchendo em maioria poros de canal. Os poros fenestrais alongados chegaram a 5 mm de largura, encontraram-se bem distribuídos e relativamente bem interconectados. Notou-se que, mesmo nos poros grandes, não havia preenchimento de esparita nas bordas, chegando esta a ocorrer próxima a borda de alguns poros maiores, mas que estariam em poros de canal. Isto possivelmente significa poros isolados, os quais não teriam sido percolados por fluido termal rico em CO<sub>2</sub>, e consequentemente sem formação de esparita nas bordas.

**Lâmina 12 (ortogonal) – média porosidade**

**Apêndice II (F)** Foto mosaico da lâmina 12 com orientação ortogonal ao acamamento.

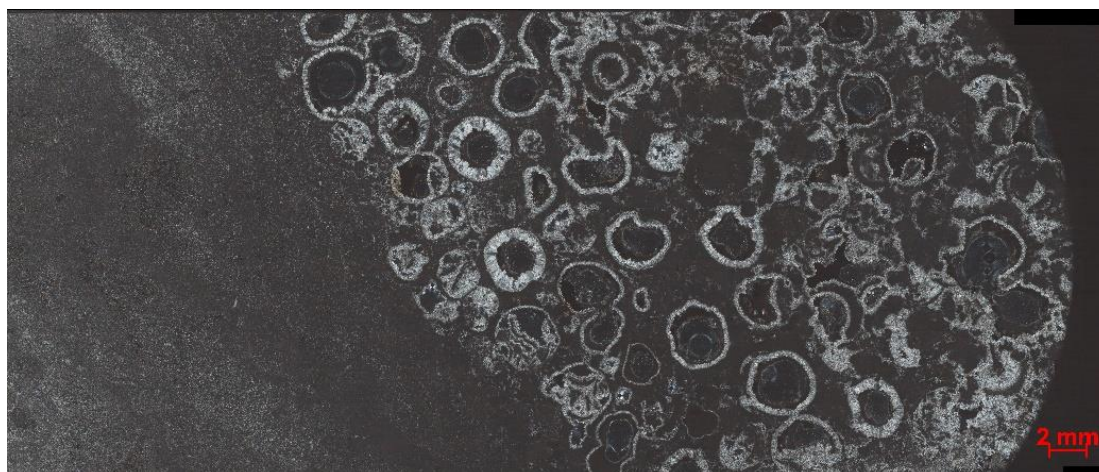
O melhor exemplar das lâminas que evidenciou o contraste entre os andares adotados A1 e A2 certamente foi a lâmina 12. A única que ilustrou cerca de metade de cada lado. À esquerda tem-se uma grande quantidade de calcita microcristalina com poros alongados de até 4 mm de largura, alinhados com o acamamento e preenchidos por calcita espática, alguns quase que totalmente. Observou-se que quanto maior os poros, mais bem desenvolvidos os grãos de esparita bordejando e/ou preenchendo. Já a porção direita predomina basicamente calcita microcristalina com poucos poros, a maioria deles em escala micrométrica e pouca ou nenhuma calcita espática preenchendo estes poros, mesmo assim, com grãos muito mal desenvolvidos. Notou-se na porção direita um poro isolado subarredondado de cerca de 2 mm de diâmetro. Isto mostrou que a macroporosidade desta rocha também ocorre sob poros isolados, mesmo em partes do travertino com baixíssima porosidade. Também reforça o que foi visto na lâmina 6, pertencente ao andar A1, onde existem poros grandes com nenhum ou quase nenhum preenchimento de esparita.

#### **Lâmina 8 (paralela) – baixa porosidade**



**Apêndice II (G)** Foto mosaico da lâmina 8 com orientação paralela ao acamamento.

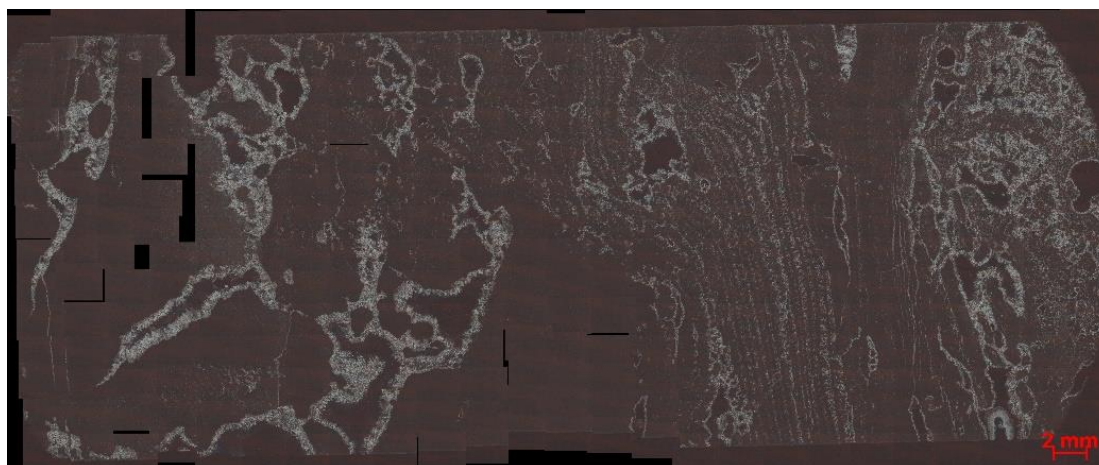
Predomínio de calcita microcristalina. Ocorrência de esparita nas bordas dos poros arredondados fenestrais de 2mm, bem como preenchendo quase que totalmente poros menores. Em alguns poros maiores, envolvidos por esparita pouco desenvolvida, existem grãos de magnetita encrustado total a parcialmente. Presença de muitos poros perfeitamente arredondados em que se acredita ter como origem bolhas de gás, onde os cristais de calcita espática nestes poros puderam se desenvolver muito bem devido às altas temperaturas, ficando o formato da bolha preservado. Nesta lâmina até mesmo o teste com ímã de neodímio apresentou atração magnética.

**Lâmina 9 (paralela) – baixa porosidade**

**Apêndice II (H)** Foto mosaico da lâmina 9 com orientação paralela ao acamamento.

Calcita microcristalina dominando a porção esquerda da lâmina, onde notou-se orientação do acamamento. Na região central e direita da mesma ocorrem poros arredondados em que se acredita serem formados por bolhas de gás. Porosidade predominante fenestral, arredondada, de até 2 mm de diâmetro e preenchida nas bordas por cristais grandes e bem desenvolvidos de calcita espática que, em alguns casos, bordejavam preenchimentos de magnetita parcial e, em poros menores, totalmente. Esta disposição reforçou a hipótese de fluidos quentes que depositaram carbonato. No caso, devido a maior temperatura, desenvolveu grãos maiores e bem desenvolvidos de calcita espática. Porém isto só foi possível onde o fluido teve condição de percolar, logicamente, os vazios interconectados. Os poros arredondados indicariam a preservação do formato de bolhas do fluido quente. E a ocorrência da magnetita nos poros bordejada por esparita pode indicar que o fluido que carregou e depositou este material foi posterior ao que depositou o carbonato. Também nesta lâmina o teste com ímã de neodímio obteve atração magnética.

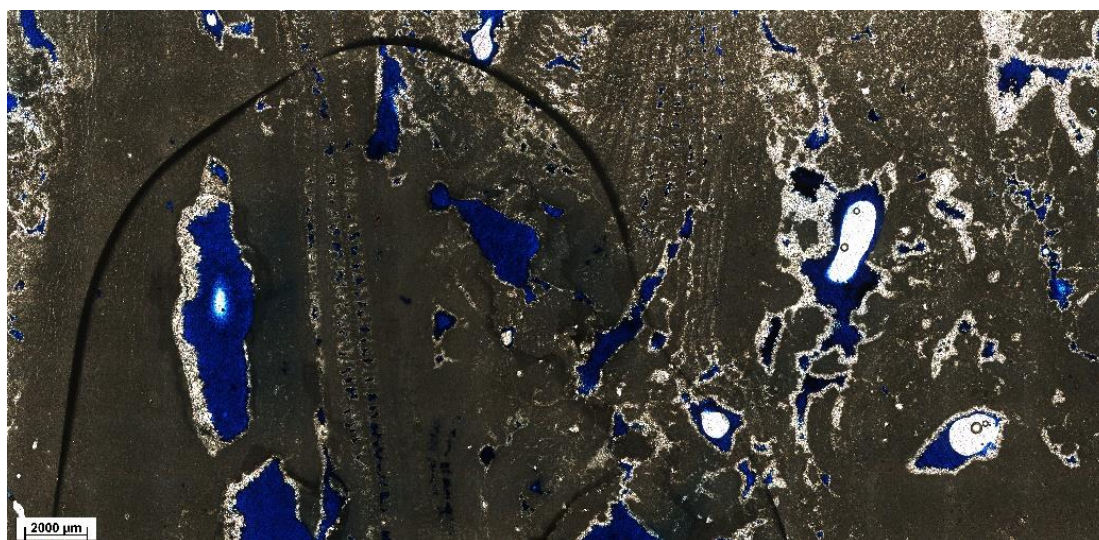
### Lâmina 3 (ortogonal) – média porosidade



**Apêndice II (I)** Foto mosaico da lâmina 3 com orientação ortogonal ao acamamento.

Bem observável a direção do acamamento e alguns poros alongados alinhados com o mesmo. Observou-se poros fenestrais alongados, de até 5 mm de largura, preenchidos por calcita espática com grãos muito bem desenvolvidas. Aqui a hipótese de percolação de fluidos quentes que depositou carbonato com cristais bem desenvolvidos devido a alta temperatura, também é fortalecida. Na porção centro-direita predomina calcita microcristalina com microgrãos de esparita alinhados com o acamamento em microporos de canal.

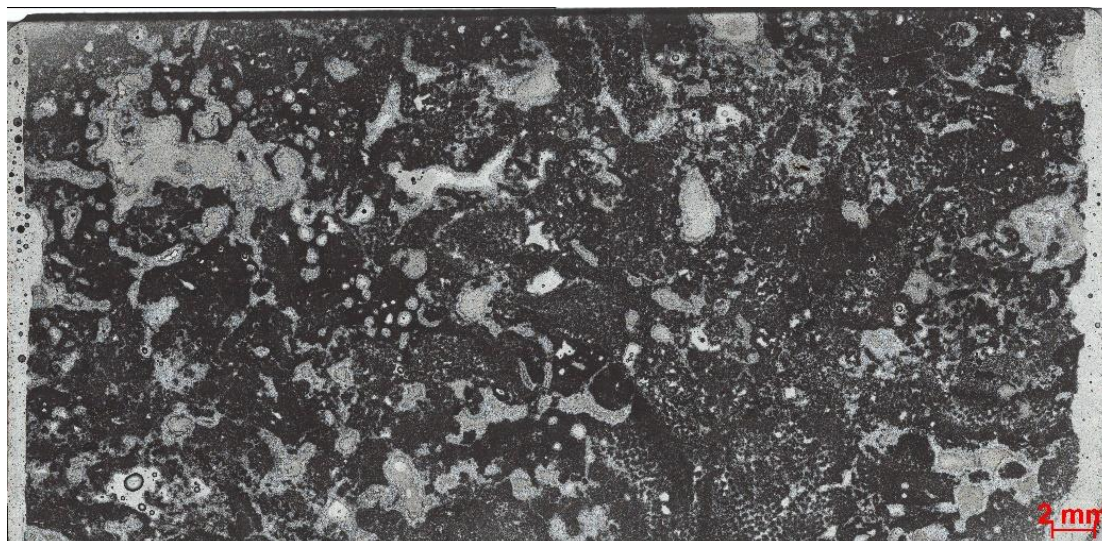
### Lâmina 4 (ortogonal) – média porosidade



**Apêndice II (J)** Foto mosaico da lâmina 4 com orientação ortogonal ao acamamento.

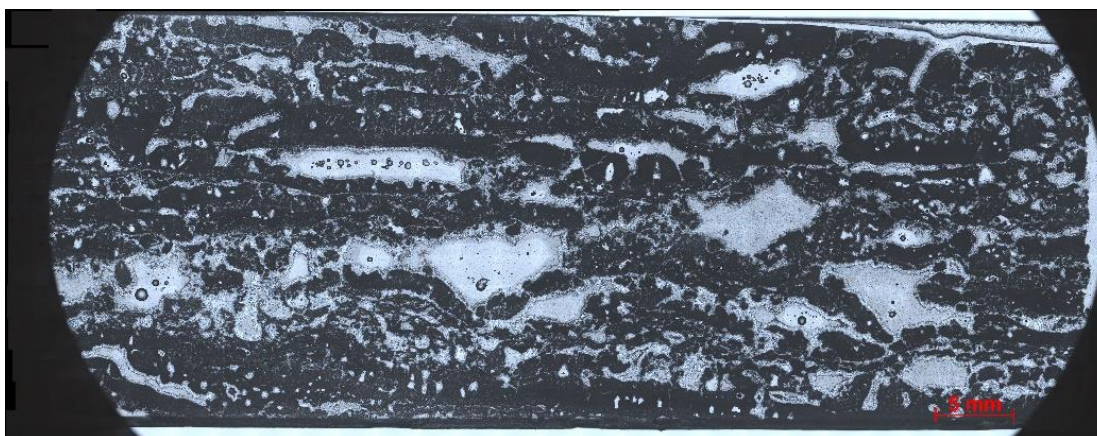
Calcita microcristalina predominando, com muitos poros fenestrais alongados de até 4mm e bordejados por calcita espática, com grãos mais desenvolvidos nos poros maiores. Observou-se a direção do acamamento na lâmina e os poros mais alongados alinhados com o mesmo. Ocorrência de poros arredondados vugulares, alguns alinhados na direção do acamamento.

#### **Lâmina 10 (paralela) – alta porosidade**



**Apêndice II (K)** Foto mosaico da lâmina 10 com orientação paralela ao acamamento.

Predomínio de calcita microcristalina, porém com ampla ocorrência de calcita espática, com grãos medianamente desenvolvidos, preenchendo os poros parcial a totalmente. Já nos poros maiores o bordejamento de esparita ocorreu com grãos bem formados e preenchimento parcial. Localizada uma ocorrência igual à da lâmina 9 onde, circundado pelo cimento espático, existe incrustação de magnetita. Porosidade vugular, fenestral e de canal ocorrem. Poros alongados de até 6mm largura.

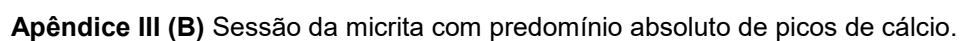
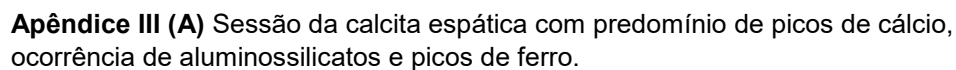
**Lâmina 11 (ortogonal) – alta porosidade**

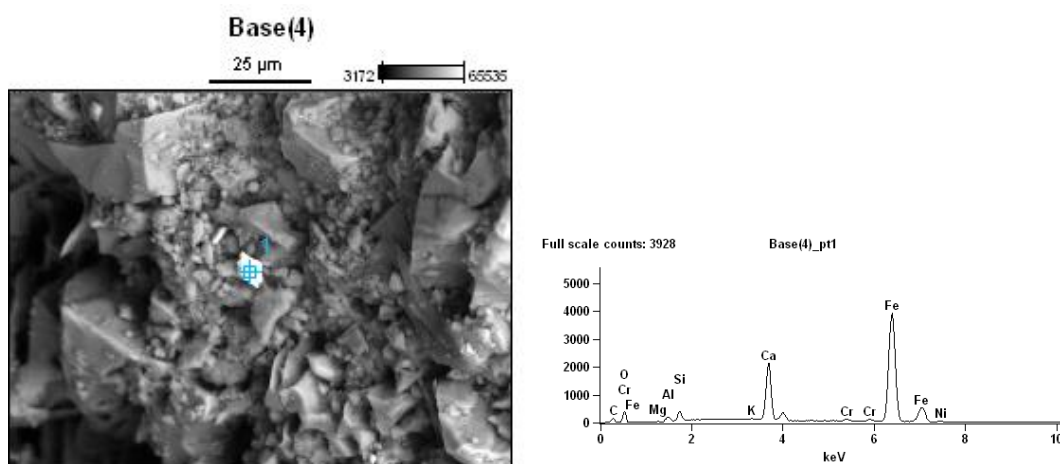
**Apêndice II (L)** Foto mosaico da lâmina 11 com orientação ortogonal ao acamamento.

Ampla ocorrência de calcita microcristalina com poros fenestrais muito grandes, alguns superando 10 mm. Os poros fenestrais ocorreram em maioria alongados e preenchidos nas bordas por calcita espática (cristais bem desenvolvidos). Nos poros menores chegou ao quase preenchimento completo. Na orientação do acamamento destacam-se e os poros alongados que acompanham o a orientação do mesmo.

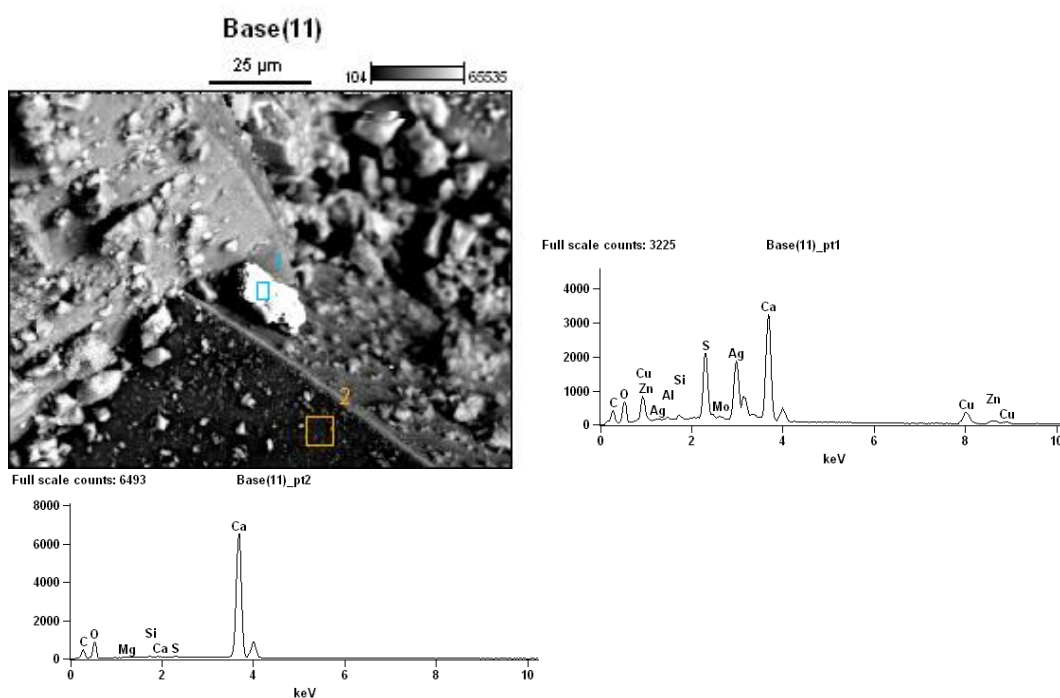
## Apêndice III

## Base(1)





**Apêndice III (C)** Sessão avermelhada em fratura com predomínio absoluto de ferro.



**Apêndice III (D)** Sessão de esparita em fratura com predomínio de cálcio e ocorrência de diversos elementos.

#### 8.4.

### Apêndice IV

### Avaliação superficial dos corpos de prova

**Apêndice IV (A)** Tabela de avaliação dos corpos de prova pós ensaio triaxial – CPV.

Avaliação do corpo de prova						CPV
$\sigma_c$ (MPa)	CP	Tipo de Ruptura	Forma dos Poros	Tamanho dos Poros	Concentração dos Poros	Observação
UCS	CPV71	Fendilhamento				
	CPV24	Fendilhamento	Alongados	Grande	Distribuída	Traços finos de fendilhamento concentrados na base
	CPV59	Colapso de poros	Subarredondados	Médio	Centro - Base	
	CPV67	Fendilhamento	Arredondados	Pequeno	Base	Caving de 0,5cm de altura na base ; Possível presença de pequenos colapsos de poros
	CPV61	Fendilhamento	Alongados	Pequeno	Topo e Base	
10	CPV54	Cisalhamento	Alongados	Grande	Distribuída	Cisalhamento concentrado na base
	CPV66	Cisalhamento	Alongados / Subarredondados	Grande / Médio	Base	Cisalhamento concentrado na base
	CPV5	Cisalhamento	Subarredondados - Alongados	Pequeno	Centro e Base	Cisalhamento concentrado na base
	CPV7	Cisalhamento	Subarredondados	Médio / Pequeno	Centro e Base	Cisalhamento entre centro e base
20	CPV14	Cisalhamento	Alongados / Subarredondados	Grande / Médio	Distribuída	Caving de 0,2cm de altura na base ; cisalhamento distribuído ao centro do corpo
	CPV63	Cisalhamento	Alongados / Subarredondados	Grande	Centro - Base	Caving de 0,6cm de altura e alongamento superior a 5cm na base; lascas quebradas na base
	CPV21	Colapso de poros	Arredondados	Grande / Médio	Base	Possível concentração de poros grandes arredondados na base do CP
	CPV13	Cisalhamento	Subarredondados	Pequeno	Topo e Base	Fino traço de cisalhamento observável próximo aos poros da base
30	CPV6	Cisalhamento	Alongados / Subarredondados	Grande	Distribuída	Cisalhamento predominante do centro para o topo, local onde estão os maiores poros alongados
	CPV30	Cisalhamento	Alongados	Grande / Médio	Distribuída	Cisalhamento pouco expressivo no centro
	CPV11	Cisalhamento	Subarredondados / Alongados	Pequeno	Distribuída	Cisalhamento bem pronunciado no topo e base
	CPV27	Cisalhamento	Subarredondados	Pequeno	Base	Cisalhamento bem pronunciado na base
40	CPV 37	Cisalhamento	Alongados	Médio	Base	Cisalhamento predominante na base; microcavings na base
	CPV29	Cisalhamento	Subarredondados	Médio / Grande	Centro - Base	Poros mais ao centro do que em CPV37

**Apêndice IV (B)** Tabela de avaliação dos corpos de prova pós ensaio triaxial – CPH.

Avaliação dos corpos de prova						CPH
$\sigma_c$ (MPa)	CP	Tipo de Ruptura	Tipo de Poros de superfície	Tamanho dos Poros de superfície	Concentração dos Poros de superfície	Observação
UCS	CPH18	Fendilhamento	Alongados	Grande / Médio	Distribuído	
	CPH11	Fendilhamento	Alongados	Grande / Médio	Centro - Base	
	CPH14	Fendilhamento	Subarredondados	Pequeno	Distribuído	Fendilhamento predominante em um lado do CP devido a ser muito mais poroso que o outro
10	CPH10	Fendilhamento / Cisalhamento	Alongados	Grande / Médio	Centro e Base	Notório cisalhamento seguindo os poros alongados paralelos ao acamamento com um microcaving
	CPH12	Cisalhamento	Alongados	Grande	Distribuído	Notório cisalhamento seguindo os poros alongados paralelos ao acamamento com alguns microcavings
	CPH25	Cisalhamento	Alongados	Grande / Médio	Distribuído	Microcavings na base e centro alongados e alinhados com o acamamento
	CPH8	Cisalhamento	Subarredondados	Pequeno	Centro - Base	Cisalhamento por todo CP; predomínio do cisalhamento nas áreas mais densas ao invés de as mais porosas
20	CPH17	Fendilhamento / Cisalhamento	Subarredondados - Alongados	Médio / Grande	Centro - Base	
	CPH20	Cisalhamento	Subarredondados	Médio / Equeno	Topo	Cisalhamento muito pronunciado em duas direções diagonais
	CPH7	Cisalhamento	Subarredondados	Pequeno	Topo	Não chegou a romper; ruptura inferida
30	CPH21	Cisalhamento	Subarredondados / Alongados	Grande / Médio	Distribuído	Possível colapso de poros no centro na fase residual
	CPH22	Cisalhamento	Alongados	Grande / Médio	Topo e Centro	
	CPH13	Cisalhamento	Subarredondados	Pequeno	Distribuído	Cisalhamento predominante no topo
	CPH15	Cisalhamento	Subarredondados	Pequeno	Distribuído	
40	CPH29	Cisalhamento	Subarredondados / Alongados	Grande / Médio	Topo - Centro	
	CPH01	Cisalhamento	Subarredondados / Alongados	Pequeno	Topo e Centro	Cisalhamento predominante no topo

8.5.  
Apêndice V  
Índices físicos e parâmetros elásticos compilados

Apêndice V (A) Tabela de índices físicos e parâmetros elásticos compilados – CPV.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1412821

Dimensional		Propriedades dos vazios							Massa específica		Propriedades da curva					Parâmetros elásticos					
		$\eta_{rel}$ (%)	e	$\eta_w$ (%)	$\eta_{ve}$ (%)	$R\eta_w$	$\Delta\eta$ (%)	$\eta_{loo}$ (%)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{sat}$ (g/cm <sup>3</sup> )	CP	$\sigma_R$ (MPa)	$\epsilon_A$ (%)	$\epsilon_{Rad}$ (%)	$\epsilon_{Vol}$ (%)	$\sigma_{Max}$ (MPa)	Tipo de Ruptura	E (GPa)	$\nu$	G (GPa)	
CPV71	113.11	2.3	12.48	0.14	7.73	4.43%	1.34	4.75	38.06%	2.36	2.44	CPV71	34.79	0.11	0.07	0.02	34.79	Fendilhamento	36.33	0.25	1.45
CPV24	106.39	2.1	11.17	0.12	7.37	5.35%	2.02%	2.65	34.02%	2.40	2.47	CPV24	37.72	0.11	0.06	0.03	37.72	Fendilhamento	35.15	0.23	1.43
CPV59	121.78	2.4	8.29	0.09	5.76	3.23%	2.53%	1.28	30.52%	2.48	2.53	CPV59	19.46	0.06	0.02	0.03	24.32	Colapso de poros	35.18	0.23	1.43
CPV67	116.92	2.3	7.33	0.07	5.95	2.74%	3.21%	0.85	18.83%	2.50	2.56	CPV67	49.00	0.11	0.04	0.03	49.00	Fendilhamento	49.94	0.27	1.96
CPV61	116.38	2.3	7.29	0.07	4.48	2.93%	1.55%	1.89	38.55%	2.50	2.55	CPV61	54.72	0.10	0.04	0.03	54.72	Fendilhamento	49.62	0.24	2.01

Dimensional		Propriedades dos vazios							Massa específica		Propriedades da curva					Parâmetros elásticos					
		$\eta_{rel}$ (%)	e	$\eta_w$ (%)	$\eta_{ve}$ (%)	$R\eta_w$	$\Delta\eta$ (%)	$\eta_{loo}$ (%)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{sat}$ (g/cm <sup>3</sup> )	CP	$\sigma_R$ (MPa)	$\epsilon_A$ (%)	$\epsilon_{Rad}$ (%)	$\epsilon_{Vol}$ (%)	$\sigma_{Max}$ (MPa)	Tipo de Ruptura	E (GPa)	$\nu$	G (GPa)	
CPV54	106.94	2.1	11.82	0.13	8.42	4.65%	3.77%	1.23	34.0	2.38	2.46	CPV54	50.69	0.13	0.04	0.11	56.73	Cisalhamento	49.02	0.28	1.91
CPV65	115.18	2.3	8.67	0.09	6.13	3.17%	2.96%	1.07	29.30%	2.47	2.53	CPV65	54.21	0.17	0.03	0.09	60.66	Cisalhamento / Colapso	48.85	0.26	1.95
CPV5	110.09	2.2	7.92	0.08	6.48	3.28%	3.20%	1.03	14.85%	2.49	2.55	CPV5	69.47	0.22	0.04	0.13	69.47	Cisalhamento	55.56	0.26	2.20
CPV7	109.01	2.2	7.17	0.07	4.42	3.24%	1.18%	2.75	38.35%	2.51	2.55	CPV7	99.40	0.22	0.06	0.11	99.40	Cisalhamento	63.13	0.20	2.62

Dimensional		Propriedades dos vazios							Massa específica		Propriedades da curva					Parâmetros elásticos					
		$\eta_{rel}$ (%)	e	$\eta_w$ (%)	$\eta_{ve}$ (%)	$R\eta_w$	$\Delta\eta$ (%)	$\eta_{loo}$ (%)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{sat}$ (g/cm <sup>3</sup> )	CP	$\sigma_R$ (MPa)	$\epsilon_A$ (%)	$\epsilon_{Rad}$ (%)	$\epsilon_{Vol}$ (%)	$\sigma_{Max}$ (MPa)	Tipo de Ruptura	E (GPa)	$\nu$	G (GPa)	
CPV14	107.40	2.1	11.52	0.13	6.12	4.71%	1.41%	3.34	40.88%	2.39	2.45	CPV14	71.96	0.28	0.01	0.25	74.03	Cisalhamento	49.50	0.36	18.33
CPV63	113.37	2.3	8.98	0.09	6.41	2.87%	3.53%	0.81	25.7	2.46	2.52	CPV63	96.79	1.30	0.30	0.80	96.79	Cisalhamento	50.00	0.42	2.22
CPV21	107.38	2.1	8.25	0.08	5.33	3.45%	1.88%	1.84	2.92	2.48	2.53	CPV21	54.20	0.17	0.04	0.16	57.81	Colapso de poros	50.03	0.46	20.2
CPV13	109.00	2.2	6.60	0.07	5.09	2.45%	2.64%	0.93	1.51	2.52	2.57	CPV13	120.99	0.27	0.06	0.14	120.99	Cisalhamento	68.97	0.29	2.67

Dimensional		Propriedades dos vazios							Massa específica		Propriedades da curva					Parâmetros elásticos					
		$\eta_{rel}$ (%)	e	$\eta_w$ (%)	$\eta_{ve}$ (%)	$R\eta_w$	$\Delta\eta$ (%)	$\eta_{loo}$ (%)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{sat}$ (g/cm <sup>3</sup> )	CP	$\sigma_R$ (MPa)	$\epsilon_A$ (%)	$\epsilon_{Rad}$ (%)	$\epsilon_{Vol}$ (%)	$\sigma_{Max}$ (MPa)	Tipo de Ruptura	E (GPa)	$\nu$	G (GPa)	
CPV6 R	106.70	2.1	12.07	0.13	7.86	4.34%	3.52%	1.23	4.21	2.37	2.45	CPV6 R	78.11	0.26	0.09	0.13	89.88	Cisalhamento	48.57	0.23	1.98
CPV30	107.06	2.1	9.24	0.10	7.14	3.77%	3.37%	1.12	2.10	22.73%	2.45	CPV30	83.45	0.28	0.05	0.17	83.45	Cisalhamento	54.05	0.26	2.15
CPV11 R	106.32	2.1	7.55	0.08	4.51	3.60%	0.91%	3.96	3.04	40.26%	2.50	CPV11 R	102.47	0.67	0.04	0.62	125.04	Cisalhamento	46.83	0.24	1.88
CPV27	105.58	2.2	6.80	0.07	5.00	3.53%	1.47%	2.40	1.80	36.47%	2.52	CPV27	106.84	0.37	0.05	0.25	116.67	Cisalhamento	64.52	0.23	2.63

Dimensional		Propriedades dos vazios							Massa específica		Propriedades da curva					Parâmetros elásticos					
		$\eta_{rel}$ (%)	e	$\eta_w$ (%)	$\eta_{ve}$ (%)	$R\eta_w$	$\Delta\eta$ (%)	$\eta_{loo}$ (%)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{sat}$ (g/cm <sup>3</sup> )	CP	$\sigma_R$ (MPa)	$\epsilon_A$ (%)	$\epsilon_{Rad}$ (%)	$\epsilon_{Vol}$ (%)	$\sigma_{Max}$ (MPa)	Tipo de Ruptura	E (GPa)	$\nu$	G (GPa)	
CPV 37	109.02	2.2	7.20	0.07	5.02	3.12%	1.50%	1.64	2.18	30.28%	2.51	CPV 37	104.36	0.25	0.08	0.14	135.18	Cisalhamento	64.52	0.26	2.56
CPV29	107.52	2.1	6.94	0.07	5.34	3.71%	1.63%	2.28	1.60	23.05%	2.51	CPV29	122.60	0.40	0.10	0.18	122.60	Cisalhamento	67.33	0.33	2.53

# Apêndice V (B) Tabela de índices físicos e parâmetros elásticos compilados – CPH.

PUC-Rio - Certificação Digital N° 1412821

CP	Dimensional		Propriedades dos vazios							Massa específica			
	H (mm)	H/D	$\eta_{Total}$ (%)	e	$\eta_w$ (%)	$\eta_{wi}$ (%)	$\eta_{we}$ (%)	$R\eta_w$ (%)	$\Delta\eta$ (%)	$\eta_{iso}$ (%)	$\rho_s$ (g/cm³)	$\rho_{sat}$ (g/cm³)	
CPH18	110,50	2,2	11,53	0,13	6,57	4,03%	2,55%	1,58	4,96	43,02%	2,39	2,45	
CPH11	110,80	2,2	9,90	0,11	7,41	5,05%	2,36%	2,14	2,49	25,15%	2,43	2,51	
CPH14	111,61	2,2	8,27	0,09	7,04	4,16%	2,88%	1,44	1,23	14,87%	2,48	2,55	

CP	Dimensional		Propriedades dos vazios							Massa específica			
	H (mm)	H/D	$\eta_{Total}$ (%)	e	$\eta_w$ (%)	$\eta_{wi}$ (%)	$\eta_{we}$ (%)	$R\eta_w$ (%)	$\Delta\eta$ (%)	$\eta_{iso}$ (%)	$\rho_s$ (g/cm³)	$\rho_{sat}$ (g/cm³)	
CPH10	108,31	2,2	10,46	0,11	7,11	4,84%	2,27%	2,13	3,35	32,03%	2,42	2,49	
CPH12	109,51	2,2	10,13	0,11	7,44	4,14%	3,20%	1,25	2,69	26,59%	2,43	2,50	
CPH25	108,72	2,2	9,32	0,10	5,75	4,03%	1,72%	2,34	3,57	38,30%	2,45	2,51	
CPH8	109,72	2,2	6,79	0,07	5,99	3,11%	2,89%	1,08	0,80	11,78%	2,52	2,58	

CP	Dimensional		Propriedades dos vazios							Massa específica			
	H (mm)	H/D	$\eta_{Total}$ (%)	e	$\eta_w$ (%)	$\eta_{wi}$ (%)	$\eta_{we}$ (%)	$R\eta_w$ (%)	$\Delta\eta$ (%)	$\eta_{iso}$ (%)	$\rho_s$ (g/cm³)	$\rho_{sat}$ (g/cm³)	
CPH17	110,86	2,2	10,44	0,11	6,53	3,54%	2,99%	1,18	3,91	37,45%	2,42	2,48	
CPH20	110,91	2,2	10,12	0,11	6,47	3,55%	2,91%	1,22	3,65	36,07%	2,43	2,49	
CPH7	107,49	2,1	8,34	0,09	4,00	3,61%	0,39%	9,26	4,34	52,04%	2,47	2,51	

CP	Dimensional		Propriedades dos vazios							Massa específica			
	H (mm)	H/D	$\eta_{Total}$ (%)	e	$\eta_w$ (%)	$\eta_{wi}$ (%)	$\eta_{we}$ (%)	$R\eta_w$ (%)	$\Delta\eta$ (%)	$\eta_{iso}$ (%)	$\rho_s$ (g/cm³)	$\rho_{sat}$ (g/cm³)	
CPH21 R	108,55	2,2	11,07	0,12	8,24	4,22%	4,02%	1,05	2,83	25,56%	2,40	2,48	
CPH22	110,00	2,2	10,19	0,11	7,33	5,30%	2,03%	2,61	2,86	28,07%	2,42	2,50	
CPH13	107,15	2,1	8,70	0,09	6,10	4,69%	1,41%	3,33	2,60	29,89%	2,47	2,53	
CPH15 R	109,75	2,2	8,27	0,09	7,00	3,03%	3,96%	0,77	1,27	15,36%	2,48	2,55	

CP	Dimensional		Propriedades dos vazios							Massa específica			
	H (mm)	H/D	$\eta_{Total}$ (%)	e	$\eta_w$ (%)	$\eta_{wi}$ (%)	$\eta_{we}$ (%)	$R\eta_w$ (%)	$\Delta\eta$ (%)	$\eta_{iso}$ (%)	$\rho_s$ (g/cm³)	$\rho_{sat}$ (g/cm³)	
CPH29	110,84	2,2	12,16	0,13	10,38	8,42%	1,96%	4,30	1,78	14,64%	2,37	2,48	
CPH1	115,09	2,3	7,25	0,07	3,50	3,43%	0,07%	49,00	3,75	51,72%	2,50	2,54	

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH18	65,32	0,12	0,05	0,03	65,32
CPH11	69,80	0,12	0,06	0,02	69,80
CPH14	64,75	0,12	0,05	0,03	64,75

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH10	109,74	0,18	0,07	0,05	109,74
CPH12	138,41	0,22	0,09	0,08	128,41
CPH25	138,31	0,22	0,07	0,10	138,31
CPH8	146,64	0,28	0,06	0,18	146,64

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH17	140,84	0,32	0,09	0,11	140,84
CPH20	139,63	0,31	0,12	0,08	139,63
CPH7	152,55	0,27	0,07	0,13	152,55

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH21 R	140,65	0,50	0,18	0,35	140,65
CPH22	160,46	0,28	0,09	0,10	160,46
CPH13	151,17	0,37	0,08	0,19	151,17
CPH15 R	140,77	0,38	0,20	0,03	140,77

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH29	104,43	0,19	0,06	0,07	104,43
CPH1	168,55	0,40	0,11	0,20	168,55

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH18	65,32	0,12	0,05	0,03	65,32
CPH11	69,80	0,12	0,06	0,02	69,80
CPH14	64,75	0,12	0,05	0,03	64,75

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH10	109,74	0,18	0,07	0,05	109,74
CPH12	138,41	0,22	0,09	0,08	128,41
CPH25	138,31	0,22	0,07	0,10	138,31
CPH8	146,64	0,28	0,06	0,18	146,64

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH17	140,84	0,32	0,09	0,11	140,84
CPH20	139,63	0,31	0,12	0,08	139,63
CPH7	152,55	0,27	0,07	0,13	152,55

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH21 R	140,65	0,50	0,18	0,35	140,65
CPH22	160,46	0,28	0,09	0,10	160,46
CPH13	151,17	0,37	0,08	0,19	151,17
CPH15 R	140,77	0,38	0,20	0,03	140,77

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH29	104,43	0,19	0,06	0,07	104,43
CPH1	168,55	0,40	0,11	0,20	168,55

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH18	65,32	0,12	0,05	0,03	65,32
CPH11	69,80	0,12	0,06	0,02	69,80
CPH14	64,75	0,12	0,05	0,03	64,75

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH10	109,74	0,18	0,07	0,05	109,74
CPH12	138,41	0,22	0,09	0,08	128,41
CPH25	138,31	0,22	0,07	0,10	138,31
CPH8	146,64	0,28	0,06	0,18	146,64

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH17	140,84	0,32	0,09	0,11	140,84
CPH20	139,63	0,31	0,12	0,08	139,63
CPH7	152,55	0,27	0,07	0,13	152,55

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH21 R	140,65	0,50	0,18	0,35	140,65
CPH22	160,46	0,28	0,09	0,10	160,46
CPH13	151,17	0,37	0,08	0,19	151,17
CPH15 R	140,77	0,38	0,20	0,03	140,77

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH29	104,43	0,19	0,06	0,07	104,43
CPH1	168,55	0,40	0,11	0,20	168,55

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH18	65,32	0,12	0,05	0,03	65,32
CPH11	69,80	0,12	0,06	0,02	69,80
CPH14	64,75	0,12	0,05	0,03	64,75

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH10	109,74	0,18	0,07	0,05	109,74
CPH12	138,41	0,22	0,09	0,08	128,41
CPH25	138,31	0,22	0,07	0,10	138,31
CPH8	146,64	0,28	0,06	0,18	146,64

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH17	140,84	0,32	0,09	0,11	140,84
CPH20	139,63	0,31	0,12	0,08	139,63
CPH7	152,55	0,27	0,07	0,13	152,55

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH21 R	140,65	0,50	0,18	0,35	140,65
CPH22	160,46	0,28	0,09	0,10	160,46
CPH13	151,17	0,37	0,08	0,19	151,17
CPH15 R	140,77	0,38	0,20	0,03	140,77

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH29	104,43	0,19	0,06	0,07	104,43
CPH1	168,55	0,40	0,11	0,20	168,55

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH18	65,32	0,12	0,05	0,03	65,32
CPH11	69,80	0,12	0,06	0,02	69,80
CPH14	64,75	0,12	0,05	0,03	64,75

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH10	109,74	0,18	0,07	0,05	109,74
CPH12	138,41	0,22	0,09	0,08	128,41
CPH25	138,31	0,22	0,07	0,10	138,31
CPH8	146,64	0,28	0,06	0,18	146,64

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH17	140,84	0,32	0,09	0,11	140,84
CPH20	139,63	0,31	0,12	0,08	139,63
CPH7	152,55	0,27	0,07	0,13	152,55

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH21 R	140,65	0,50	0,18	0,35	140,65
CPH22	160,46	0,28	0,09	0,10	160,46
CPH13	151,17	0,37	0,08	0,19	151,17
CPH15 R	140,77	0,38	0,20	0,03	140,77

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH29	104,43	0,19	0,06	0,07	104,43
CPH1	168,55	0,40	0,11	0,20	168,55

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH18	65,32	0,12	0,05	0,03	65,32
CPH11	69,80	0,12	0,06	0,02	69,80
CPH14	64,75	0,12	0,05	0,03	64,75

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH10	109,74	0,18	0,07	0,05	109,74
CPH12	138,41	0,22	0,09	0,08	128,41
CPH25	138,31	0,22	0,07	0,10	138,31
CPH8	146,64	0,28	0,06	0,18	146,64

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH17	140,84	0,32	0,09	0,11	140,84
CPH20	139,63	0,31	0,12	0,08	139,63
CPH7	152,55	0,27	0,07	0,13	152,55

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH21 R	140,65	0,50	0,18	0,35	140,65
CPH22	160,46	0,28	0,09	0,10	160,46
CPH13	151,17	0,37	0,08	0,19	151,17
CPH15 R	140,77	0,38	0,20	0,03	140,77

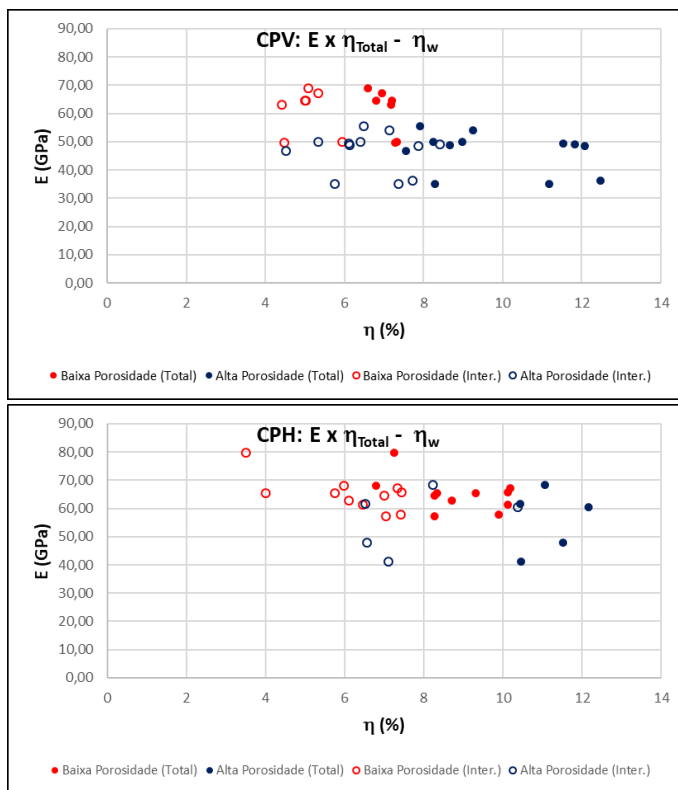
Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$	$\epsilon_{Vol}$	$\sigma_{Max}$
CPH29	104,43	0,19	0,06	0,07	104,43
CPH1	168,55	0,40	0,11	0,20	168,55

Propriedades da curva			Parâmetros elásticos		
$\sigma_p$	$\sigma_R$	$\epsilon_{Ax}$	$\epsilon_{Rad}$		

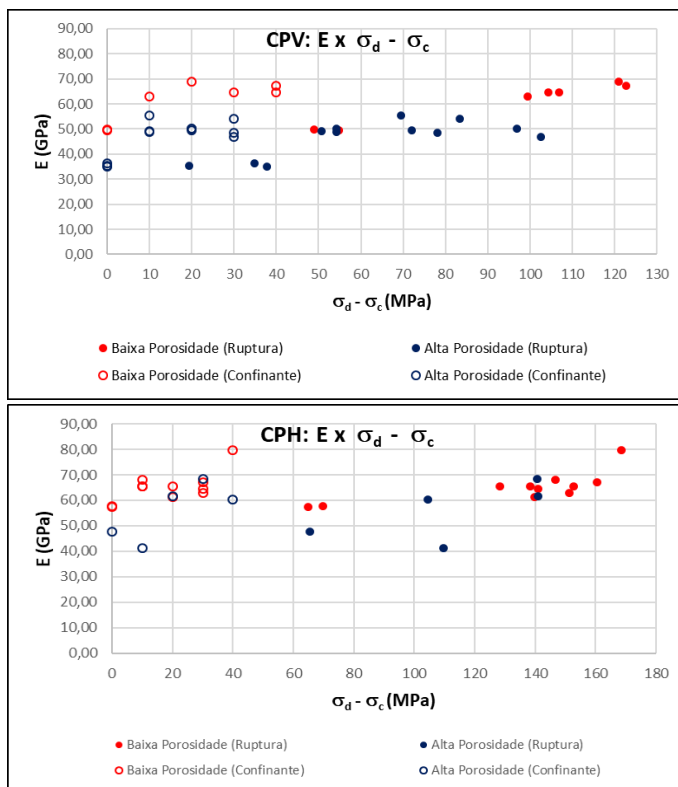
## 8.6.

### Apêndice VI

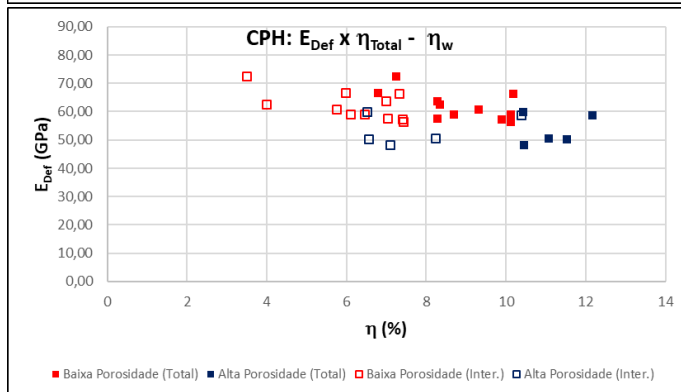
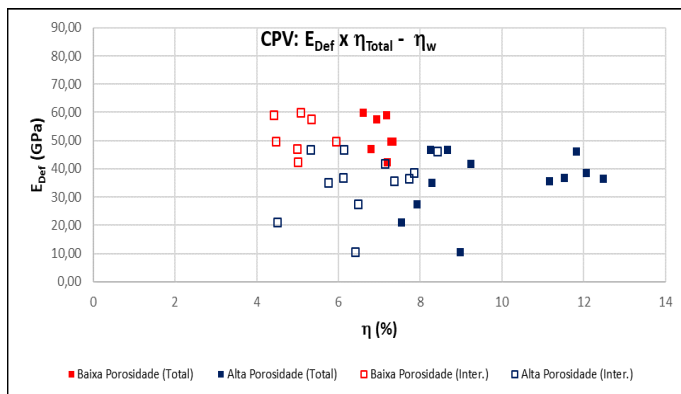
#### Parâmetros elásticos (Gráfico de dispersão)



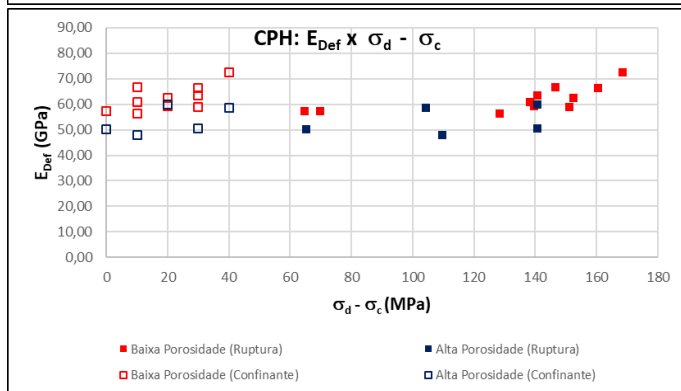
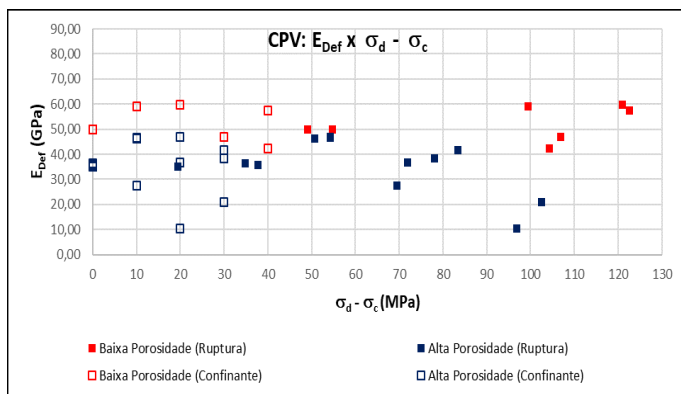
**Apêndice VI (A)** Módulo de elasticidade x Porosidade Total – Porosidade Interconect.



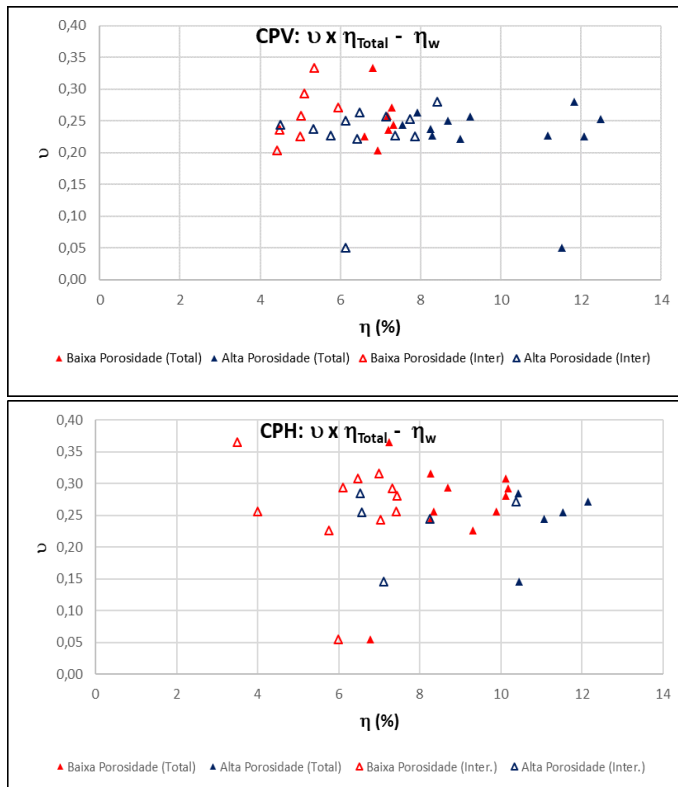
**Apêndice VI (B)** Módulo de elasticidade x Tensão desviadora – Tensão confinante.



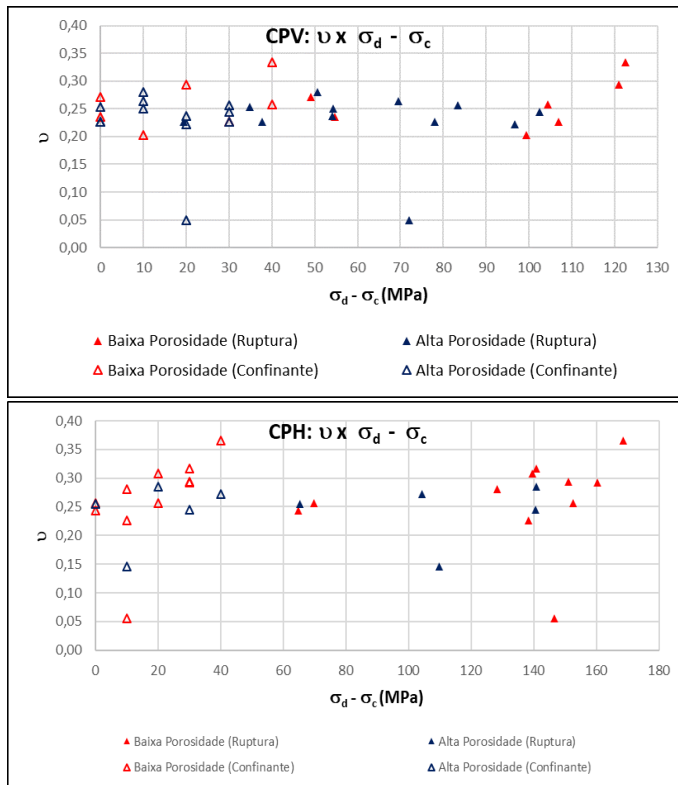
**Apêndice VI (C)** Módulo de deformabilidade x Porosidade Total – Porosidade Interconectada.



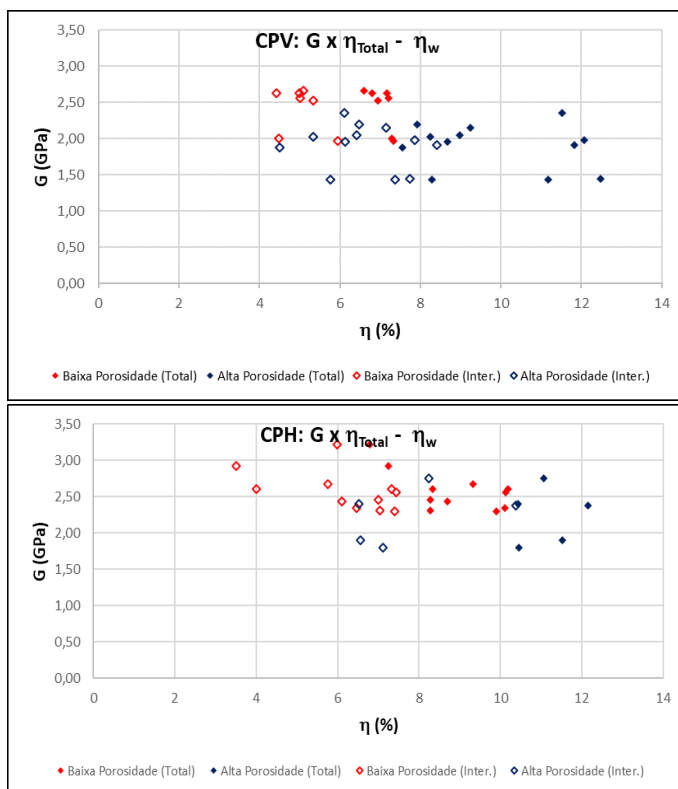
**Apêndice VI (D)** Módulo de deformabilidade x Tensão desviadora – Tensão confinante.



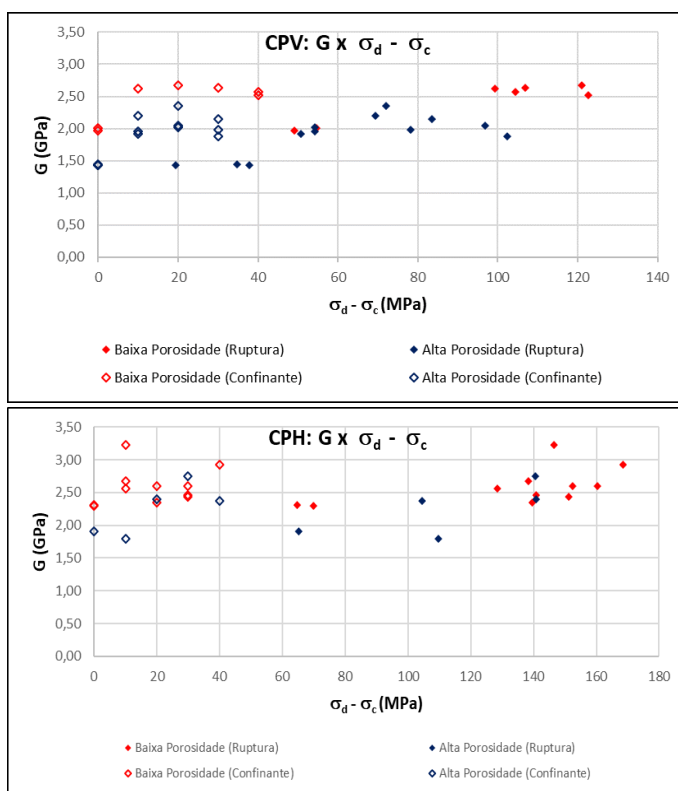
**Apêndice VI (E) Coeficiente de Poisson x Porosidade Total – Porosidade Interconectada.**



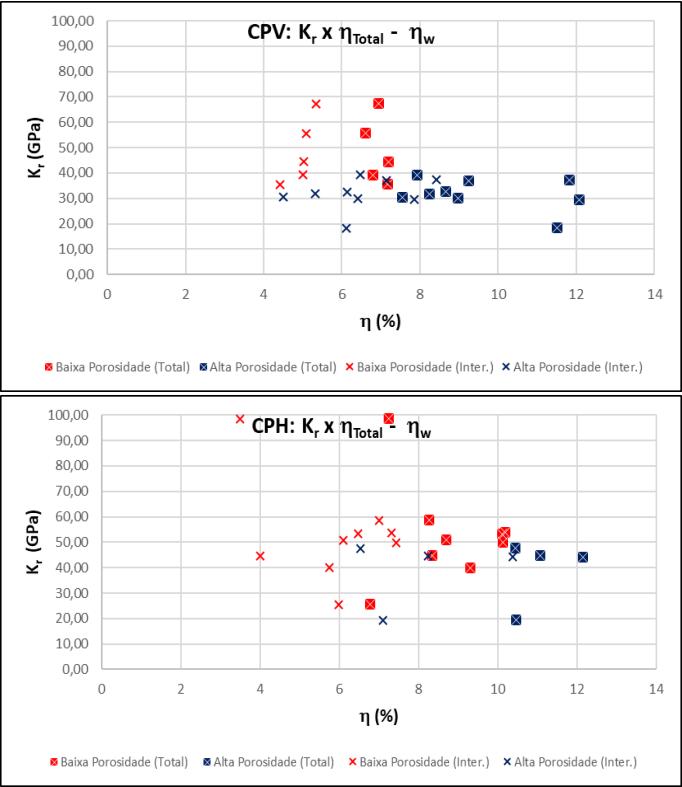
**Apêndice VI (F) Coeficiente de Poisson x Tensão desviadora – Tensão confinante.**



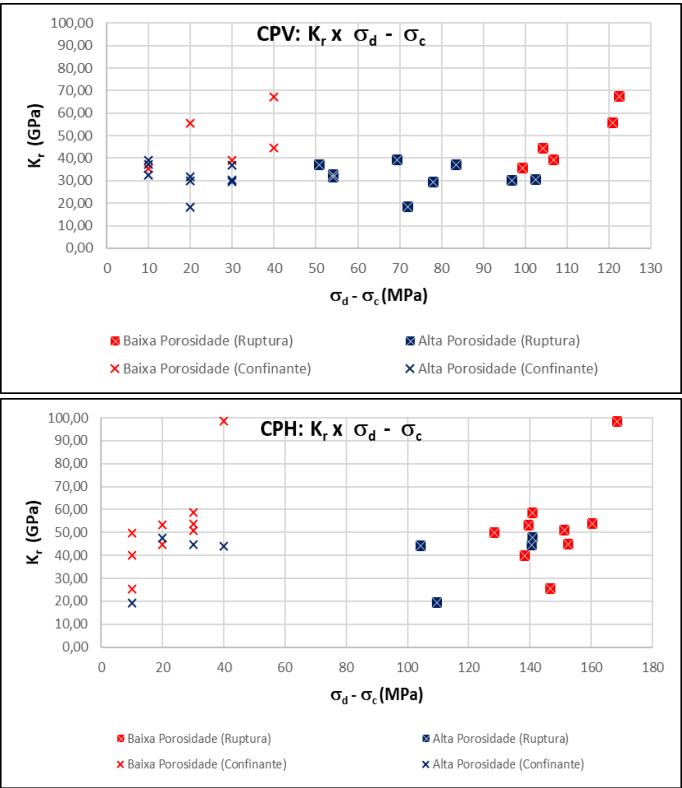
**Apêndice VI (G) Módulo de cisalhamento x Porosidade Total – Porosidade Interconectada.**



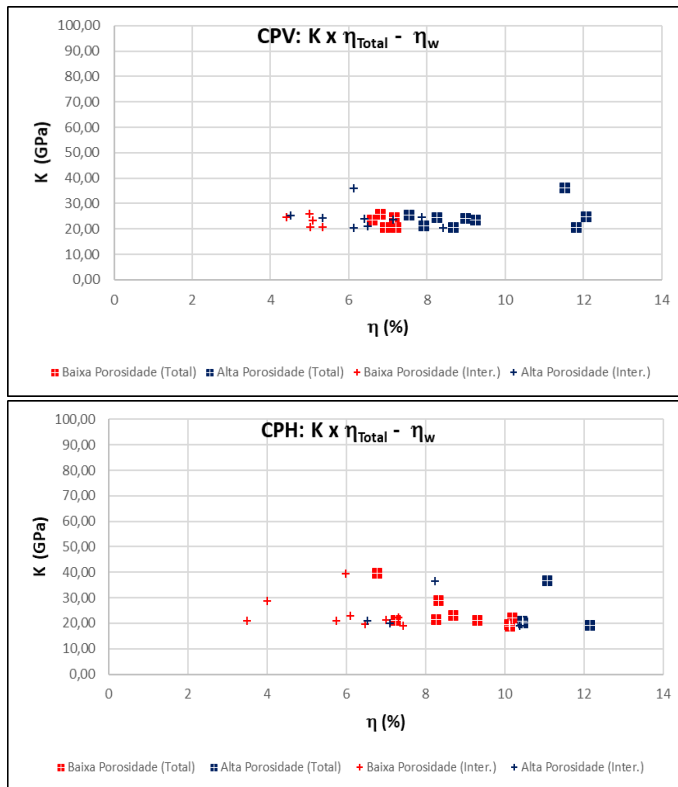
**Apêndice VI (H) Módulo de cisalhamento x Tensão desviadora – Tensão confinante.**



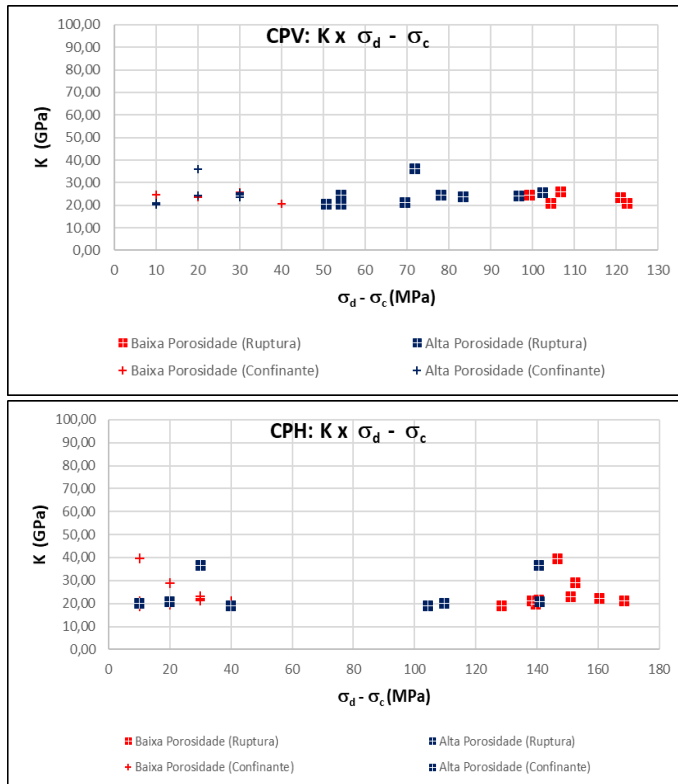
**Apêndice VI (I)** Módulo volumétrico (rel.) x Porosidade Total – Porosidade Interconectada.



**Apêndice VI (J)** Módulo volumétrico (rel.) x Tensão desviadora – Tensão confinante.



**Apêndice VI (K) Módulo volumétrico x Porosidade Total – Porosidade Interconectada.**



**Apêndice VI (L) Módulo volumétrico x Tensão desviadora – Tensão confinante.**