

5 Apresentação e Discussão dos Resultados

5.1. Análises químicas e mineralógicas

5.1.1. Espectrometria por fluorescência de raios-X

O ensaio de espectrometria por fluorescência de raios-X foi realizado em três amostras de travertino de Itaboraí, em uma amostra de travertino romano e em uma amostra de travertino turco.

Travertinos de Itaboraí

A Tabela 5.1 apresenta os resultados da composição química, expressa em óxidos, das amostras de travertino de Itaboraí. A escolha das amostras TRI-01, TRI-03 e TRI-09 para a realização dos ensaios não foi aleatória. Elas foram escolhidas por apresentarem diferenças estruturais e de coloração, conforme pode ser visto na Figura 5.1.

Tabela 5.1 – Resultados da composição química, expressa em óxidos, das amostras de travertino de Itaboraí.

	Travertino Itaboraí		
	TRI-01	TRI-03	TRI-09
Óxidos	Concentração (%)	Concentração (%)	Concentração (%)
L.O.I	43,7	42,19	38,96
MgO	0,678	0,695	< 0,1
Al ₂ O ₃	< 0,1	0,292	0,439
SiO ₂	0,341	2,085	14,209
CaO	54,828	54,438	45,925
Fe ₂ O ₃	0,197	0,28	0,428
MnO	0,18	< 0,1	< 0,1
SrO	0,077	< 0,1	< 0,1
Elementos Traços	Al, P, Zr	Mg, P, K, Mn, Sr, Zr	Al, P, Zr

L.O.I. – perda ao fogo.



Figura 5.1 – Amostras escolhidas para a realização do ensaio. Da esquerda para direita: TRI-01, TRI-03 e TRI-09.

Observa-se na Tabela 5.1 que os travertinos fitados da bacia de Itaboraí apresentam uma alta concentração de CaO (óxido de cálcio) que se constitui em um indício da presença de calcita na amostra. Nota-se ainda que as três amostras possuem uma baixa concentração de MgO, Fe₂O₃, MnO e Al₂O₃. A amostra TRI-09 apresenta uma quantidade de SiO₂ bem superior as demais (*i.e.*, TRI-01 e TRI-03). Vale ressaltar, que a amostra TRI-09 é a mais representativa do afloramento no qual foi retirada as amostras para o presente estudo. Verificou-se que as três amostras apresentam os mesmos compostos químicos, com apenas pequenas diferenças nas concentrações, um indicativo que a rocha fonte dos elementos químicos é a mesma para as três amostras.

Pela classificação de rochas carbonáticas quanto à relação MgO/CaO, apresentada na Tabela 5.2, verifica-se que as amostras de travertino fitado de Itaboraí são classificadas como calcário calcítico, pois apresentam uma relação MgO/CaO muito baixa (apresentam baixa concentração de MgO), conforme apresenta a Tabela 5.3.

Tabela 5.2 – Classificação de rochas carbonáticas quanto à razão MgO/CaO.

Classificação		
Termo	Teores de MgO (%)	Razão MgO/CaO
Calcário Calcítico	0,0 - 1,1	0,00 - 0,02
Calcário Magnesiano	1,2 - 4,3	0,02 - 0,08
Calcário Dolomítico	4,4 - 10,5	0,08 - 0,25
Dolomito Calcítico	10,6 - 19,1	0,25 - 0,56
Dolomito	≥ 19,2	≥ 0,56

Tabela 5.3 – Classificação das amostras de travertino de Itaboraí quanto à razão MgO/CaO.

Amostra	Razão MgO/CaO	Classificação
TRI-01	0,012	Calcário Calcítico
TRI-03	0,013	Calcário Calcítico
TRI-09	0	Calcário Calcítico

As análises realizadas não detectaram nenhum elemento químico que indicasse a ocorrência de hidrotermalismo nas amostras coletadas. Este fato contrasta com os resultados publicados por Sant'Anna *et al.* (2000). Os autores, através de estudos isotópicos dos calcários de Itaboraí, comprovaram a ocorrência de hidrotermalismo a partir de soluções hidrotermais ascendentes ao longo da falha São José que foram enriquecidas por bicarbonato de cálcio pela lixiviação dos mármores proterozóicos do embasamento.

No entanto, os resultados presentes na Tabela 5.1 foram similares aos encontrados por Rodrigues-Francisco (1975) em sua dissertação de mestrado sobre a geologia e estratigrafia da bacia de São José de Itaboraí. Em sua pesquisa, Francisco realizou uma série de análises químicas das rochas calcárias existentes na bacia, inclusive nos travertinos fitados. O autor fez análise química em duas amostras de travertinos fitados, denominadas de 27-la e 28-l. Na amostra 27-la foram obtidos 53,3% de CaO e 1,5 % de MgO, já na amostra 28-l foi encontrado 52,9 % de CaO e 1,0 % de MgO. O método utilizado na análise não foi mencionado pelo autor.

Travertinos Romano e Turco

A Tabela 5.4 mostra os resultados da composição química, expressa em óxidos, da amostra TRR-01 de travertino romano e da amostra TRT-01 de travertino turco.

Analisando os resultados da amostra de travertino romano, observa-se uma alta concentração de CaO, o que provavelmente indica a presença de calcita. Nota-se uma baixa concentração de MgO, SiO₂, Fe₂O₃, SO₃ e SrO. A presença de SO₃ pode ser um indicativo da presença de ação hidrotermal na formação dos travertinos. Os elementos traços encontrados na amostra foram o alumínio e fósforo.

A amostra de travertino turco também apresenta uma alta concentração de CaO, e baixos valores de MgO, Al₂O₃, SiO₂, Fe₂O₃ e SrO. Os elementos traços encontrados foram o fósforo e o enxofre.

Tabela 5.4 – Resultados da composição química, expressa em óxidos, de amostras de travertino de romano e travertino turco.

	Travertino Romano	Travertino Turco
	TRR-01	TRT-01
Óxidos	Concentração (%)	Concentração (%)
L.O.I	43,43	43,31
MgO	0,482	0,77
Al ₂ O ₃	< 0,1	0,206
SiO ₂	0,209	0,23
CaO	55,387	55,366
Fe ₂ O ₃	0,115	0,084
SO ₃	0,328	< 0,1
SrO	0,078	0,044
Elementos Traços	Al, P	P, S

L.O.I. – perda ao fogo

Pela classificação de rochas carbonáticas quanto à relação MgO/CaO, a amostra de travertino romano e a amostra de travertino turco foram classificadas como calcário calcítico, pois apresentam uma relação MgO/CaO muito baixa, conforme mostra a Tabela 5.5

Tabela 5.5 – Classificação das amostras de travertino romano e turco quanto à razão MgO/CaO.

Amostra	Razão MgO/CaO	Classificação
TRR-01	0,009	Calcário Calcítico
TRT-01	0,014	Calcário Calcítico

O travertino romano apresenta o valor da relação MgO/CaO menor que os valores encontrados nas amostras de travertino de Itaboraí, com exceção da amostra TRI-09 que apresenta o magnésio como elemento traço. Já o valor da relação MgO/CaO do travertino turco é um pouco maior do que o valor encontrado nas amostras de travertino de Itaboraí.

De maneira geral, foram encontrados os mesmos elementos químicos nas amostras de travertino romano e turco, variando apenas as concentrações. Isto pode ser um indicativo que a área fonte e os processos geológicos que formaram estas rochas são similares, apesar de serem formados em locais completamente distantes.

5.1.2. Ataque Sulfúrico

O ensaio de ataque sulfúrico foi realizado no intuito de determinar indiretamente o valor de quartzo ou de sílica criptocristalina (calcedônia) presente.

Na realidade, o ensaio de ataque sulfúrico determina somente o teor de sílica proveniente de argilominerais, micas intemperizadas ou de material amorfo. No entanto, o ensaio de espectrometria por fluorescência de raios-X fornece o valor total de sílica encontrada na amostra. Assim, subtraindo o valor de sílica encontrado no ensaio de ataque sulfúrico do valor obtido pelo ensaio de espectrometria, será encontrado o valor de quartzo ou de sílica criptocristalina (calcedônia) presente na amostra.

O ensaio de ataque sulfúrico foi realizado apenas em amostras de travertino da bacia de Itaboraí devido ao fato destas amostras apresentarem uma razoável quantidade de sílica. A Tabela 5.6 apresenta os resultados obtidos, enquanto que a Tabela 5.7 mostra a subtração dos resultados realizados nos dois tipos de análise e apresenta os valores de quartzo encontrados nas amostras. Os resultados indicaram que a amostra que apresenta uma maior quantidade de quartzo é a TRI-09, justamente a mais representativa do afloramento estudado.

Tabela 5.6 – Resultados obtidos através do ensaio de ataque sulfúrico.

Amostra	SiO ₂ (%)
TRI-01	0,3
TRI-03	0,6
TRI-09	0,6

Tabela 5.7 – Quantidade de quartzo nas amostras de travertino de Itaboraí.

Amostra	Quantidade de quartzo(%)
TRI-01	$0,3 - 0,3 = 0$
TRI-03	$2,085 - 0,6 = 1,485$
TRI-09	$14,209 - 0,6 = 13,609$

As informações presentes na Tabela 5.7 foram atestadas através da análise macroscópica das amostras. Observando macroscopicamente a amostra TRI-09, foi possível reconhecer alguns minerais de quartzo. Verificou-se ainda que a amostra TRI-03 apresentava uma pequena quantidade de quartzo e que a amostra TRI-01 não apresentava quartzo.

5.1.3. Análise de lâminas petrográficas através de microscopia óptica com luz transmitida

Em todas as amostras dos materiais estudados foi realizada a confecção de lâminas petrográficas. Nestas lâminas foram feitos o reconhecimento de minerais, análises de textura, porosidade e feições diagenéticas.

Nas lâminas petrográficas das amostras de travertino de Itaboraí, foram observadas a ocorrência de calcita. Dois tipos de calcita foram reconhecidas: calcita microcristalina, que pode ser visualizada na Figura 5.2 e calcita espática com formato plumoso, alongado, verificada na Figura 5.3.

Uma feição típica encontrada nas lâminas de travertino de Itaboraí é a intercalação de calcita espática (formato alongado) com óxido de ferro, como mostra a Figura 5.4. Estas calcitas espáticas crescem rapidamente, sendo típicas de ambiente permanentemente inundado de água doce. As intercalações de calcita com óxido de ferro podem ser um indicativo da ocorrência de sazonalidade do ambiente. O quartzo autigênico não foi detectado nas lâminas petrográficas devido a dificuldade de reconhecimento na “massa microcristalina” da rocha, mas em determinados locais da lâmina haviam minerais que apresentavam birrefringência similares a do quartzo podendo, portanto, ser estes minerais.

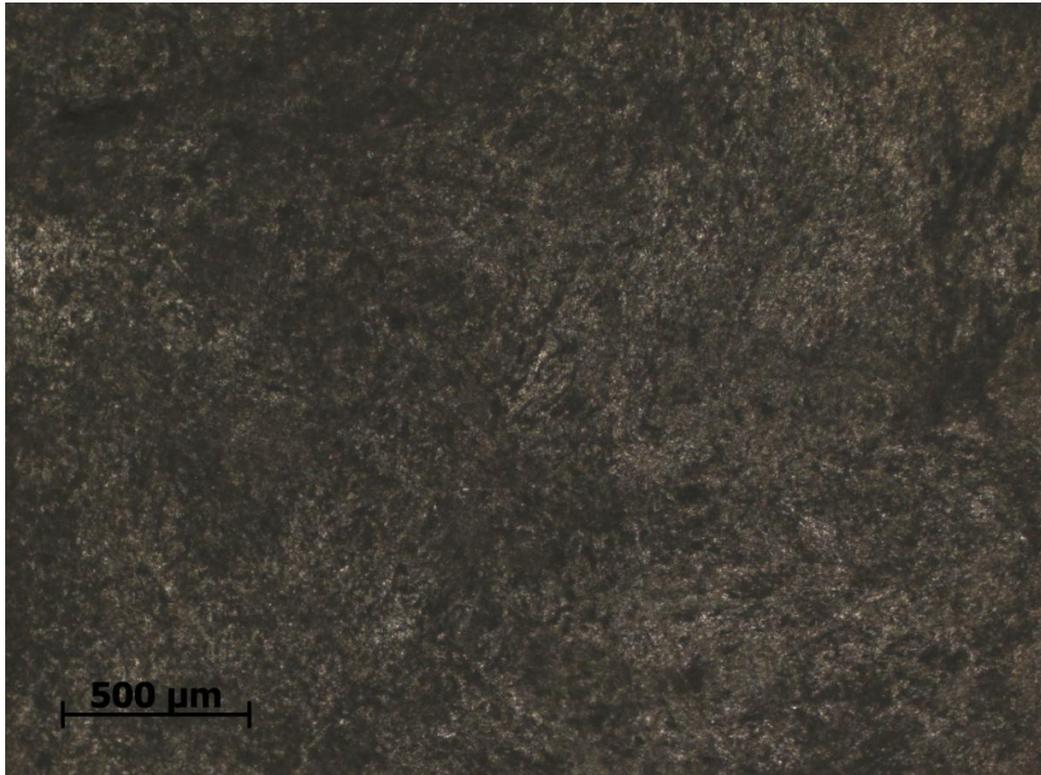


Figura 5.2 – Calcita microcristalina observada na lâmina TRI-10 (Condições: luz transmitida polarizada).

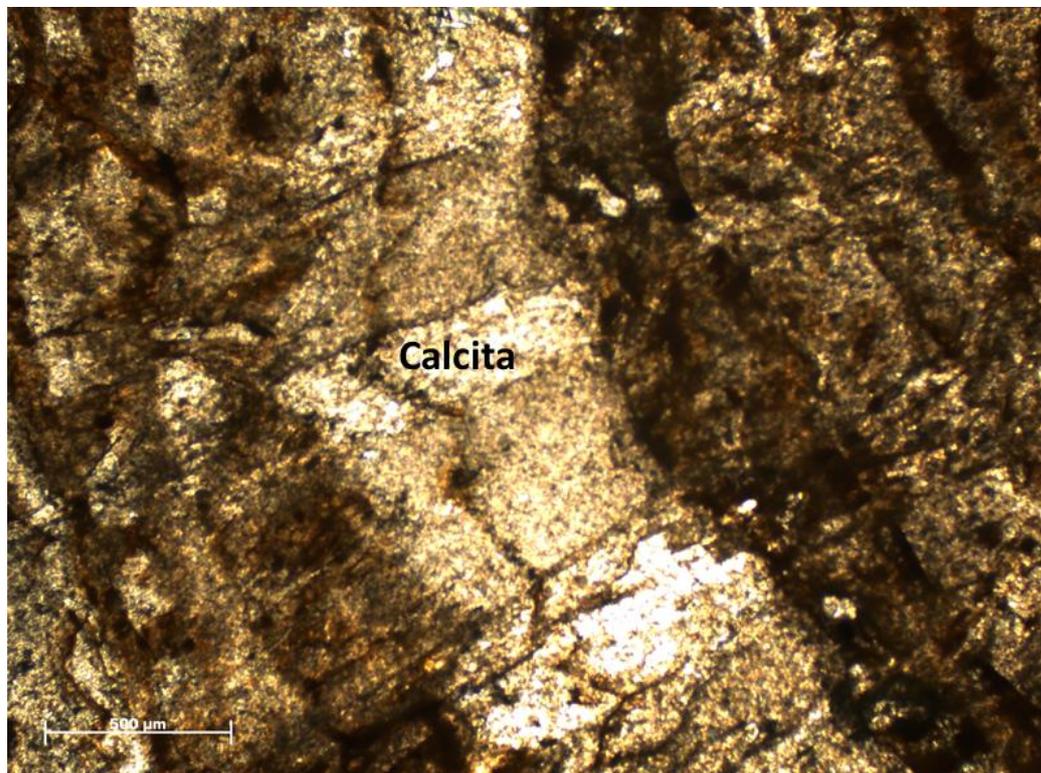


Figura 5.3 – Minerais de calcita com formato alongado encontrados na lâmina TRI-09. (Condições: luz transmitida polarizada com nicóis cruzado)

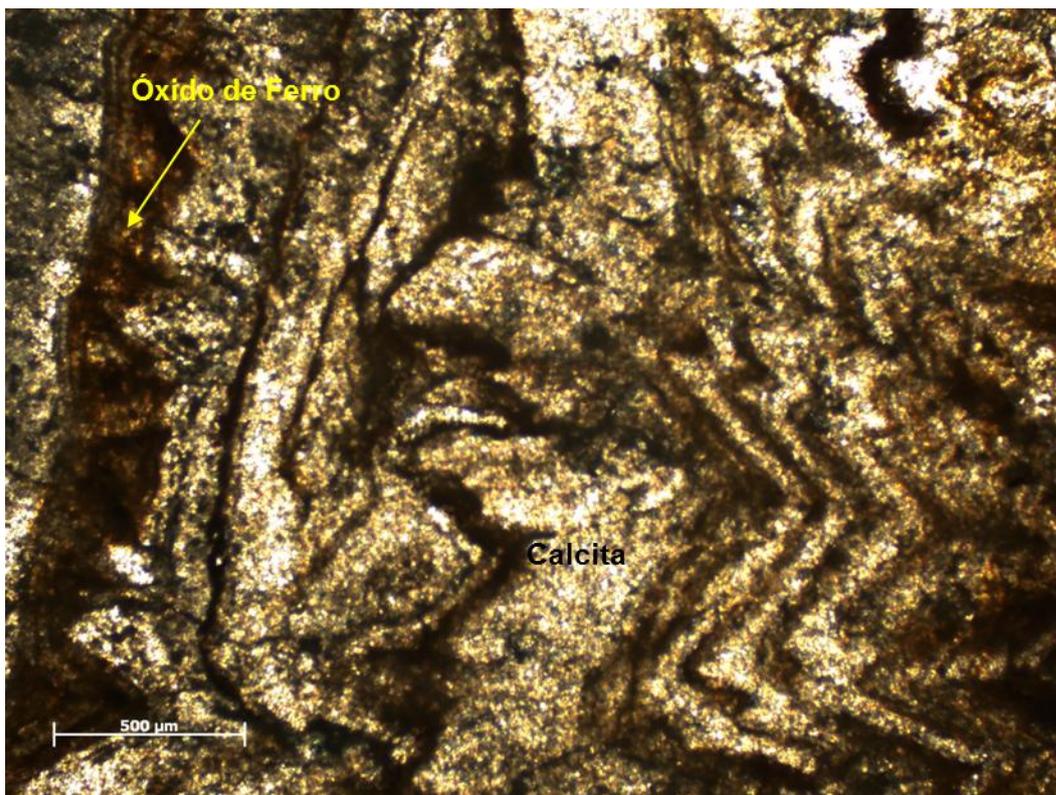


Figura 5.4 – Intercalação da calcita com óxido de ferro observada na lâmina TRI-01. (Condições: luz transmitida polarizada com nicóis cruzado)

A presença de calcita com formato plumoso e microcristalina e a intercalação da calcita com óxido de ferro também foi verificada por Rodrigues-Francisco (1975) e Sant'Anna *et al.* (2004).

Nas análises das lâminas petrográficas dos travertinos romanos foram observadas calcita espática equidimensional ao redor dos poros e calcita microcristalina, também conhecida como micrito. A Figura 5.5 mostra estes dois tipos de calcita encontrada.

Adicionalmente, as análises petrográficas detectaram um tipo de cimento em forma de lamelas de fibras vegetais conforme mostra a Figura 5.6. Nota-se ainda na Figura 5.7 grumos de calcita (cimento) que são um indicativo de influência de bactérias.

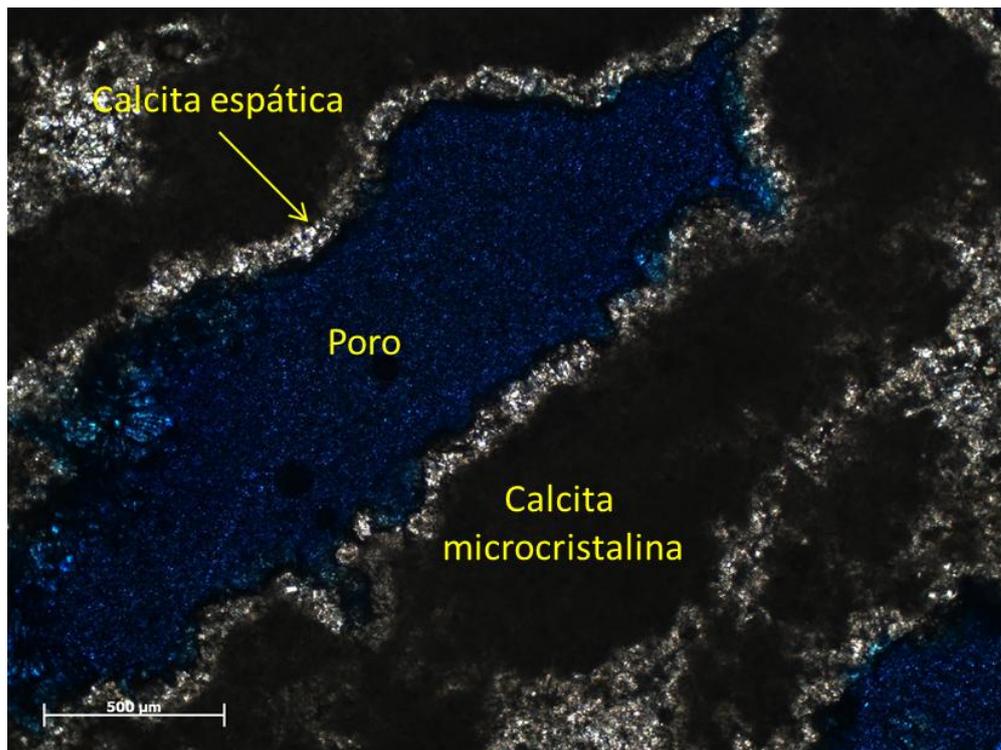


Figura 5.5 – Lâmina petrográfica TRR-01a no qual pode-se visualizar calcita espática ao redor do poro em azul (corante azul de metileno) e matriz de calcita microcristalina. (Condições: luz transmitida polarizada).

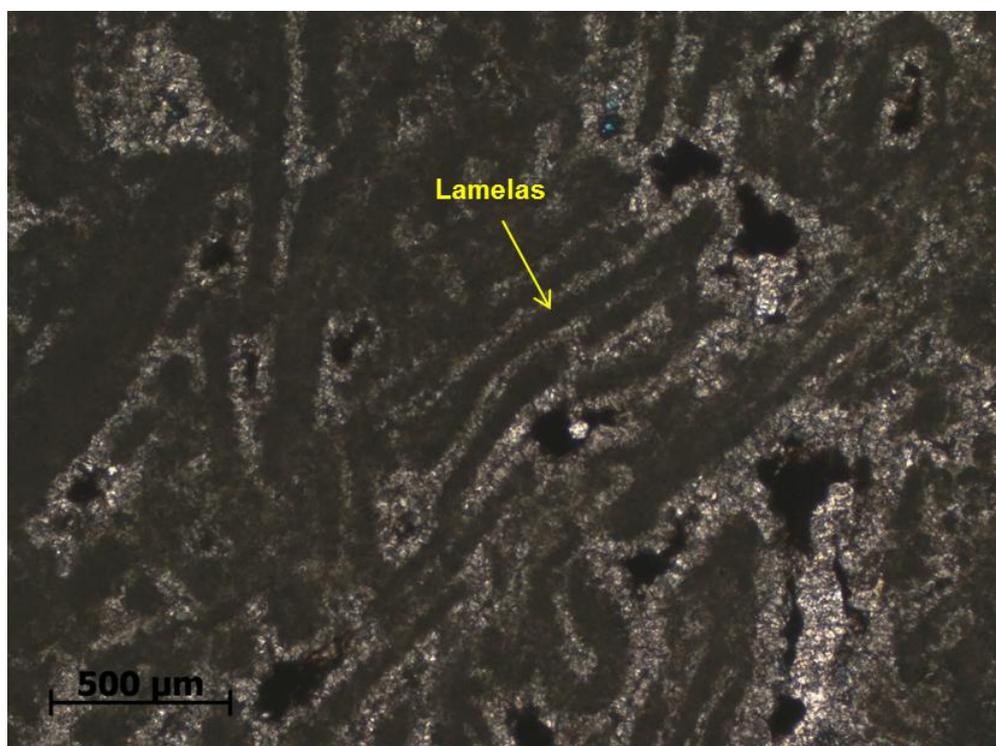


Figura 5.6 – Lamelas de fibras de vegetais encontradas na lâmina TRR-01b. (Condições: luz transmitida polarizada).

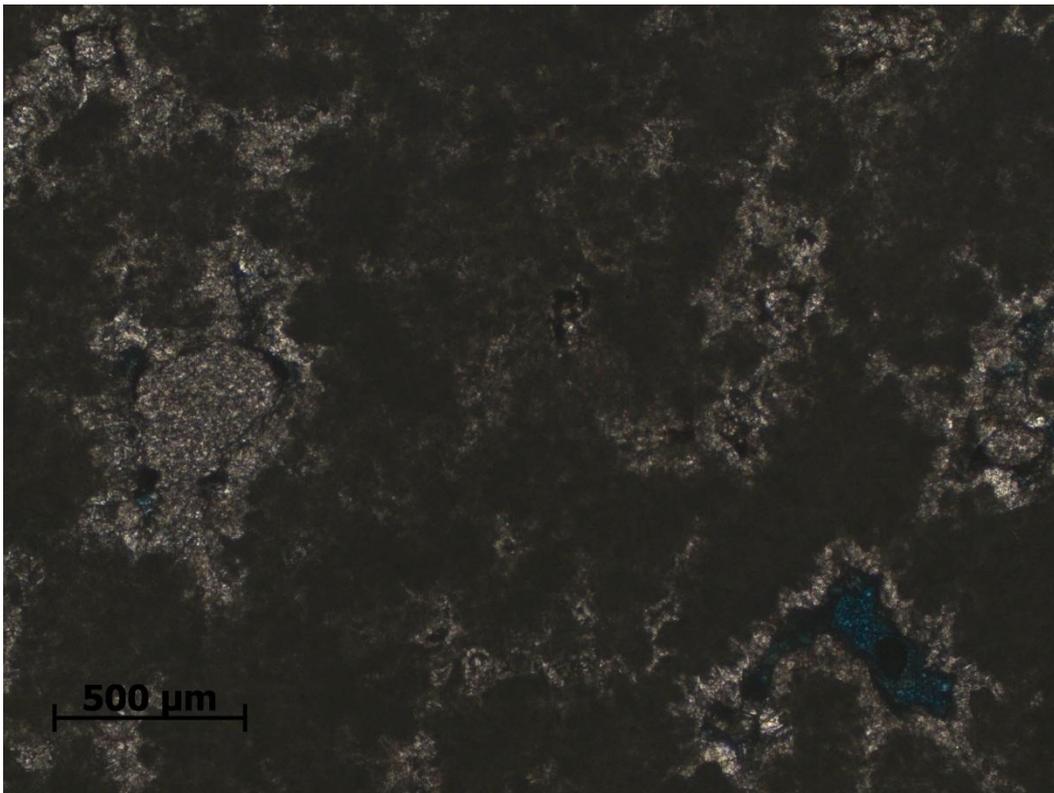


Figura 5.7 – Grupos de calcita presentes na lâmina TRR-01a. (Condições: luz transmitida polarizada).

Nas lâminas petrográficas dos travertinos turcos foram também observadas calcita microcristalina e calcita espática equidimensional, como mostra a Figura 5.8.

Além da observação dos minerais com o microscópio óptico, foi realizada uma estimativa dos constituintes (*i.e.*, matriz, cimento e poros) presentes nas lâminas petrográficas através do processamento de imagens empregando o programa Axio Vision. A Figura 5.9 representa uma lâmina de travertino romano, onde a matriz da rocha está delimitada em vermelho. A estimativa de seus constituintes encontra-se Tabela 5.8. Cabe ressaltar que esta análise é uma estimativa e que alguns tipos de cimentos (*i.e.*, grupos de calcita) por serem mais escuros ficam disseminados na matriz, sendo de difícil delimitação.

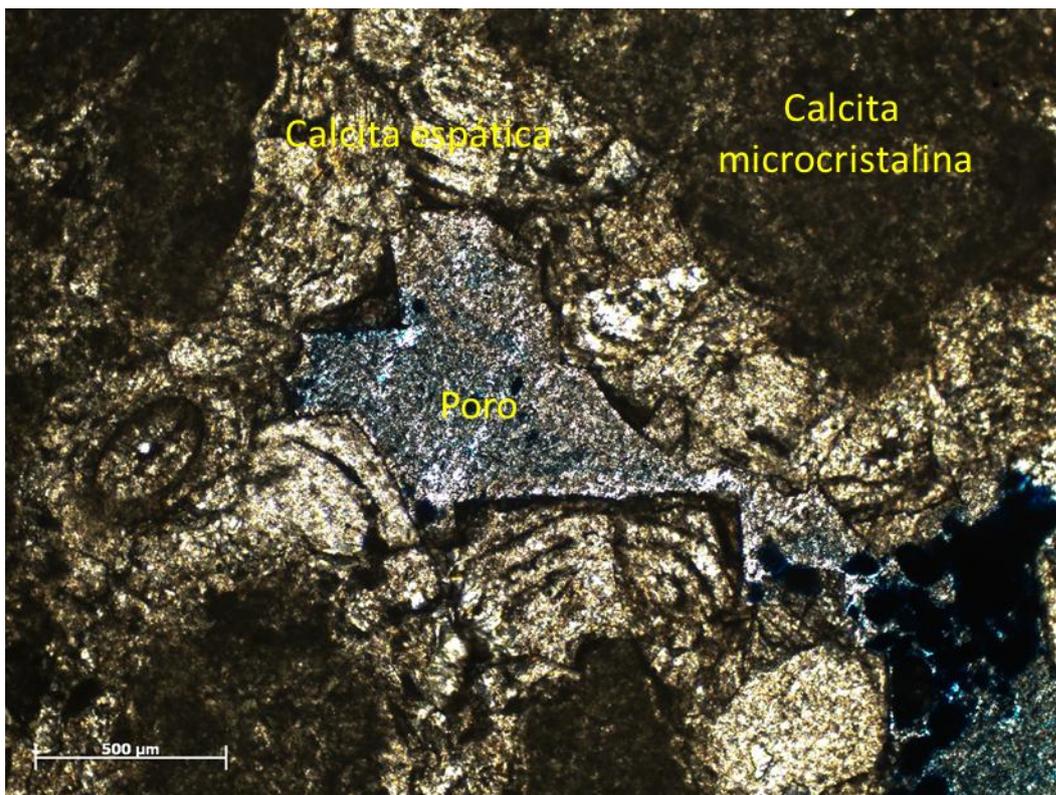


Figura 5.8 – Calcita espática e calcita microcristalina observadas na lâmina petrográfica TRT-01a de travertino turco. (Condições: luz transmitida polarizada).

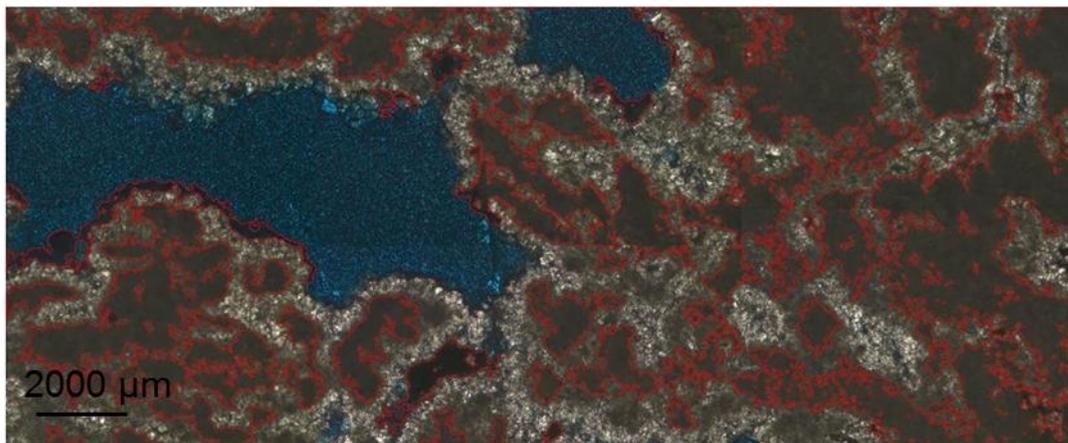


Figura 5.9 – Lâmina petrográfica TRR-01d com a matriz da rocha delimitada em vermelho. (Condições: luz transmitida polarizada).

Tabela 5.8 – Resultados dos constituintes presentes nas lâminas petrográficas de travertinos romanos.

Travertino romano			
Lâmina Petrográfica	Matriz (%) (calcita microcristalina)	Cimento (%) (calcita espática)	Poros (%)
TRR-01a	63	31,2	5,8
TRR-01b	51,66	43,63	4,71
TRR-01c	45,24	48,16	6,6
TRR-01d	62,05	24,89	13,06
Média	55,49	36,97	7,54

Os resultados obtidos nas lâminas petrográficas do travertino turco estão apresentados na Tabela 5.9. Nota-se que há uma maior porcentagem de cimento comparado com as lâminas de travertino romano.

Tabela 5.9 – Resultados dos constituintes presentes nas lâminas petrográficas de travertinos turcos.

Travertino turco			
Lâmina Petrográfica	Matriz (%) (calcita microcristalina)	Cimento (%) (calcita espática)	Poros (%)
TRT-01a	42,46	57,26	0,27
TRT-01b	15,63	84,24	0,13
TRT-01c	8,12	91,74	0,14
TRT-02a	10,60	89,34	0,07
TRT-03a	26,95	73,04	0,005
Média	20,75	79,13	0,12

A análise da porcentagem dos constituintes das rochas não pôde ser realizada nas lâminas de travertino de Itaboraí, pois o seu cimento e a sua matriz apresentam colorações similares.

A fim de descrever composicionalmente os travertinos romanos e turcos, os resultados das análises petrográficas foram inseridos no diagrama MSC proposto por Riding (2002), visto na Figura 5.10. A partir deste diagrama, as rochas carbonáticas recifais (*reef rocks*) podem ser descritas composicionalmente em termos da proporção relativa dos três principais constituintes da rocha: esqueleto, matriz e cimento. Nota-se que os travertinos romanos e turcos ficaram próximos da categoria, que inclui os travertinos e tufas, proposta por Riding (*op. cit.*).

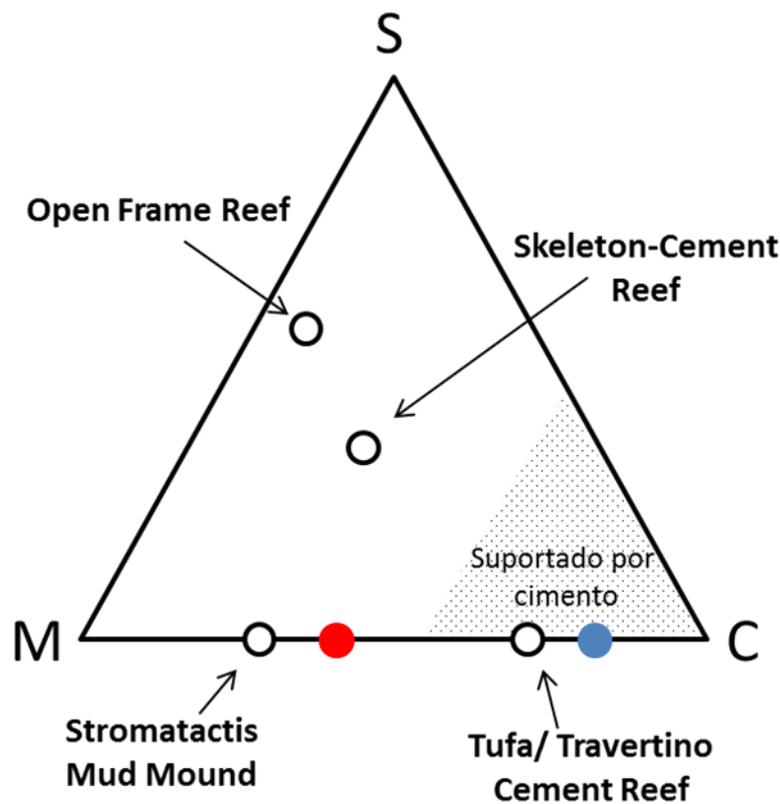


Figura 5.10 – Diagrama MSC proposto por Riding (2002) com os resultados do travertino romano e turco plotados. O círculo vermelho representa o travertino romano e o círculo azul representa o travertino turco.

5.1.4. Análise de lâminas petrográficas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas nas lâminas petrográficas TRI-02, TRI-03, TRI-06, TRI-08, TRI-09, TRR-01d e a TRT-01e.

Neste item serão apresentados apenas os minerais reconhecidos através da análise MEV. A textura será discutida no item 5.2 (análise textural).

Nas lâminas de travertino de Itaboraí foram reconhecidas calcitas na forma euédrica e subédrica, como mostra a Figura 5.11. Os poros encontrados nas lâminas de Itaboraí variam de 8µm a 1,4mm. Na Figura 5.11 há um exemplo de poro com 38,1µm. A Figura 5.12 apresenta um cristal de calcita com formato alongado, que é uma feição tipicamente encontrada nos travertinos fitados de Itaboraí.

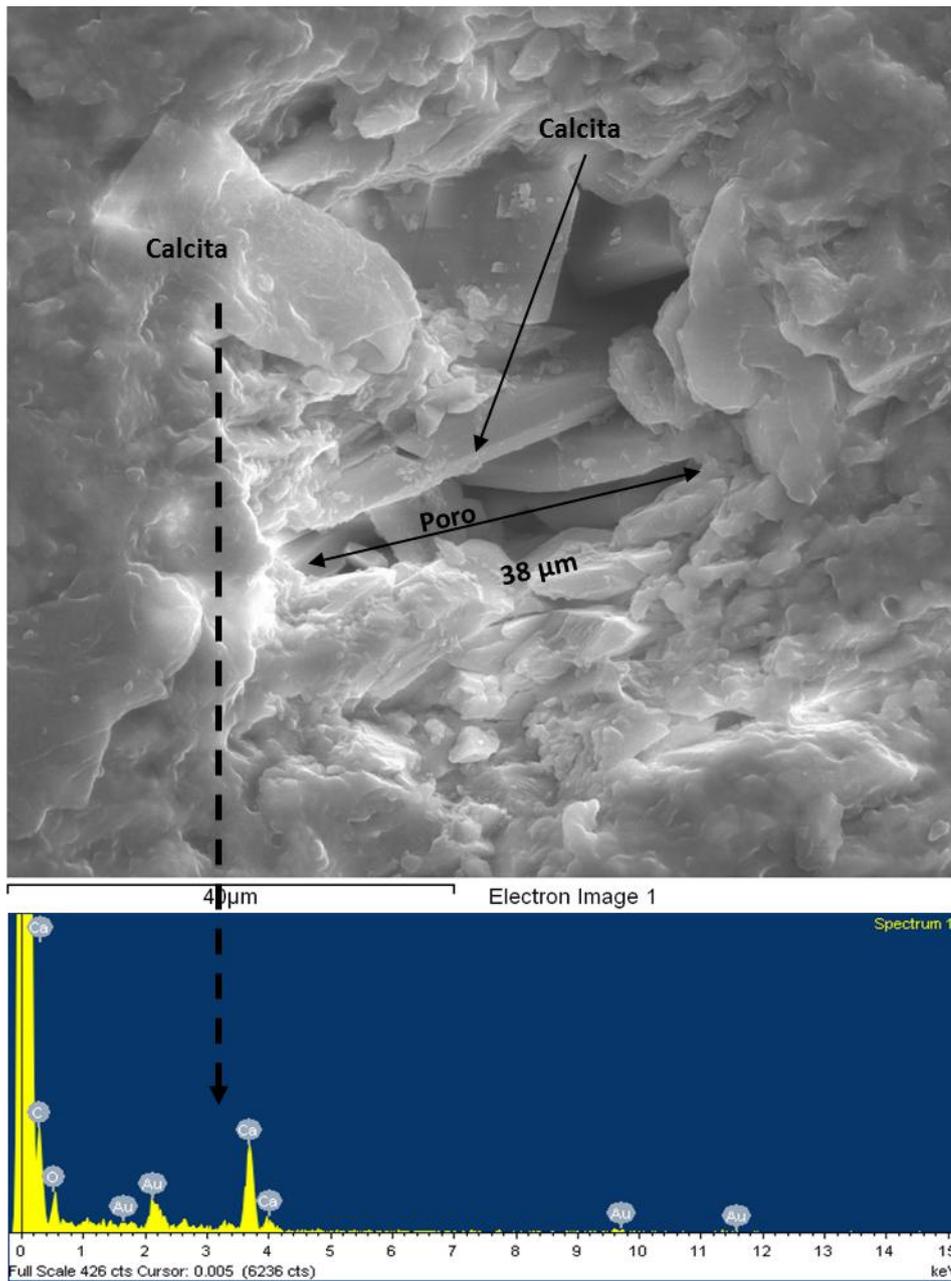


Figura 5.11 – Imagem MEV na qual se pode observar calcita sob a forma euédrica e subédrica e poro com 38,1 μm de largura.

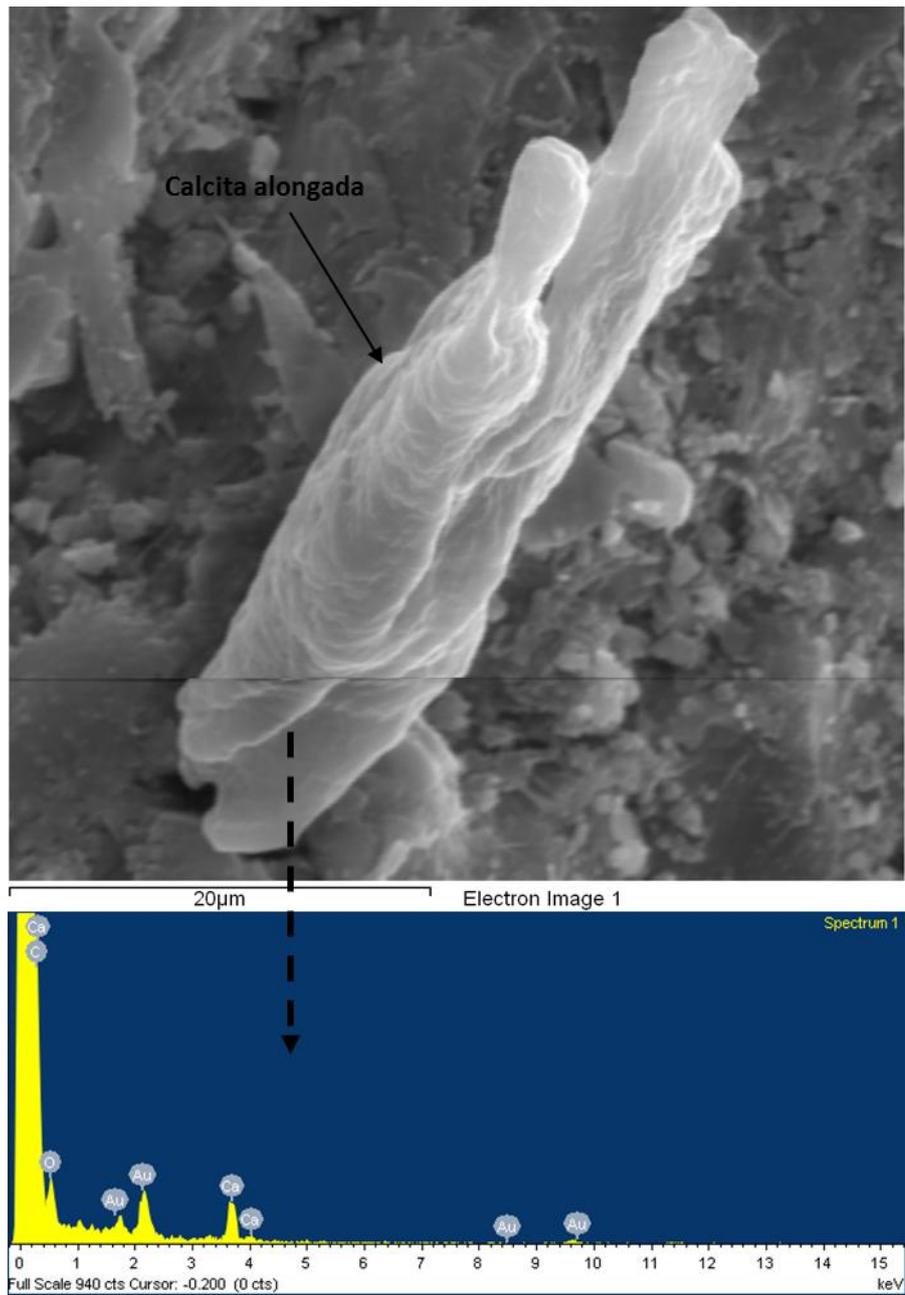


Figura 5.12 – Calcita com formato alongado observada na lâmina TRI-08 e seu respectivo gráfico EDS mostrando o pico de cálcio.

Nas lâminas de Itaboraí foram detectados cristais de quartzo, como mostra a figura 5.13, além de material silicoso, provavelmente calcedônia, preenchendo alguns poros.

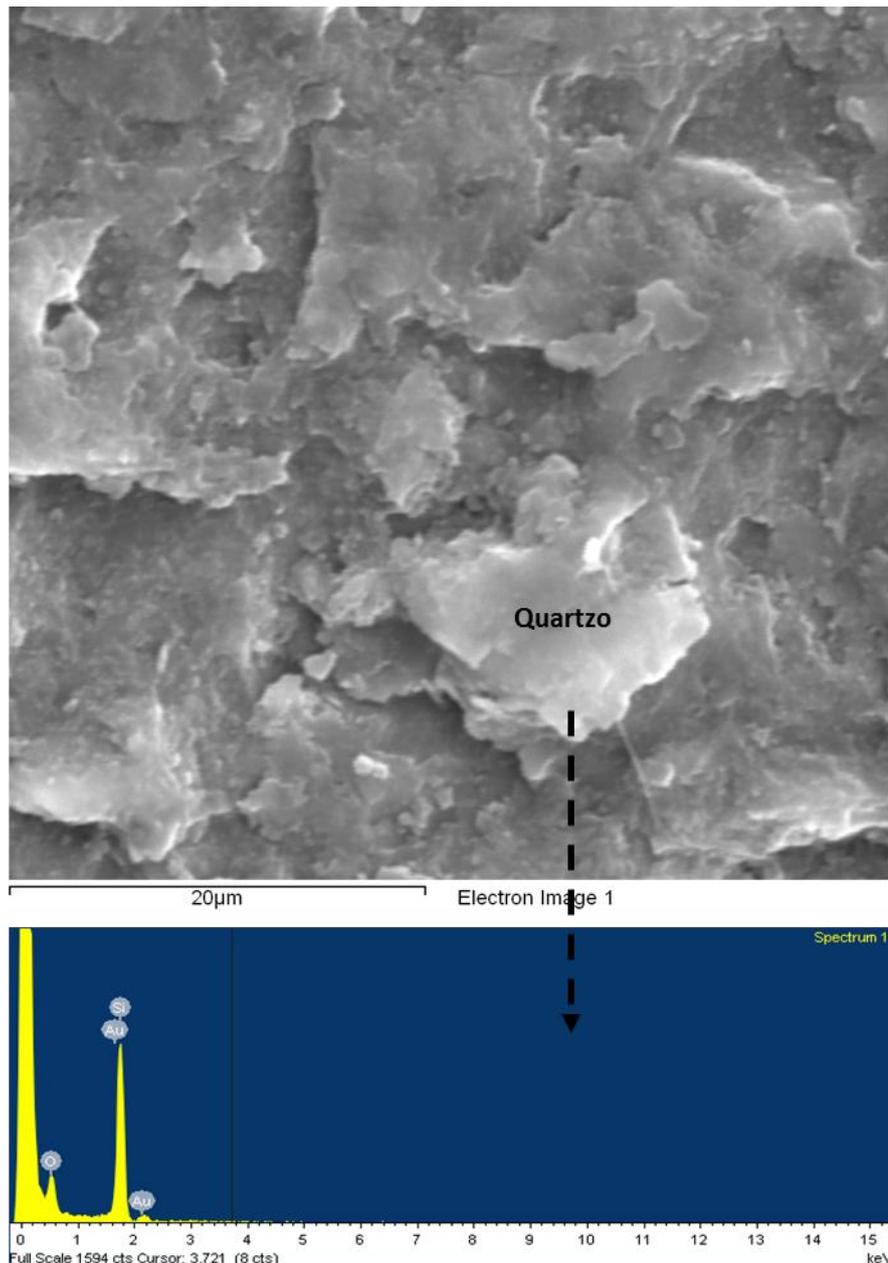


Figura 5.13 – Quartzo encontrado na lâmina TRI-03 e seu respectivo gráfico EDS, no qual pode ser visto o pico de sílica.

Outra feição típica observada nos travertinos de Itaboraí é a intercalação de calcitas alongadas com óxido de ferro. Esta feição foi detectada no MEV e pode ser vista na Figura 5.14. Vale ressaltar, que não foi reconhecido nenhum mineral de ferro (*i.e.*, geothita, hematita, pirita). O óxido de ferro, na verdade, recobre as calcitas, formando esta intercalação. Logo, dentro da camada de óxido de ferro, foram reconhecidos minerais de calcita.

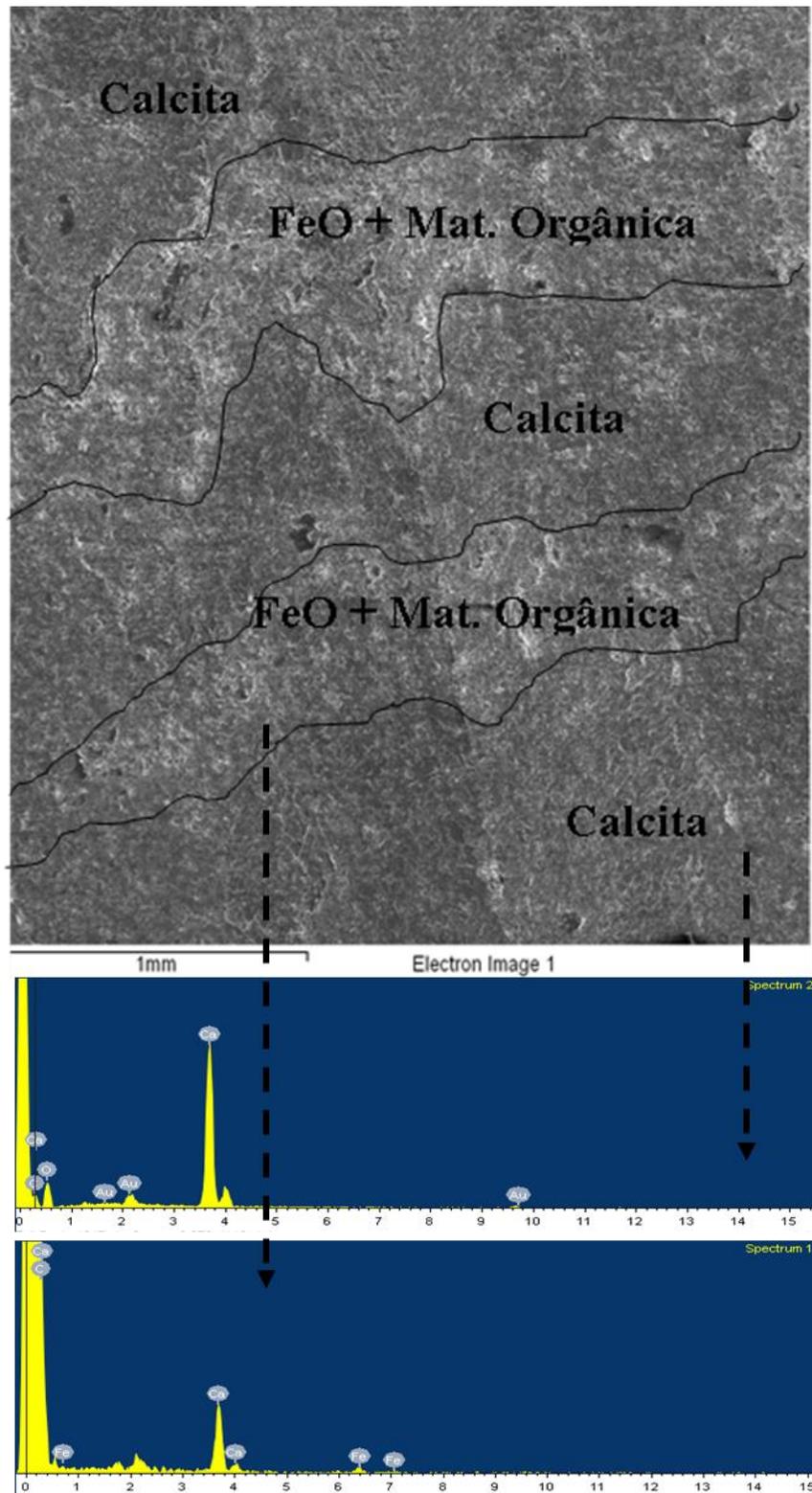


Figura 5.14 – Intercalação de calcita com óxido de ferro e matéria orgânica vista na lâmina TRI-02, e os gráficos EDS com picos de cálcio e ferro + carbono, respectivamente.

Em todas as lâminas petrográficas dos travertinos fitados de Itaboraí foi notada a presença de matéria orgânica preenchendo poros ou aderida à calcita. Provavelmente a matéria orgânica ou recobriu a calcita formando uma película ou está na estrutura interna da calcita sob a forma de impureza. Nas imagens geradas pelo MEV pode-se reconhecer a matéria orgânica aderida à calcita pela coloração mais escura da região do mineral onde há a matéria orgânica. Na Figura 5.12 nota-se que a parte central da calcita apresenta uma coloração mais escura (apresenta matéria orgânica) do que nas extremidades.

Em todas as figuras apresentadas neste item, que mostram as imagens geradas pela análise MEV, foram adicionadas os gráficos EDS. Estes gráficos apresentam os elementos químicos reconhecidos num determinado local da imagem. O local onde foi feita a análise EDS está representado na figura por uma seta preta pontilhada.

Análises MEV em lâminas petrográficas de travertinos encontrados na bacia de Itaboraí, entre eles, o travertino fitado também foram realizadas por Sant'anna *et al.* (2004). Os autores encontraram calcita dentro de camadas ferruginosas e cristais de calcita sob forma euédrica e subédrica, assim como foram observadas nesta pesquisa. Adicionalmente Sant'anna *et al.* (*op. cit.*) observaram cristais de goethita, o que não foi encontrado nas lâminas analisadas nesta pesquisa.

Na lâmina petrográfica de travertino romano selecionada para a análise de microscopia eletrônica de varredura foram observados principalmente ao redor dos poros, cristais de calcita sob a forma subédricas, com granulometria grosseira. Os minerais de calcita mais afastados dos poros apresentam granulometria mais fina. A Figura 5.15 mostra estes minerais de calcita encontrados na lâmina TRR-01d.

Os poros encontrados nesta lâmina variam de 20 μ m a 2,12mm. Assim como nas lâminas de travertinos de Itaboraí, foi observada a presença de matéria orgânica preenchendo poros ou aderida aos cristais de calcita.

Após a confecção das lâminas petrográficas de travertino romano foi notado que alguns poros não tinham sido preenchidos pelo corante azul de metileno. A partir da análise MEV pode-se observar que na verdade estes poros haviam sido preenchidos por calcita com granulometria mais fina e matéria orgânica.

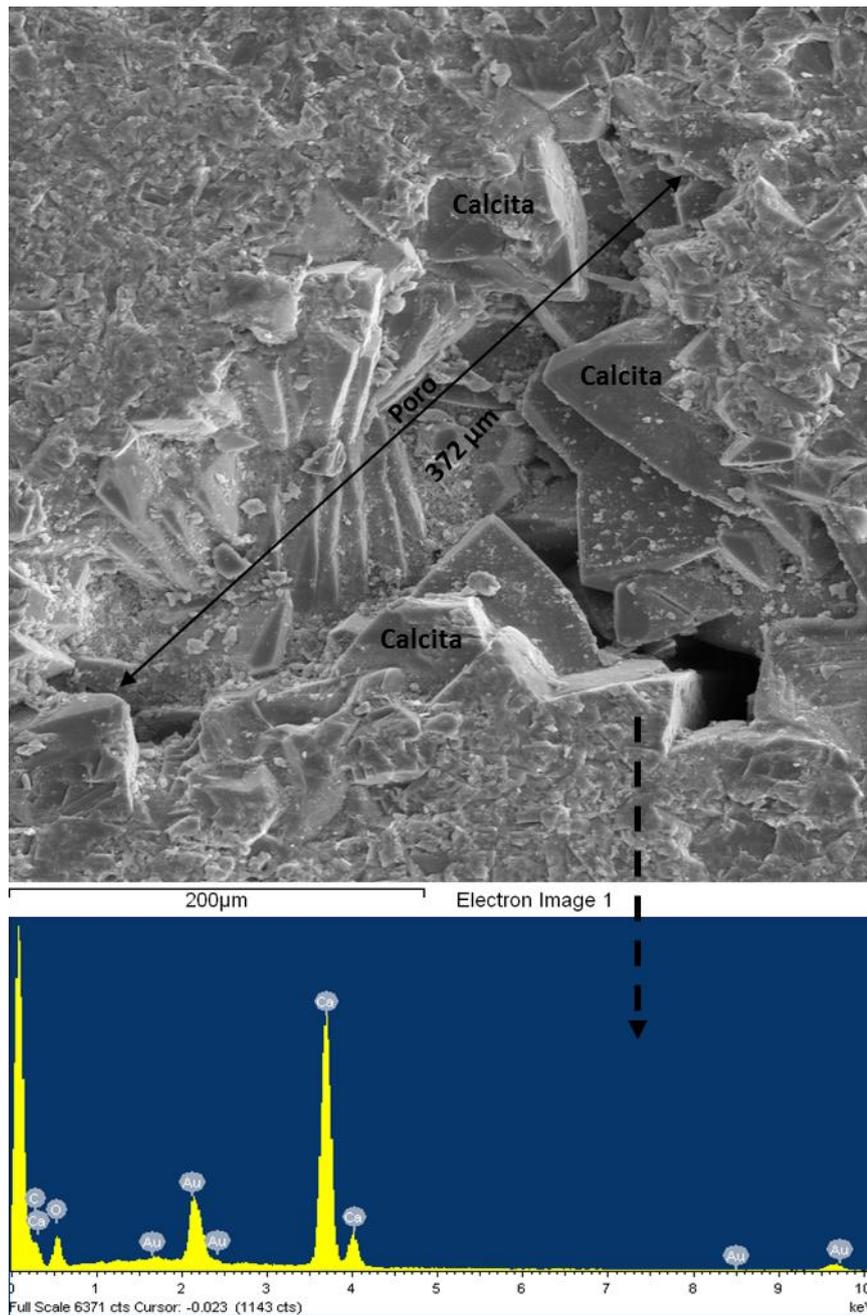


Figura 5.15 – Calcitas de granulação grosseira ao redor de um poro de 372μm de largura, na lâmina petrográfica TRR-01d.

Na lâmina petrográfica de travertino turco utilizada no MEV foi observada a presença de matéria orgânica preenchendo poros ou aderida aos minerais de calcita, como mostra a Figura 5.16. Os poros encontrados na lâmina variam de 12μm a 3,0mm.

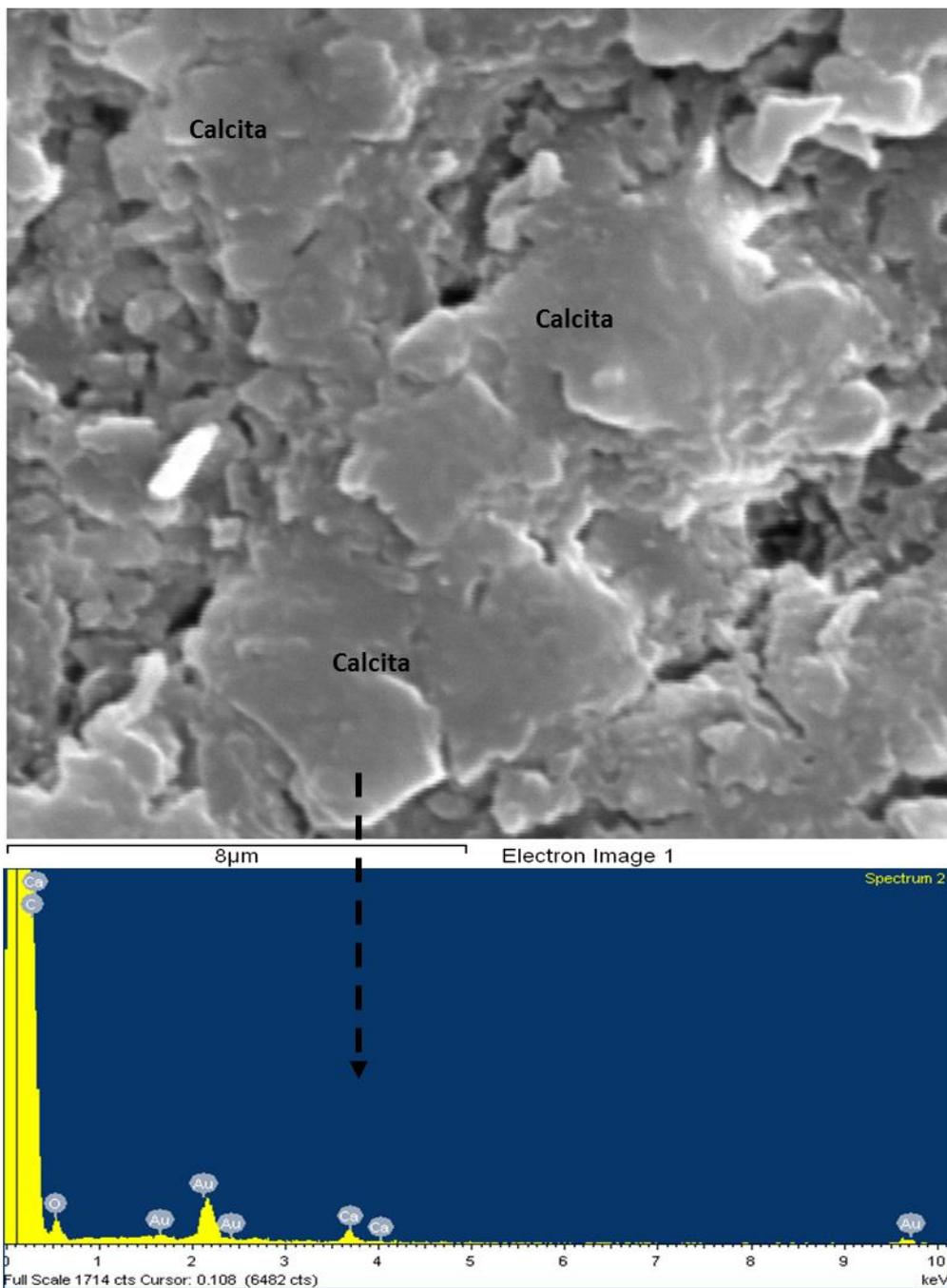


Figura 5.16 – Cristais de calcita observados na lâmina TRT-01e e seu respectivo gráfico EDS com o pico de cálcio. Nota-se que a parte central dos cristais são mais escuros que as bordas. Isso se deve pela presença de matéria orgânica.

De maneira geral, foram reconhecidos cristais de calcita com granulometria mais grosseira ao redor dos poros, e calcita com granulometria mais fina disseminado na lâmina e no interior de alguns poros.

Assim como nas lâminas de travertinos romanos, foi notado após a confecção das lâminas petrográficas, que alguns poros não tinham sido

preenchidos pelo corante azul de metileno. A partir da análise MEV pode-se observar que alguns destes poros haviam sido preenchidos por minerais de calcita com granulometria mais fina e matéria orgânica, e outros realmente não tinham sido preenchidos pelo corante.

As imagens restantes geradas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) podem ser vistas no Apêndice I desta dissertação.

5.1.5. Difração de Raios-X

As análises de difração de raios-X foram realizadas nas amostras TRI-01, TRI-03, TRI-09, TRR-01 e TRT-01.

Na amostra TRI-01 foram reconhecidos apenas cristais de calcita, como mostra a Figura 5.17. Os minerais detectados na amostra TRI-03 foram calcita e quartzo conforme mostra a Figura 5.18. Na amostra TRI-09 além de serem observados calcita e quartzo, foi reconhecido o argilomineral illita. O difratograma da amostra TRI-09 pode ser visto na Figura 5.19.

Os resultados obtidos pela difração de raios-X coincidiu com os resultados de espectrometria e de ataque sulfúrico. A partir da junção dos resultados destes dois últimos ensaios, foi determinado que a amostra TRI-01 não apresentava quartzo, o que foi confirmado pelo ensaio de difração de raios-X. Já as amostras TRI-03 e TRI-09 apresentam calcita e quartzo, resultado que foi confirmado com o ensaio de difração de raios-X. Vale ressaltar, que pelos resultados de espectrometria com os resultados de ataque sulfúrico a amostra TRI-09 apresentava maior quantidade de quartzo do que a amostra TRI-03. Fato que também foi confirmado pelo ensaio de difração de raios-X.

Os resultados apresentados nas Figuras 5.17, 5.18 e 5.19 diferem daqueles mostrados em Sant'anna *et al.* (2004) posto que os autores detectaram apenas calcita nas amostras de travertino fitado da bacia de Itaboraí.

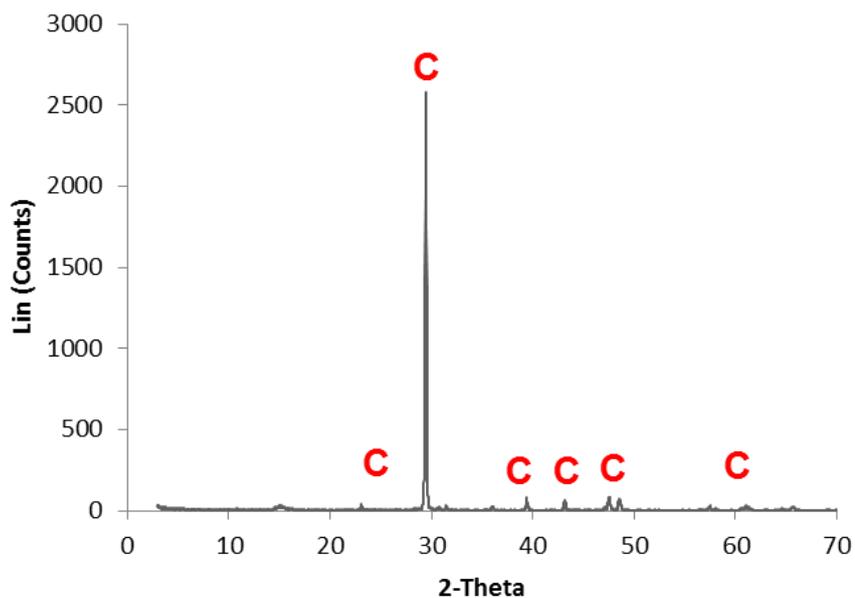


Figura 5.17 – Difratoograma referente à amostra TRI-01. A letra C representa o mineral calcita.

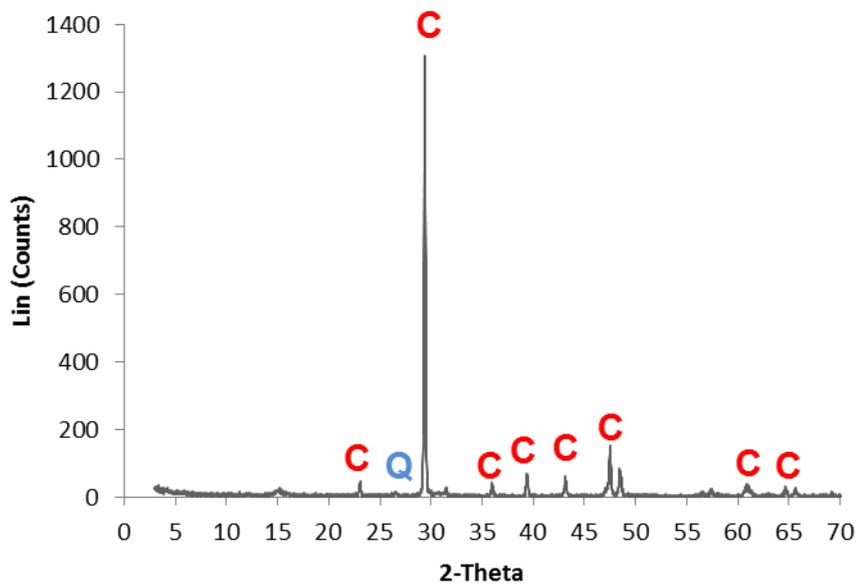


Figura 5.18 – Difratoograma da amostra TRI-03. A letra C representa o mineral calcita e a letra q representa o mineral quartzo.

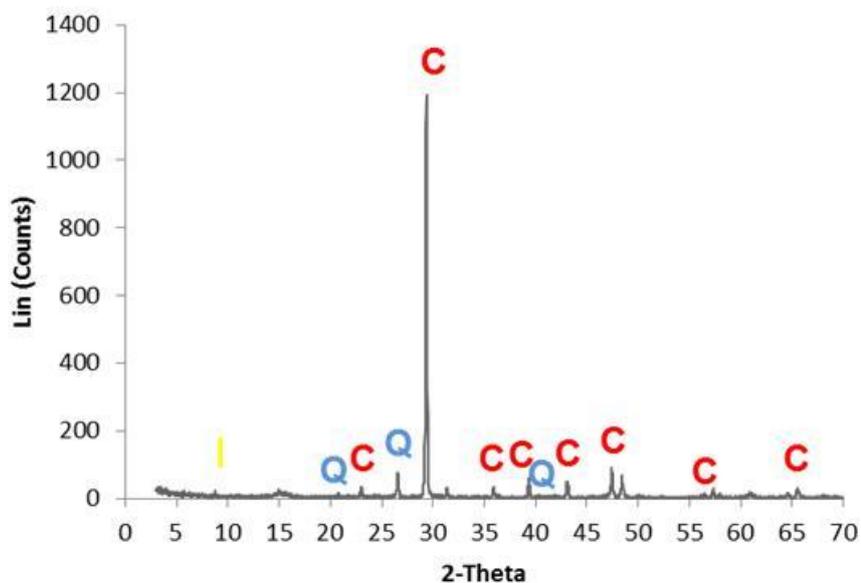


Figura 5. 19 – Difratoograma da amostra TRI-09. A letra C representa o mineral calcita, a letra q representa o mineral quartzo e a letra I representa o argilomineral illita.

Nos difratogramas das amostras de travertino romano e turco foram detectados apenas calcita, como mostra as Figuras 5.20 e 5.21, respectivamente.

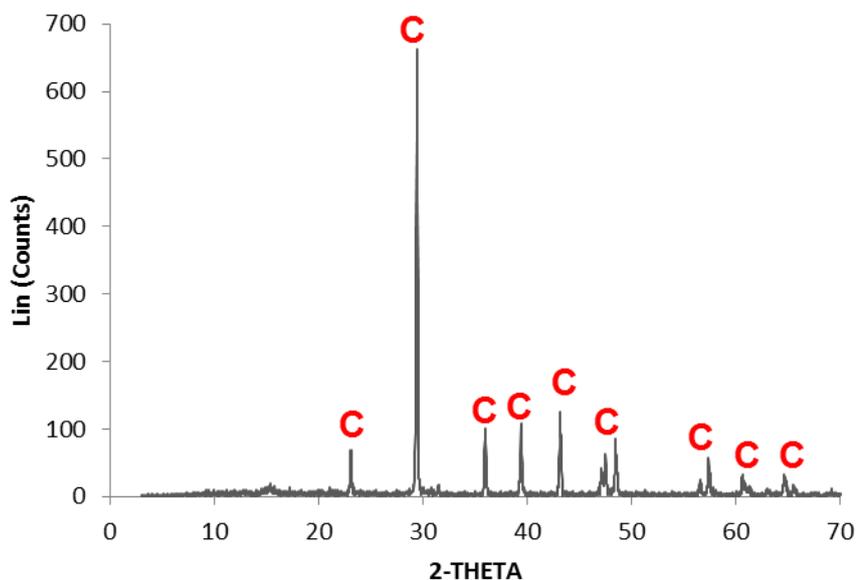


Figura 5.20 – Difratoograma da amostra TRR-01 de travertino romano. A letra C representa o mineral calcita.

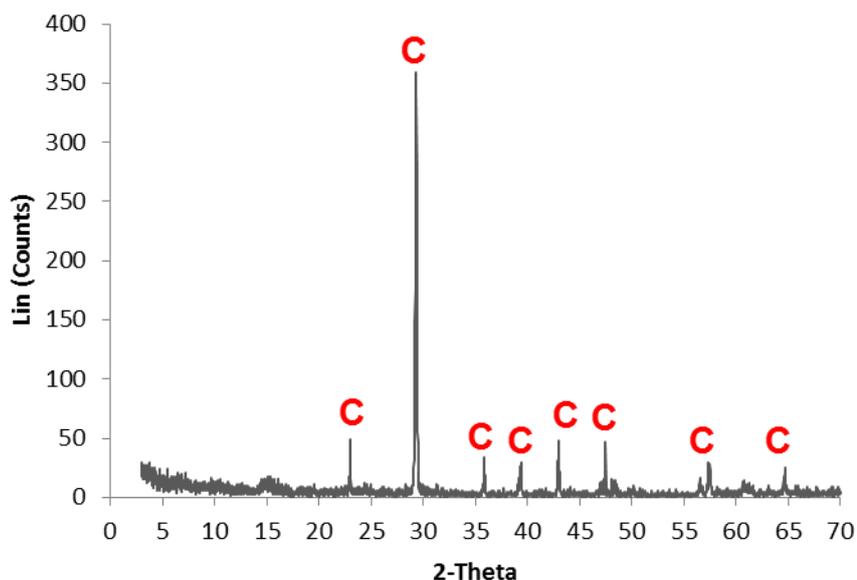


Figura 5.21 – Difratoograma da amostra TRT-01 de travertino turco. A letra C representa o mineral calcita.

5.2. Análise Textural

A textura das rochas foi analisada através de amostras de mão e de lâminas petrográficas.

Nesta pesquisa foi realizada uma descrição das amostras de mão (análise macroscópica), através de um formulário, no qual se fez o reconhecimento dos minerais, textura, dureza e se as rochas efervesce com ácido clorídrico e água oxigenada.

O formulário com a descrição macroscópica da amostra TRI-07 está representado na Figura 5.22. Os formulários preenchidos com as descrições macroscópicas das amostras restantes estão no Apêndice II desta dissertação.

A coloração das amostras de travertinos de Itaboraí basicamente variam de marrom claro a branco. Há geralmente uma intercalação, com bandas mais claras (calcita) e bandas mais escuras (calcita + óxido de ferro). As amostras TRI-06 e TRI-10 apresentam coloração esverdeada devido às impurezas de manganês.

Análise Macroscópica	
	Amostra: TRI-07
	Origem: Bacia de Itaboraí
	Data de coleta: 04/11/2010
	Responsável pela coleta: Renato Ramos/ Débora Pilotto/ Sérgio Fontoura e Maria Isabel.
Coloração: Bege amarronzado	
Estrutura: Maciça e nas extremidades há a estrutura laminada.	
Textura: Cristalina fina	
Dureza: Todos os minerais foram riscados pelo canivete	
Minerais: Calcita	
Efervesce com água oxigenada? Não	
Efervesce com ácido clorídrico? Sim	
Observações:	

Figura 5.22 – Formulário com a descrição macroscópica da amostra TRI-07.

O mineral observado nas amostras de Itaboraí foi a calcita, sendo que na amostra TRI-09 foram reconhecidos cristais de quartzo. Devido aos travertinos fitados de Itaboraí serem compostos essencialmente por calcita, os minerais de todas as amostras foram riscados pelo canivete (i.e., a dureza da calcita é 3 e a dureza do canivete é em torno de 5,0).

Todas as amostras de Itaboraí efervesceram com ácido clorídrico diluído a frio, comprovando a presença de calcita. Contudo, as amostras não efervesceram com água oxigenada 20 vol., sugerindo que não há matéria orgânica livre nas amostras.

As estruturas visualizadas foram a laminada e a maciça, sendo que algumas amostras possuem estrutura maciça na área central e laminada nas extremidades, como a amostra TRI-07 que está representada na Figura 5.22. Em todas as amostras observou-se a textura granular fina.

Rodrigues-Francisco (1975) realizou análises macroscópicas em amostras de travertinos fitados em sua dissertação. As descrições realizadas pelo autor são similares das que foram efetuadas no presente estudo.

As amostras de travertino romano apresentam coloração bege clara e o mineral encontrado nas amostras foi a calcita, por este motivo todas as amostras foram riscadas pelo canivete.

Todas as amostras de travertino romano efervesceram com ácido clorídrico diluído a frio, comprovando a presença de calcita. No entanto, as amostras não efervesceram com água oxigenada 20 vol., indicando que não há matéria orgânica livre nas amostras.

A estrutura encontrada nestas amostras de travertino foi a laminada com intercalações de bandas mais porosas com bandas mais maciça, como mostra a Figura 5.23. E a textura observada foi a granular fina.



Figura 5.23 – Estrutura laminada com intercalações de bandas porosas e bandas maciças observada na amostra TRR-01 de travertino romano.

As placas de travertino turco possuem coloração bege amarelado e estrutura laminada, com intercalações de bandas porosas e bandas maciças. O único mineral observado nas amostras foi a calcita. Assim como nos travertinos fitados de Itaboraí e romano, as amostras de travertino turco efervesceram com ácido clorídrico diluído a frio e não efervesceram com água oxigenada 20 vol. A textura granular fina foi observada em todas as placas de travertino turco.

As texturas das rochas foram também observadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV). Nas amostras de Itaboraí foram reconhecidas duas texturas diferentes, representadas na Figura 5.24. Na textura 01 os minerais estão alinhados e apresentam uma granulometria maior, já na textura 02 os minerais estão dispersos e apresentam uma granulometria menor. Através

do gráfico EDS pode-se comprovar que tanto na textura 01 como na textura 02 só há minerais de calcita.

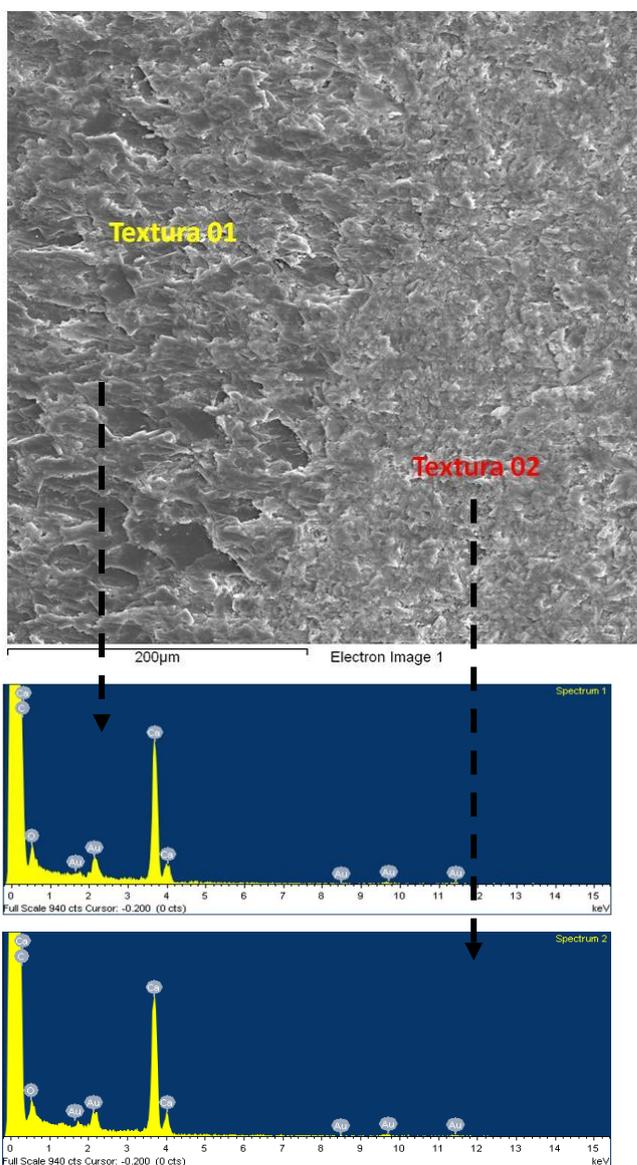


Figura 5.24 – Imagem gerada no MEV mostrando os dois tipos de texturas observadas na amostra TRI-08.

Nas imagens MEV obtidas a partir das lâminas de travertino romano foi observada a textura microcristalina. Próximo aos poros foi notado que os minerais apresentam grãos maiores. Já nas amostras de travertino turco foi reconhecida apenas a textura microcristalina.

As análises texturais também foram realizadas no microscópio óptico. Nas lâminas petrográficas das amostras de travertino de Itaboraí foi reconhecida a textura microcristalina e a textura fibrosa, que podem ser visualizadas nas

Figuras 5.2 e 5.3, respectivamente. Rodrigues-Francisco (1975) reconheceu estas duas texturas em lâminas petrográficas de travertinos fitados de Itaboraí.

A textura visualizada nas lâminas de travertino romano (Figura 5.5) e turco foi a microcristalina, sendo que nas lâminas de travertino turco (Figura 5.8) a maioria dos poros estão envoltos por cristais de calcita que apresentam uma maior granulometria.

5.3. Termogravimetria

A termogravimetria é a técnica na qual a mudança de massa de uma substância é medida em função da temperatura, enquanto esta é submetida a uma programação controlada. Os ensaios termogravimétricos foram realizados com o objetivo de reconhecer a temperatura na qual a amostra começa a ter a perda de água (*i.e.*, perda de massa). A partir dos resultados dos ensaios termogravimétricos pode-se avaliar a temperatura adequada para a secagem dos corpos de prova para a realização dos ensaios de porosimetria.

A Figura 5.25 apresenta a variação de massa sofrida na amostra TRI-03 com o aumento da temperatura. Observa-se que a partir de cerca de 110°C, começa haver a perda de massa na amostra. A variação máxima de massa encontrada na amostra de travertino de Itaboraí foi de - 0,48 % a 500°C. O sinal negativo significa que houve perda de massa.

Já na Figura 5.26 observa-se que a amostra de travertino romano começou a ter perda de massa a uma temperatura um pouco menor que 100°C. A variação máxima de massa foi de -0,37% a 500°C. Nota-se que o comportamento da curva da amostra TRI-03 é muito similar a curva da amostra de travertino romano. Após o ensaio foi observado que a amostra de travertino romano sofreu o processo de coqueamento, provavelmente devido a combustão incompleta ocasionada pela quantidade insuficiente de oxigênio no meio.

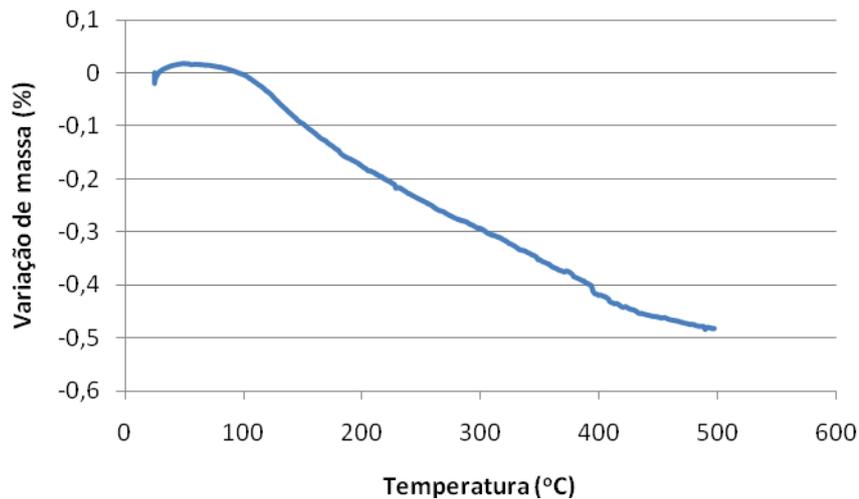


Figura 5.25 – Gráfico da variação de massa *versus* temperatura da amostra TRI-03.

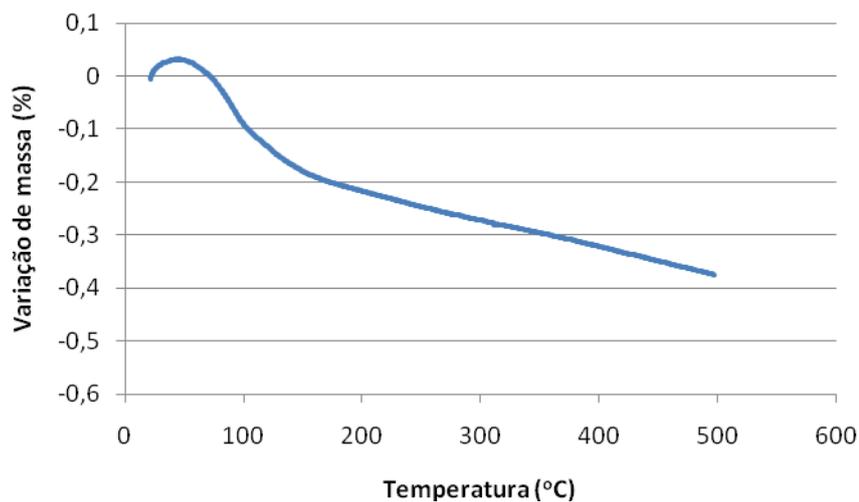


Figura 5.26 – Gráfico da variação de massa *versus* temperatura da amostra TRR-01.

A Figura 5.27 mostra a variação de massa da amostra de travertino turco sob o aumento de temperatura. A amostra de travertino turco começou a ter perda de massa a uma temperatura um pouco menor que 100°C. Foram observadas quedas bruscas de massa a determinadas temperaturas, como indica as setas pretas na figura. Devido a este comportamento, foram realizados mais três ensaios em amostras de travertino turco. Os resultados dos ensaios suplementares foram idênticos, sugerindo que o comportamento ilustrado na Figura 5.27 deva ser uma característica inerente ao material. A variação máxima de massa nas amostras de travertinos turcos é de aproximadamente -0,8 %,

sendo maior que os valores encontrados no travertino de Itaboraí e no travertino romano.

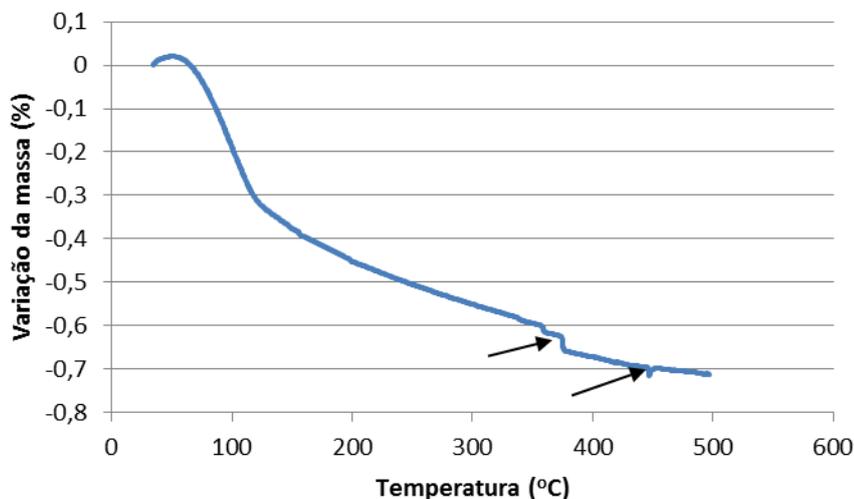


Figura 5.27 – Gráfico da variação de massa *versus* temperatura da amostra TRT-01.

5.4. Análises de porosidade

5.4.1. Análise de porosidade através da captura e processamento de imagens

Nas lâminas petrográficas dos travertinos de Itaboraí foram observados os poros do tipo intercristalino, vugular, fenestral, móldico, *shelter* e fratural, conforme mostra a Figura 5.28.

Os tipos de poros reconhecidos nas lâminas petrográficas dos travertinos romanos foram: intercristalino, intracristalino, fenestral e vugular, como ilustra a Figura 5.29.

Nas lâminas dos travertinos turcos foram observados poros do tipo fenestral, intercristalino, intracristalino e vugular, conforme pode ser visto na Figura 5.30.

Os resultados estão de acordo com a afirmação de Pentecost (2005). Segundo o autor, os tipos de poros frequentemente encontrados em travertinos são: intercristalino, móldico, fenestral, *shelter*, fratural e caverna.

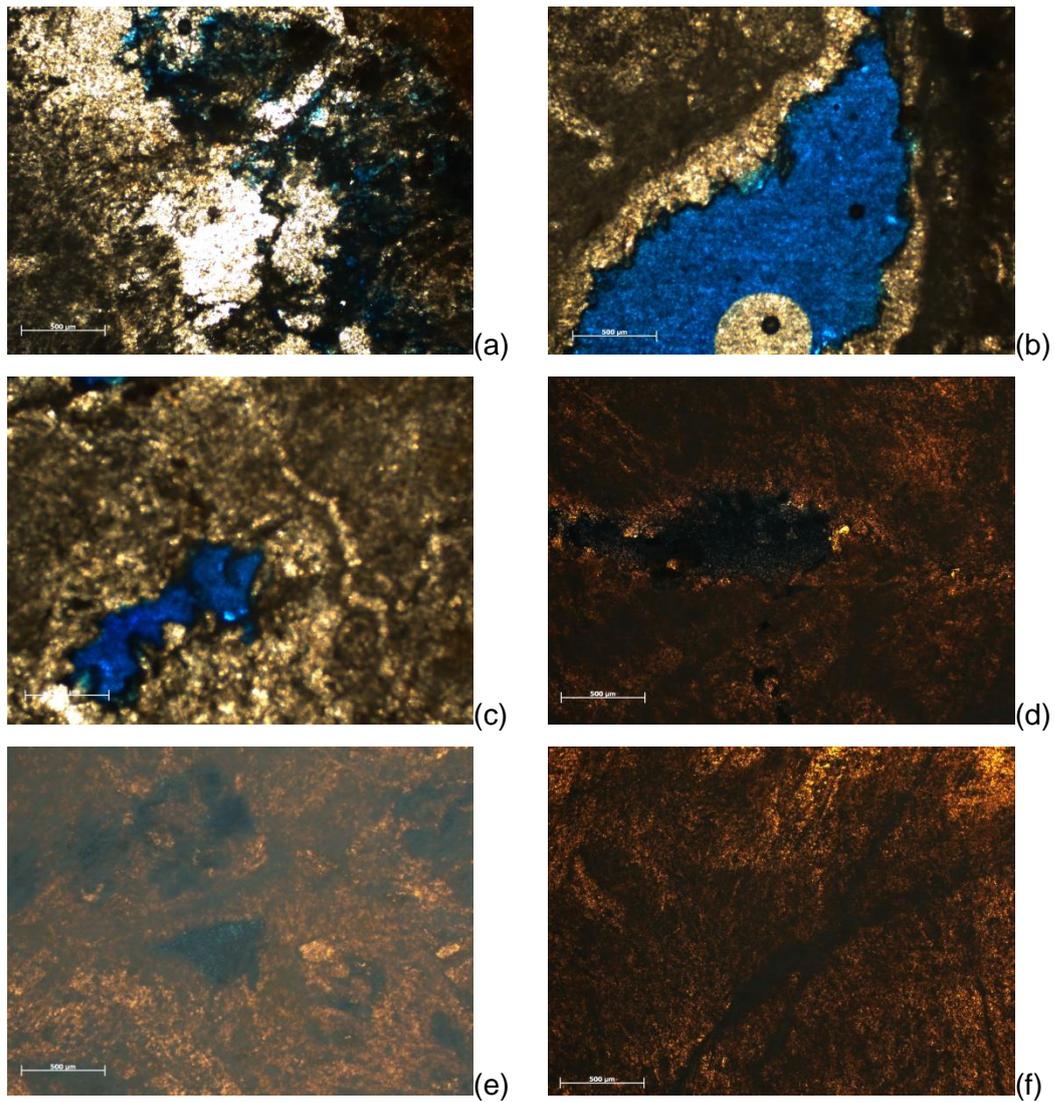


Figura 5.28 – Tipos de poros encontrados nas lâminas petrográficas dos travertinos de Itaboraí. (a) Porosidade intergranular reconhecida na lâmina TRI-07. (b) Porosidade vugular observada na lâmina TRI-02. (c) Porosidade fenestral vista na lâmina TRI-02. (d) Porosidade móldica observada na lâmina TRI-10. (e) Porosidade do tipo *shelter* reconhecida na lâmina TRI-03. (f) Porosidade do tipo fratural observada na lâmina TRI-06. (Condições: luz transmitida polarizada).

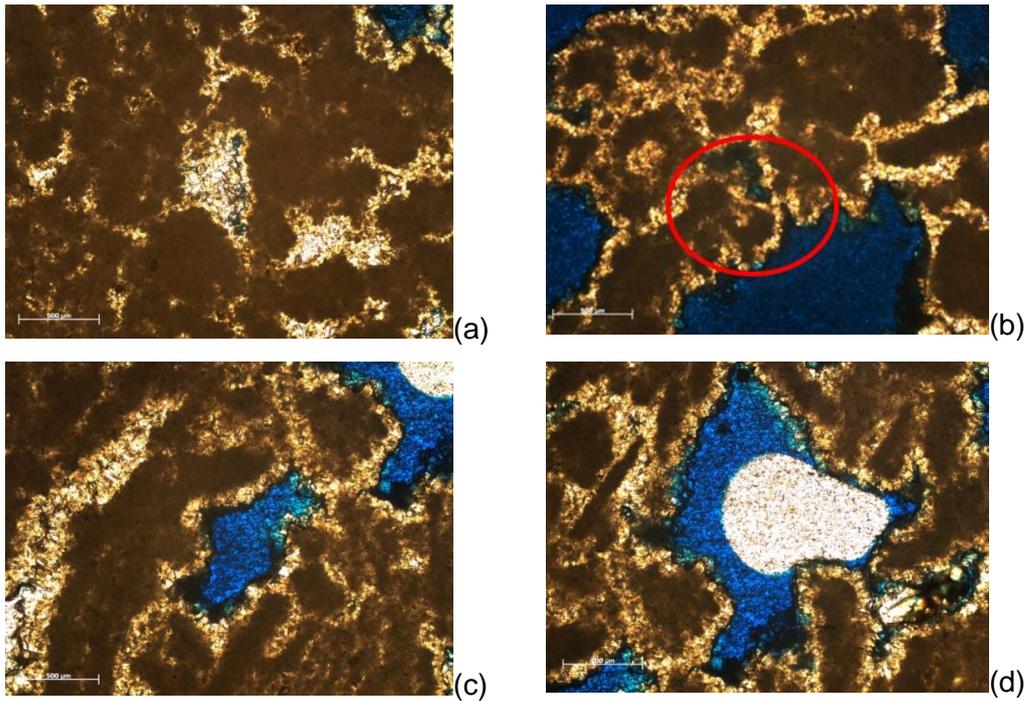


Figura 5.29 – Tipos de poros encontrados nas lâminas dos travertinos romanos. (a) Porosidade intercrystalina (TRR-01a). (b) Porosidade intracrystalina (TRR-02a). (c) Porosidade fenestral (TRR-01b). (d) Porosidade vugular (TRR-01b). (Condições: luz transmitida polarizada).

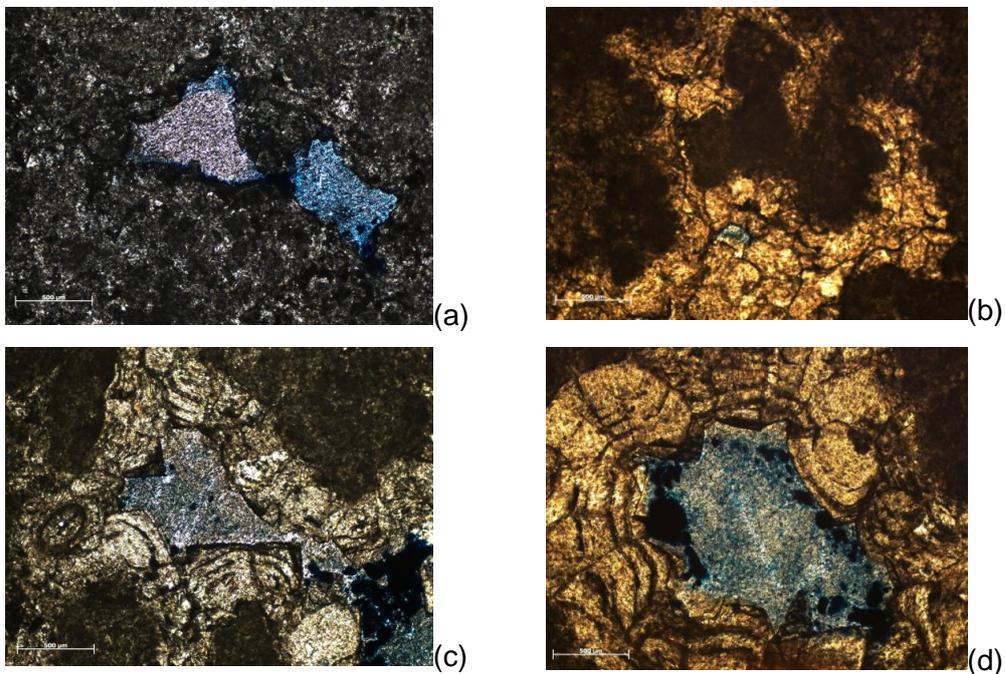


Figura 5.30 – Tipos de poros encontrados nas lâminas dos travertinos turcos. (a) Porosidade fenestral (TRT-01e). (b) Porosidade intercrystalina (TRT-01a). (c) Porosidade do tipo *shelter* (TRT-01c). (d) Porosidade vugular (TRT-01b). (Condições: luz transmitida polarizada).

A captura e o processamento das imagens foram realizados em todas as lâminas petrográficas confeccionadas nesta pesquisa.

A digitalização das lâminas petrográficas consiste na captura de imagens em mosaicos. Estes mosaicos podem ser unidos, formando uma imagem panorâmica da lâmina petrográfica conforme mostra a imagem realizada na lâmina petrográfica TRI-02 ilustrada na Figura 5.31.

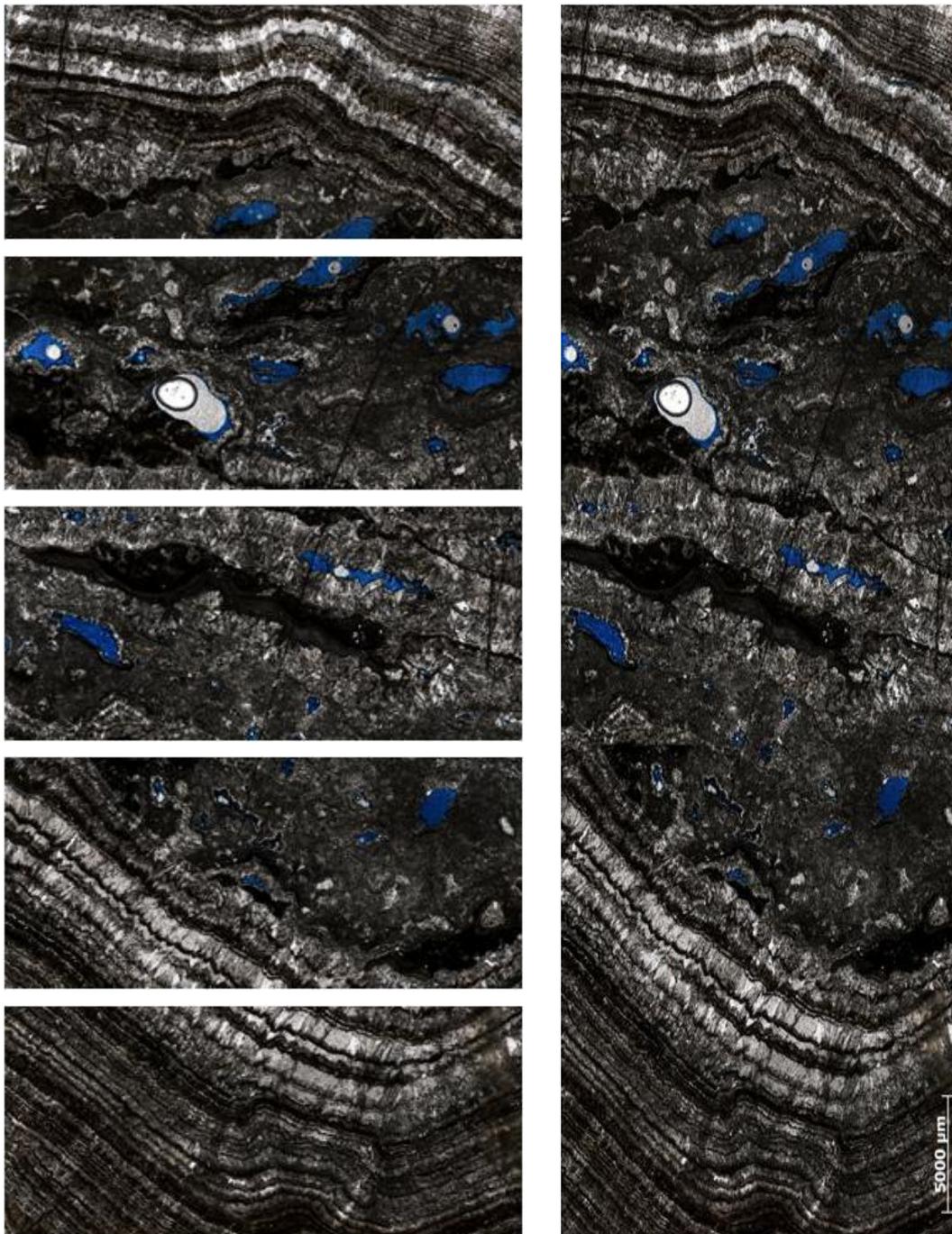


Figura 5.31 – Sequência de mosaicos e a imagem panorâmica (junção dos mosaicos) realizados na lâmina TRI-02. (Condições: luz transmitida polarizada).

No Apêndice III, podem ser vistos os mosaicos e as imagens panorâmicas das lâminas petrográficas restantes.

O processamento das imagens geradas (mosaicos) foi realizado com o objetivo de determinar a porosidade total, o número de objetos (poros) presentes nas lâminas e a área total ocupada pelos objetos. Estes parâmetros também foram calculados considerando a microporosidade.

Durante o processamento das imagens, é de praxe utilizar a operação denominada *scrap*, que tem como objetivo eliminar os objetos muito pequenos, que poderiam ser os nanoporos. Assim, no cálculo dos parâmetros considerando a microporosidade não foi realizada a operação *scrap*.

As Tabelas 5.10, 5.11 e 5.12 mostram os resultados obtidos através do processamento das imagens das lâminas petrográficas dos travertinos de Itaboraí, romanos e turcos, respectivamente.

Tabela 5.10 – Valores dos parâmetros obtidos através do processamento dos mosaicos das lâminas dos travertinos fitados de Itaboraí.

Lâmina Petrográfica	Número de poros	Área total ocupada pelos poros (cm ²)	Porosidade (%)	Valores considerando a microporosidade		
				Número de poros	Área total ocupada pelos poros (cm ²)	Porosidade (%)
TRI-01	249	0,64	0,09	1468453	11,7	0,93
TRI-02	311	24,44	1,76	1128201	32,1	2,3
TRI-03	60	0,3	0,02	968610	7,31	0,53
TRI-04	593	22,64	1,24	25772	23,1	1,27
TRI-06	0	0	0	972864	5,55	0,42
TRI-06a	137	2,42	0,21	221798	3,82	0,34
TRI-07	303	0,94	0,07	997394	9,4	0,68
TRI-07a	2	0,97	0,07	250	1,05	0,08
TRI-08	267	1,18	0,08	58470	1,78	0,12
TRI09	70	0,18	0,01	5155	0,19	0,02
TRI-10	318	8,27	0,57	23776	8,55	0,59

Tabela 5.11 – Valores dos parâmetros obtidos através do processamento dos mosaicos das lâminas dos travertinos romanos.

Lâmina Petrográfica	Número de poros	Área total ocupada pelos poros (cm ²)	Porosidade (%)	Valores considerando a microporosidade		
				Número de poros	Área total ocupada pelos poros (cm ²)	Porosidade (%)
TRR-01a	1644	79,82	5,8	59422	80,7	5,9
TRR-01b	1181	64,44	4,7	49647	65	4,8
TRR-01c	1381	102,99	6,6	58415	104	6,7
TRR-01d	2110	166	12,3	81487	167	12,4
TRR-02a	802	16,81	2,61	85065	44,5	2,65
TRR-02b	1411	13,95	3,93	58526	13,95	3,99

Tabela 5.12 – Valores dos parâmetros obtidos através do processamento dos mosaicos das lâminas dos travertino turcos.

Lâmina Petrográfica	Número de poros	Área total ocupada pelos poros (cm ²)	Porosidade (%)	Valores considerando a microporosidade		
				Número de poros	Área total ocupada pelos poros (cm ²)	Porosidade (%)
TRT-01a	277	3,13	0,27	30895	3,48	0,3
TRT-01b	276	1,47	0,13	54833	1,97	0,17
TRT-01c	367	2,33	0,14	138195	3,49	0,21
TRT-02a	196	1,01	0,07	55155	1,47	0,11
TRT-03a	26	0,046	0,01	7613	0,13	0,01

Observa-se na Tabela 5.10 que a porosidade dos materiais contidos nas lâminas variou entre 0 a 1,76%. O valor médio calculado foi 0,37%, o que sugere que os travertinos de Itaboraí apresentam uma porosidade baixa. Vale ressaltar, que a porosidade calculada nas lâminas petrográficas se refere aos poros conectados, sendo, portanto a porosidade efetiva das lâminas petrográficas.

A Tabela 5.10 mostra que os materiais contidos nas lâminas que apresentaram uma maior porosidade e conseqüentemente uma maior área total ocupada pelos objetos (poros) foram o TRI-02, TRI-04 e TRI-10. Estas mesmas lâminas foram as que apresentaram o maior número de objetos. Os materiais contidos nas lâminas TRI-06, TRI-03 e TRI-09 foram os que apresentaram os menores valores de porosidade e de área total ocupada pelos objetos (poros).

Estes materiais também apresentam o menor número de poros, sendo que o material contido a lâmina TRI-07 possui apenas 2 poros. Nos materiais contidos nas lâminas dos travertinos de Itaboraí foi encontrado um valor médio de 210 objetos (poros).

Considerando a microporosidade, os valores da porosidade variaram entre 0,02 a 2,3%, com um valor médio de 0,6%. Os materiais contidos nas lâminas petrográficas TRI-02 e TRI-04 continuaram tendo os maiores valores de porosidade. Nota-se que o material contido na lâmina TRI-01 apresentou um grande aumento de porosidade quando a microporosidade foi acrescida. Além da presença de ruídos foi observada através do microscópio óptico que a lâmina TRI-01 apresenta uma grande quantidade de microporos. Os materiais contidos nas lâminas petrográficas que obtiveram os maiores números de objetos (poros) foram o TRI-01, TRI-02 e TRI-07. O valor médio de poros encontrados nas lâminas de Itaboraí foi de 533704. O material contido na lâmina TRI-09 permaneceu como um dos menores valores de porosidade encontrado, mas os materiais presente nas lâminas TRI-06 e TRI-03 obtiveram um grande aumento de porosidade. As lâminas que apresentaram juntamente com a TRI-09 os menores valores de porosidade foram a TRI-07a e TRI-08. As lâminas TRI-07a e TRI-09 permaneceram com as menores quantidades de poros, além da lâmina TRI-10.

Nota-se na Tabela 5.11 que os valores da porosidade dos travertinos romanos variam entre 2,61 a 12,3%, com um valor médio de 5,99%, apresentado valores de porosidade mais elevadas que os travertinos de Itaboraí. Este fato é perceptível ao se observar as amostras de mão destas rochas. Os materiais rochosos contidos nas lâminas que apresentaram os menores valores de porosidade foram as TRR-02a e a TRR-02b. Este fato pode ser comprovado visualizando a Figura 5.32, onde a placa TRR-02 apresenta menos poros (é mais fechada) que a placa TRR-01. As lâminas que apresentam o menor número de objetos são as TRR-02a e a TRR-01b. O material contido na lâmina que possui o maior valor de porosidade e o maior número de objetos (poros) foi a TRR-01d. Esta comprovação era de se esperar, pois a região em que foi confeccionada esta lâmina petrográfica era bastante porosa. O valor médio do número de objetos encontrados nos materiais rochosos contidos nas lâminas foi de 1422, valor mais elevado que o encontrado nas lâminas dos travertinos de Itaboraí.



Figura 5.32 – Comparação entre a placa TRR-01 (à esquerda) e a placa TRR-02 (à direita).

Os valores da porosidade dos travertinos romanos considerando a microporosidade variam entre 2,65 a 12,4%, com um valor médio de 6,07%. Os materiais contidos nas lâminas TRR-02a e TRR-02b continuaram apresentando os maiores valores de porosidade e o material contido na lâmina TRR-01d o valor mínimo. Com o acréscimo da microporosidade, o material rochoso contido na lâmina TRR-02a foi o que apresentou o maior ganho no número de objetos (poros). O valor médio do número de objetos encontrados nas lâminas foi de 65427, valor bem menor do que o encontrado nas lâminas dos travertinos de Itaboraí. Este fato sugere que, apesar dos travertinos de Itaboraí apresentarem valores de porosidade bem menores que os dos travertinos romanos, possuem um valor considerável de microporos, que, por sua vez, não chegam a afetar no valor total da porosidade, mas contribui para a excessiva quantidade de poros encontrados.

Nota-se na Tabela 5.12 que os valores da porosidade dos materiais rochosos contidos nas lâminas de travertinos turcos variam entre 0,01 a 0,27%, com um valor médio de 0,12%. Observando as amostras de mão dos travertinos turcos é perceptível que a porosidade não é tão baixa como foi encontrada, mesmo sendo em lâminas petrográficas.

O que pode explicar esta subestimação dos valores da porosidade é o fato de que muitos poros presentes nas lâminas de travertino turco, aparentemente não foram preenchidos pelo corante azul de metileno. Durante a realização das análises no microscópio eletrônico de varredura (MEV) foi comprovado que

muitos poros não preenchidos pelo corante realmente eram poros. Mas vale ressaltar que alguns destes poros (não preenchidos por corante), na verdade, estavam preenchidos ou por matéria orgânica ou por cristais de calcita com uma granulometria mais grosseira.

Analisando a Tabela 5.12, pode-se perceber que os materiais contidos nas lâminas TRT-01a e TRT-01b apresentam maiores valores de porosidade e maior quantidade de objetos (poros). A lâmina TRT-03a possui o menor valor de porosidade e a menor quantidade de poros. O valor médio da quantidade de poros nas lâminas é de 194.

Com o acréscimo da microporosidade, o valor da porosidade variou entre 0,01 a 0,3%, com um valor médio de 0,15 %. Os materiais rochosos contidos nas lâminas TRT-01a e TRT-01b mantiveram os maiores valores de porosidade e da quantidade de objetos, com o acréscimo da microporosidade. A lâmina TRT-03a permaneceu apresentando o menor valor de porosidade e número de objetos. O valor médio do número de poros encontrados foi de 37124.

Em suma, verificou-se que os materiais contidos nas lâminas petrográficas dos travertinos romanos apresentaram valores de porosidade mais elevados, seguido dos travertinos de Itaboraí e travertinos turcos. Cabe ressaltar que os travertinos turcos apresentaram os valores de porosidade mais baixos, pois muitos poros não foram preenchidos pelo corante azul de metileno. Com a inclusão dos microporos nos valores da porosidade, o número de objetos nas lâminas de travertino de Itaboraí aumentou consideravelmente. Além da possibilidade de ruídos, foi observado que estas rochas realmente apresentam um valor considerável de microporos.

No entanto, torna-se necessário ressaltar que a análise da porosidade por processamento de imagens apresenta uma série de limitações, incluindo:

- Como a quantificação da porosidade é realizada a partir da diferenciação de cores (o que é azul é poros), o fato das lâminas serem muito escuras dificulta o reconhecimento do que é poro e do que é a matriz da rocha, acarretando no mascaramento de alguns poros, e conseqüentemente, a subestimação do valor da porosidade.
- Nem todos os poros vão conseguir ser impregnados pelo corante azul de metileno. Microporos e mesmo poros conectados, muitas vezes não são impregnados pelo corante, ocasionando a subestimação do valor da porosidade.

5.4.2. Determinação dos Índices Físicos

Os índices físicos considerados abrangem a massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente. Estes índices definem relações básicas entre a massa e o volume das amostras de um determinado tipo de rocha.

Os valores dos índices físicos são interrelacionados. Por exemplo, quanto menor a densidade, tanto maior se pode estimar o volume de espaços vazios existentes na rocha. Sendo maior o volume de espaços vazios, maior será a porosidade aparente e, possivelmente a porosidade efetiva (aberta). Quão maior a porosidade aberta, que traduz a existência de poros e/ou cavidades intercomunicantes, maior será a absorção de água esperada para a rocha e provavelmente menor a sua resistência.

A Tabela 5.13 apresenta os valores dos índices físicos determinados nas amostras de travertino de Itaboraí. Pode-se notar que as amostras TRI-06 e TRI-10 obtiveram valores mais elevados de porosidade efetiva e absorção d'água. As outras amostras obtiveram valores de porosidade e absorção d'água mais próximos, variando entre 1,12 a 2,36% e entre 0,43 a 0,92%, respectivamente.

Tabela 5.13 – Resultados dos índices físicos determinados nas amostras de travertino de Itaboraí.

Índices físicos					
Amostra	Massa específica aparente seca (Mg/m ³)	Massa específica aparente saturada (Mg/m ³)	Densidade esquelética aparente (Mg/m ³)	Porosidade Aparente (%)	Absorção d'água aparente (%)
TRI-04	2,56	2,59	2,62	2,36	0,92
TRI-05	2,63	2,65	2,68	1,74	0,66
TRI-06	2,42	2,50	2,63	7,79	3,22
TRI-07	2,61	2,63	2,66	1,97	0,76
TRI-08	2,61	2,64	2,68	2,41	0,92
TRI-09	2,63	2,64	2,66	1,12	0,43
TRI-10	2,54	2,58	2,65	4,20	1,65

Os valores dos índices físicos apresentados na Tabela 5.13 permitem observar diferenças entre as amostras estudadas relacionadas tanto com a massa específica aparente seca ($\rho_{a\text{sec}}$) e a saturada ($\rho_{a\text{sat}}$), quanto com a densidade esquelética (d_{skel}) e, portanto, com as propriedades de porosidade (Φ_a) e de absorção d'água (α_a). As maiores diferenças entre as amostras são

observadas nas propriedades de porosidade (Φ_a) e de absorção d'água (α_a), conforme ilustra a Figura 5.33. Nota-se uma relação direta da porosidade com a absorção d'água.

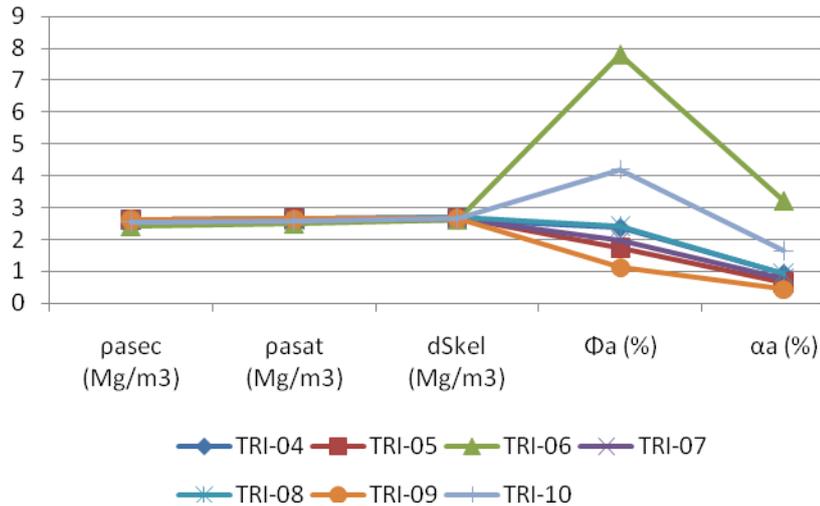


Figura 5.33 – Índices físicos das amostras de travertino de Itaboraí.: $\rho_{a,sec}$: massa específica aparente seca; $\rho_{a,sat}$: massa específica aparente saturada; d_{Skel} - densidade esquelética; Φ_a - porosidade; α_a - absorção d'água.

Além da realização dos cálculos dos índices físicos nas amostras de travertino de Itaboraí, representadas na Tabela 5.13, foram calculados os índices físicos dos quatro corpos de prova retirados do bloco TRI-05. Ao analisar os resultados, vistos na Tabela 5.14, verifica-se que os valores da massa específica aparente e da densidade esquelética dos corpos de prova são mais elevados que os determinados nas amostras de travertino de Itaboraí. Em contrapartida, a porosidade aparente e a absorção d'água aparente apresentam valores mais baixos, como era de se esperar.

A partir da análise macroscópica das amostras de travertino de Itaboraí e dos corpos de prova TRI-05, nota-se que os corpos de prova são mais rígidos, compactos, e por este motivo apresentam valores de massa específica aparente e de densidade esquelética mais elevados e porosidade e absorção d'água mais baixos.

O corpo de prova TRI-05(2) foi o que apresentou o maior valor de porosidade e absorção d'água aparente, já o TRI-05(4) apresentou os menores valores.

Os valores da massa específica aparente seca, saturada e da densidade esquelética foram bastante aproximados em todos os corpos de prova.

As maiores diferenças entre os corpos de prova são observadas nas propriedades de porosidade (Φ_a) e de absorção d'água (α_a), conforme ilustra a Figura 5.34. Nota-se uma relação direta da porosidade com a absorção d'água.

Tabela 5.14 – Índices físicos dos corpos de prova retirados do bloco TRI-05 de travertino de Itaboraí.

Índices físicos					
Corpos de prova	Massa específica aparente seca (Mg/m^3)	Massa específica aparente saturada (Mg/m^3)	Densidade esquelética aparente (Mg/m^3)	Porosidade aparente (%)	Absorção d'água aparente (%)
TRI-05(1)	2,70	2,71	2,73	0,92	0,34
TRI-05(2)	2,69	2,70	2,72	1,14	0,42
TRI-05(3)	2,71	2,71	2,72	0,57	0,21
TRI-05(4)	2,72	2,72	2,72	0,12	0,04

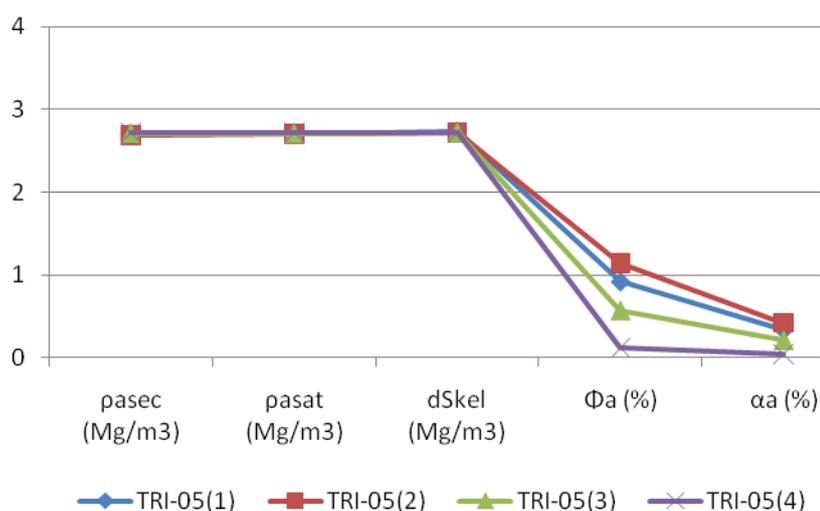


Figura 5.34 – Índices físicos dos corpos de prova retirados do bloco TRI-05 de travertino de Itaboraí. $p_{a_{sec}}$: massa específica aparente seca; $p_{a_{sat}}$: massa específica aparente saturada; d_{skel} : densidade esquelética; Φ_a : porosidade; α_a : absorção d'água.

A Tabela 5.15 mostra os valores dos índices físicos determinados nas amostras de travertino romano e turco. Observa-se que as amostras de travertino romano apresentam valores mais elevados de porosidade efetiva e absorção d'água que as amostras de travertinos turcos, e valores de massa

específica aparente seca e saturada inferiores. Os valores da densidade esquelética aparente foram similares para ambos os tipos de rochas.

Tabela 5.15 – Valores dos índices físicos encontrados nas amostras de travertino romano e turco.

Índices físicos					
Amostra	Massa específica aparente seca (Mg/m ³)	Massa específica aparente saturada (Mg/m ³)	Densidade esquelética aparente (Mg/m ³)	Porosidade Aparente (%)	Absorção d'água aparente (%)
R1	2,30	2,41	2,59	11,47	4,99
R2	2,38	2,46	2,60	8,56	3,60
R3	2,32	2,42	2,59	10,56	4,55
R4	2,38	2,46	2,59	8,08	3,40
R5	2,24	2,36	2,55	12,27	5,49
T1	2,46	2,52	2,62	6,05	2,46
T2	2,46	2,52	2,60	5,49	2,23
T3	2,48	2,53	2,61	5,09	2,06
T4	2,53	2,57	2,65	4,40	1,74

A Figura 5.35 mostra a variação dos índices físicos nas amostras de travertino romano e turco estudadas. As maiores variações observadas nas amostras foram em relação a porosidade e absorção d'água.

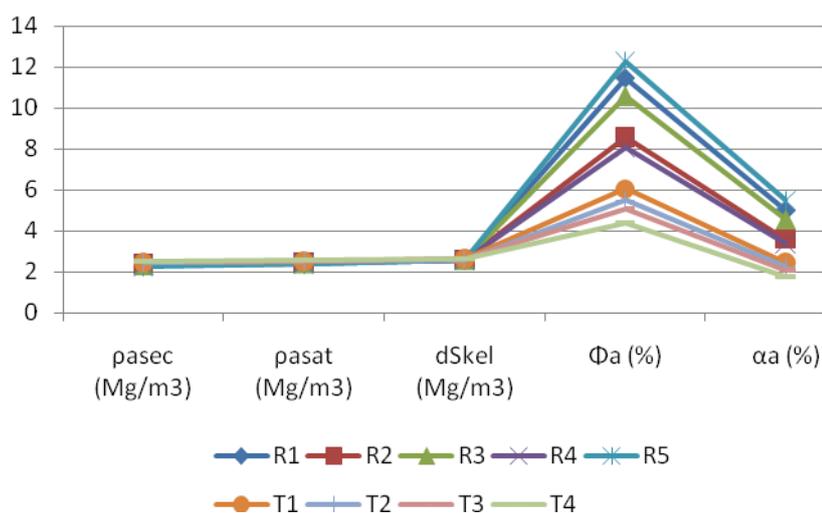


Figura 5.35 – Índices físicos das amostras de travertino romano e turco. pasec : massa específica aparente seca; paSat: massa específica aparente saturada; dSkel: densidade esquelética; Φa: porosidade; αa: absorção d'água.

5.4.3. Porosimetria por intrusão de mercúrio

Os ensaios de porosimetria de mercúrio foram realizados em duas campanhas. Na primeira campanha foram realizados 36 ensaios em amostras que permaneceram na estufa por 24 horas, a 65°C. Na segunda campanha, as amostras foram colocadas na estufa a 150°C, por um período de 24 horas, conforme recomenda a norma ASTM D 4404.

As amostras de travertino de Itaboraí selecionadas para a realização dos ensaios de porosimetria de mercúrio foram a TRI-03, TRI-04, TRI-05, TRI-09 e TRI-10. A Tabela 5.16 mostra os resultados dos ensaios nas amostras de Itaboraí a 65°C.

Tabela 5.16 – Resultados dos ensaios da primeira campanha realizado nas amostras de travertino de Itaboraí.

Travertinos Itaboraí						
Corpos de prova	Porosidade efetiva (%)	Densidade esquelética aparente (Mg/m ³)	Densidade Aparente Seca (Mg/m ³)	Área porosa total (m ²)	Diâmetro de poro mediano (µm)	Diâmetro de poro médio (µm)
TRI-03a	3,57	2,65	2,55	3,53E-03	1,10	14,26
TRI-03c	2,65	2,67	2,59	1,62E-02	0,16	13,98
TRI-03d	2,04	2,66	2,61	1,32E-03	0,58	13,05
TRI-03e	1,98	2,67	2,62	2,44E-04	1,10	18,07
TRI-03f	1,63	2,65	2,61	8,79E-05	2,67	30,01
TRI-03g	1,75	2,65	2,61	1,46E-04	2,65	25,12
TRI-03h	1,38	2,66	2,63	2,13E-04	1,73	26,43
TRI-03i	1,55	2,67	2,63	3,26E-05	2,73	22,88
TRI-04a	2,31	2,66	2,59	4,20E-04	1,40	17,82
TRI-04b	2,81	2,66	2,58	4,68E-04	1,39	14,08
TRI-05a	2,55	2,66	2,59	3,80E-03	0,72	14,46
TRI-05b	2,03	2,66	2,60	8,46E-03	0,37	14,80
TRI-05c	2,41	2,66	2,60	7,99E-03	0,30	10,91
TRI-09a	3,11	2,66	2,59	1,94E-04	5,21	21,38
TRI-09c	2,6	2,65	2,58	1,36E-03	3,28	26,92
TRI-09e	1,28	2,66	2,63	8,13E-04	1,11	15,92
TRI-09f	1,19	2,21	2,19	1,69E-03	0,90	14,32
TRI-09g	0,68	2,22	2,21	2,09E-05	7,57	32,48
TRI-10a	3,39	2,67	2,58	1,51E-04	14,91	22,24
TRI-10b	2,89	2,66	2,58	1,68E-04	4,15	17,64
TRI-10c	3,10	2,67	2,58	1,36E-04	9,61	17,43
TRI-10d	4,07	2,68	2,57	8,67E-05	12,00	24,71
TRI-10e	2,74	2,65	2,59	4,48E-04	2,66	15,30
TRI-10g	1,57	2,68	2,64	9,73E-05	12,02	23,83

O diâmetro mediano dos poros é entendido como sendo o valor no qual, metade dos diâmetros dos poros são maiores que ele. O diâmetro médio é calculado como a média volumétrica dos diâmetros de garganta de poros, isto é, a média dos diâmetros ponderada pelo volume invadido em cada diâmetro de garganta de poro (pressão). Segundo Schneider *et al*, (2003), a densidade esquelética aparente de uma partícula é a densidade do esqueleto estrutural em conjunto com os poros não conectados. Os poros não conectados ou isolados são aqueles que não podem ser alcançados pelo fluido de intrusão utilizado, seja a água, mercúrio ou hélio.

Analisando a Tabela 5.16 pode-se perceber que as amostras TRI-03 obtiveram valores de porosidade variando de 1,38 a 3,57%, com um valor médio de 2,07%. O diâmetro mediano dos poros variou entre 0,16 a 2,67 μm . Já o diâmetro médio dos poros variou entre 13,05 a 30,01 μm . O valor médio da densidade esquelética aparente é de 2,66 Mg/m^3 e da densidade aparente seca é de 2,61 Mg/m^3 .

Foram realizados apenas dois ensaios de porosimetria em corpos de prova retirados da amostra TRI-04. A porosidade média determinada foi de 2,56% e o diâmetro mediano dos poros foi de 1,40 μm . A densidade esquelética média foi de 2,66 Mg/m^3 e a densidade seca foi de 2,59 Mg/m^3 . O diâmetro médios dos poros variou de 14,08 a 17,82 μm .

Os valores da porosidade das amostras TRI-05 variaram de 2,03 a 2,55%, com um valor médio de 2,33%. O diâmetro mediano dos poros variou de 0,30 a 0,72 μm e o diâmetro médio variou de 10,91 a 14,80 μm . A densidade esquelética média foi de 2,66 Mg/m^3 e o valor médio da densidade seca foi de 2,60 Mg/m^3 .

As amostras TRI-09 obtiveram valores de porosidade variando entre 0,68 a 3,11%, com um valor médio de 1,77%. O diâmetro mediano dos poros variou entre 0,90 a 7,57 μm e o diâmetro médio dos poros variou entre 14,32 a 32,48 μm . O valor médio da densidade esquelética aparente é de 2,48 Mg/m^3 e a densidade aparente seca média é de 2,44 Mg/m^3 .

A porosidade total nas amostras TRI-10 variou entre 1,57 a 4,07%, apresentando um valor médio de 2,96%. O diâmetro mediano do tamanho dos poros variou entre 2,66 a 14,91 μm . Já os valores dos diâmetros médios variaram entre 15,30 a 24,71 μm . A densidade esquelética aparente média determinada foi de 2,67 Mg/m^3 e o valor médio da densidade seca foi de 2,59 Mg/m^3 .

A ordem das amostras mais porosas para as menos porosas são: TRI-10 > TRI-04 > TRI-05 > TRI-03 > TRI-09. Mesmo a amostra TRI-10 sendo a mais porosa, houve corpos de prova desta amostra que apresentaram valores de

porosidade mais baixo que a média. O mesmo ocorre com a amostra menos porosa, TRI-09, no qual houve corpo de prova que apresentou porosidade igual a 3,11%. Devido ao fato das rochas carbonáticas estudadas serem heterogêneas, há locais nestas amostras que são mais porosos e outros locais que são mais maciços. Como os corpos de prova utilizados nos ensaios possuem dimensões muito pequenas, de aproximadamente 1,5cm de altura e 0,5cm de largura, pois os penetrômetros utilizados apresentam volume reduzido (*i.e.*, 3cm³ e 5cm³), houve uma variação da porosidade determinada que dependeu do local da amostra onde o corpo de prova foi obtido (local mais poroso ou local mais maciço).

Em relação ao diâmetro mediano dos poros, a amostra TRI-10 apresentou os maiores valores e a amostra TRI-05 os menores valores. Verificou-se que embora a amostra TRI-09 tenha apresentando o menor valor de porosidade, ela possui valores elevados de diâmetro mediano dos poros.

Os valores médios da densidade esquelética aparente foram similares em todas as amostras analisadas. A exceção se deu com a amostra TRI-09 que apresentou um valor um pouco mais baixo.

A amostra TRI-09 foi a que apresentou os maiores valores dos diâmetros médios dos poros, seguido pelas amostras TRI-03, TRI-10, TRI-04 e TRI-05.

O gráfico de intrusão acumulativa *versus* diâmetro dos poros está representado na Figura 5.36. O gráfico mostra que a amostra TRI-05 é a que apresenta os menores valores do diâmetro mediano dos poros. Percebe-se ainda que a amostra TRI-10 apresenta valores bem superiores do diâmetro mediano dos poros. O comportamento da curva chega a ser mais côncavo que o das outras amostras. A amostra TRI-09 apresenta um dos diâmetros medianos dos poros mais elevados dentre as amostras coletadas para o presente estudo, mas não chegam a ser tão elevados quanto os da amostra TRI-10.

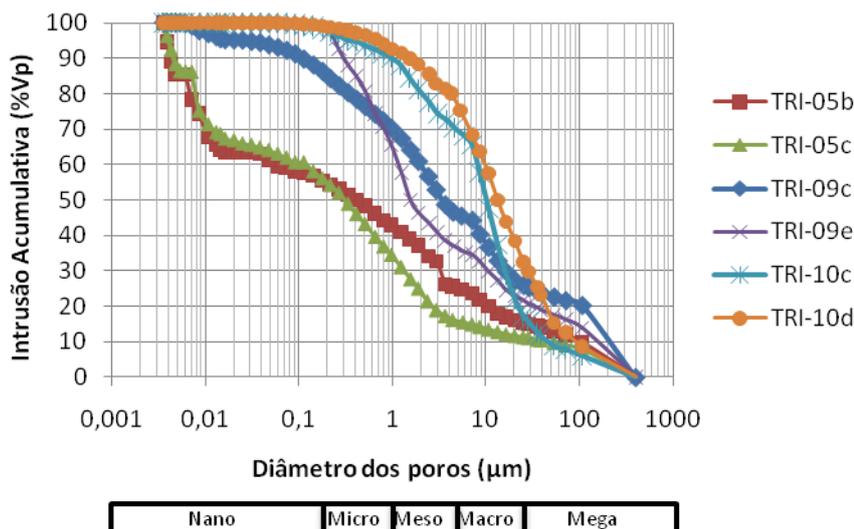


Figura 5.36 – Gráfico de intrusão acumulativa *versus* diâmetro dos poros dos corpos de prova de travertino de Itaboraí.

Abaixo de todos os gráficos realizados no ensaio de porosimetria de mercúrio foram colocados uma classificação de tamanho de poros utilizado por Beiravand (2003) com o objetivo de dar uma noção de ordem de grandeza. Esta classificação de tamanho de poros pode ser vista na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 – Classificação quanto ao tamanho dos poros proposto por Beiravand (2003).

Classificação quanto ao tamanho dos poros (Beiravand, 2003)	
Tamanho dos poros	Diâmetro dos poros (μm)
Nanoporos	< 0,2
Microporos	0,2 - 1,0
Mesoporos	1,0 – 4,0
Macroporos	4,0 – 20,0
Megaporos	> 20,0

A Figura 5.37 apresenta a distribuição incremental *versus* diâmetro dos poros das amostras de travertino fitado de Itaboraí. Verifica-se que este material possui uma distribuição multimodal de poros.

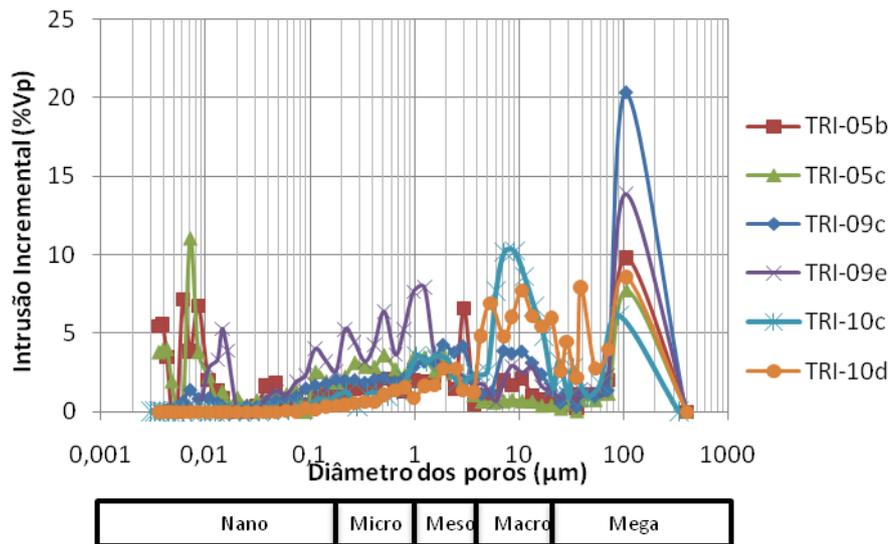


Figura 5.37 – Gráfico de intrusão incremental *versus* diâmetro dos poros dos corpos de prova de travertino de Itaboraí.

Observa-se na Figura 5.37 que nos corpos de prova TRI-10 há maiores intrusões de mercúrio nos maiores diâmetros de poros. Já nos corpos de prova TRI-05, as maiores intrusões ocorrem nos diâmetros de poros menores. Nota-se que nas amostras TRI-09, a intrusão de mercúrio ocorre praticamente de forma homogênea, com um grande pico de intrusão de mercúrio em torno do diâmetro de poros de 100 μ m. Em todas as amostras foram observados grandes picos de intrusão de mercúrio no intervalo de diâmetro dos poros de 60 a 300 μ m, aproximadamente. Estes valores podem ser atribuídos ao fato destas rochas apresentarem poros grandes. Adicionalmente, este comportamento ocorre devido a imperfeições dos corpos de provas, que são confundidos com poros e pela acomodação do mercúrio dentro da câmara.

A Figura 5.38 apresenta a distribuição dos tamanhos dos poros presentes nos corpos de prova da amostra TRI-05. Nota-se que a maioria dos poros são considerados nanoporos. Já a distribuição dos tamanhos de poros das amostras TRI-09, apresentada na Figura 5.39, é bem desordenada, havendo corpos de prova com a maior quantidade de poros sendo nano e outros corpos de prova com a maioria dos poros sendo mega ou macro. Mas os valores médios encontrados foram: 14,28% (Nano), 22,37% (Micro), 17,25% (Meso), 17,54 % (Macro) e 28,55 % (Mega). A Figura 5.40 mostra que a maioria dos poros encontrados nos corpos de prova retirados da amostra TRI-10 são considerados macroporos e megaporos.

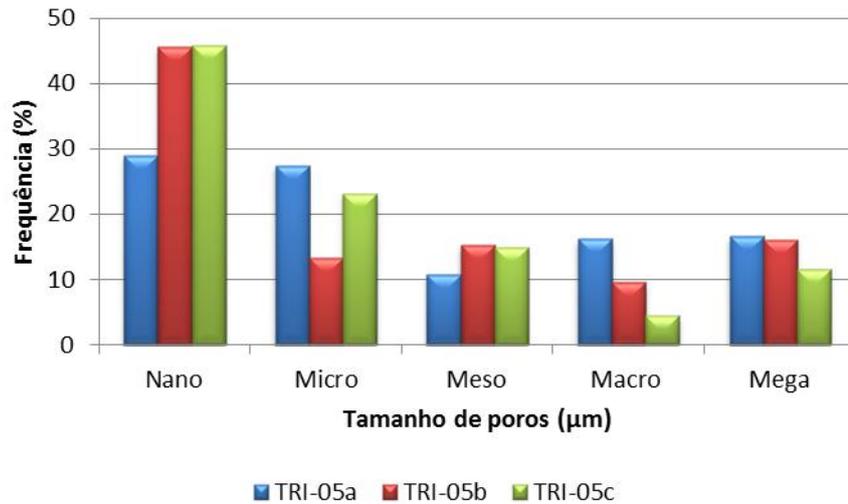


Figura 5.38 – Gráfico com a distribuição dos tamanhos de poros dos corpos de prova da amostra TRI-05.

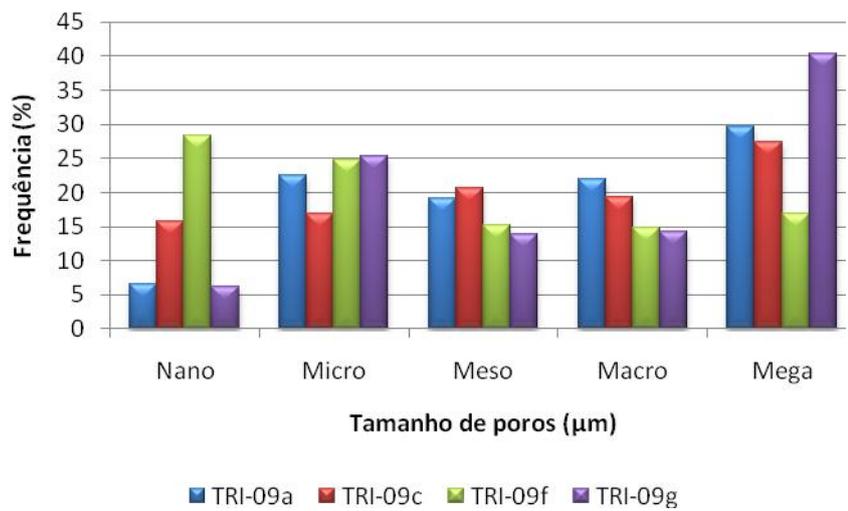


Figura 5.39 – Gráfico com a distribuição dos tamanhos de poros dos corpos de prova da amostra TRI-09.

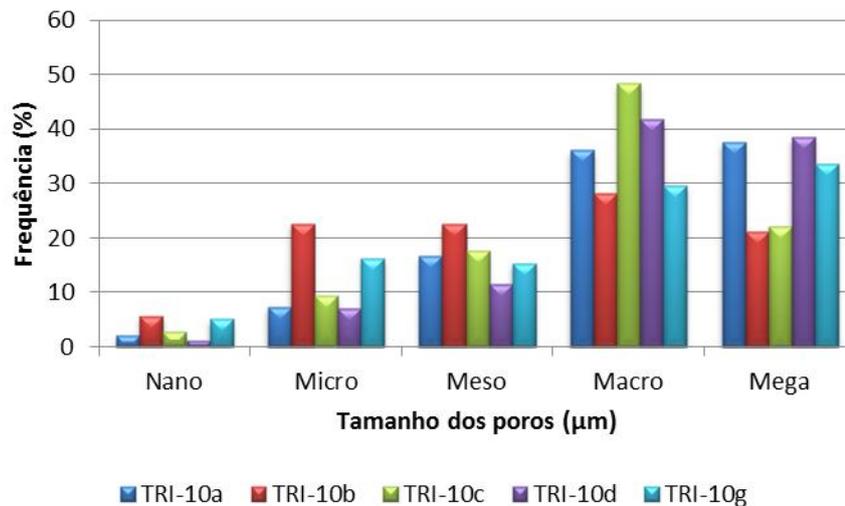


Figura 5.40 – Gráfico com a distribuição dos tamanhos de poros dos corpos de prova da amostra TRI-10.

A Tabela 5.18 apresenta os resultados da primeira campanha dos ensaios de porosimetria de mercúrio em corpos de prova de travertino romano. As placas selecionadas para a confecção dos corpos de prova foram a TRR-01 e a TRR-02. Observa-se na Tabela 5.18 que os corpos de prova confeccionados a partir da placa TRR-01 apresentam valores de porosidade mais elevados que o corpo de prova confeccionado a partir da placa TRR-02. Visualizando as duas placas a olho nu percebe-se que a placa TRR-01 é mais porosa que a placa TRR-02. Os corpos de prova da placa TRR-01 apresentam o diâmetro dos poros mediano e médio superiores aos da placa TRR-02. Os valores da densidade esquelética aparente variaram de 2,63 a 2,68 Mg/m³ e a densidade aparente seca variou entre 2,52 a 2,63 Mg/m³. O diâmetro mediano dos poros das placas TRR-01 e TRR-02 variaram entre 1,11 a 12µm conforme mostra a Figura 5.41.

Tabela 5.18 – Resultados dos ensaios de porosimetria da primeira campanha em corpos de prova de travertino de romano.

Travertinos romanos						
Corpos de prova	Porosidade efetiva (%)	Densidade esquelética aparente (Mg/m ³)	Densidade aparente seca (Mg/cm ³)	Área porosa total (m ²)	Diâmetro de poro mediano (µm)	Diâmetro de poro médio (µm)
TRR-01a	4,96	2,63	2,53	2,52E-03	2,65	34,31
TRR-01b	5,08	2,67	2,53	4,74E-03	7,83	38,27
TRR-01c	4,59	2,65	2,52	5,36E-03	3,27	29,04
TRR-01d	4,9	2,67	2,54	2,76E-03	9,61	34,99
TRR-01e	3,92	2,64	2,53	1,37E-03	12,00	36,17
TRR-02a	2,06	2,68	2,63	7,49E-04	1,11	17,71

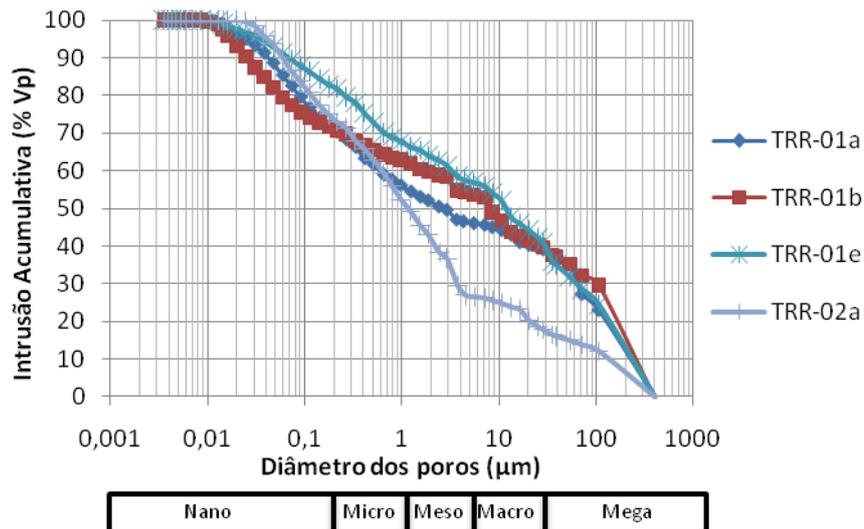


Figura 5.41 – Gráfico de intrusão acumulativa *versus* diâmetro dos poros dos corpos de prova retirados das placas TRR-01 e TRR-02.

A Figura 5.42 apresenta o gráfico da intrusão incremental de mercúrio *versus* diâmetro dos poros das amostras de travertinos romanos onde é observado uma distribuição multimodal dos poros.

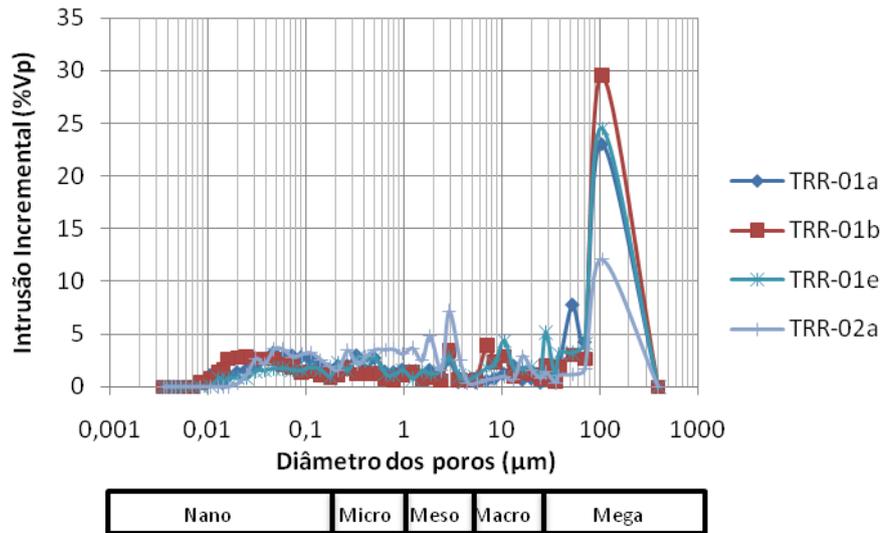


Figura 5.42 – Gráfico de intrusão incremental *versus* diâmetro dos poros dos corpos de prova retirados das placas TRR-01 e TRR-02.

A Figura 5.43 apresenta a distribuição dos tamanhos de poros dos corpos de prova de travertino romano. Verifica-se que a maioria dos poros dos corpos de prova da amostra TRR-01 são nano e megaporos. Já a amostra TRR-02 apresenta maior quantidade de nano, micro e mesoporos.

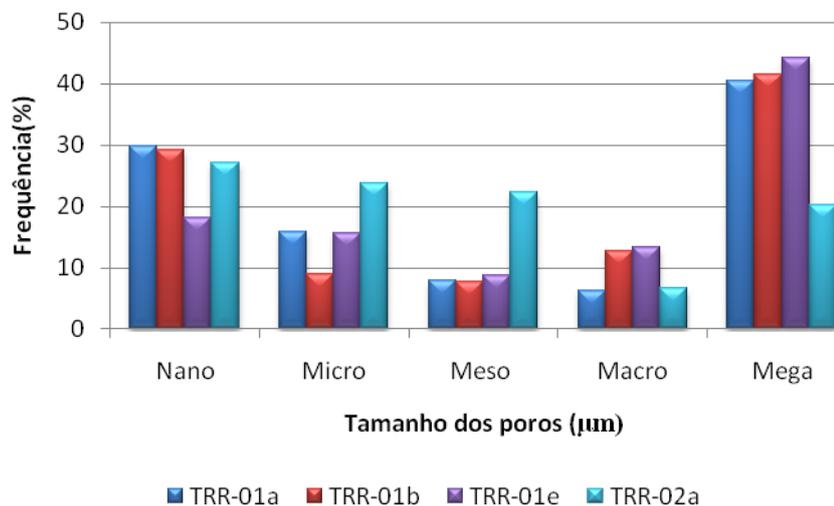


Figura 5.43 – Gráfico com a distribuição dos tamanhos de poros dos corpos de prova da amostra TRR-01 e TRR-02.

Era de se esperar que as amostras de travertino romano apresentassem valores de diâmetro de poros maiores, visto que as amostras a olho nu

apresentam poros de grandes dimensões. No entanto, como os penetrômetros utilizados na realização dos ensaios foram os de 3 e de 5cm³, os corpos de prova tiveram que ser confeccionados em pequenas dimensões, não havendo a representatividade dos poros de grandes dimensões. A fim de comprovar esta suposição, alguns corpos de prova, com dimensões maiores, foram enviados ao Laboratório de Petrofísica do Cenpes/Petrobras para a realização do ensaio de porosimetria de mercúrio com penetrômetros com 15cm³ de volume. Os resultados obtidos no Cenpes/Petrobras podem ser vistos na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 – Resultados de porosimetria de mercúrio realizados em corpos de prova de travertino romano no Cenpes.

Travertinos romanos						
Corpos de prova	Porosidade efetiva (%)	Densidade esquelética aparente (Mg/m ³)	Densidade aparente seca (Mg/m ³)	Área porosa total (m ²)	Diâmetro de poro mediano (µm)	Diâmetro de poro médio (µm)
TRR-01f	7,01	2,53	2,42	1,04E-02	22,61	49,67
TRR-01g	7,48	2,52	2,41	1,16E-02	20,25	49,73

Através dos resultados obtidos na Tabela 5.19, pode-se perceber um acréscimo na porosidade efetiva, na área porosa total, no diâmetro de poro mediano e no diâmetro de poro médio. Verificou-se ainda uma redução nos valores da densidade esquelética aparente e da densidade aparente seca, o que é compreensível devido a maior porosidade determinada. Os resultados realizados com o uso de penetrômetros de maior dimensão ressaltam a importância do fator escala na determinação das propriedades dos poros de amostras de rochas heterogêneas.

O comportamento multimodal dos três tipos de materiais rochosos estudados permite estabelecer que estes travertinos apresentam elementos com diferentes porosidades, sendo que os valores menores provavelmente estariam ligados ao cimento espático e os valores maiores estariam relacionados com os poros vulgares.

A Tabela 5.20 apresenta os resultados dos ensaios nas amostras de travertino turco realizados na primeira campanha. Foram utilizadas as placas TRT-01, TRT-02 e TRT-03 para a realização dos corpos de prova. Verificou-se que os valores da porosidade encontradas nos corpos de prova das três placas de travertino turco são bastante similares. Os valores do diâmetro mediano dos poros também são aproximados, com exceção da amostra TRT-02 que

apresentou um valor superior. A densidade esquelética aparente e a densidade aparente seca dos corpos de prova analisados não apresentaram grandes variações.

Tabela 5.20 – Resultados dos ensaios da primeira campanha nos corpos de prova de travertino de turco.

Travertinos turcos						
Corpos de prova	Porosidade efetiva (%)	Densidade esquelética aparente (Mg/m ³)	Densidade aparente seca (Mg/m ³)	Área porosa total (m ²)	Diâmetro de poro mediano (μm)	Diâmetro de poro médio (μm)
TRT-01a	2,50	2,66	2,60	5,21E-03	0,46	26,02
TRT-01b	2,81	2,66	2,59	1,09E-03	0,58	23,35
TRT-01c	3,07	2,67	2,59	2,43E-03	0,24	17,98
TRT-02a	2,77	2,64	2,57	5,31E-03	7,83	41,39
TRT-03a	2,82	2,66	2,59	4,68E-04	1,39	14,08

O diâmetro mediano dos poros das amostras de travertinos turcos, variam em torno de 1μm, com a amostra TRT-02a apresentando valor em torno de 10μm, e podem ser visualizados na Figura 5.44. Já a distribuição dos diâmetros dos poros pode ser vista na Figura 5.45, onde foi notada uma distribuição multimodal dos poros.

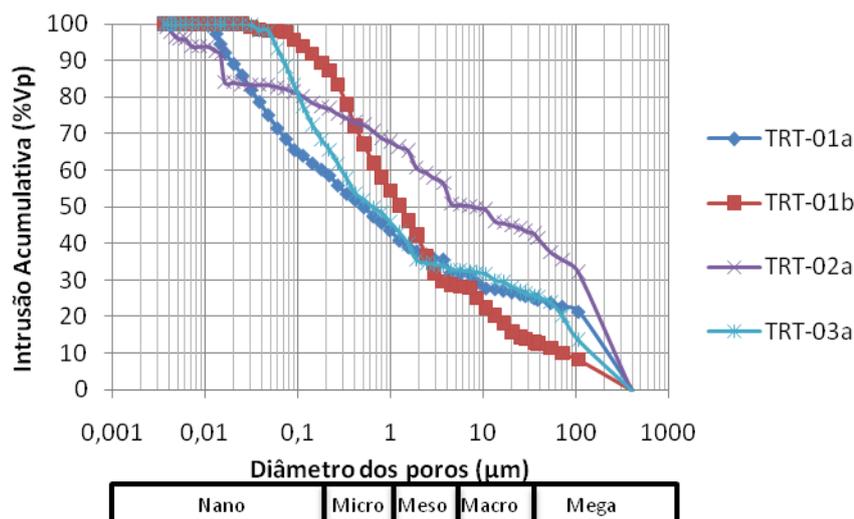


Figura 5.44 – Gráfico de intrusão acumulativa *versus* diâmetro dos poros dos corpos de prova retirados das placas TRR-01, TRT-02 e TRT-03.

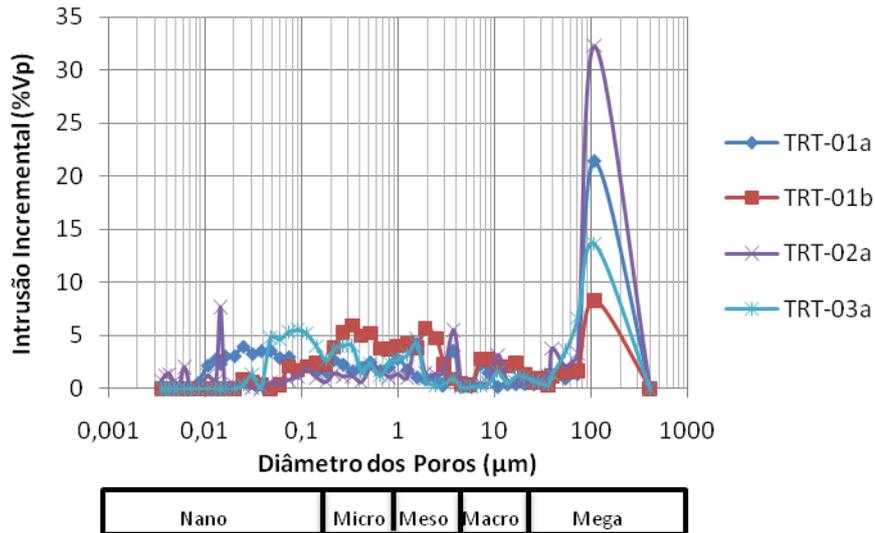


Figura 5.45 – Gráfico de intrusão incremental *versus* diâmetro dos poros dos corpos de prova retirados das placas TRT-01, TRT-02 e TRT-03.

Observa-se na Figura 5.46 que a maioria dos poros encontrados nos corpos de prova de travertinos turcos são considerados nanoporos e megaporos. Verifica-se ainda que a amostra TRR-02 apresenta uma maior quantidade de megaporos, se comparados com as demais amostras.

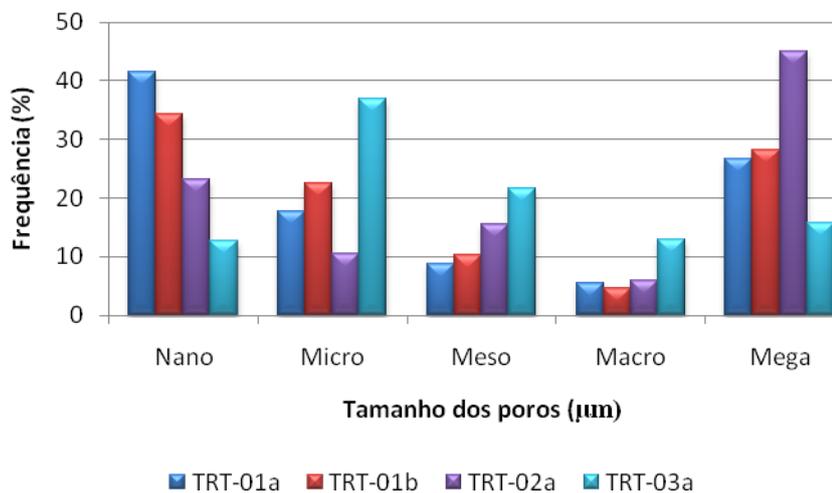


Figura 5.46 – Gráfico com a distribuição dos tamanhos de poros dos corpos de prova da amostra TRT-01, TRT-02 e TRT-03.

Observou-se nos travertinos turcos o mesmo comportamento verificado com os travertinos romanos: esperavam-se valores de diâmetro dos poros mais elevados. Da mesma forma, foram enviados ao Cenpes/Petrobras corpos de

prova com maiores dimensões para avaliar o efeito escala nas determinações de porosidade através do porosímetro de mercúrio. Os resultados dos ensaios nos corpos de prova de travertino turco realizados no Cenpes/Petrobras estão apresentados na Tabela 5.21.

Tabela 5.21 – Resultados de porosimetria de mercúrio realizados em corpos de prova de travertino turco no Cenpes/Petrobras.

Travertino turco						
Corpos de prova	Porosidade efetiva (%)	Densidade esquelética aparente (Mg/m ³)	Densidade aparente seca (Mg/m ³)	Área porosa total (m ²)	Diâmetro de poro mediano (µm)	Diâmetro de poro médio (µm)
TRT-01d	5,85	2,54	2,40	1,53E-03	29,68	44,35
TRT-01e	3,61	2,52	2,41	8,86E-03	18,15	48,41

O mesmo comportamento foi evidenciado quando da análise com as amostras de travertino turco (*i.e.*, menor densidade e maior porosidade). Este fato indica a importância da realização de um estudo para avaliar a influência da dimensão dos corpos de prova de travertinos no ensaio de porosimetria de mercúrio.

A Tabela 5.22 mostra os resultados de porosimetria de mercúrio em corpos de prova de travertino de Itaboraí, que foram submetidos à temperatura de 150°C em estufa.

Nota-se que os valores da porosidade obtidos nos corpos de prova a 150°C são um pouco mais elevados que os valores obtidos nos corpos de prova que foram colocados na estufa a uma temperatura de 65°C. Verifica-se que os valores da densidade esquelética e da densidade aparente seca foram mais baixos nos corpos de prova a 150°C, comprovando a indicação do ensaio de termogravimetria que previu uma perda de massa nos travertinos a temperaturas superiores a 70°C.

A Norma ASTM D 4404 recomenda que o ensaio seja conduzido a uma temperatura de 150°C desde que a rocha não possua argilominerais em sua composição. Especula-se que a perda de massa verificada no ensaio de termogravimetria que resultou na redução vista nos valores de densidade no ensaio de porosimetria de mercúrio esteja associada a perda de água. A fim de verificar esta hipótese foi realizado um estudo de distribuição de tamanho de poros nos corpos de prova. A Figura 5.47 apresenta o gráfico com a distribuição dos poros da amostra TRI-09.

Tabela 5.22 – Resultados da segunda campanha dos corpos de prova de travertino de Itaboraí.

Travertinos Itaboraí						
Amostra	Porosidade efetiva (%)	Densidade esquelética aparente (Mg/m ³)	Densidade aparente seca (Mg/m ³)	Área porosa total (m ²)	Diâmetro de poro mediano (µm)	Diâmetro de poro médio (µm)
TRI-03j	2,87	2,45	2,38	3,09E-03	0,58	10,56
TRI-03l	2,22	2,47	2,42	4,90E-03	0,46	28,32
TRI-03m	1,43	2,40	2,36	8,55E-04	2,18	42,80
TRI-09h	2,43	2,49	2,43	5,59E-03	0,58	11,69
TRI-09i	2,52	2,38	2,33	4,77E-03	0,37	7,00
TRI-09j	2,48	2,18	2,12	3,72E-03	0,89	15,78
TRI-10h	1,62	2,44	2,40	6,08E-04	3,33	30,24
TRI-10i	3,96	2,46	2,36	1,29E-03	7,83	23,57
TRI-10j	1,79	2,45	2,40	3,30E-03	1,71	28,15
TRI-10K	2,13	2,42	2,37	7,93E-04	9,61	33,66

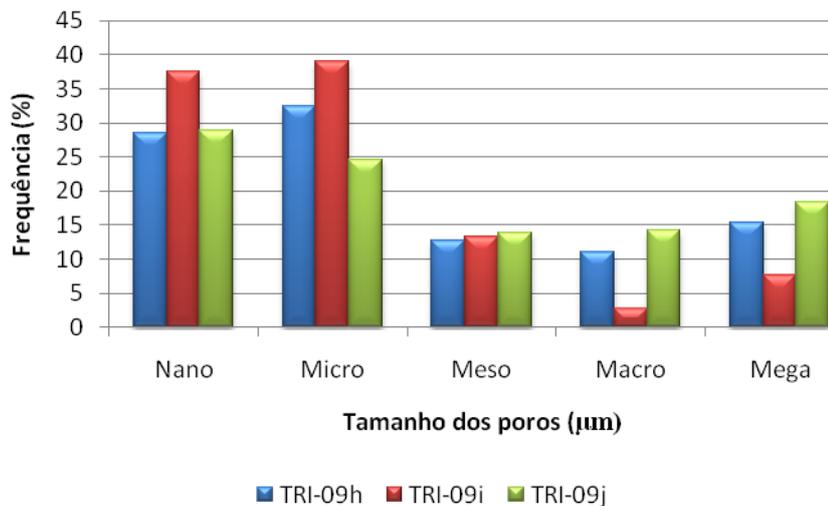


Figura 5.47 – Gráfico com a distribuição dos tamanhos de poros dos corpos de prova da amostra TRI-09 que foram levados à estufa com a temperatura de 150°C.

Ao se comparar a distribuição dos diâmetros dos poros presentes nos corpos de prova da amostra TRI-09 a 150°C com os corpos de prova da amostra TRI-09 a 65°C, verificou-se uma redução na quantidade de meso, macro e megaporos e um aumento na quantidade de nano e microporos. O mesmo comportamento foi evidenciado nos ensaios realizados com corpos de prova

obtidos a partir da amostra TRI-10. Novamente, constatou-se uma elevação nas quantidades de nanoporos e uma redução na quantidade de macroporos, como mostra a Figura 5.48.

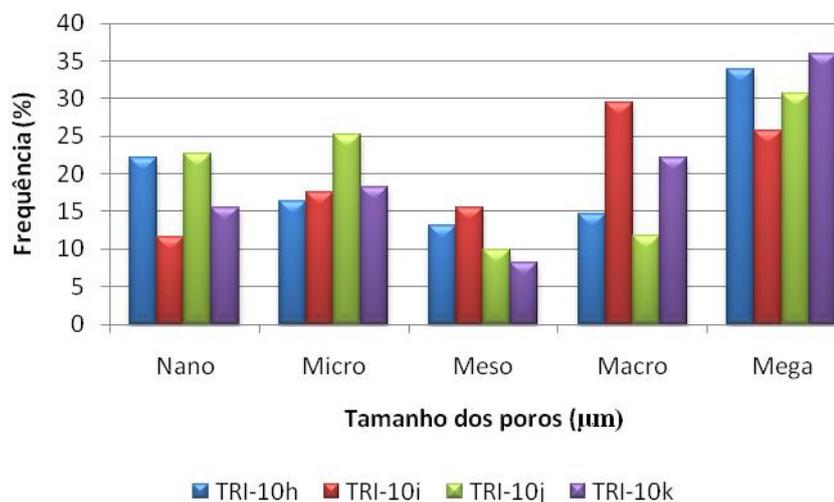


Figura 5.48 – Gráfico com a distribuição dos tamanhos de poros dos corpos de prova da amostra TRI-10 que foram levado à estufa com a temperatura de 150°C.

Especula-se que nos corpos de prova levados a estufa a uma temperatura de 150°C houve uma maior evaporação de água dos poros e, fruto disto, o mercúrio pode penetrar poros que antes estavam preenchidos por água. Por isso ocorreu um aumento na quantidade de nanoporos detectados.

A Tabela 5.23 mostra os resultados de porosimetria de mercúrio em corpos de prova de travertino romano, que foram submetidos à temperatura de 150°C em estufa.

Tabela 5.23 – Resultados da segunda campanha dos corpos de prova de travertino romano.

Travertinos Romanos						
Corpos de prova	Porosidade efetiva (%)	Densidade aparente (esqueletal) (Mg/m ³)	Densidade Aparente seca (Mg/m ³)	Área porosa total (m ²)	Diâmetro de poro mediano (µm)	Diâmetro de poro médio (µm)
TRR-01g	5,45	2,15	2,03	1,05E-02	2,18	33,32
TRR-01h	5,76	2,41	2,27	5,26E-03	46,17	52,48
TRR-01i	7,24	2,47	2,28	7,05E-04	254,47	79,23
TRR-01j	6,06	2,42	2,27	1,13E-02	46,18	51,95

Observa-se na Tabela 5.23 que os valores da porosidade e do diâmetro mediano e médio dos poros obtido nos corpos de prova que antes da realização do ensaio foram levados a estufa a uma temperatura de 150°C, são mais elevados que os resultados obtidos nos corpos de prova que foram levados a estufa à 65°C. Já a densidade esquelética aparente e a bulk encontrada nos corpos de prova levados a estufa a 150°C são bem menores que os valores encontrados nos corpos de prova à 65°C.

A Figura 5.49 mostra a distribuição dos diâmetros de poros presentes nas amostras de travertino romano que foram submetidas à temperatura de 150 °C na estufa. Nota-se em todos os corpos de prova uma maior quantidade de megaporos, e uma quantidade considerável de nanoporos, com exceção do corpo de prova TRR-01i. Comparando estes resultados com os obtidos nas amostras de travertino romano que ficaram na estufa a 65°C, observa-se uma maior quantidade de macroporos e uma menor quantidade de nano, micro e mesoporos.

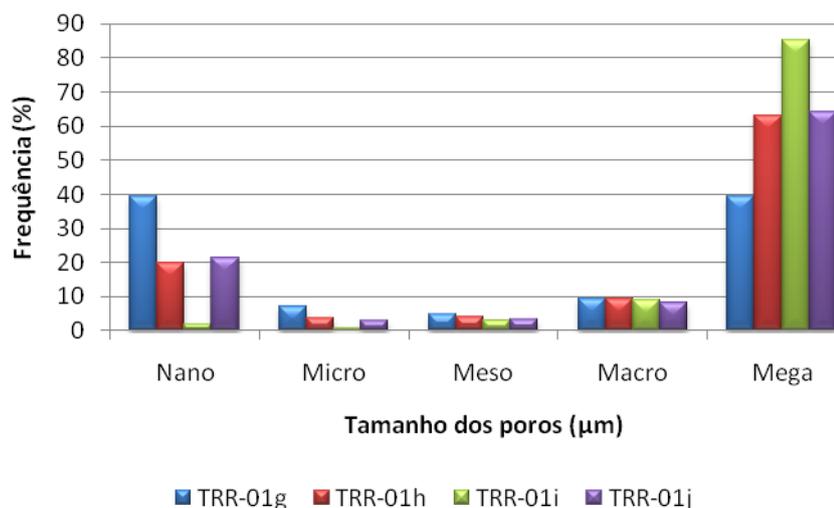


Figura 5.49 – Gráfico com a distribuição dos tamanhos de poros dos corpos de prova da amostra TRR-01 que foram levado à estufa com a temperatura de 150°C.

A Tabela 5.24 apresenta os resultados do ensaio de porosimetria de mercúrio nos corpos de prova de travertino turco.

Tabela 5.24 – Resultados da segunda campanha nos corpos de prova de travertino turco colocados na estufa à 150°C.

Travertinos Turcos						
Corpo de prova	Porosidade efetiva (%)	Densidade aparente (esqueletal) (Mg/m ³)	Densidade aparente seca (Mg/m ³)	Área porosa total (m ²)	Diâmetro de poro mediano (µm)	Diâmetro de poro médio (µm)
TRT-01g	2,99	2,4	2,33	4,58E-03	32,06	49,90
TRT-01h	3,16	2,43	2,35	1,06E-02	7,83	38,12
TRT-02a	4,08	2,46	2,36	4,90E-03	14,89	50,01
TRT-03a	5,28	2,43	2,31	1,71E-02	4,06	39,48

Observa-se na Tabela 5.24 que os valores da porosidade e do diâmetro mediano e médio dos poros obtido nos corpos de prova que antes da realização do ensaio foram levados a estufa a uma temperatura de 150°C, são mais elevados que os resultados obtidos nos corpos de prova que foram levados a estufa à 65°C. Sendo que, o valor do diâmetro mediano e do diâmetro médio dos poros são bem mais elevados. Já a densidade esqueletal aparente e a densidade seca encontrada nos corpos de prova levados a estufa a 150°C são bem menores que os valores encontrados nos corpos de prova à 65°C.

A Figura 5.50 mostra a distribuição dos diâmetros dos poros presentes nas amostras de travertino turco que foram submetidas à temperatura de 150°C na estufa. Nota-se em todos os corpos de prova uma maior quantidade de megaporos. Em alguns corpos de prova há uma grande quantidade de nanoporos. Comparando estes resultados com os obtidos nas amostras de travertino turco que ficaram na estufa a 65°C, observa-se uma maior quantidade de macroporos e uma menor quantidade de nano, micro e mesoporos.

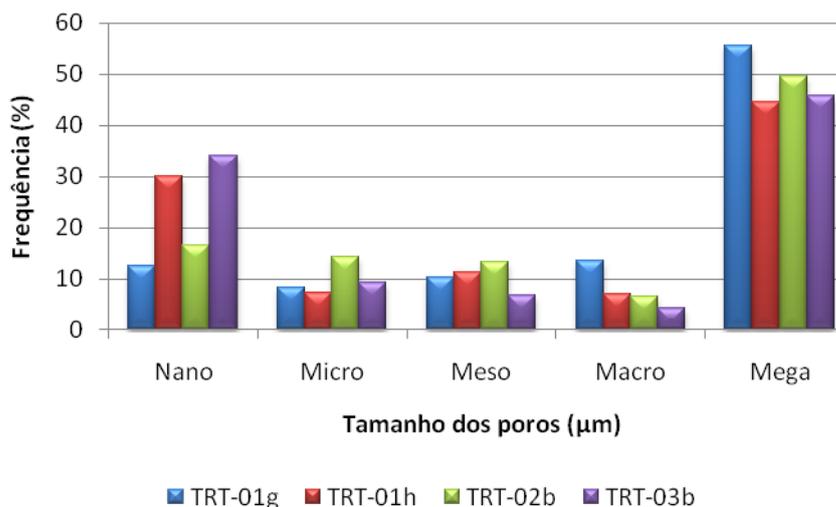


Figura 5.50 – Gráfico com a distribuição dos tamanhos dos poros dos corpos de prova da amostra TRT-01 que foram levado à estufa com a temperatura de 150°C.

5.4.4. Porosimetria a gás

Os ensaios de porosimetria a gás foram executados em amostras de travertinos de Itaboraí, romano e turco. As propriedades dos corpos de prova ensaiados encontram-se na Tabela 5.25. Já os resultados das determinações realizadas encontram-se na Tabela 5.26.

Tabela 5.25 – Valores das dimensões e volumes encontrados nos corpos de prova.

Massa e Geometria				
Corpo de prova	Diâmetro (cm)	Comprimento (cm)	Volume Total (cm ³)	Volume de Sólidos (cm ³)
TRI-06	2,47	2,27	10,91	9,33
TRR-01	2,55	2	10,23	9,18
TRT-01	2,53	1,99	10,04	9,06
TRI-09	2,45	2,09	9,84	8,8

Tabela 5.26 – Resultados dos parâmetros obtidos através do ensaio de porosimetria a gás.

Resultados						
Corpo de prova	Massa da Amostra (g)	Permeabilidade Aparente (mD)	Permeabilidade Absoluta (mD)	Porosidade Efetiva (%)	Massa Específica dos Grãos (Mg/m ³)	Volume Poroso (cm ³)
TRI-06	25,14	1,05	0,92	10,6	2,69	1,1
TRI-09	23,28	0,008	0,004	5,3	2,65	0,49
TRR-01	24,52	146	142	4,9	2,67	0,47
TRT-01	23,78	80,6	77,9	7,5	2,62	0,73

Verifica-se, de uma maneira geral, que os valores de porosidade encontrados são bem maiores que os valores encontrados pelo método de porosimetria de mercúrio. Este fato é provavelmente decorrente da maior facilidade de penetração nos poros dos corpos de prova pelo gás nitrogênio quando comparado com o mercúrio.

Observa-se na Tabela 5.26 que o corpo de prova TRI-06 foi o que apresentou o maior valor de porosidade efetiva dentre as amostras de travertino de Itaboraí, em concordância com os valores obtidos pelo uso das outras técnicas utilizadas. Embora esta amostra seja aparentemente mais porosa a olho nú, o ensaio realizado no corpo de prova determinou baixos valores de permeabilidade absoluta e aparente quando comparados com os valores obtidos para os travertinos turco e romano. Especula-se que os valores elevados de porosidade sejam em decorrência de seu grau de alteração (intemperismo), que pode ter aumentado a interconexão entre muitos de seus poros.

Em relação à amostra TRI-09, observou-se que o valor de porosidade obtido pela porosimetria a gás foi superior aos valores determinados pelas outras técnicas empregadas. Este alto valor pode estar associado a existência de um poro de grande dimensão na sua superfície lateral, conforme pode ser visto na Figura 5.51a. Embora esta amostra apresente um alto valor de porosidade, ela possui os menores valores de permeabilidade absoluta e aparente encontrados nos ensaios de permeabilidade.

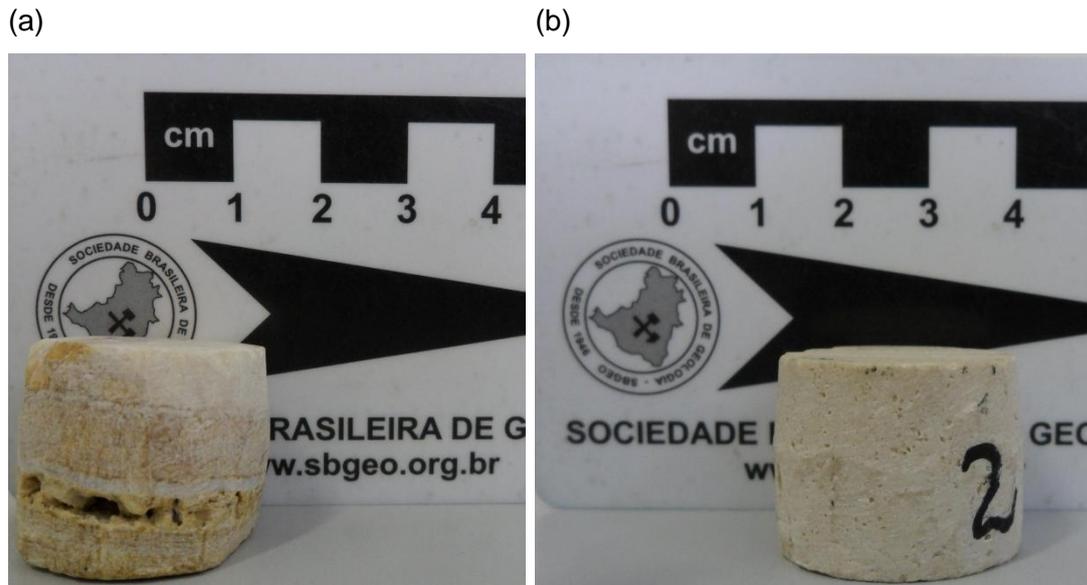


Figura 5.51 – Corpos de prova utilizados no ensaio de porosimetria a gás. (a) Corpo de prova TRI-09 com um poro grande na superfície. (b) corpo de prova TRR-01 com poucos poros.

Embora as amostras de Itaboraí tenham apresentado altos valores de porosidade efetiva, acredita-se que elas não tenham um alto valor de volume de poros, mas que os valores de porosidade determinados sejam decorrentes de fissuramento interno devido a processos intempéricos.

O corpo de prova de travertino romano apresentou um valor de porosidade mais baixo do que os valores determinados pelas outras técnicas. Verifica-se na Figura 5.51b que o corpo de prova selecionado para a realização do ensaio não é muito poroso, e por este motivo os resultados de porosidade não foram tão elevados como o esperado. Embora o valor de porosidade determinado para o corpo de prova de travertino romano não tenha sido tão alto, este foi o que apresentou os maiores valores de permeabilidade absoluta e aparente entre os demais, sugerindo a existência de uma grande quantidade de poros interconectados.

O corpo de prova de travertino turco apresentou 7,5% de porosidade efetiva e valores de permeabilidade aparente e absoluta inferiores aos determinados para o travertino romano, embora este último apresentasse um menor valor de porosidade. Este fato sugere que a permeabilidade não apresenta uma relação direta com a porosidade, mas sim com a forma em que os poros estão conectados no interior da massa rochosa.

5.4.5. Microtomografia

As amostras de travertinos foram ensaiadas pelo microtomógrafo Skyscan 1173, sendo utilizado um filtro de alumínio de 1 mm na saída do tubo de raios-X, para diminuir a intensidade das baixas energias do feixe. A Tabela 5.27 apresenta os principais parâmetros utilizados para a aquisição das imagens das amostras no microtomógrafo.

Tabela 5.27 – Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para as amostras analisadas.

Amostra	Tensão (kV)	Rotação total (°)	Passo angular (°)	Resolução Espacial (µm)	Tempo de exposição para cada projeção (ms)	"Frames"	Tempo total de aquisição
TRI-09	80	0 a 180	0,5	33,84	800	5	32 min e 37 seg
TRR-01	80	0 a 180	0,5	26,08	800	5	32 mim e 28 seg
TRT-01	80	0 a 180	0,5	26,08	800	5	32 mim e 35seg

Depois da aquisição das imagens no microtomógrafo foi realizada a reconstrução das imagens, onde foram utilizados filtros com a finalidade de atenuar o efeito de ruídos presentes, incluindo: *beam hardening* e *ring artifact*. A Figura 5.52 apresenta as imagens reconstruídas dos travertinos analisados. Observa-se que mesmo utilizando filtros para atenuar os artefatos, eles ainda continuam visíveis.

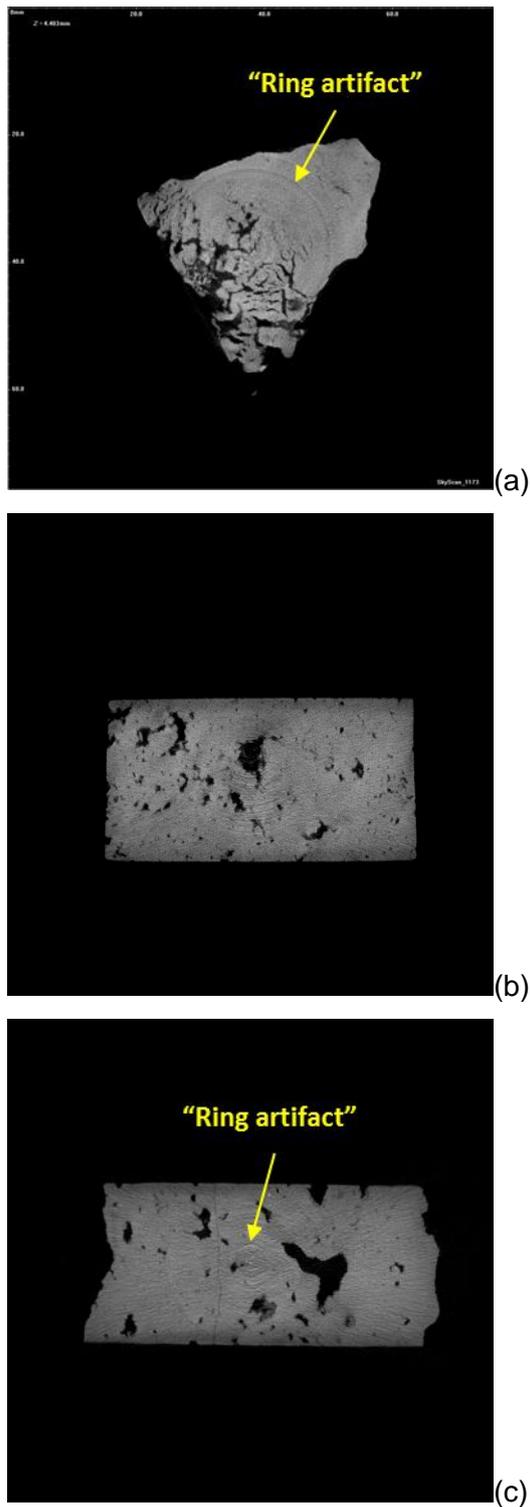


Figura 5.52 – Imagens reconstruídas no programa NRecon. (a) Travertino de Itaboraí. (b) Travertino romano. (c) travertino turco.

O efeito de *beam hardening*, ou endurecimento do feixe, é um ruído frequentemente encontrado em imagens tomográficas, que ocorre nas extremidades do material estudado tornando a sua imagem mais clara que na

região central. Este ruído resulta do fato de raios-X menos energéticos serem mais facilmente absorvidos que os mais energéticos. Já o *ring artifact*, ou artefato em anel, aparece como círculos parciais ou completos centrados no eixo de rotação. Segundo Fernandes (2009), eles são causados devido aos vários detectores contidos na câmara CCD não fornecerem sinais idênticos a um mesmo estímulo, resultando em valores anômalos de atenuação.

A partir das imagens reconstruídas, são realizadas as análises e processamento das imagens em 2-D e 3-D no programa CTan. Nesta dissertação foi criada uma metodologia para a criação e análise dos modelos 3-D das amostras de rocha, como mostra a Figura 5.53.

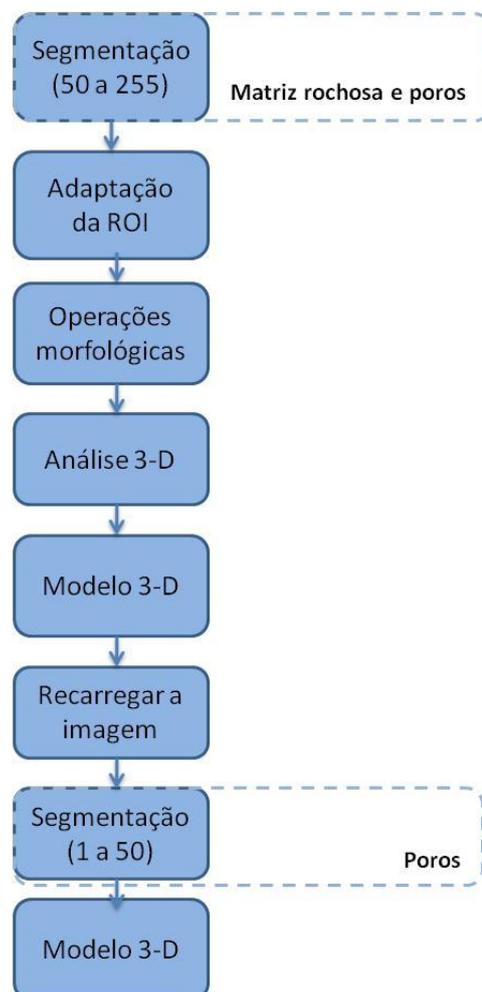


Figura 5.53 – Metodologia gerada para a análise de microtomografia.

A primeira etapa consiste no processo de segmentação da imagem, ou seja, a escolha do nível de cinza que caracterizará a fase sólida e a fase porosa

nas imagens. O intervalo de nível cinza escolhido foi de 50 a 255, onde a área branca representa a matriz rochosa e a área preta representa os poros, como mostra o exemplo ilustrado na Figura 5.54.

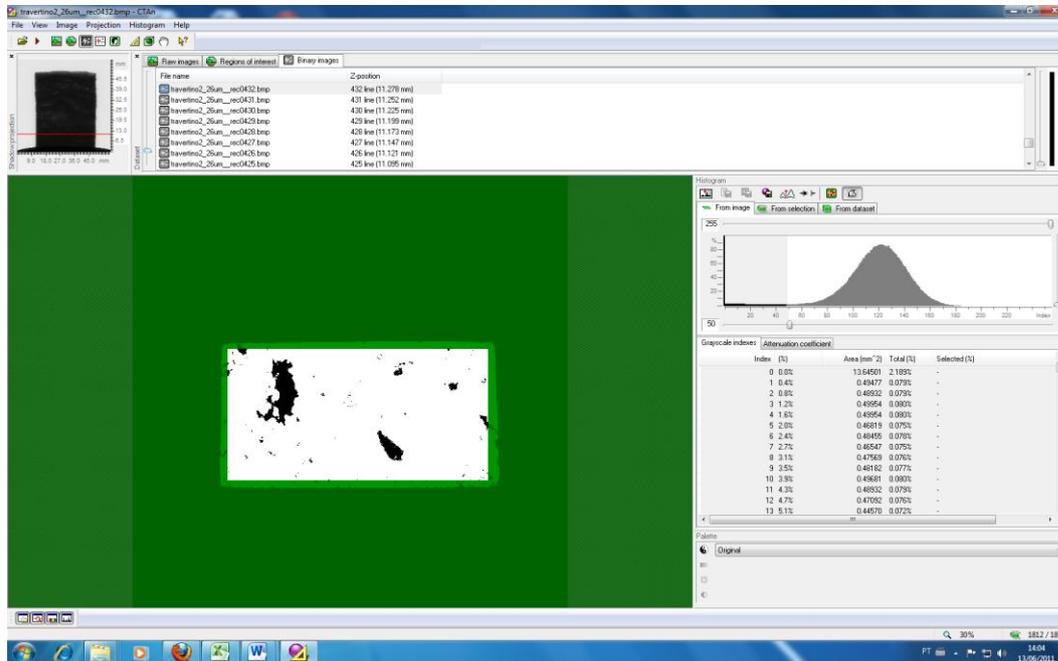


Figura 5.54 – Tela do programa CTan, onde pode ser visto o processo de segmentação das imagens da amostra de travertino romano.

Após esta primeira etapa, faz-se necessário a utilização de uma ferramenta para adaptar a região de interesse (ROI) nas seções 2-D da amostra, devido ao fato da amostra de travertino de Itaboraí não apresentar uma forma regular, o que dificulta na escolha de um ROI retangular ou quadrado. Como foi necessário realizar esta ferramenta na amostra de Itaboraí, também foi realizada nas amostras de travertino romano e turco.

Em todas as seções binarizadas (segmentadas) foi utilizada a ferramenta de abertura (operações morfológicas) dos poros, no qual foram realizados a união de poros seguido do processo de erosão, com a finalidade de eliminar os ruídos existentes nas imagens. A utilização desta ferramenta se julgou necessária, visto que as imagens binarizadas apresentaram muitos ruídos e que muitos poros não estavam completamente preenchidos.

Após esta fase foram realizadas análises 3-D das amostras, nas quais foram calculadas a porosidade total, aberta e fechada, onde os resultados podem ser visualizados na Tabela 5.28.

Tabela 5.28 – Resultados da análise da porosidade realizada nos modelos 3-D gerados a partir das imagens de microtomografia.

Amostra	Porosidade Total (%)	Porosidade aberta (%)	Porosidade fechada (%)
TRI-09	0,24	0,16	0,08
TRR-01	6,49	5,38	1,11
TRT-01	4,26	2,33	1,93

Observa-se na Tabela 5.28 que a porosidade total encontrada na amostra de travertino de Itaboraí é baixa, e que esta apresenta uma maior quantidade de poros conectados do que de poros não conectados. Já era de se esperar valores bem baixos de porosidade, pois a amostra TRI-09 é a que apresenta os menores valores de porosidade dentre as amostra de Itaboraí estudadas.

A amostra de travertino romano apresentou o valor de porosidade mais elevado, e apresentou mais poros conectados do que poros não conectados. Já a amostra de travertino turco apresentou um valor de porosidade um pouco menor que o do travertino romano, mas apresentou praticamente a mesma proporção de poros conectados e poros não conectados.

Também foram realizadas análises 3-D da distribuição dos diâmetros dos poros presentes nas amostras estudadas. Os resultados estão apresentados nas Figuras 5.55 a 5.58.

As Figuras 5.55 e 5.56 mostram a distribuição dos diâmetros dos poros presentes na amostra de travertino de Itaboraí. Na Figura 5.55 o histograma foi dividido em 4 classes com espaçamento de 250 μ m. Nota-se que este histograma apresenta uma distribuição exponencial com uma concentração de diâmetros de poros no intervalo de 0 a 250 μ m.

Como 71,31 % dos diâmetros dos poros encontravam-se no intervalo de 0 a 250 μ m, fez-se necessária a construção de outro histograma com espaçamento entre classes de 50 μ m. Este histograma está apresentado na Figura 5.56. Nota-se que há uma concentração de diâmetro de poros no intervalo de 50 a 200 μ m. O maior diâmetro de poro encontrado na amostra de Itaboraí foi de 2501,554 μ m e o menor diâmetro encontrado foi de 38,88 μ m. Vale ressaltar que a resolução espacial da amostra de Itaboraí foi de 33,84 μ m, o que impediu a detecção de poros com diâmetros inferiores a este no microtomógrafo.

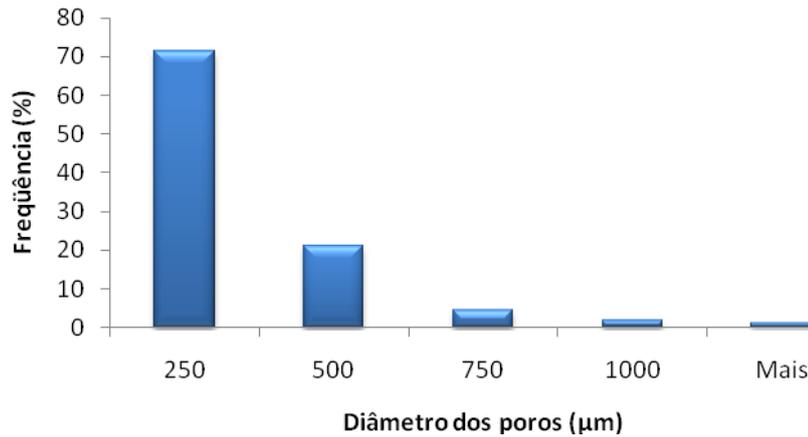


Figura 5.55 – Histograma com a distribuição do diâmetro dos poros na amostra TRI-09 (travertino de Itaboraí), apresentando classes com espaçamento de 250µm.

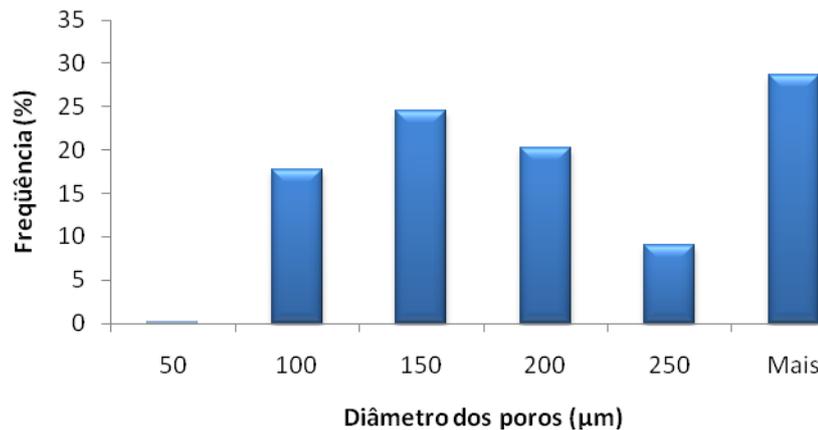


Figura 5.56 – Histograma com a distribuição do diâmetro dos poros na amostra TRI-09 (travertino de Itaboraí), apresentando classes com espaçamento de 50µm.

A Figura 5.57 apresenta a distribuição dos diâmetros dos poros na amostra de travertino romano. Observa-se que o histograma apresenta uma distribuição exponencial, com uma diminuição da frequência com o aumento do diâmetro dos poros. Há uma concentração (56,06%) de poros com diâmetros variando de 0 a 50µm. O maior diâmetro de poro encontrado na amostra foi de 11361,84µm e o valor mínimo foi de 26,96µm. A resolução espacial da amostra de travertino romano foi de 26,08µm.

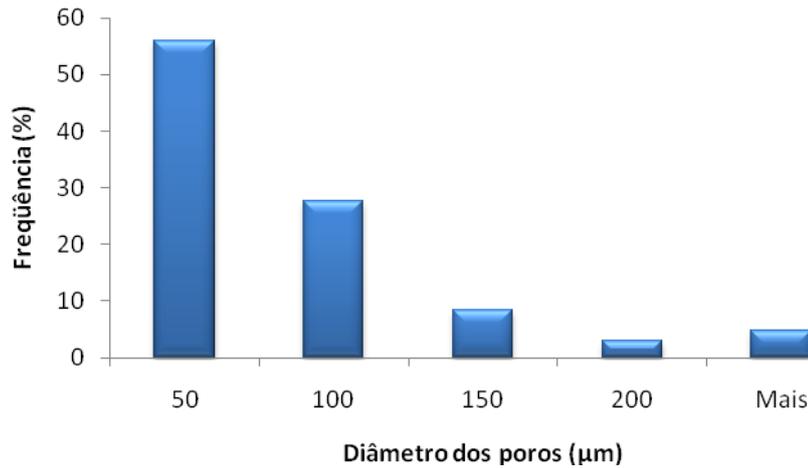


Figura 5.57 – Histograma com a distribuição do diâmetro dos poros na amostra TRR-01 (travertino romano).

O histograma com a distribuição dos diâmetros dos poros na amostra TRT-01 pode ser visualizado na Figura 5.58. Observa-se grande semelhança entre os histogramas do travertino turco e romano.

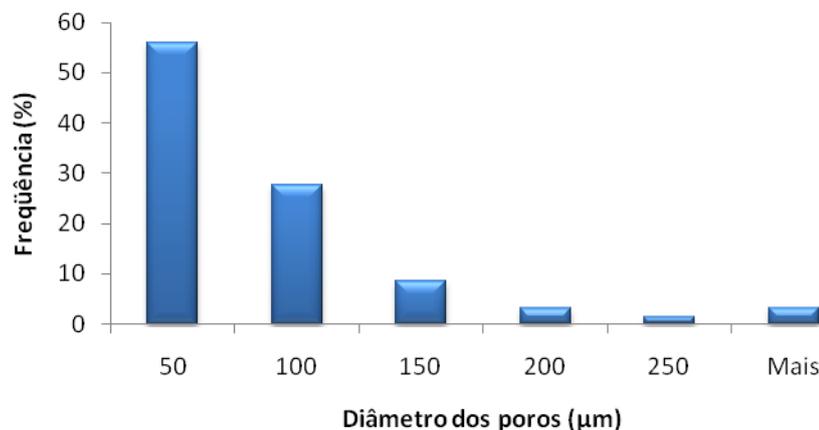


Figura 5.58 – Histograma com a distribuição do diâmetro dos poros na amostra TRT-01 (travertino turco).

Nota-se na Figura 5.58 que o histograma apresenta uma distribuição exponencial, com maior concentração de poros com diâmetros de 0 a 50 μm . O maior diâmetro encontrado foi de 9589,62 μm e o menor diâmetro foi de 26,96 μm . A resolução espacial da amostra de travertino turco foi a mesma da amostra de travertino romano, ou seja, é igual a 26,08 μm .

Além das análises 3-D, foram realizadas análises da porosidade ao longo das seções 2-D, que estão mostradas nas Figuras 5.59, 5.60 e 5.61. Observa-se na Figura 5.59 a distribuição da porosidade ao longo das seções 2-D. Pelo gráfico verifica-se que há uma região da amostra que é mais porosa (valores mais altos de porosidade), mas no restante a amostra apresenta baixa porosidade. Ao observar a amostra de mão realmente nota-se que há uma região com uma concentração de poros (vazios). O valor médio da porosidade 2-D encontrada foi de 0,29 %. Valor bem próximo do encontrado na análise 3-D (vide Tabela 5.28).

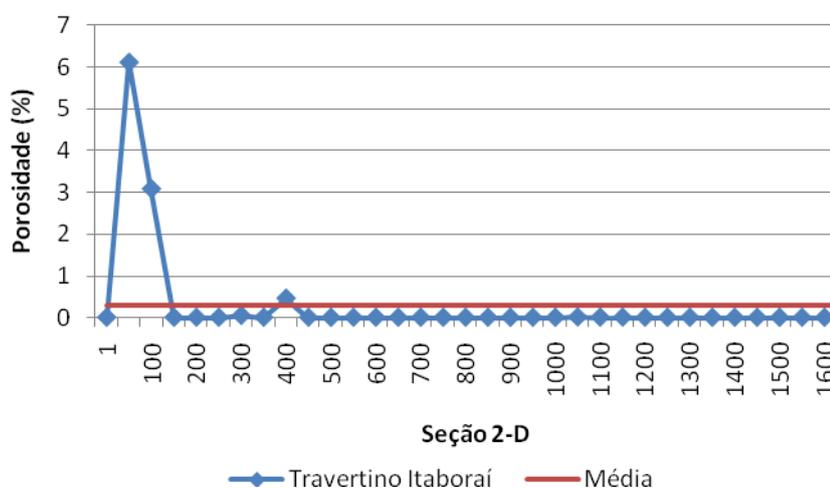


Figura 5.59 – Perfil de porosidade das 1650 seções 2-D da amostra de travertino de Itaboraí.

A Figura 5.60 mostra a distribuição da porosidade ao longo das seções 2-D da amostra de travertino romano. Nota-se que o gráfico apresenta uma distribuição da porosidade com variação de 2 a 12%, sendo que as seções iniciais apresentam os menores valores da porosidade. A porosidade média 2-D encontrada foi de 7,04%. Valor bem próximo do encontrado na análise 3-D (vide Tabela 5.28).

Já a distribuição da porosidade ao longo das seções 2-D da amostra de travertino turco é bastante homogênea, com poucas áreas onde há uma diminuição considerável da porosidade, como mostra a Figura 5.61. A porosidade média 2-D encontrada foi de 4,00%. Valor bem próximo do encontrado na análise 3-D (vide Tabela 5.28).

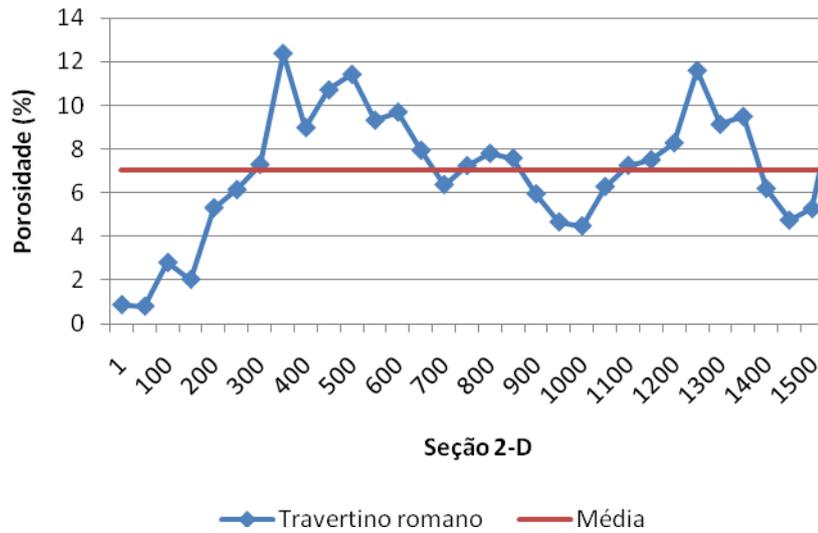


Figura 5.60 – Perfil de porosidade das 1550 seções 2-D da amostra de travertino romano.

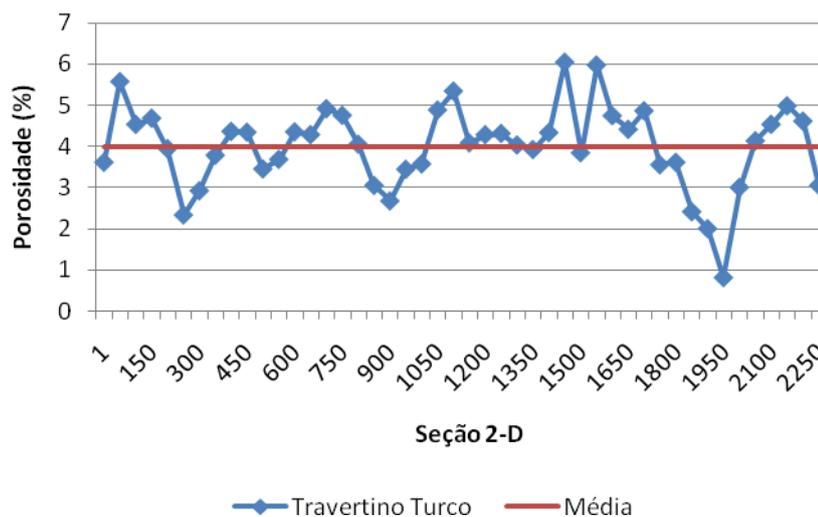


Figura 5.61 – Perfil de porosidade das 2300 seções 2-D da amostra de travertino turco.

Após a realização das análises 2-D e 3-D das imagens, foi realizada a etapa de geração do modelo 3-D. Os resultados estão ilustrados na Figura 5.62, que mostra lado a lado os modelos 3-D gerados das respectivas amostras microtomografadas e as fotografias das amostras. Observa-se nesta figura uma grande semelhança entre os modelos gerados e a imagem da amostra real.

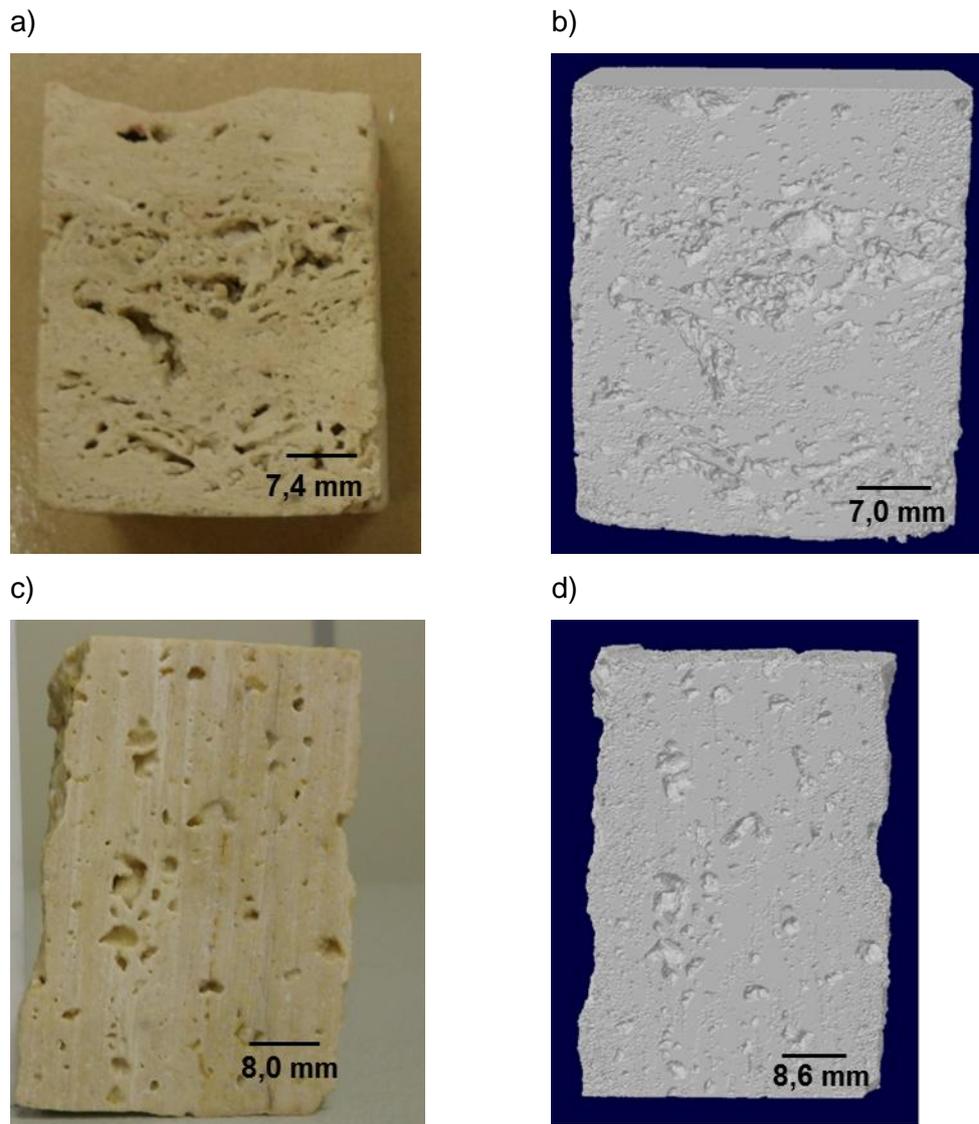


Figura 5.62 – Amostras utilizadas no ensaio de microtomografia e os seus respectivos modelos gerados a partir do processamento das imagens: (a) Amostra de travertino romano, (b) Imagem 3-D da amostra de travertino romano, (c) Amostra de travertino turco e (d) Imagem 3-D da amostra de travertino turco.

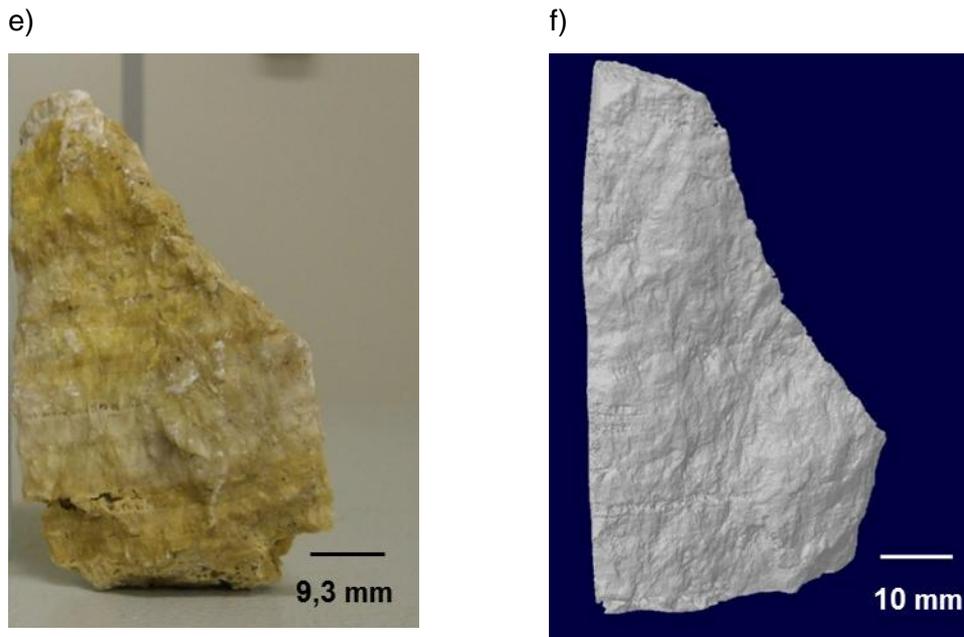


Figura 5.62 (cont.) – Amostras utilizadas no ensaio de microtomografia e os seus respectivos modelos gerados a partir do processamento das imagens: (e) Amostra de travertino de Itaboraí, e (f) Imagem 3-D da amostra de travertino de Itaboraí.

Após a geração do modelo 3-D da matriz rochosa com poros, foi utilizado no programa CTan a ferramenta *reload*, para recarregar a imagem 2-D que sofreu todo este processamento. Após o recarregamento da imagem, foi realizada uma nova segmentação, só que agora o objetivo é criar um modelo 3-D apenas dos poros, empregando um intervalo de nível cinza de 1 a 50. Depois desta segmentação foi criado o modelo 3-D dos poros.

Em síntese, foram criados dois modelos 3-D das imagens, um que representa a matriz rochosa com poros e outro que representa os poros. Estes dois modelos são abertos no programa CTvol, onde é possível a visualização dos modelos conforme ilustra a Figura 5.63.

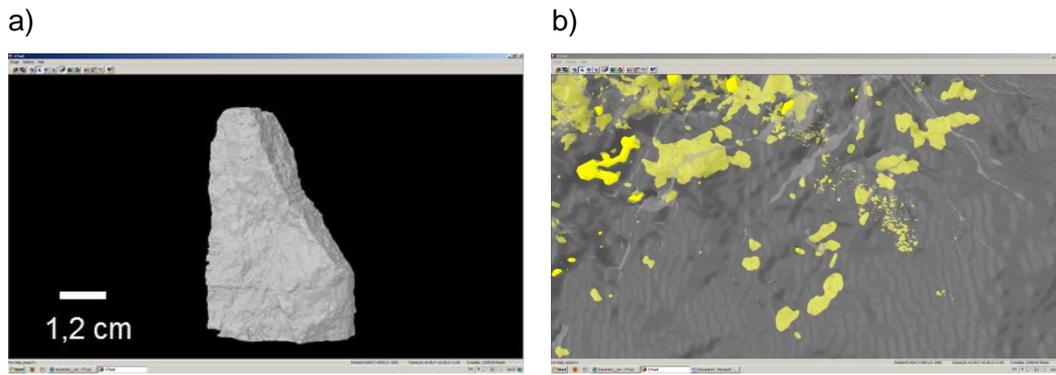


Figura 5.63 – Tela de visualização do programa CTvol; (a) Amostra de travertino de Itaboraí. (b) a mesma imagem porém agora “entrando” na amostra. Os poros estão representados pela cor amarela e a matriz rochosa pela cor cinza.

A imagem 3-D reconstruída da amostra de travertino de Itaboraí pode ser vista na Figura 5.64. A cor cinza representa a matriz rochosa e a cor azul representa os poros. Nota-se na Figura 5.64 que há poucos poros, e que estes estão concentrados em determinadas áreas da rocha, principalmente nas áreas onde ocorrem laminações. Na Figura 5.65 foi realizado um corte no modelo 3-D do travertino de Itaboraí a fim de melhorar a visualização dos poros.

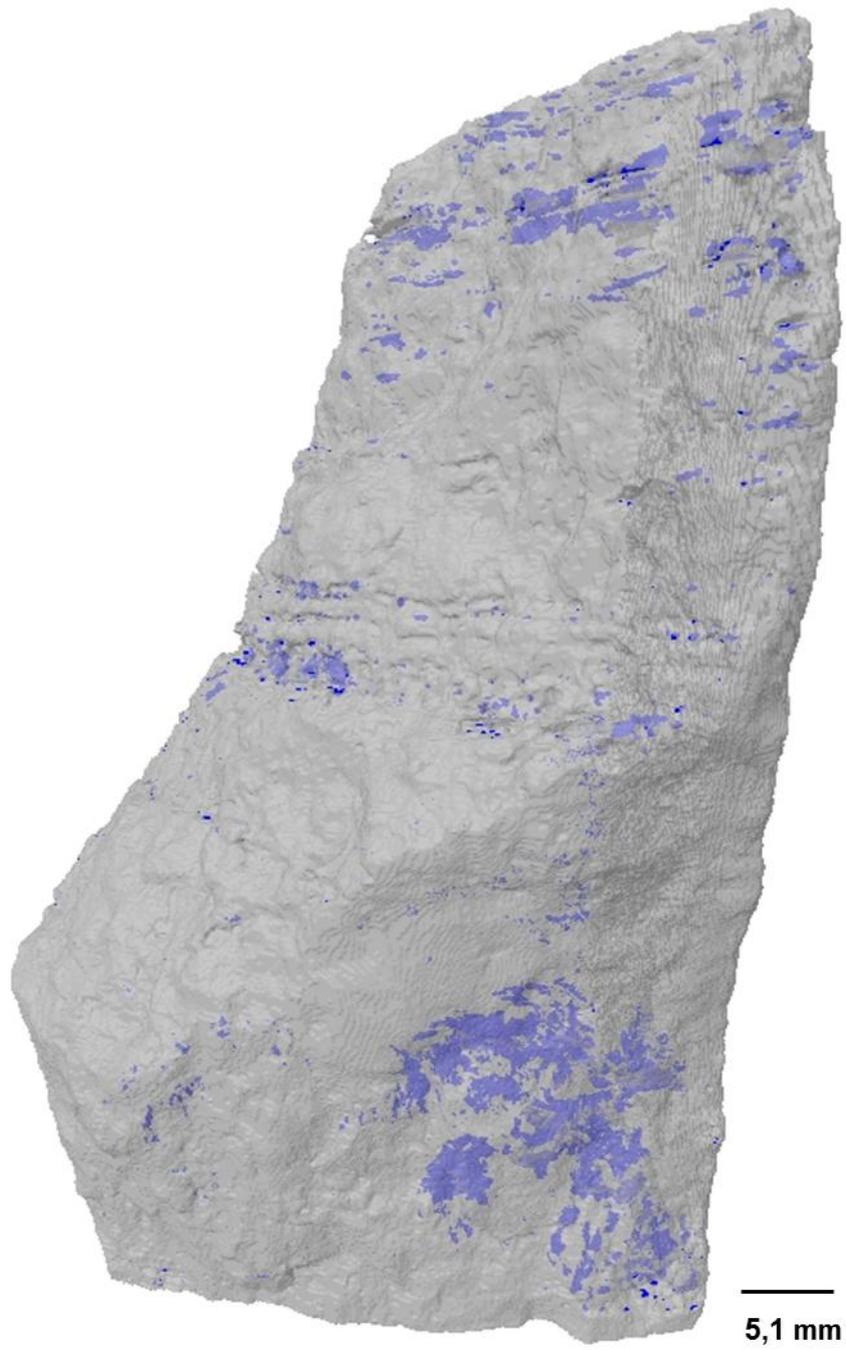


Figura 5.64 – Imagem 3-D reconstruída da amostra TRI-09 (travertino de Itaboraí).

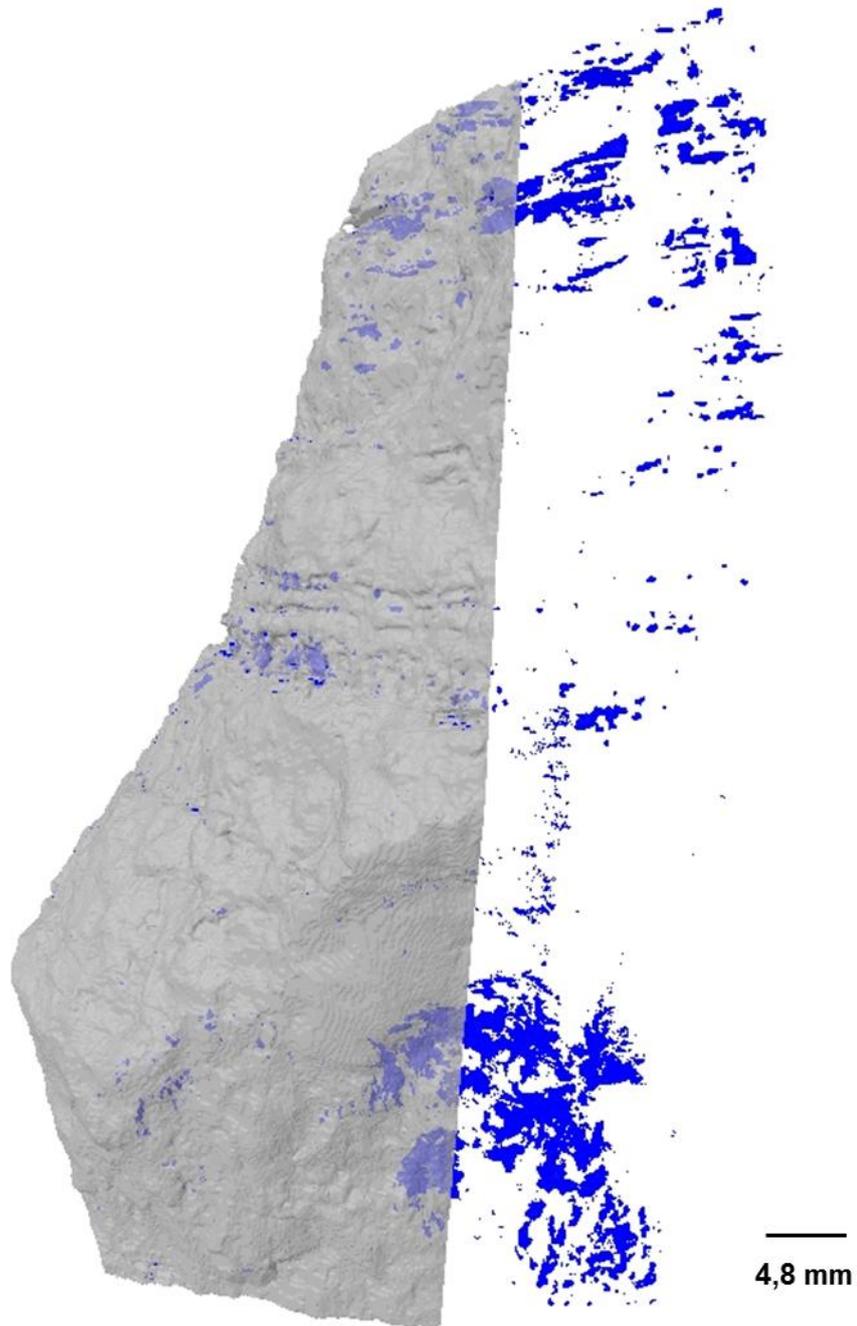


Figura 5.65 – Corte da imagem 3-D reconstruída da amostra TRI-09 (travertino de Itaboraí).

A Figura 5.66 mostra a imagem 3-D reconstruída da amostra de travertino romano. Observa-se que a amostra apresenta uma complexa rede de poros conectados. Com o objetivo de uma melhor visualização dos poros, foi realizado um corte na imagem 3-D da amostra de travertino romano. O resultado pode ser visto na Figura 5.67.

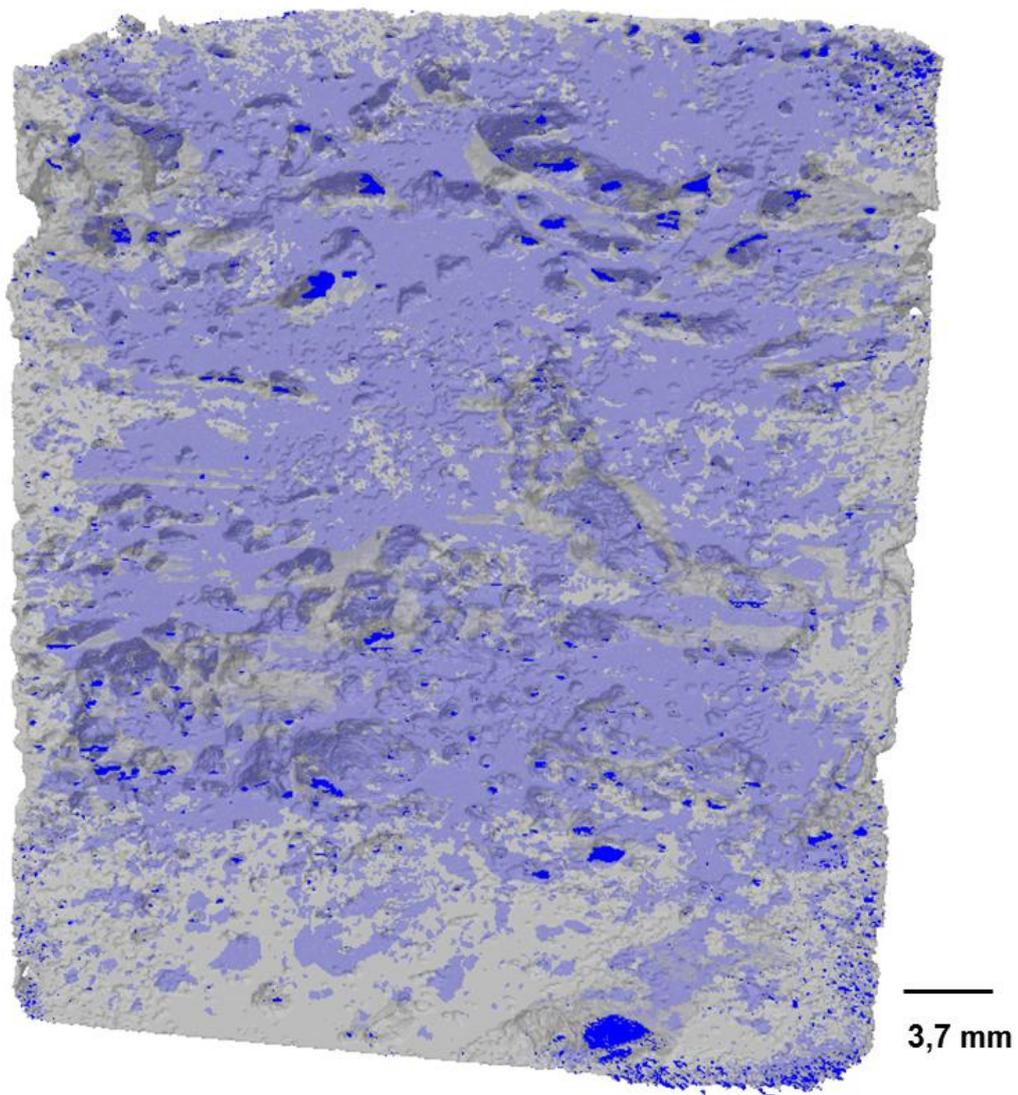


Figura 5.66 – Imagem 3-D reconstruída da amostra TRR-01 (travertino romano).

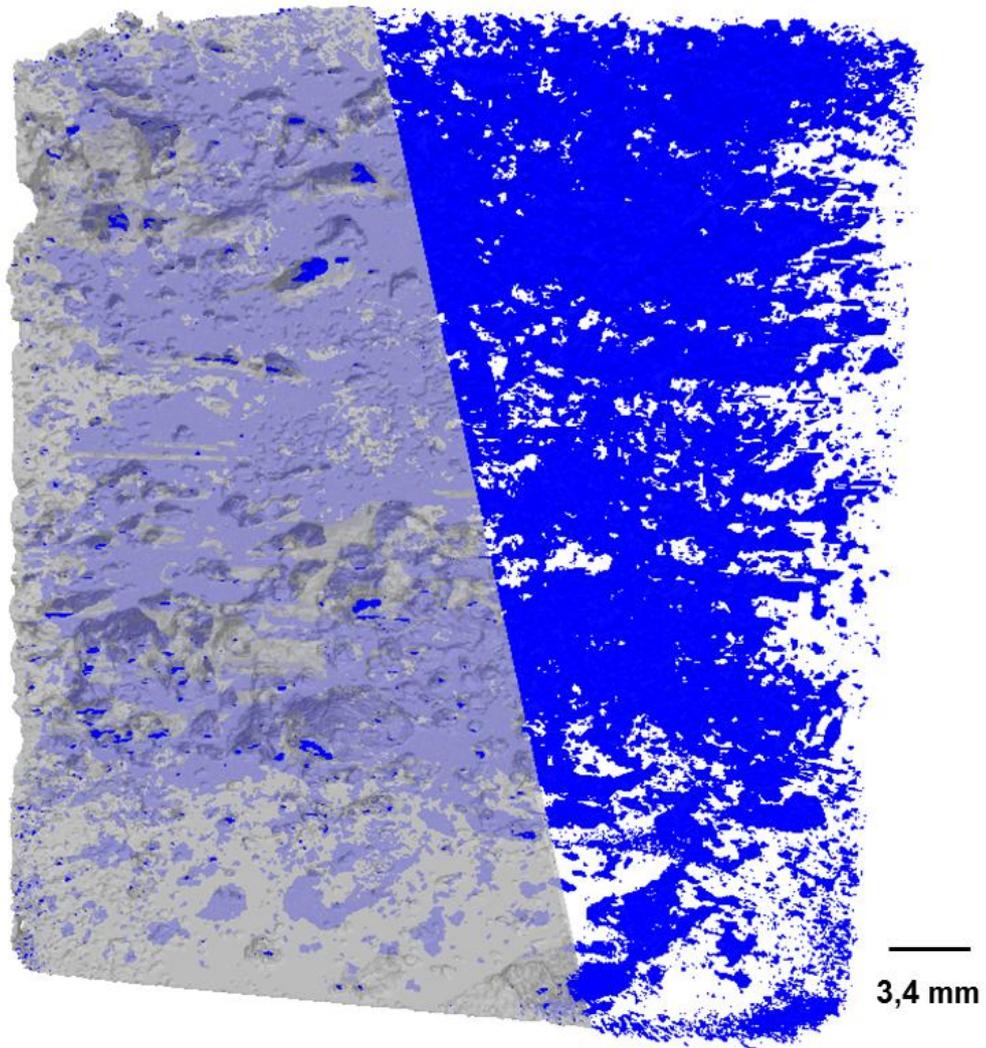


Figura 5.67 – Corte da imagem 3-D reconstruída da amostra TRR-01 (travertino romano).

A imagem 3-D reconstruída da amostra de travertino turco pode ser vista na Figura 5.68. Observa-se nesta imagem uma rede de poros complexa, com poros interconectados e poros não conectados. Na Figura 5.69, os poros podem ser melhores visualizados, devido ao corte realizado na rocha.

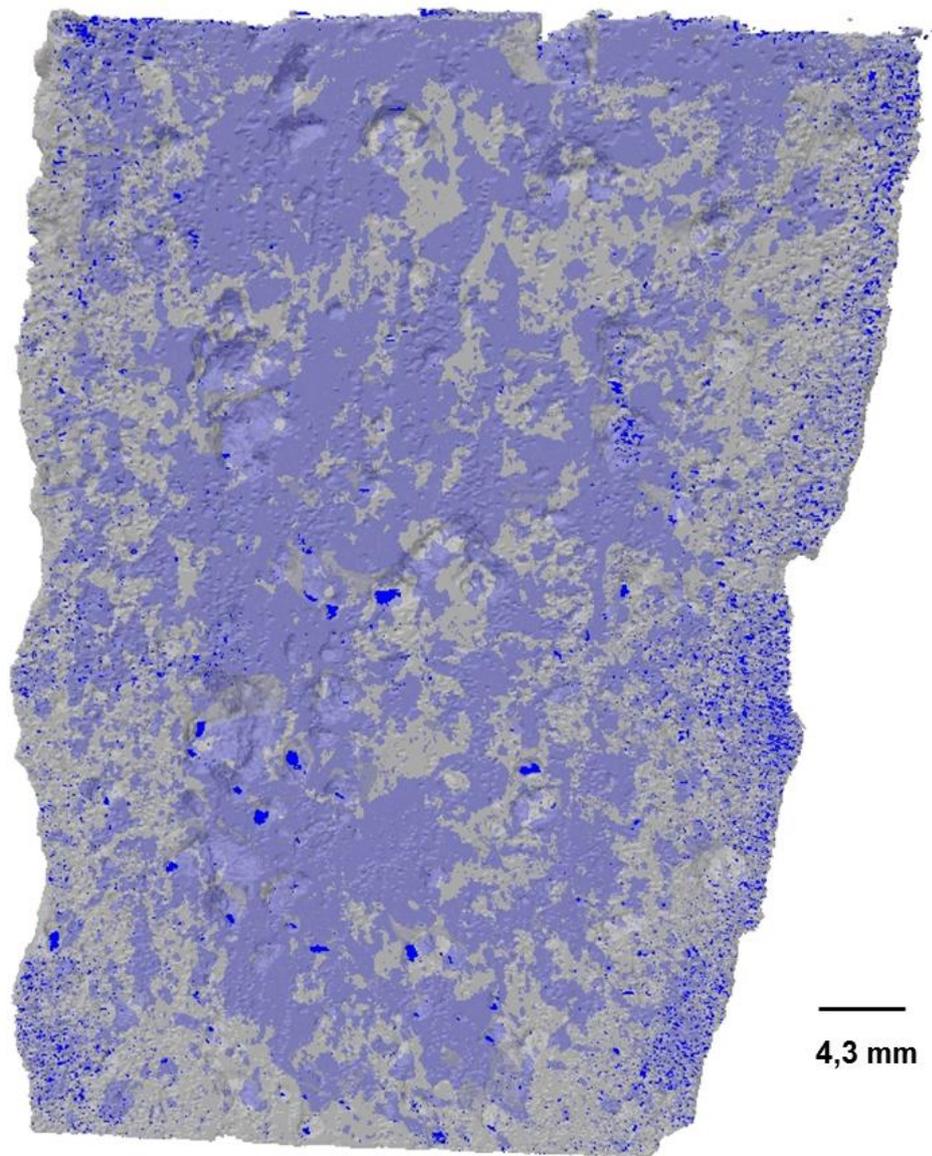


Figura 5.68 – Imagem 3-D reconstruída da amostra TRT-01 (travertino turco).

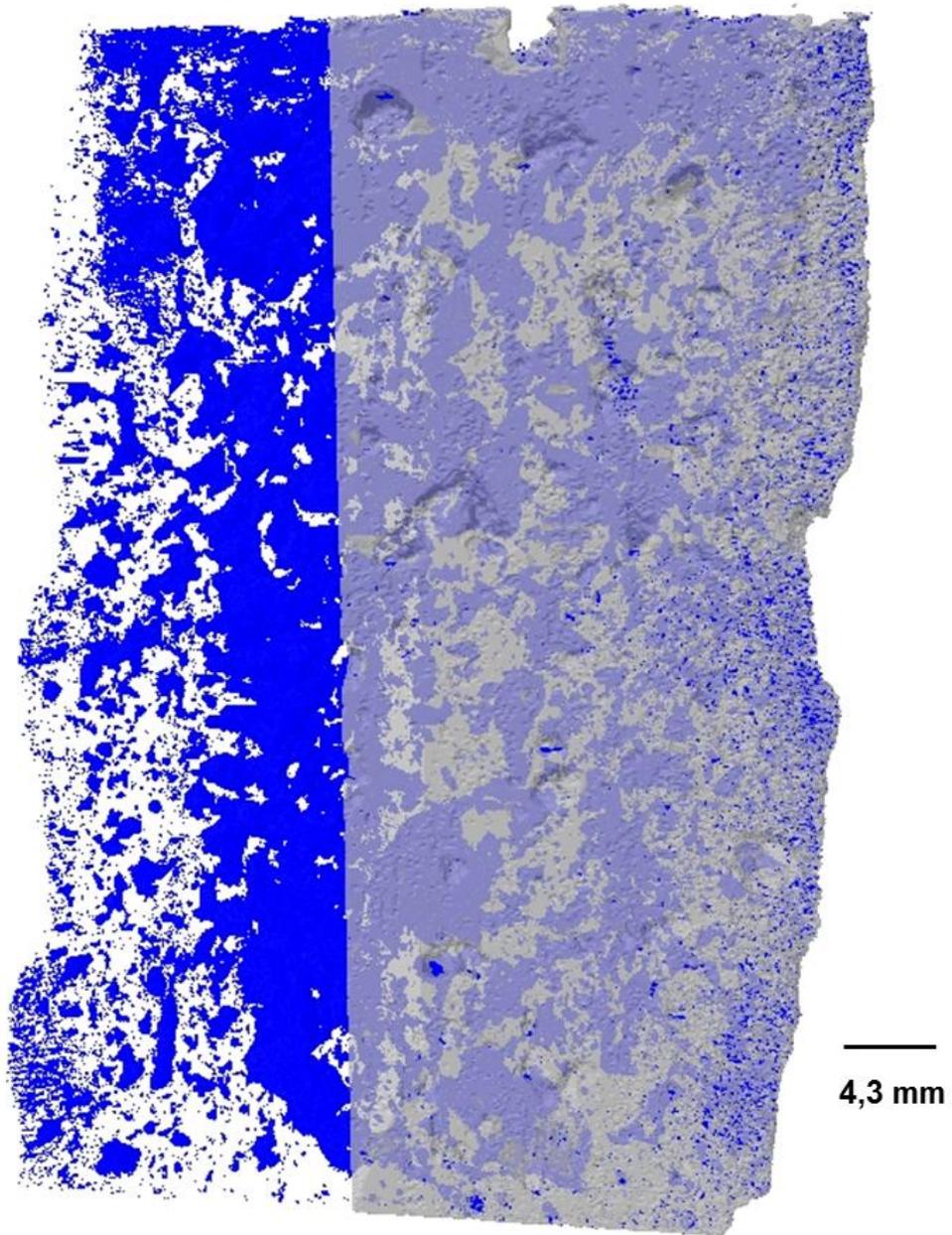


Figura 5.69 – Corte na imagem 3-D reconstruída da amostra TRT-01 (travertino turco).

5.5. Ensaaios de Resistência

5.5.1. Ensaio de Compressão simples

Os ensaios de compressão simples foram realizados em seis corpos de prova retirados dos blocos de travertino de Itaboraí. Como já foi relatado no Capítulo anterior, não foi possível realizar corpos de prova para a realização de ensaios de compressão simples nos travertinos romanos e turcos pelo fato destes materiais apresentarem forma de placas.

A Tabela 5.29 apresenta os resultados da resistência à compressão simples (UCS), do módulo de Young axial, do coeficiente de Poisson e da deformação máxima axial determinados.

Tabela 5.29 – Resultados dos ensaios de compressão simples nos corpos de prova de travertino de Itaboraí.

Corpos de prova	UCS (MPa)	Módulo de Young (E) (GPa)	Coeficiente de Poisson (ν)	Deformação axial máxima (ϵ_{ax}) (%)
TRI-04 (01)	56,39	13,83	0,06	0,46
TRI-04 (02)	55,03	15,67	0,16	0,51
TRI-05 (01)	39,86	62,93	0,35	0,067
TRI-05 (02)	27,2	39,83	0,25	0,074
TRI-05 (03)	40,69	68,46	0,37	0,068
TRI-05 (04)	43,29	42,62	0,19	0,094

Observa-se na Tabela 5.29, que os corpos de prova retirados do bloco TRI-04 apresentam maiores valores de resistência à compressão simples (UCS) e de deformação axial máxima, e menores valores do módulo de Young axial e do coeficiente de Poisson, comparados com os corpos de prova retirados do bloco TRI-05. A forma dos grãos, textura dos corpos de prova TRI-04 e TRI-05 são diferentes, e podem ser visualizadas na Figura 5.70. Nota-se que o corpo de prova TRI-04 (01) é mais poroso que o corpo de prova TRI-05 (04), que por sua vez é o mais compacto.

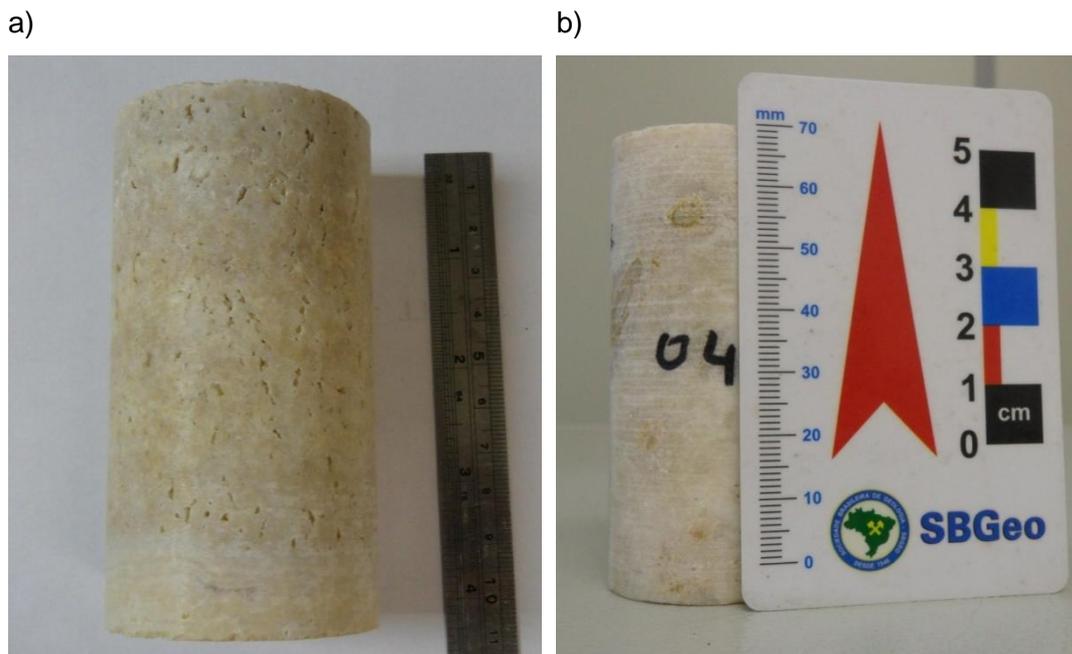


Figura 5.70 – Comparação entre os corpos de prova. (a) TRI-04 (01) e (b) TRI-05 (04).

Os corpos de prova obtidos do bloco TRI-05 apresentaram baixos valores de resistência à compressão simples, que pode ser explicado pelo contato entre os grãos, como pode ser visto na Figura 5.71.



Figura 5.71 – Contato entre os grãos da amostra TRI-05.

Pelos resultados obtidos nos ensaios de porosidade, densidade aparente seca e saturada, velocidade de ondas ultrassônicas, esperava-se valores mais

elevados da resistência à compressão simples nos corpos de prova obtidos do bloco TRI-05.

Estes corpos de prova (TRI-05) possuem o comportamento de rochas mais resistentes (alto valor de V_p e de densidade aparente e baixo valor de porosidade), mas apresentaram valores baixos de resistência.

As curvas de tensão-deformação, obtidas através do ensaio, podem ser visualizadas nas Figuras 5.72 a 5.77.

Os gráficos referentes aos corpos de prova TRI-04 (01) e TRI-04 (02), representados na Figura 5.72 e 5.73, respectivamente, apresentam comportamento similares, tanto na curva tensão-deformação axial, como na curva tensão-deformação transversal. Observou-se no gráfico tensão-deformação axial do corpo de prova TRI-04 (01) um pequeno embriçamento, próximo à tensão de 45 MPa e deformação axial de 0,005 mm/mm. Este comportamento ocorre devido ao calvalgamento de um grão sobre o outro.

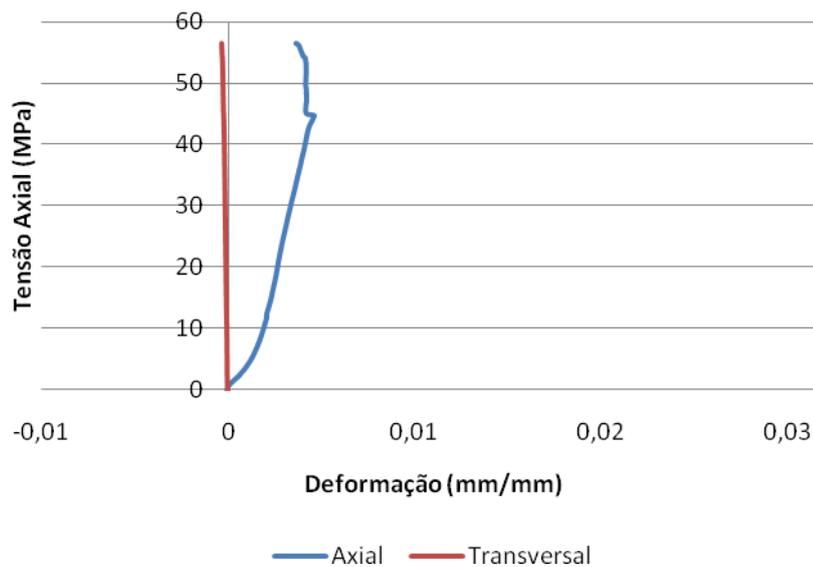


Figura 5. 72 – Curva tensão-deformação do corpo de prova TRI-04 (01).

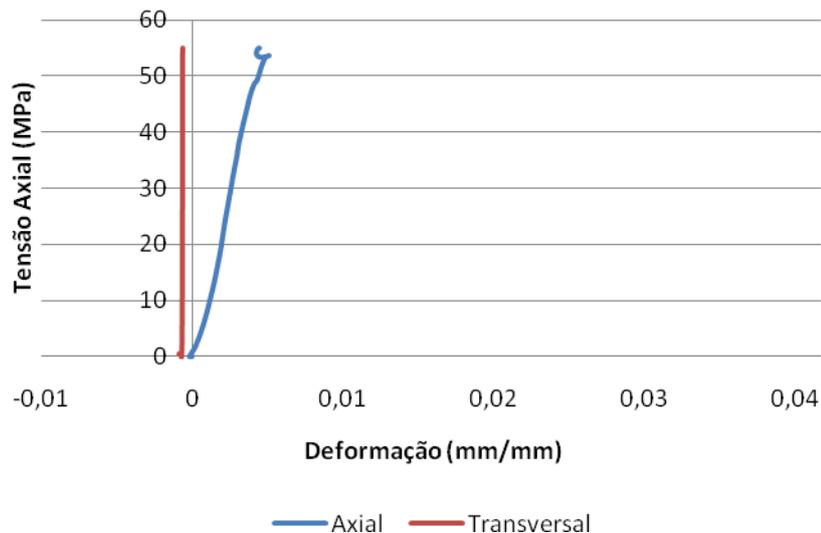


Figura 5. 73 – Curva tensão-deformação do corpo de prova TRI-04 (02).

As curvas tensão-deformação dos corpos de prova obtidos do bloco TRI-05 apresentam comportamento parecidos entre si, mas não tão similares como as curvas dos corpos de prova TRI-04 (vide Figuras 5.74, 5.75, 5.76 e 5.77).

Verifica-se em todas as curvas tensão-deformação axial dos corpos de prova TRI-05, que após a ruptura há uma diminuição da deformação para o mesmo nível de tensão, ocorrendo em seguida a diminuição brusca da tensão. Em todas as curvas pode-se ver o comportamento típico de embricamento, inclusive nas curvas de tensão-deformação transversal.

Vale ressaltar, que durante a realização do ensaio de compressão simples no corpo de prova TRI-05 (02) ocorreu um problema na leitura do *strain gage* e o operador do equipamento realizou um descarregamento, onde foi perceptível o descamamento na extremidade inferior do corpo de prova. Este fato pode ter influenciado no resultado final do ensaio.

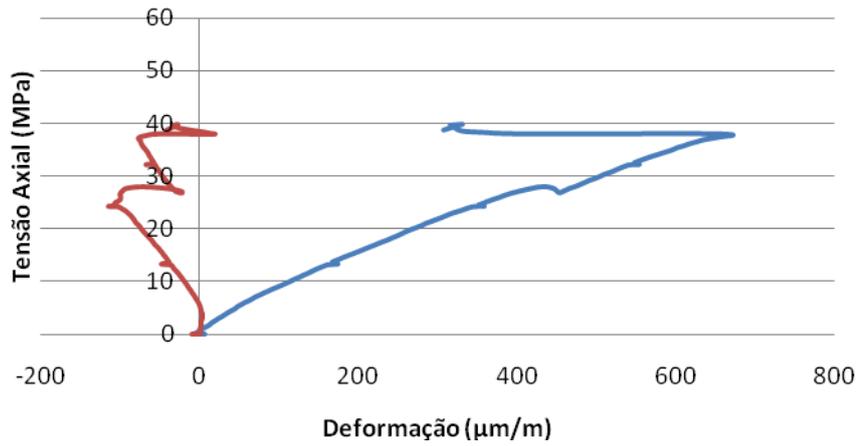


Figura 5.74 – Curva tensão-deformação do corpo de prova TRI-05 (01).

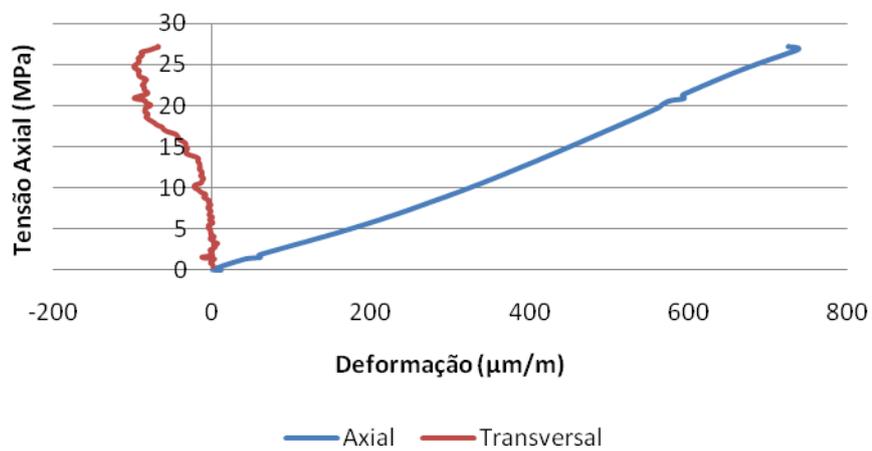


Figura 5.75 – Curva tensão-deformação do corpo de prova TRI-05 (02).

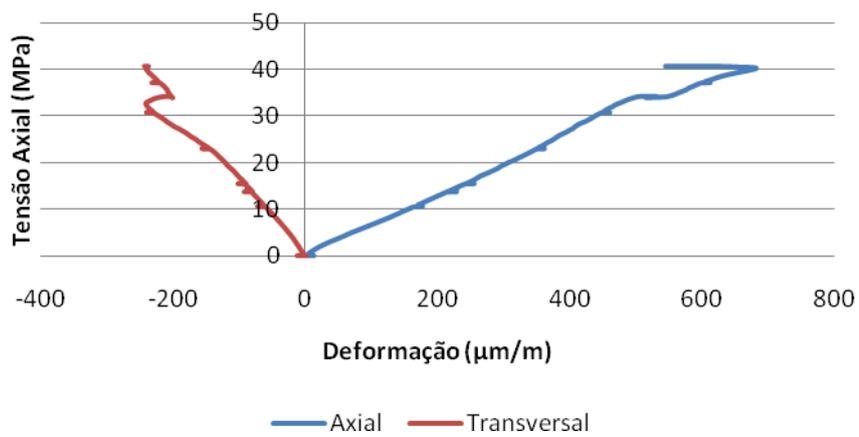


Figura 5.76 – Curva tensão-deformação do corpo de prova TRI-05 (03).

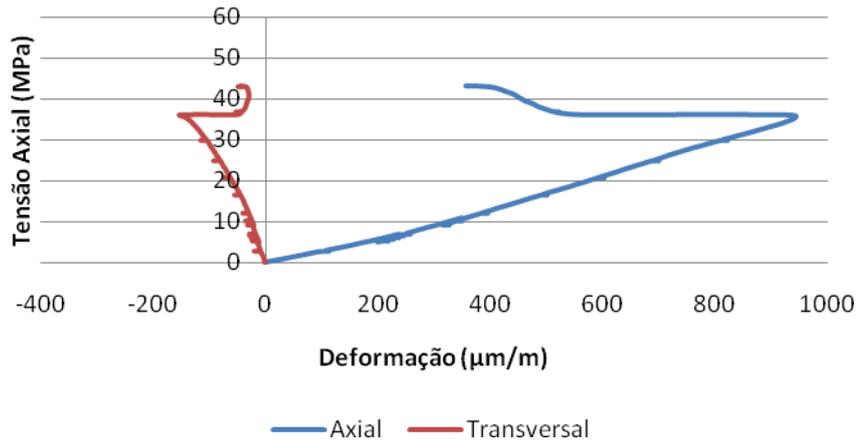


Figura 5.77 – Curva tensão-deformação do corpo de prova TRI-05 (04).

A Figura 5.78 mostra os tipos de ruptura verificados nos corpos de prova. Nota-se que os corpos de prova TRI-04 apresentaram a ruptura do tipo fendilhamento, onde as fraturas são desenvolvidas na direção paralela ao carregamento axial. Já os corpos de prova TRI-05 apresentam a ruptura do tipo cisalhamento. Neste tipo, a ruptura ocorre ao longo de uma fratura inclinada em relação ao carregamento axial.

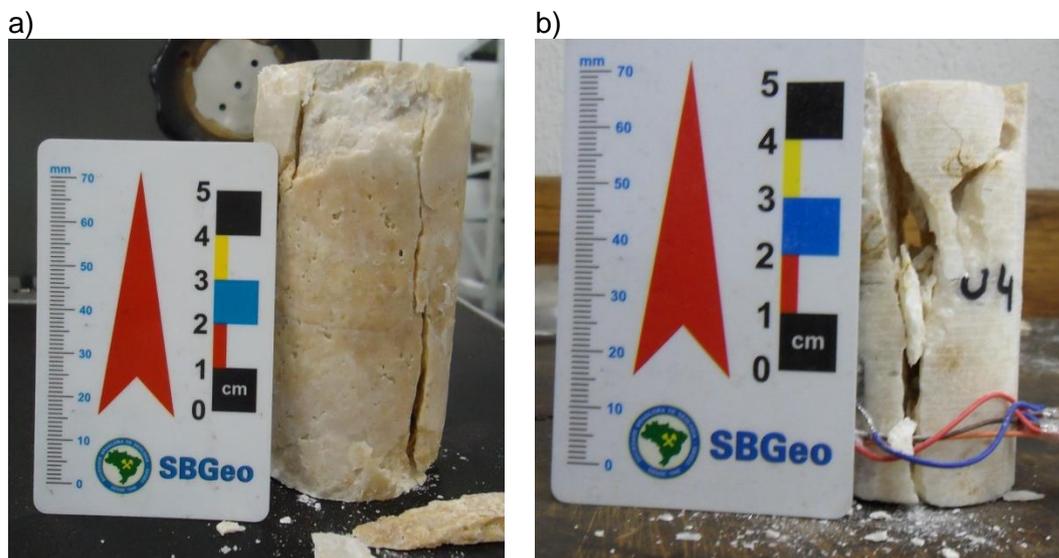


Figura 5.78 – Tipos de ruptura verificados nos corpos de prova: (a) fendilhamento no corpo de prova TRI-04 (01), e (b) cisalhamento no corpos de prova TRI-05 (04).

Os resultados encontrados nos ensaios de compressão simples foram plotados no gráfico de classificação de rocha intacta proposto por Deere & Miller (1966), como mostra a Figura 5.79.

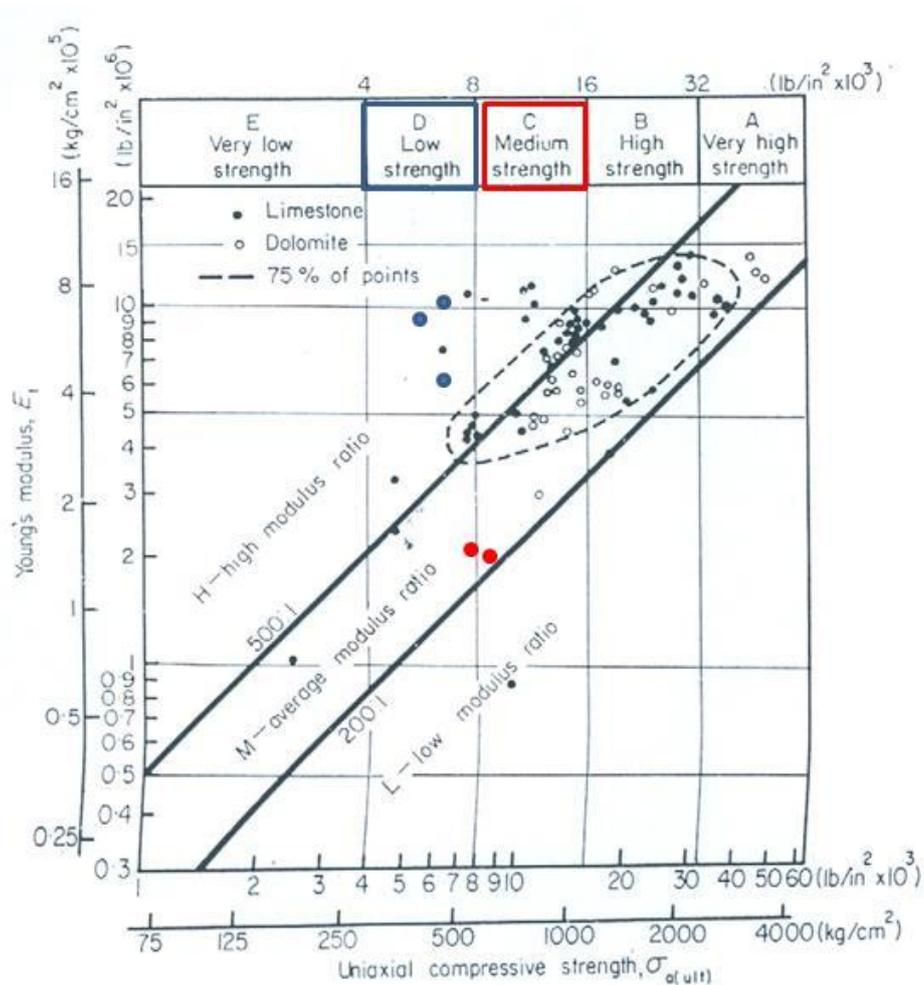


Figura 5.79 – Gráfico resumido da classificação de rochas intactas para rochas carbonáticas (77 corpos de prova, 22 locais e várias fontes) proposto por Deere & Miller (1966) com os resultados encontrados nesta pesquisa plotados.

A classificação proposta por Deere & Miller (1966) é baseada em duas propriedades importantes das rochas: a resistência à compressão simples (UCS) e o módulo de elasticidade (E). O cálculo do módulo de elasticidade utilizado na classificação é realizado através da tangente da curva tensão-deformação e a resistência à compressão simples é determinada em corpos de prova com a relação H/D igual ou maior que dois. As rochas são classificadas em seis categorias de resistência, como mostra a Tabela 5.30. Segundo Deere & Miller (*op. cit.*), as rochas carbonáticas geralmente estão inseridas nas categorias B e C.

A segunda propriedade utilizada na classificação proposta por Deere & Miller é o módulo de elasticidade (E_t). Contudo esta propriedade não é usada sozinha, mas em conjunto com a resistência à compressão simples, na forma de um módulo denominado módulo razão (M_r), que é igual a razão entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão simples. Com base neste módulo Deere & Miller (1966) propuseram três classes de rochas, como mostra a Tabela 5.31.

Tabela 5.30 – Classificação de rochas intactas com base na resistência proposta por Deere & Miller (1966).

Classe	Descrição	UCS (Mpa)
A	Resistência muito alta	> 220,63
B	Resistência alta	110,32 – 220,63
C	Resistência média	55,16 – 110,32
D	Resistência baixa	27,58 – 55,16
E	Resistência muito baixa	< 27,58

Tabela 5.31 – Classificação de rochas intactas com base no módulo razão proposta por Deere & Miller (1966).

Classe	Descrição	E_t/UCS
H	módulo razão alto	> 500
M	módulo razão médio	200 - 500
L	módulo razão baixa	< 200

Observa-se na Figura 5.79 que os corpos de prova do bloco TRI-04 estão inseridos na classe C (resistência média) e M (módulo razão médio). Na verdade estas rochas estão inseridas no limite inferior destas classes. Já os corpos de prova do bloco TRI-05 estão inseridos na classe D (resistência baixa) e H (módulo razão alto). Segundo Deere & Miller (1966) a maioria das rochas

carbonáticas apresentam alto valor do módulo razão devido a sua mineralogia particular (calcita e dolomita) e a presença de *fabric* do tipo *interlocking*.

5.5.2. Ensaio de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais e transversais

Os ensaios de propagação de ondas foram realizados nos quatro corpos de prova retirados do bloco TRI-05. Os ensaios não foram feitos nos corpos de prova TRI-04, pois estes apresentam 2 polegadas de diâmetro, o que não era compatível com o transdutor disponível no Laboratório de Física de Rochas. Também não foi possível realizar os ensaios nos travertinos romanos e turcos devido ao fato de terem o formato de placas.

A Tabela 5.32 apresenta os resultados do ensaio e os valores determinados dos módulos dinâmicos calculados a partir das velocidades de ondas ultrassônicas. Os módulos dinâmicos calculados foram: Módulo de Young (E); Módulo de Cisalhamento (G); Módulo de Volume (K).

Tabela 5. 32 – Resultados do ensaio de propagação de ondas ultrassônicas nos corpos de prova obtidos da amostra TRI-05.

Corpo de Prova	TRI-05 (01)	TRI-05 (02)	TRI-05 (03)	TRI-05 (04)
Vp (km/s)	6,38	6,37	6,44	6,73
Vs1 (km/s)	3,37	3,42	3,51	4,21
Vs2 (km/s)	3,48	3,24	3,31	3,68
E1 (GPa)	80,09	81,94	86,27	112,8
G1 (GPa)	30,65	31,57	33,46	47,86
K1(GPa)	68,93	67,57	68,20	58,43
v1 (Poisson)	0,31	0,3	0,29	0,18
E2 (GPa)	84,35	75,01	78,77	94,22
G2 (GPa)	32,76	28,28	29,83	36,63
K2 (GPa)	66,12	71,95	73,04	73,41
v2 (Poisson)	0,29	0,33	0,32	0,29
Densidade aparente (Mg/m ³)	2,70	2,70	2,72	2,70

A partir dos resultados da Tabela 5.32, verifica-se que o corpo de prova TRI-05 (04) apresenta o maior valor de velocidade de ondas ultrassônicas longitudinais (V_p) e o corpo de prova TRI-05 (02) o menor valor. Em todos os corpos de prova foram observadas diferenças entre V_{s1} e V_{s2} , que são as velocidades de ondas ultrassônicas transversais. O corpo de prova TRI-05 (04) foi o que apresentou uma maior diferença entre V_{s1} e V_{s2} e o corpo de prova TRI-05 (01) a menor diferença. Crê-se que a diferença entre as velocidades de ondas transversais seja devido à heterogeneidade do material.

Os resultados dos módulos dinâmicos obtidos nesta pesquisa são similares aos valores encontrados em rochas carbonáticas por Sayers (2008). Em seu estudo, as rochas que apresentavam porosidade em torno de 1%, obtiveram valores do módulo de Volume (K) variando de 50 a 70GPa, e valores do módulo de cisalhamento (G) variando de 27 a 32GPa.

Foi verificado que os valores do módulo de Young dinâmico são maiores que os valores do módulo de Young estático. Yale & Jamieson (1994) sugerem que a maior parte desta diferença entre os módulos ocorrem devido aos efeitos viscoelásticos. Para que isto ocorra, a diferença entre as medições dinâmicas e estáticas necessitam ser grande o suficiente para permitir significativas deformações viscoelásticas nos ensaios estáticos, que não ocorrem nos ensaios de velocidades de ondas. Um exemplo de tais deformações viscoelásticas seriam deformações inelásticas que ocorrem no microfraturamento e no contato entre grãos no interior das rochas.

Sayers (*op. cit*) comenta em seu trabalho que, geralmente, o coeficiente de Poisson dinâmico é menor que o coeficiente de Poisson estático. Nesta dissertação, os corpos de prova TRI-05 (01) e TRI-05 (03) obtiveram estes resultados. Já os corpos de prova TRI-05 (02) e TRI-05 (04) obtiveram valores mais elevados do coeficiente de Poisson dinâmico.

5.5.3. Ensaio de esclerometria

Os ensaios de esclerometria foram realizados em amostras de travertino de Itaboraí, romano e turco. Na superfície das amostras foram realizadas malhas retangulares, nas quais foram efetuados os disparos com o esclerômetro, conforme ilustra a Figura 5.80. Os resultados dos ensaios realizados estão descritos na Tabela 5.33.

Verifica-se na Figura 5.80 que a superfície da amostra não foi polida conforme recomenda a Norma ASTM D5873. O descumprimento do

procedimento estabelecido na referida norma deu-se pela reduzida disponibilidade de amostras, posto que as amostras ensaiadas foram também submetidas a outros tipos de ensaio (e.g., resistência à compressão simples, porosimetria).

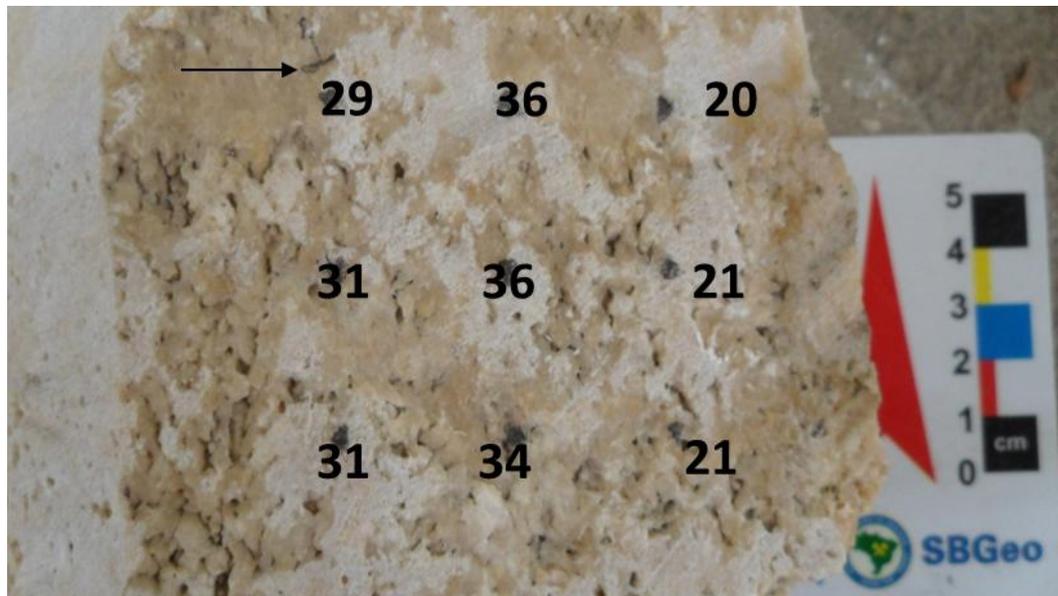


Figura 5.80 – Malha retangular realizada na superfície da amostra TRI-04 e os respectivos índices esclerométricos. A seta preta representa a direção inicial do ensaio.

Tabela 5.33 – Resultados dos ensaios de esclerometria.

Esclerometria				
Amostra	Índice esclerométrico médio	Variância	Desvio Padrão	UCS estimado (Mpa)
TRI-01	26	26,86	5,18	42,03
TRI-04	29	42,44	6,51	50
TRI-05	37	74,15	8,61	75,99
TRI-06	31	18,52	4,3	56,31
TRI-10	27	26,86	5,18	43,46
TRR-01	25	12,99	3,6	32,05
TRT-02	25	4,81	2,19	36,49
TRT-03	32	4,06	16,51	52,51

Nas amostras de travertino de Itaboraí os valores médios do índice esclerométrico variaram entre 26 a 37 e os valores de resistência a compressão simples estimada por este ensaio variaram entre 42,03 a 75,99MPa. Observa-se,

que dentre as amostras de travertino de Itaboraí ensaiadas, a amostra TRI-05 foi a que apresentou a maior resistência.

Vários são os parâmetros que influenciam nos resultados do ensaio, incluindo: a resistência relativa dos grãos com a matriz da rocha, a umidade e o grau de intemperismo da rocha, a anisotropia, a presença de descontinuidades na superfície da amostra, e a espessura da amostra ensaiada.

Como as amostras de Itaboraí foram coletadas em afloramento supõe-se que elas sofreram algum tipo de intemperismo. As amostras de Itaboraí selecionadas para a realização do ensaio de esclerometria apresentam as seguintes características que podem ter influenciado nos resultados obtidos:

- TRI-01: superfície lisa com algumas irregularidades ocorridas no momento do preparo da amostra e laminações (anisotropia);
- TRI-04: pouca espessura e superfície rugosa;
- TRI-05: anisotropia e heterogeneidades;
- TRI-06: superfície lisa e laminações (anisotropia);
- TRI-10: superfície rugosa com bastantes irregularidades ocorridas no momento do preparo da amostra.

Observa-se na Tabela 5.33 que a placa de travertino romano apresentou o valor mais baixo de resistência à compressão simples estimada em comparação com os demais materiais ensaiados. A amostra de travertino romano submetida ao ensaio é bastante porosa, apresenta superfície lisa com irregularidades (poros) naturais do material, além de ser anisotrópica. Já as amostras de travertino turco além de possuírem a superfície lisa, apresentam laminações com a intercalação de lâminas porosas e lâminas maciças. As amostras de travertino turco são menos porosas que a amostra de travertino romano estudada.

A Tabela 5.33 ainda apresenta o resultado das análises estatísticas realizadas com os dados obtidos. A partir destes dados foram construídos histogramas mostrando a distribuição dos índices esclerométricos (R) na superfície da rocha. A Figura 5.81 apresenta os resultados para a amostra TRI-04.

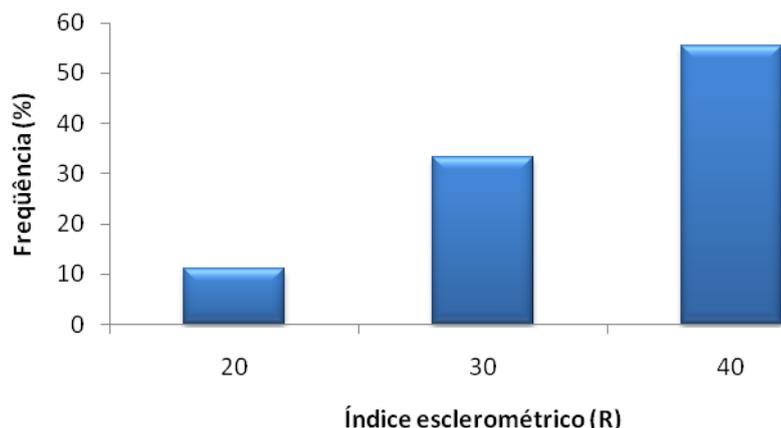


Figura 5.81 – Histograma realizado na amostra TRI-04.

Observa-se no histograma da Figura 5.81, uma distribuição triangular, onde a frequência aumenta de forma constante. A média e o desvio padrão representam bem o universo de dados. A frequência mínima encontrada foi de 11%, no intervalo de 10 a 20; e a frequência máxima foi de 55%, no intervalo de 30 a 40.

Os histogramas realizados nas demais amostras encontram-se no Apêndice IV desta dissertação.

Os histogramas realizados nas outras amostras de Itaboraí apresentam uma distribuição triangular, sendo que alguns exibem o trecho de crescimento e outros apresentam tanto o trecho de acréscimo como o de decréscimo. Todos os histogramas das amostras de Itaboraí possuem uma concentração de pontos entre 20 e 40.

O histograma do travertino romano também apresenta uma distribuição triangular, com uma concentração de pontos entre 20 e 30. Já as amostras de travertino turco apresentaram uma distribuição constante, com a concentração de pontos entre 25 e 40. Vale ressaltar, que devido a pequena quantidade de pontos, os histogramas tiveram que ser realizados com apenas três classes.

A Figura 5.82 mostra o diagrama de distribuição dos índices esclerométricos na malha retangular da amostra TRI-04. Este resultado foi gerado a partir da realização de uma análise geoestatística que empregou o programa computacional *RockWorks*, versão 15. O método de interpolação de dados utilizado foi o inverso da distância.

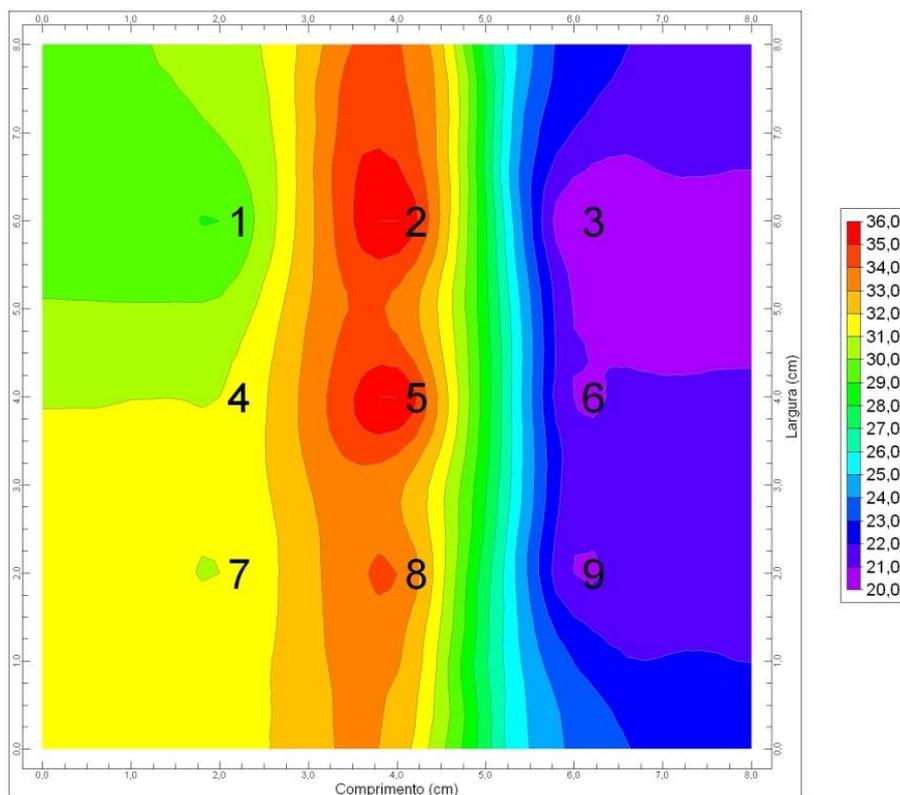


Figura 5.82 – Diagrama de distribuição dos índices esclerométricos da amostra TRI-04.

Nota-se no diagrama, que na parte central da amostra foi onde se obtiveram os maiores valores do índice esclerométrico. Este comportamento foi observado na maioria das amostras ensaiadas, como pode ser constatado nas figuras do Apêndice IV desta dissertação.

Verificou-se nos diagrama de distribuição dos índices esclerométricos que as amostras de travertino de Itaboraí obtiveram valores similares em determinados locais da malha, observando uma tendência de concentração dos valores mais elevados na parte central da malha. Este mesmo comportamento não foi observado nos diagramas das placas de travertino romano e turco.

O ensaio de esclerometria também foi realizado nos quatro corpos de prova retirados da amostra TRI-05 que seriam *a posteriori* submetidos ao ensaio de compressão simples. Devido ao receio de danos nos corpos de prova, a esclerometria foi apenas realizada em um malha contendo 6 pontos. A Tabela 5.34 apresenta os resultados do ensaio nos corpos de prova.

Tabela 5.34 – Resultados dos ensaios de esclerometria realizados nos corpos de prova TRI-05.

Corpo de Prova	Índice esclerométrico médio	Variância	Desvio Padrão	UCS estimado (MPa)	UCS medido (MPa)
TRI-05 (01)	33	3,87	1,97	56,31	39,86
TRI-05 (02)	28	11,87	3,45	42,63	27,2
TRI-05 (03)	34	1,37	1,17	61,25	40,69
TRI-05 (04)	35	15,2	3,9	63	43,29

Estes resultados também foram submetidos a uma análise geostatística empregando os mesmos procedimentos descritos anteriormente. A Figura 5.83 apresenta os resultados. Verifica-se que há regiões mais resistentes nos corpos de prova devido ao fato destes possuírem regiões com textura maciça e com textura laminada.

Observa-se que o corpo de prova que apresentou um maior valor do índice esclerométrico e da resistência à compressão simples (UCS) foi o TRI-05 (04) e o que apresentou os menores valores do índice esclerométrico e de UCS estimado foi o TRI-05 (02). Os valores de resistência à compressão simples estimados através do ensaio de esclerometria foram mais elevados que os valores de UCS calculados a partir do ensaio de compressão simples, embora tenha sido evidenciada uma relação direta entre estes valores.

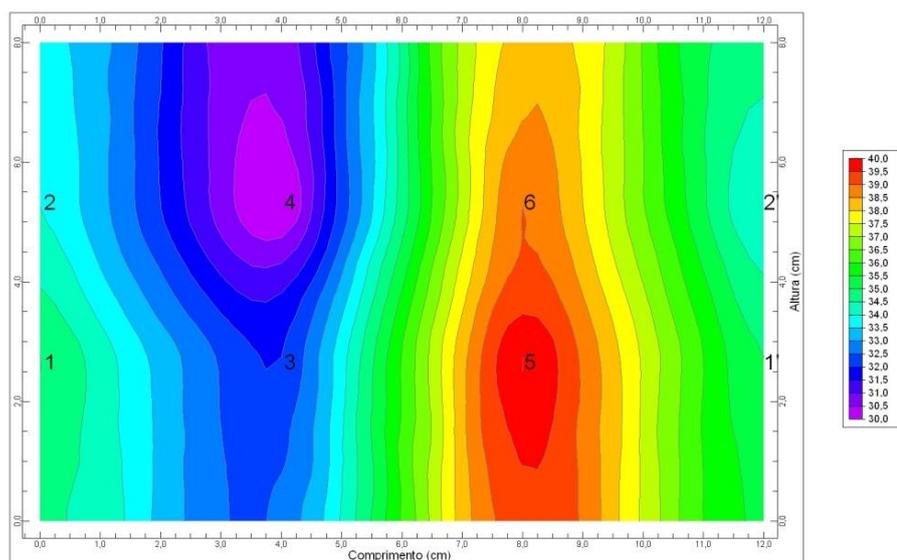


Figura 5.83 – Diagrama de distribuição dos índices esclerométricos do corpo de prova TRI-05 (04).

5.5.4. Ensaio de abrasividade Cerchar

O índice de abrasividade CERCHAR corresponde à média de 20 determinações (20 traços) realizadas nos fragmentos de rocha de cada amostra.

Os valores médios e o desvio padrão, de todas as amostras ensaiadas, são apresentados na Tabela 5.35.

Tabela 5.35 – Resultados do ensaio de abrasividade Cerchar.

Amostra	Índice de Abrasividade CERCHAR (1/10mm)	
	Valor Médio	Desvio Padrão
TRI-08	0,6	0,25
TRR-01	0,9	0,48
TRT-01	0,9	0,67

Observa-se na Tabela 5.35 que as amostras de travertino romano e turco apresentaram o mesmo valor do índice de abrasividade, sendo que na amostra de travertino romano houve uma menor dispersão dos valores.

Era de se esperar que a amostra de travertino fitado de Itaboraí apresentasse um índice de abrasividade Cerchar mais elevado que as amostras romanas e turcas, já que apresentam o mineral quartzo em sua composição, que é abrasivo. Mas vale ressaltar que as amostras de Itaboraí sofreram processos intempéricos, que podem influenciar no contato entre os grãos da rocha, reduzindo o valor do índice de abrasividade.

Plinninger *et al.* (2003) realizaram o ensaio Cerchar em 109 tipos diferentes de rochas com o objetivo de reconhecer os principais fatores que influenciam os resultados do ensaio. Os resultados obtidos no estudo estão presentes na Figura 5.84.

Resolveu-se incluir os resultados do presente estudo na Figura 5.84 a título de comparação. Verificou-se que os valores obtidos para os travertinos romano e turco encontram-se na faixa de variação dos valores para as rochas calcárias obtidas por Plinninger *et al.* (*op. cit.*). Já o valor médio obtido para o travertino fitado de Itaboraí encontra-se aquém da faixa de variação listada pelos autores.

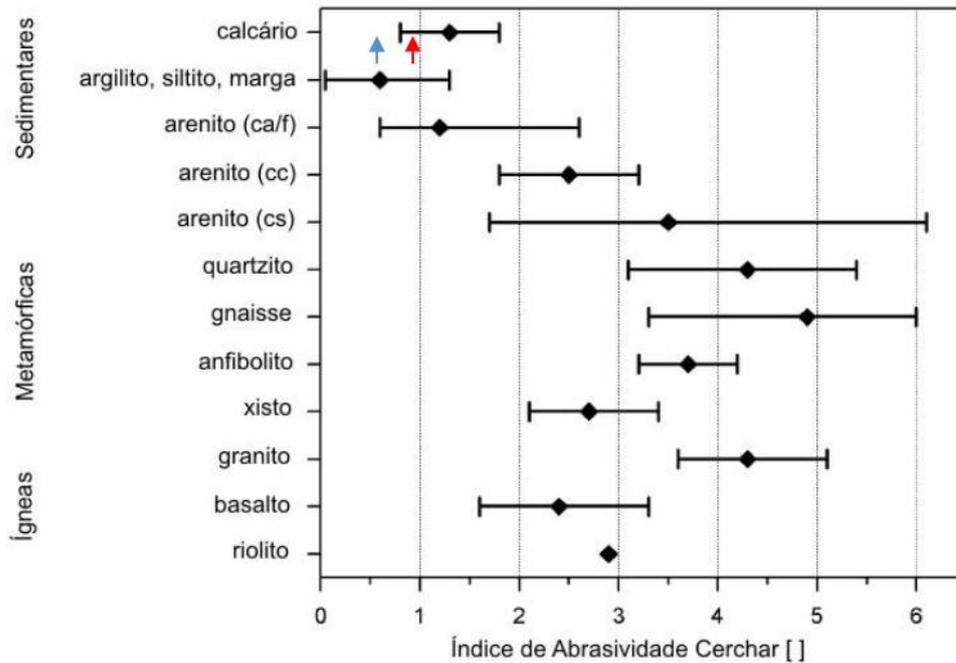


Figura 5.84 – Compilação de valores típicos de CAI para alguns tipos de rochas de acordo com Karling (2000), Plinninger et al. (2002) e Buchi et al. (1995) com os resultados encontrados nesta pesquisa plotados. A seta azul representa o valor CAI no travertino de Itaboraí e a seta vermelha representa o CAI encontrado no travertino romano e turco.

5.5.5. Scratch test

O ensaio de Scratch test foi realizado nas placas preparadas a partir das amostras TRI-05, TRR-01 e TRT-01.

O *Scratch test* fornece os valores da energia específica necessária para a realização do corte na superfície da rocha. Em cada corte são realizados 3 corridas, cada uma com 0,3 mm de espessura aproximadamente. A partir dos valores obtidos da energia específica, a resistência à compressão simples é estimada. Os resultados dos ensaios estão listados na Tabela 5.36.

Tabela 5.36 – Resultados do *Scratch test* nos travertinos estudados.

Placa	UCS estimado (MPa)	
	1º corte	2º corte
TRI-05	108	100
TRR-03	80	77
TRT-03	92	82

A Figura 5.85 mostra o gráfico da energia específica *versus* comprimento do primeiro corte realizado na amostra TRI-05. Verificou-se que as quedas bruscas da energia específica correspondiam a vazios ou descontinuidades presentes na superfície da amostra. Este fato é exemplificado na Figura 5.86, onde as quedas nos valores da energia específica coincidiram com as laminações e vazios presentes na superfície da amostra.

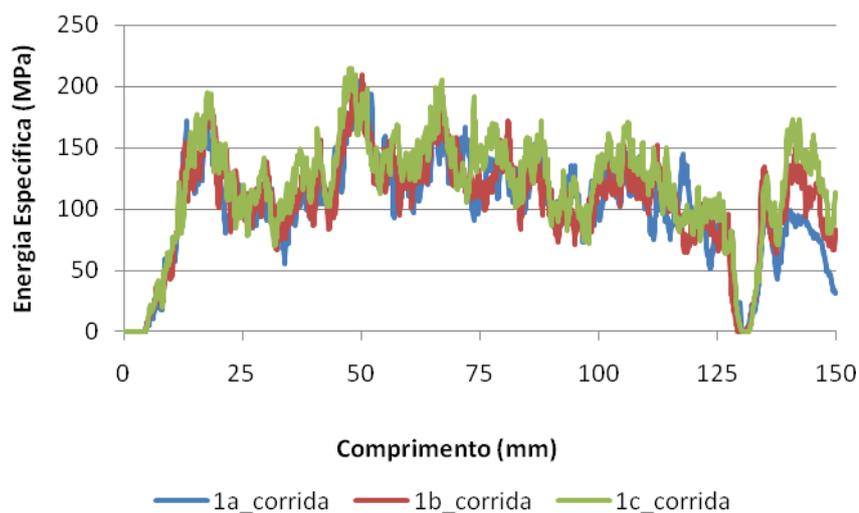


Figura 5.85 – Gráfico da energia específica *versus* comprimento do primeiro corte, realizado na amostra TRI-05.

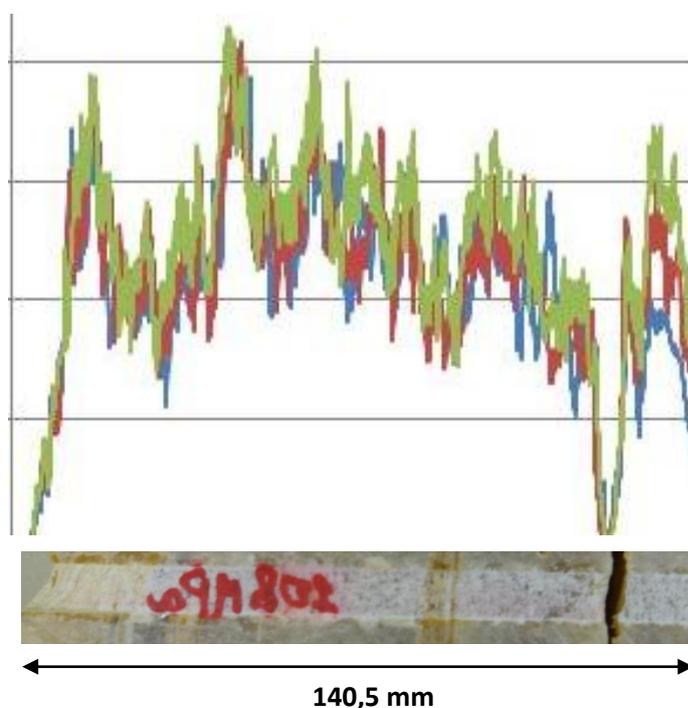


Figura 5.86 – Variação dos valores da energia específica durante o corte na superfície da amostra TRI-05.

A Figura 5.87 apresenta o gráfico de energia específica *versus* comprimento do primeiro corte na placa de travertino romano. A variação dos valores da energia específica durante o corte está ilustrada em detalhe na Figura 5.88. Observa-se nesta figura que onde há poros ocorrem pequenas quedas nos valores da energia específica.

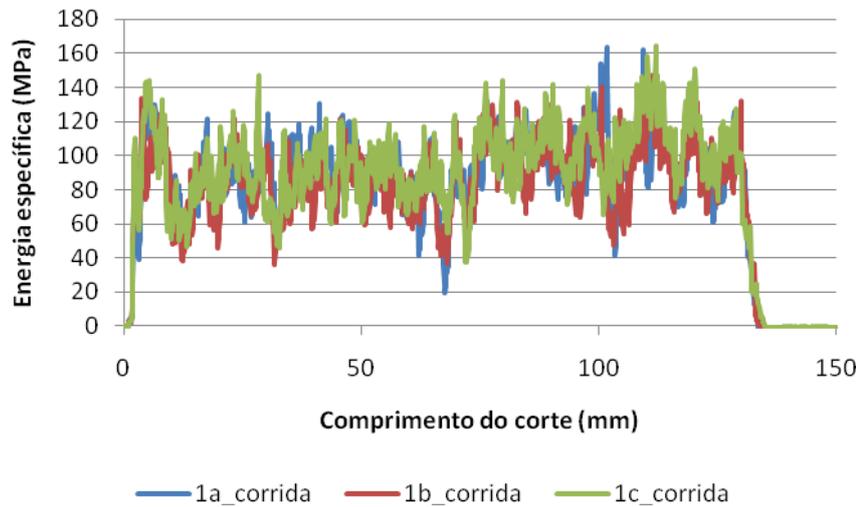


Figura 5.87 – Gráfico da energia específica *versus* comprimento do primeiro corte, realizado na amostra TRR-01.

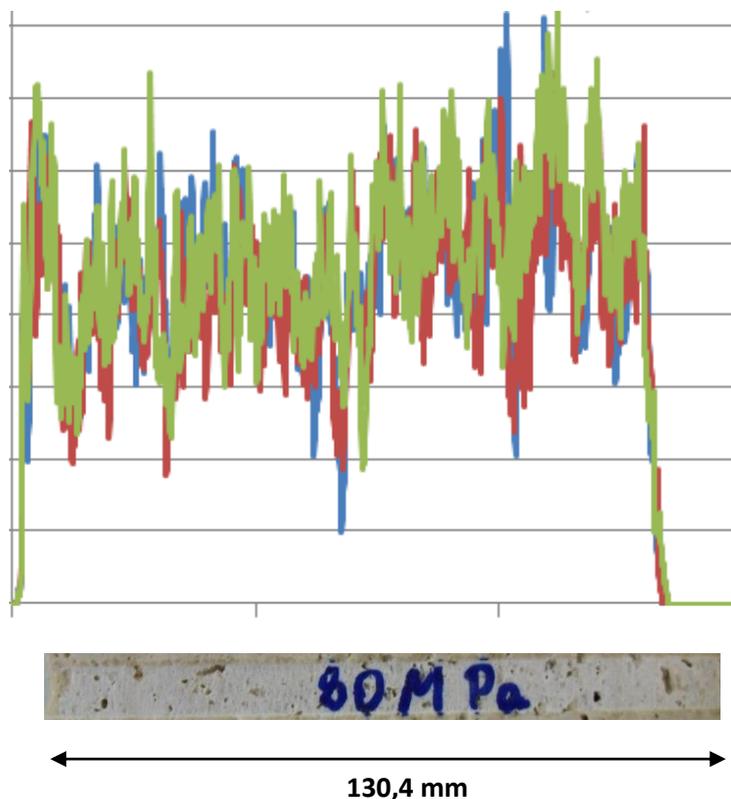


Figura 5.88 – Variação dos valores da energia específica durante o primeiro corte realizado na superfície da amostra TRR-01.

Observa-se na Figura 5.89 que não há consideráveis oscilações no valor da energia específica durante o corte realizado na amostra de travertino turco. Na verdade, a pequena variação observada é fruto da pequena presença de vazios ou descontinuidades na amostra ensaiada conforme pode ser visto na Figura 5.90.

Os resultados sugerem que a amostra de travertino de Itaboraí apresenta uma alta resistência ao corte e grandes oscilações nos valores de energia específica. Essas oscilações se devem ao fato da rocha ser bastante heterogênea.

Quando os resultados foram comparados entre as amostras ensaiadas, observou-se que a amostra de travertino turco apresentou uma resistência ao corte elevada, embora tenha sido menor que a do travertino de Itaboraí. Já a placa de travertino romano foi a que apresentou a menor resistência ao corte e uma média oscilação dos valores de energia específica, devido ao fato da amostra ser bastante porosa.

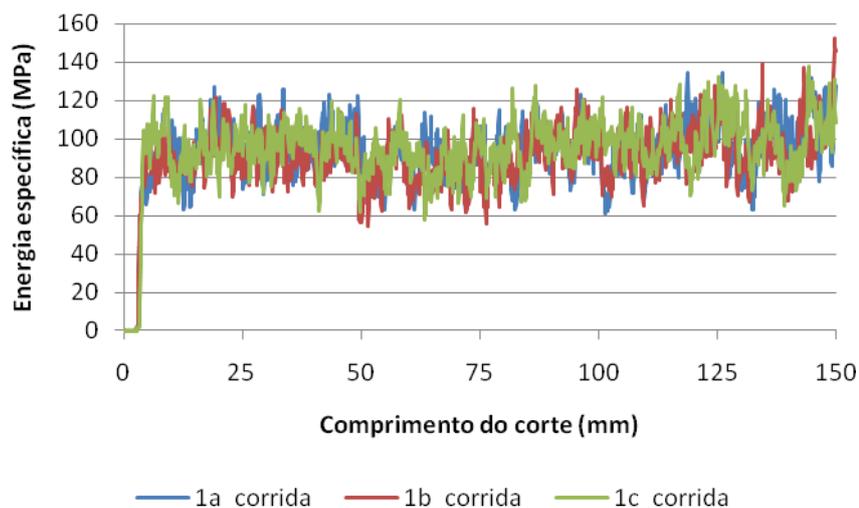


Figura 5.89 – Gráfico da energia específica *versus* comprimento do primeiro corte, realizado na amostra TRT-01.

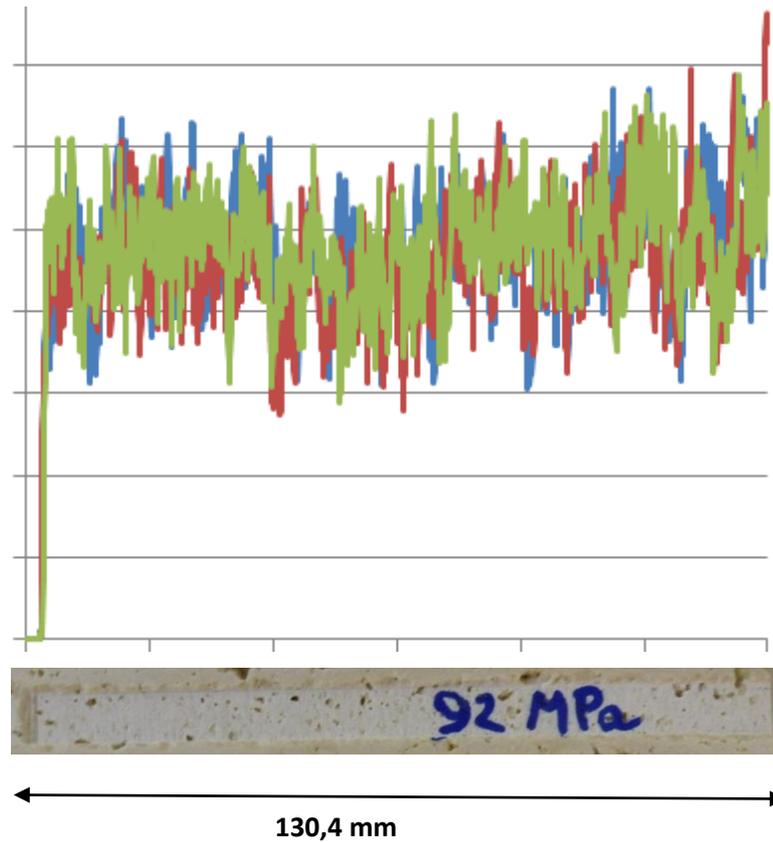


Figura 5.90 – Variação dos valores da energia específica durante o primeiro corte realizado na superfície da amostra TRT-01.

5.6. Correlações geológica e geomecânica

A partir dos resultados dos ensaios de caracterização geológica e geomecânica das rochas pesquisadas, foi feita uma tentativa no sentido de correlacionar os parâmetros/propriedades/índices obtidos. Os resultados das correlações encontram-se dispostos neste item.

Travertino fitado de Itaboraí

A Figura 5.91 apresenta a correlação entre a resistência à compressão simples e a densidade seca obtida com os resultados dos ensaios realizados nos corpos de prova retirados da amostra TRI-05. Verificou-se que a resistência à compressão simples aumenta com a elevação da densidade seca. Obteve-se uma boa correlação posto que o coeficiente de correlação foi de 0,9687.

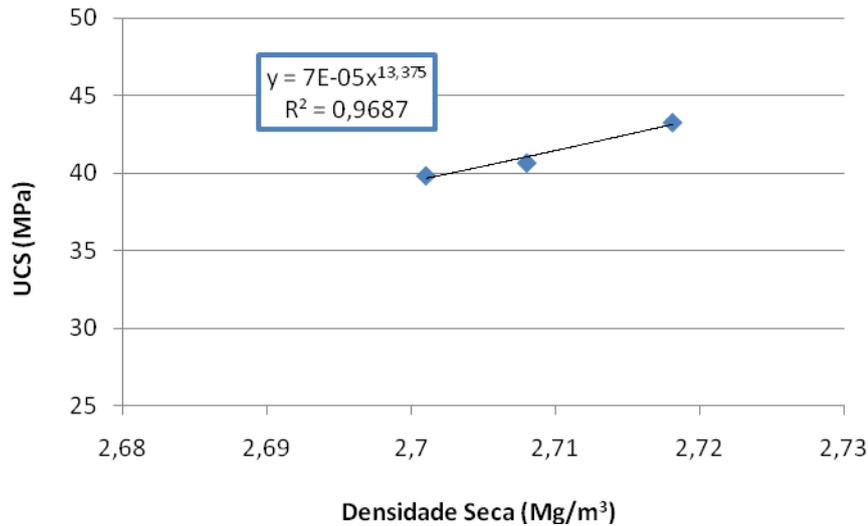


Figura 5.91 – Gráfico UCS *versus* densidade seca realizado nos corpos de prova TRI-05.

Uma boa correlação também foi observada entre a resistência à compressão simples e a porosidade, conforme ilustra a Figura 5.92. Verificou-se que materiais menos porosos apresentam uma maior resistência.

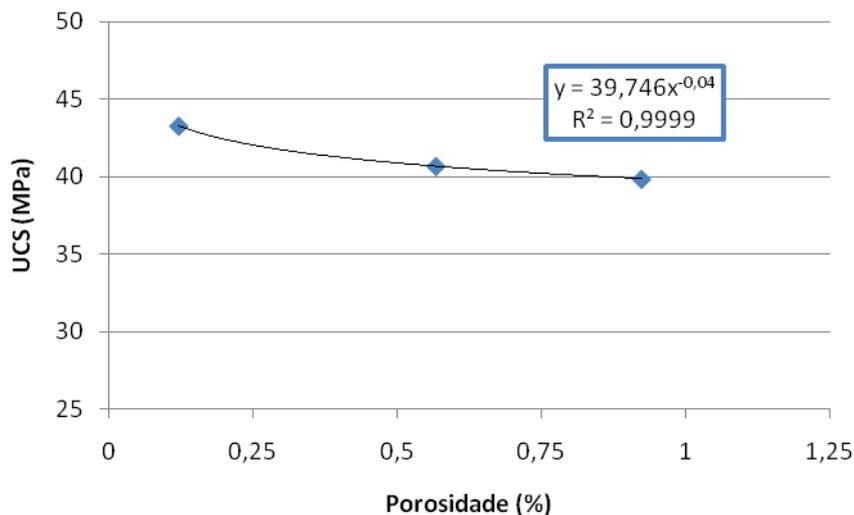


Figura 5.92 – Gráfico UCS *versus* porosidade realizado nos corpos de prova TRI-05.

Os resultados ilustrados nas Figuras 5.91 e 5.92 sugerem que os materiais, obtidos de uma mesma rocha fonte, que apresentam uma alta densidade possuem uma baixa porosidade e tendem a ter uma alta resistência.

Observou-se ainda uma boa correlação entre a resistência à compressão simples com a velocidade de ondas longitudinais (V_p), conforme mostra a Figura

5.93. Este fato já era esperado visto que os materiais que apresentam maiores velocidades são os mais compactos e os menos porosos.

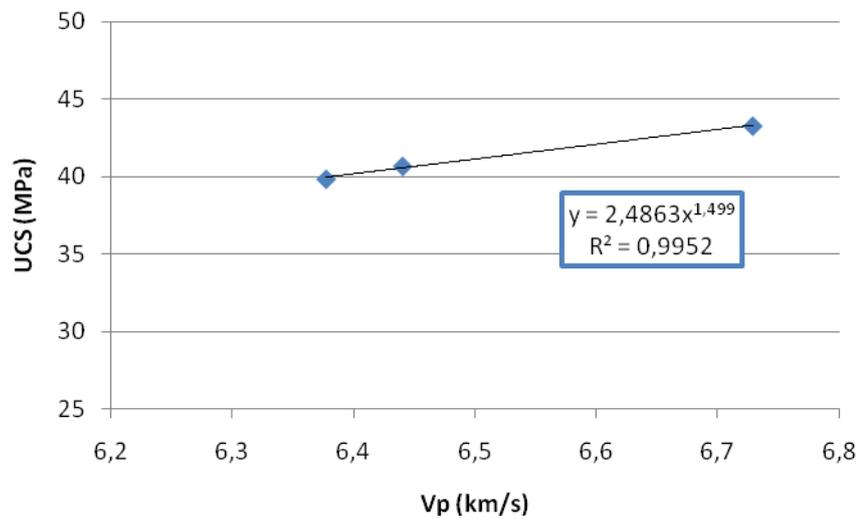


Figura 5.93 – Gráfico UCS versus Vp realizado nos corpos de prova TRI-05.

Em relação aos ensaios realizados para determinação da resistência, verificou-se uma boa correlação entre a resistência determinada pelo ensaio de compressão simples e o índice esclerométrico (R), conforme mostra a Figura 5.94. Este resultado comprova a praticidade do ensaio esclerométrico, um ensaio simples, rápido e que pode ser realizado *in situ*.

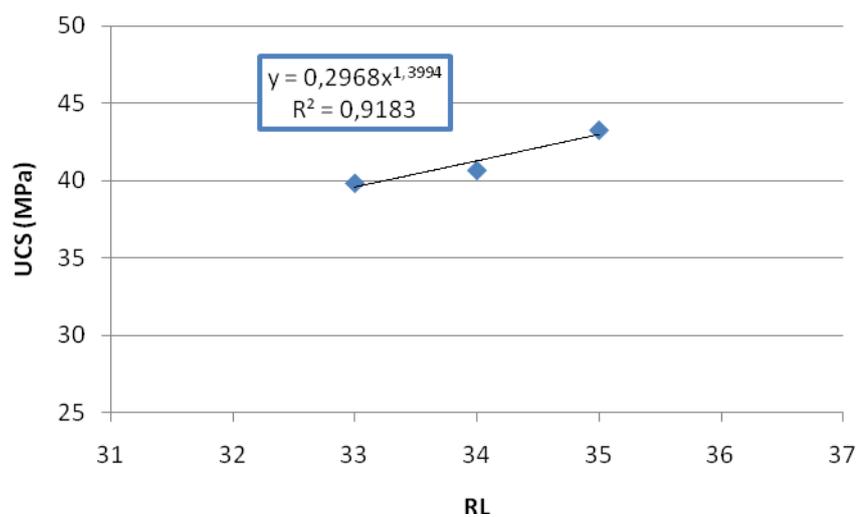


Figura 5.94 – Gráfico UCS versus índice esclerométrico (RL) realizado nos corpos de prova TRI-05.

Outro parâmetro determinado no ensaio de compressão simples é o módulo de Young estático (E_t). Neste trabalho observaram-se algumas correlações deste parâmetro com índices e propriedades obtidas em outros ensaios realizados.

A Figura 5.95 apresenta a boa correlação encontrada entre o módulo de Young estático (E_t) e a porosidade. Esta correlação sugere que os materiais mais compactos apresentam uma maior rigidez e uma maior porosidade.

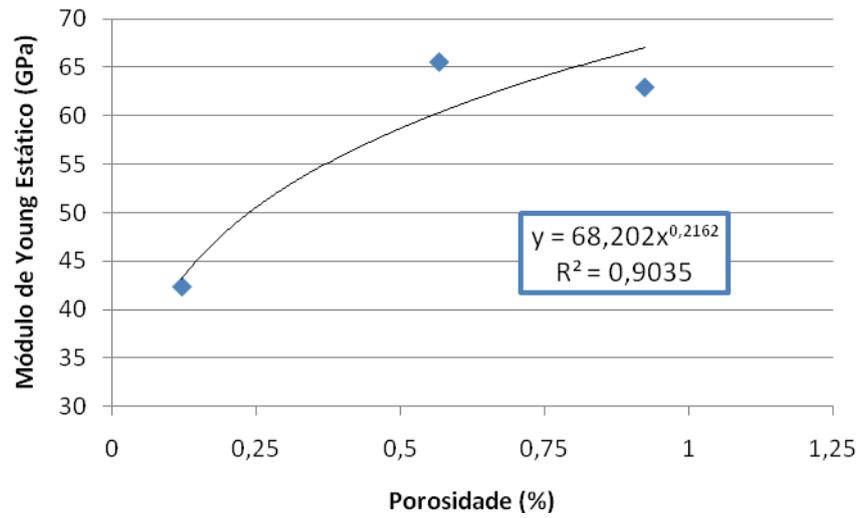


Figura 5. 95 – Gráfico E_t versus porosidade realizado nos corpos de prova TRI-05.

Observou-se ainda uma boa correlação entre os módulos estático, obtido do ensaio de compressão simples, e os módulos dinâmicos, obtido através do ensaio de propagação de ondas ultrassônicas, conforme mostra a Figura 5.96.

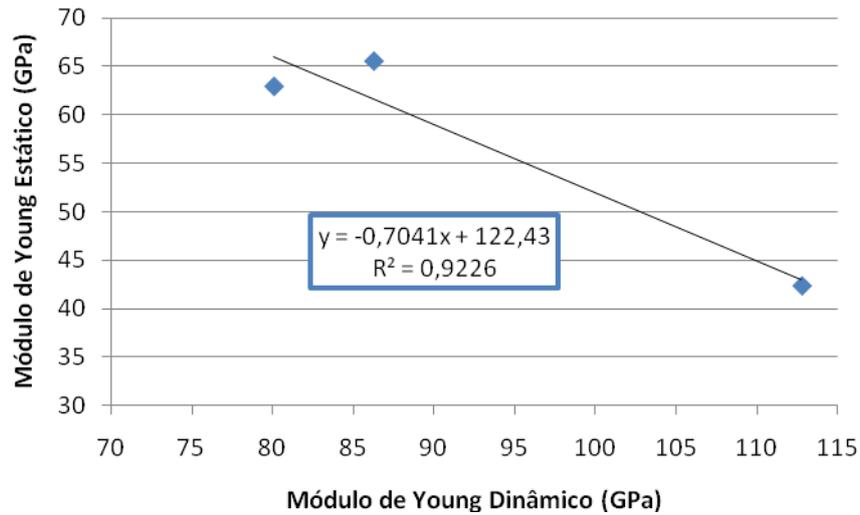


Figura 5.96 – Gráfico módulo de Young estático (Et) *versus* módulo de Young dinâmico (Ed) realizado nos corpos de prova TRI-05.

A correlação se mostrou viável para a velocidade de ondas longitudinais (Vp) e o módulo de Young estático (Et), conforme ilustra a Figura 5.97. Os resultados do programa experimental mostraram uma redução nos valores da velocidade de ondas longitudinais com o acréscimo do módulo de Young estático. Estes resultados contrastaram com o padrão relatado na literatura técnica (e.g., Yasar & Erdogan, (2004), Sayers, (2008), no qual o padrão é exatamente o oposto.

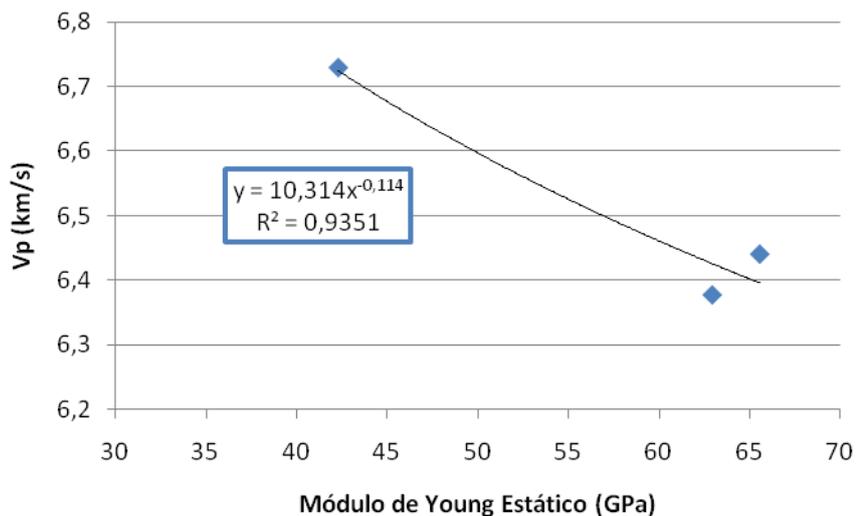


Figura 5.97 – Gráfico Vp *versus* módulo de Young estático (Et) realizado nos corpos de prova TRI-05.

Apesar dos resultados apresentados na Figura 5.97 contradizem o relatado na literatura, observou-se que os valores da velocidade de propagação estão coerentes posto que eles sofrem um acréscimo com o aumento da densidade, conforme pode ser visto na Figura 5.98, e diminuem com o aumento da porosidade, conforme pode ser visto na Figura 5.99.

Aliás, a boa correlação entre estes parâmetros já era esperada, pois quanto menor for a porosidade, maior será a densidade e maior será a velocidade de propagação, e por conseguinte maior será a resistência.

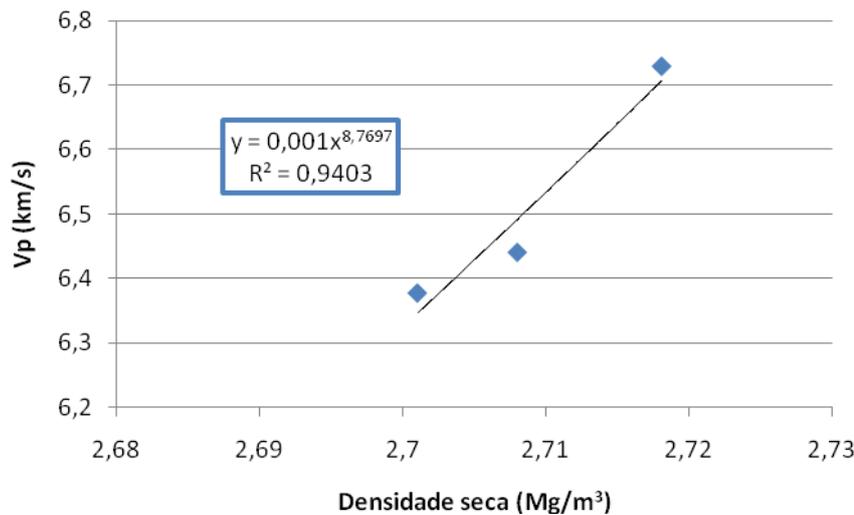


Figura 5.98 – Gráfico velocidade de ondas longitudinais (V_p) versus densidade aparente seca realizado nos corpos de prova TRI-05.

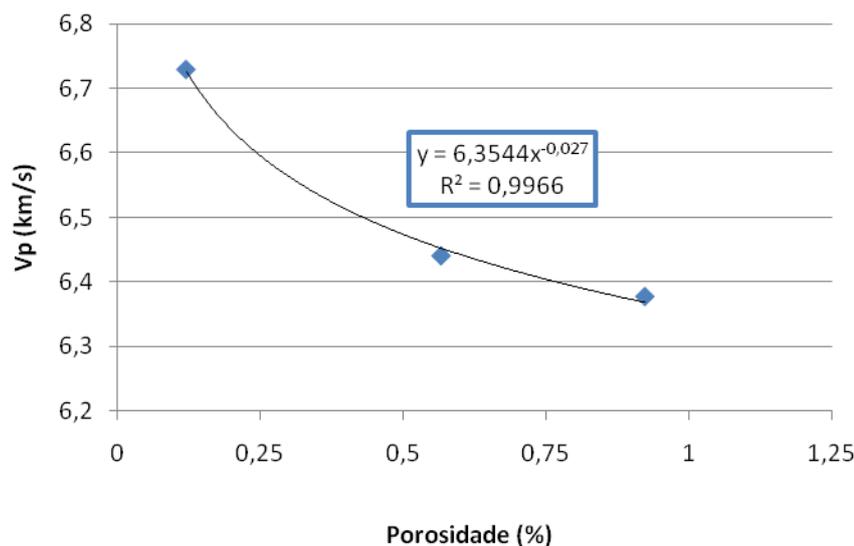


Figura 5.99 – Gráfico velocidade de ondas longitudinais (V_p) versus porosidade realizado nos corpos de prova TRI-05.

As Figuras 5.100 e 5.101 apresentam os gráficos de correlação das velocidades de ondas transversais 1 e 2 (V_{s1} e V_{s2}) com a porosidade. A velocidade de ondas transversais, V_{s1} , apresentou uma boa correlação com a porosidade. O mesmo não pode ser dito para a correlação entre a velocidade de ondas transversais, V_{s2} , e a porosidade. Como o coeficiente de correlação foi inferior a 0,7, pode-se para efeitos práticos sugerir que não há uma correlação entre os dois parâmetros. Uma provável explicação para o fato reside na heterogeneidade do material. Visto que a onda transversal V_{s2} se propaga perpendicularmente às laminações existentes nos corpos de provas não era de se esperar que houvesse uma correlação entre estes dois parâmetros.

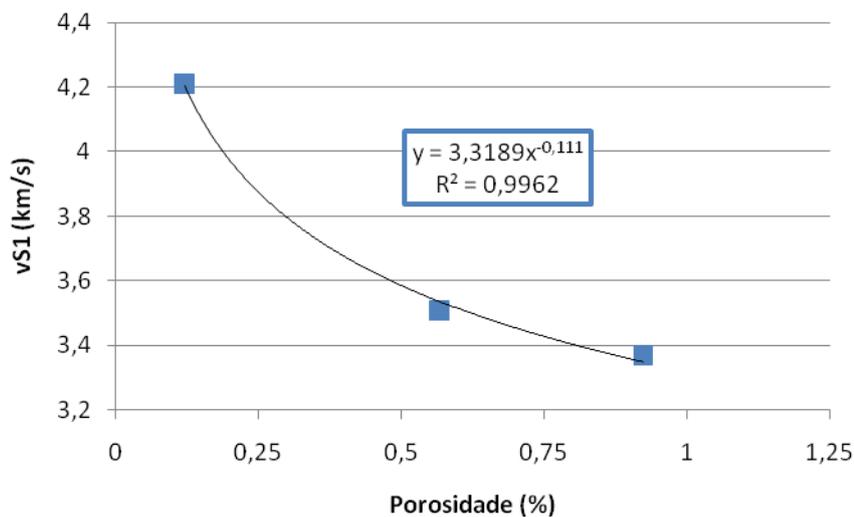


Figura 5.100 – Gráfico velocidade de ondas transversais (V_{s1}) versus porosidade realizado nos corpos de prova TRI-05.

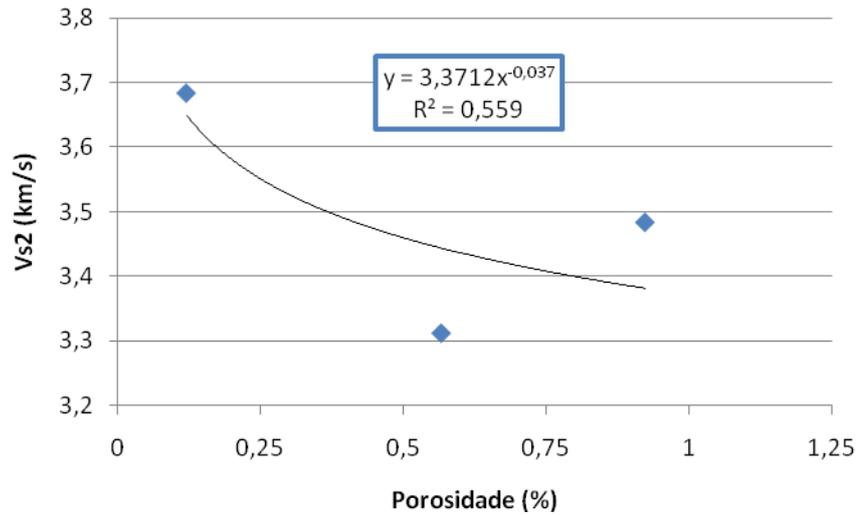


Figura 5.101 – Gráfico velocidade de ondas transversais (V_{s2}) *versus* porosidade realizado nos corpos de prova TRI-05.

Verificou-se também uma correlação entre os resultados obtidos nos ensaio de propagação de ondas ultrassônicas e o ensaio esclerométrico posto que a Figura 5.102 mostra que há uma boa correlação entre a velocidade de ondas longitudinais (V_p) e o índice esclerométrico (RL).

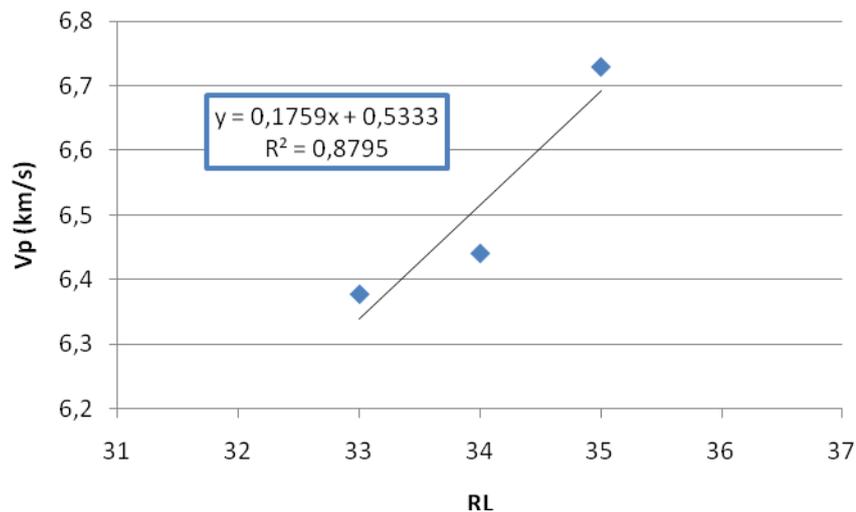


Figura 5.102 – Gráfico V_p *versus* índice esclerométrico (RL) realizado nos corpos de prova TRI-05.

Observou-se ainda uma boa correlação encontrada entre a porosidade e o índice esclerométrico (RL), conforme ilustra a Figura 5.103. Verifica-se que o índice esclerométrico cresce com a redução da porosidade do material.

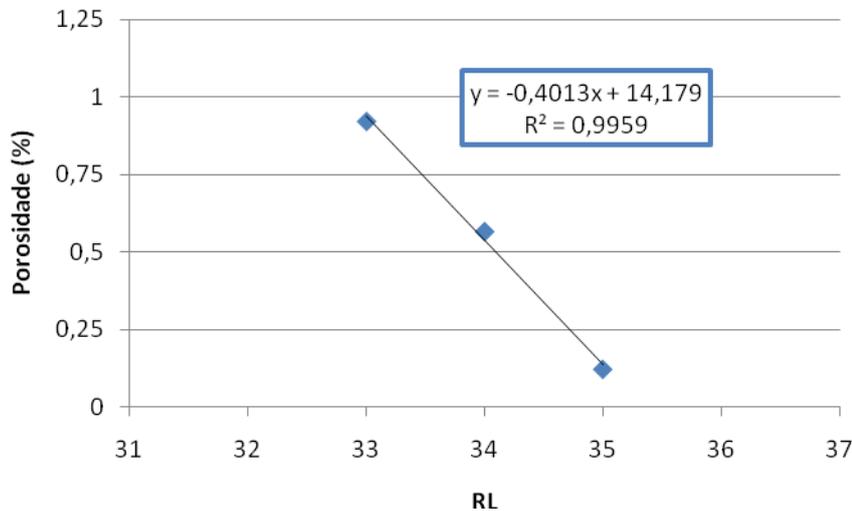


Figura 5.103 – Gráfico porosidade *versus* índice esclerométrico (RL) realizado nos corpos de prova TRI-05.

A densidade aparente seca e o índice esclerométrico (RL) também apresentaram uma boa correlação, como mostra a figura 5.104. Quanto maior a densidade do material rochoso, maior será o valor de seu índice esclerométrico.

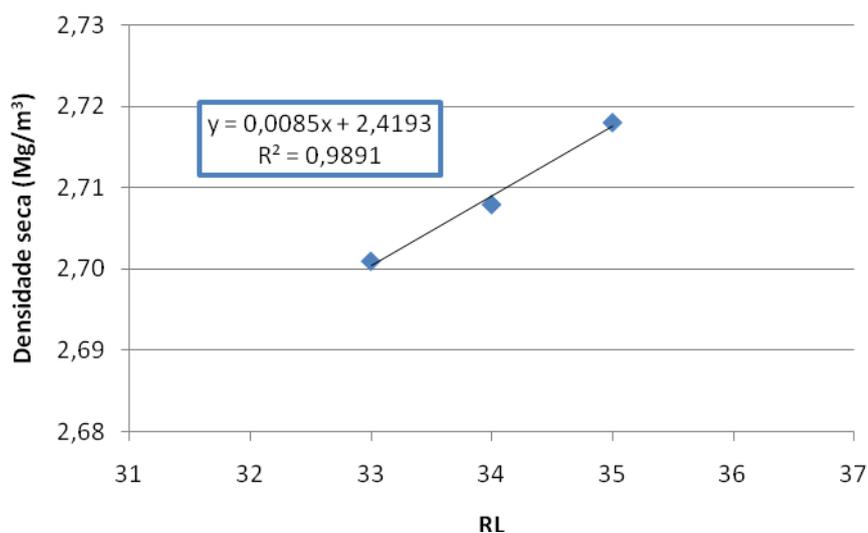


Figura 5.104 – Gráfico densidade *versus* índice esclerométrico (RL) realizado nos corpos de prova TRI-05.

Travertino romano e turco

A Figura 5.105 apresenta o gráfico de correlação da densidade aparente seca com o índice esclerométrico. Observou-se que quanto maior for a densidade seca do material, maior será o valor de seu índice esclerométrico.

Já a Figura 5.106 apresenta a correlação existente entre o índice esclerométrico e a porosidade. Verificou-se que quanto maior for a porosidade, menor será o valor do índice esclerométrico.

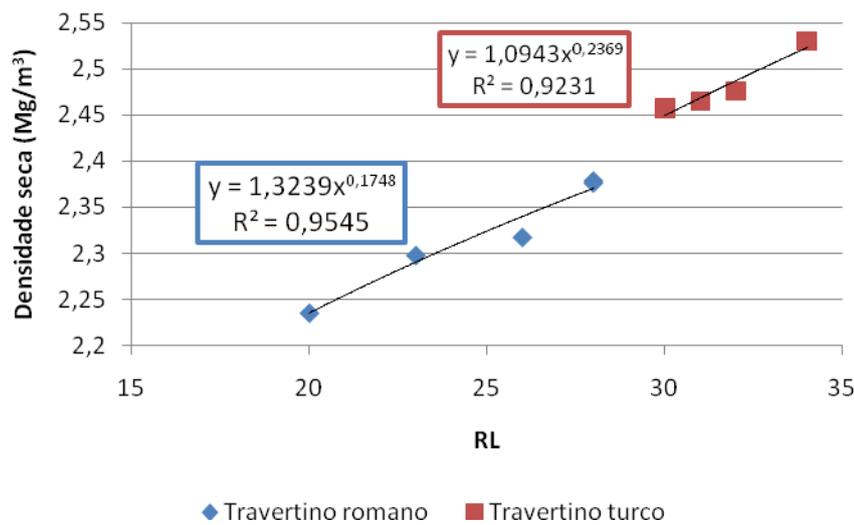


Figura 5. 105 – Gráfico densidade *versus* índice esclerométrico (RL) realizado nas placas de travertino romano e turco.

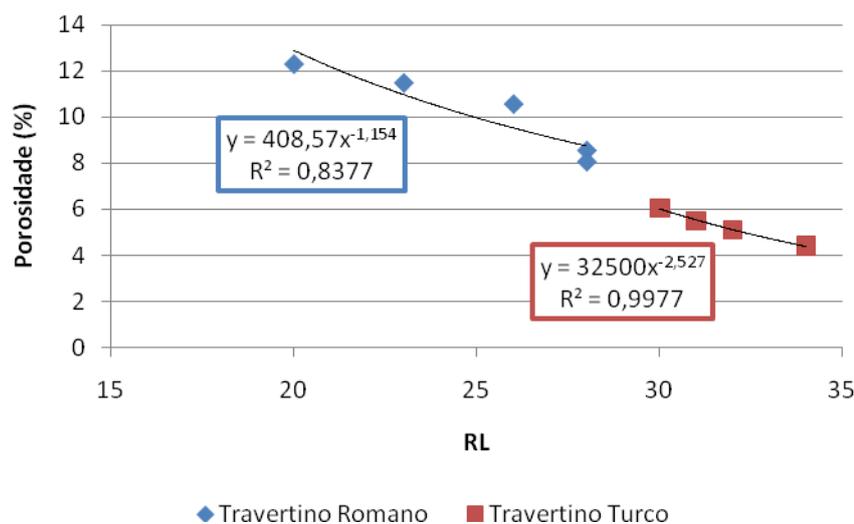


Figura 5.106 – Gráfico porosidade *versus* índice esclerométrico (RL) realizado nas placas de travertino romano e turco.

5.6.1. Correlações dos valores encontrados na literatura com os resultados encontrados nesta pesquisa

Yasar & Erdogan (2004) correlacionaram os valores da velocidade de ondas longitudinais (V_p) com a densidade (ρ), resistência à compressão simples (UCS) e o módulo de Young (E) em calcários e dolomitos da Turquia. Verifica-se na Figura 5.107 que os corpos de prova dos carbonatos estudados por Yasar & Erdogan (*op. cit.*) apresentaram velocidade de ondas longitudinais (V_p) bem menores que os corpos de prova dos travertinos de Itaboraí. A diferença entre os valores pode estar relacionada ao fato do travertino de Itaboraí possuir uma menor porosidade.

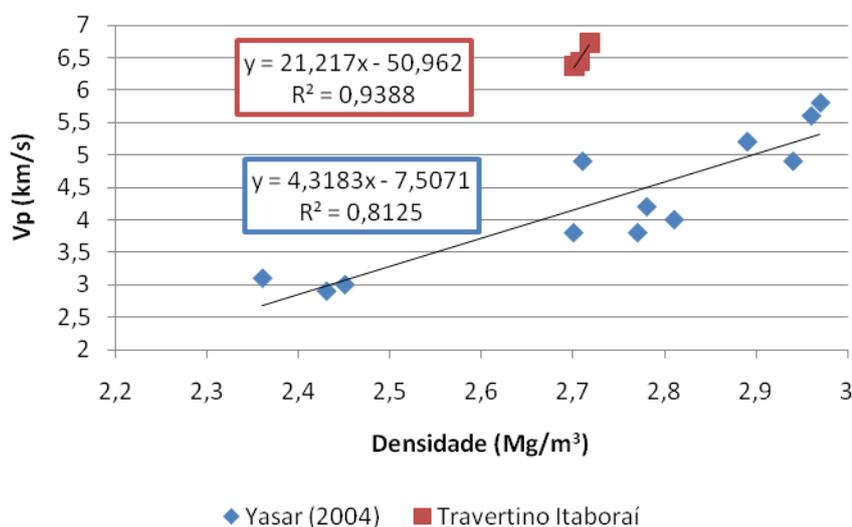


Figura 5.107 – Gráfico de correlação da velocidade de ondas longitudinais (V_p) com a densidade seca.

A diferença entre os valores da velocidade de propagação das ondas também se fez notar quando foi realizada uma comparação entre estes valores e a resistência à compressão simples dos dois materiais. A Figura 5.108 mostra que os corpos de prova de travertinos de Itaboraí que apresentaram a mesma resistência dos calcários e dolomitos turcos possuíam maiores velocidades de propagação de onda.

Em relação à correlação entre a velocidade de propagação das ondas e o módulo de Young, verificou-se dois comportamentos distintos conforme mostra a Figura 5.109. Nos calcários e dolomitos estudados por Yasar & Erdogan (2004),

a velocidade de propagação das ondas cresce com a elevação do módulo de Young. Já nos travertinos de Itaboraí a velocidade de propagação das ondas diminui com a elevação do módulo de Young.

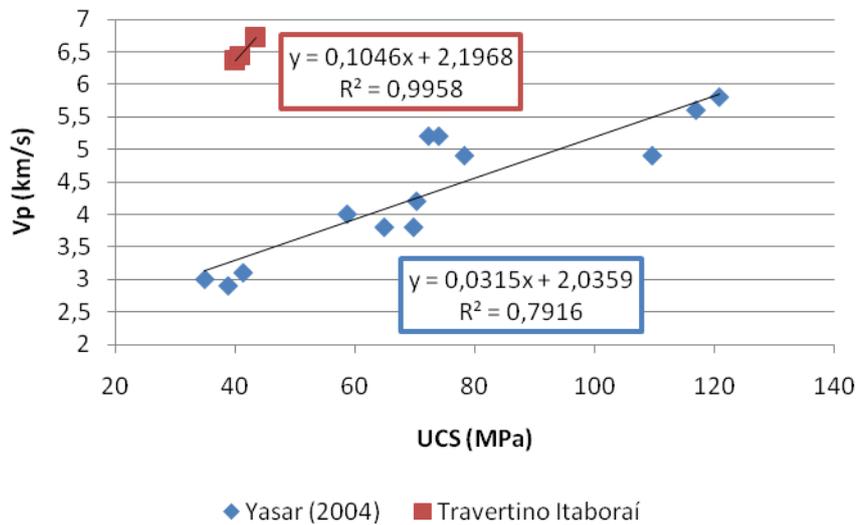


Figura 5.108 – Gráfico de correlação da velocidade de ondas longitudinais (V_p) com a resistência à compressão simples.

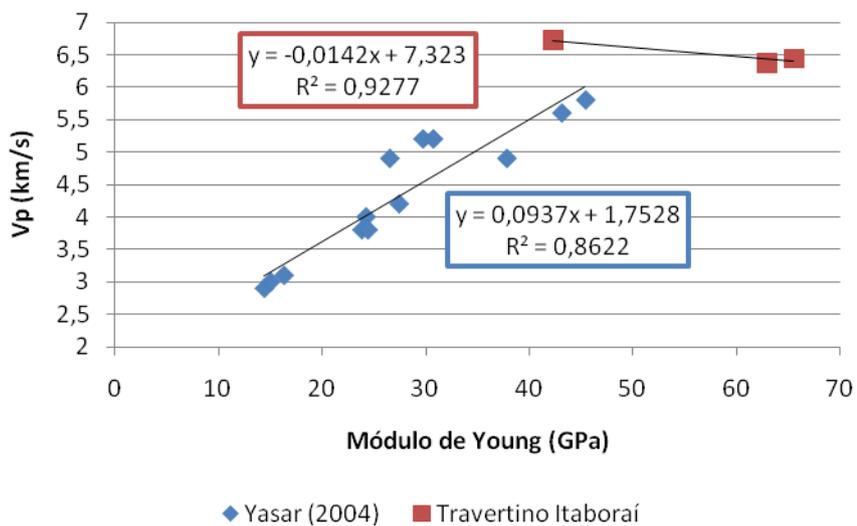


Figura 5.109 – Gráfico de correlação da velocidade de ondas longitudinais (V_p) com o módulo de Young (E).

Török & Vásárhelyi (2010) determinaram a densidade, velocidades de ondas ultrassônicas (V_p), porosidade efetiva e a resistência à compressão

simples em corpos de prova secos e saturados de dois diferentes tipos de travertinos húngaros: um com estrutura laminada e outro com estrutura maciça.

A Figura 5.110 mostra que os travertinos de Itaboraí apresentam maiores valores de velocidade de ondas longitudinais por apresentarem valores de densidade seca mais elevados do que os travertinos estudados pelos autores.

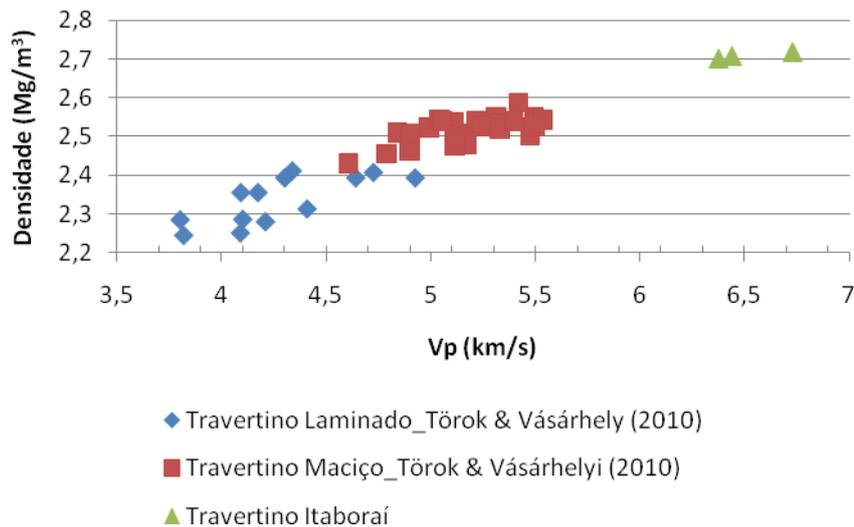


Figura 5.110 – Gráfico de correlação da densidade aparente seca com a velocidade de ondas longitudinais (Vp).

Este comportamento se reflete na comparação entre as correlações de porosidade *versus* velocidade de ondas longitudinais, conforme pode ser visto na Figura 5.111.

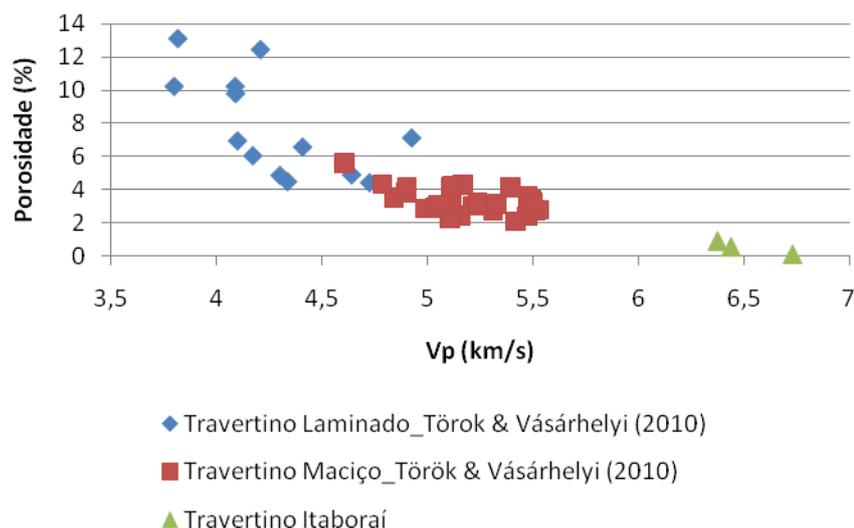


Figura 5.111 – Gráfico de correlação da porosidade com a velocidade de ondas longitudinais (Vp).

Devido aos corpos de prova de travertinos de Itaboraí exibirem maior densidade seca e menor porosidade que os corpos de prova de travertinos da Hungria é de se esperar que a resistência a compressão simples seja mais elevada para os corpos de prova de travertinos de Itaboraí. No entanto, conforme pode ser visto nas Figuras 5.112 e 5.113, este não é o caso. As Figuras mostram que a resistência dos travertinos maciços é bem mais elevada, e que a resistência dos travertinos laminados é similar.

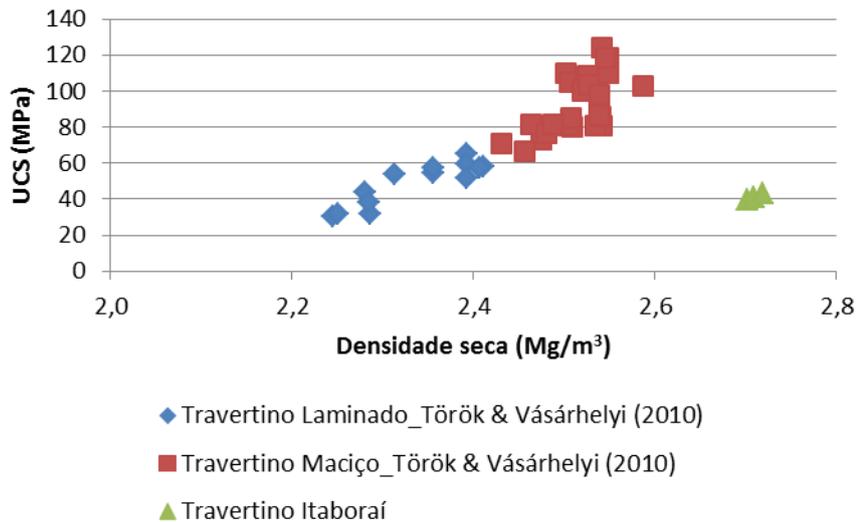


Figura 5.112 – Gráfico de correlação da resistência à compressão simples (UCS) com a densidade aparente seca.

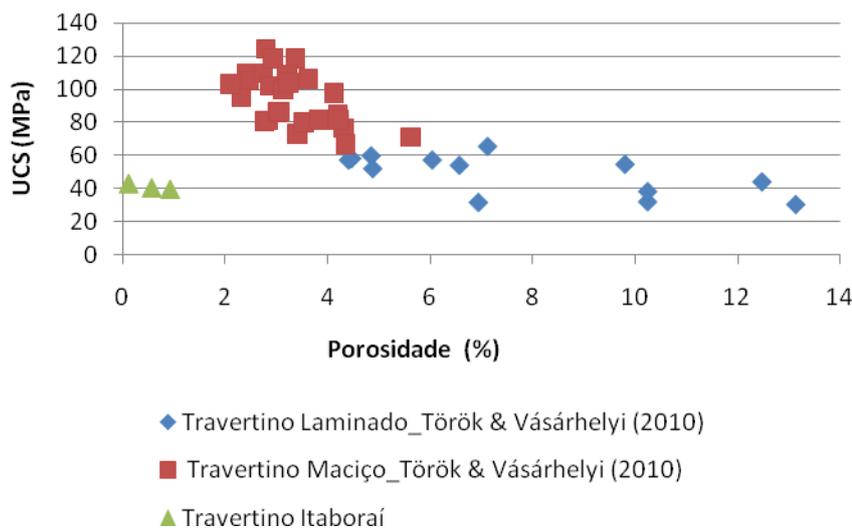


Figura 5.113 – Gráfico de correlação da resistência à compressão simples (UCS) com a porosidade.

Os resultados apresentados neste capítulo mostram que a velocidade de propagação de ondas é função da densidade e da porosidade. Quanto maior a densidade e menor a porosidade de um corpo de prova maior será a velocidade de propagação de ondas. Este comportamento se reflete nos dados mostrados na Figura 5.114, onde os valores de velocidade de propagação de ondas dos corpos de prova de travertino de Itaboraí apresentaram-se superiores aos dos travertinos laminados embora tenham resistência semelhantes.

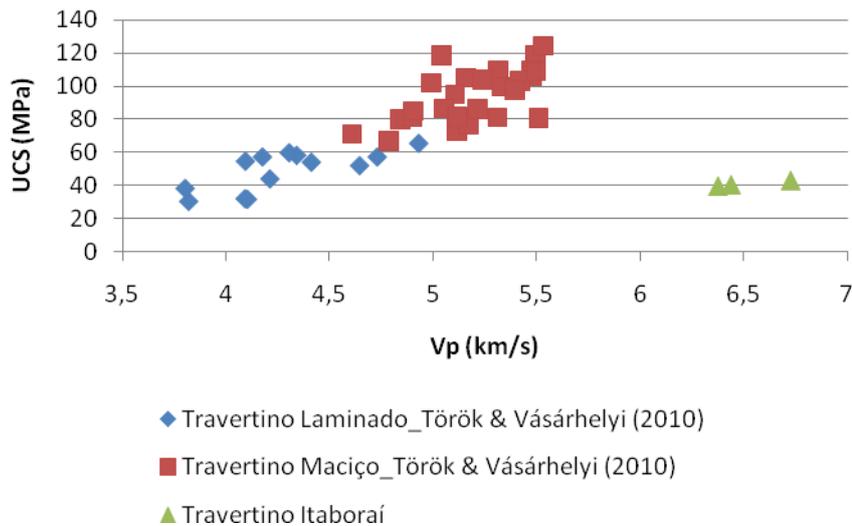


Figura 5.114 – Gráfico de correlação da resistência à compressão simples (UCS) com a velocidade de ondas longitudinais (V_p).

Palchik (2010) estudou o comportamento mecânico de 11 tipos diferentes de rochas carbonáticas, compreendendo dolomitos, calcários e chalk. Estas rochas foram coletadas em diferentes regiões de Israel. Neste trabalho foram realizadas correlações entre o módulo de elasticidade (E), a resistência à compressão simples (σ_c) e a densidade (ρ).

Notam-se nas Figuras 5.115, 5.116 e 5.117 que o autor não obteve boas correlações dos parâmetros estudados. Já os gráficos de correlação dos parâmetros obtidos nos travertinos de Itaboraí apresentaram bons coeficientes de correlação.

Verifica-se na Figura 5.115 que embora os corpos de prova dos travertinos de Itaboraí possuam uma maior densidade a sua resistência à compressão não é superior. Aliás, o valor da resistência dos corpos de prova dos travertinos de Itaboraí é somente semelhante a média dos valores determinados nas rochas

israelenses. Este mesmo comportamento foi evidenciado nas correlações entre resistência à compressão simples e porosidade ilustradas na Figura 5.116.

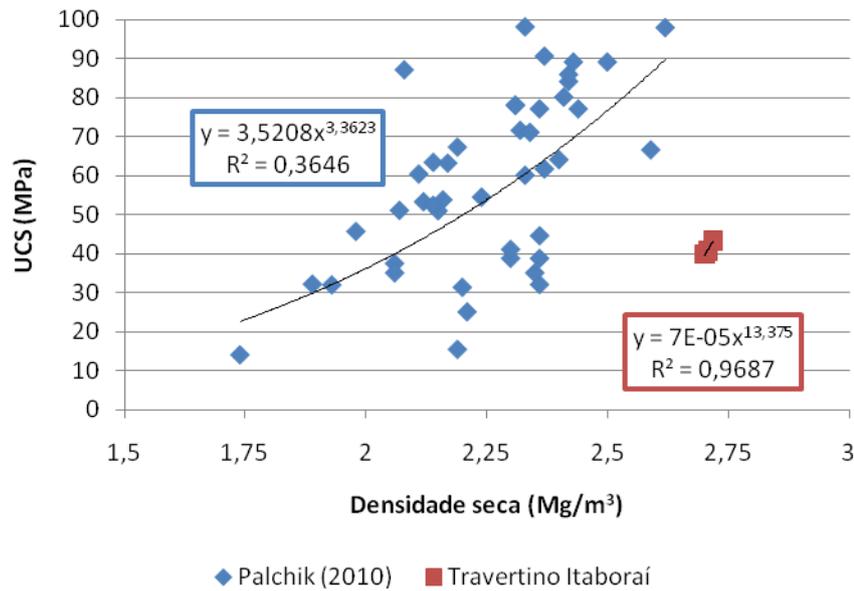


Figura 5.115 – Gráfico de correlação da resistência à compressão simples (UCS) com a densidade aparente seca.

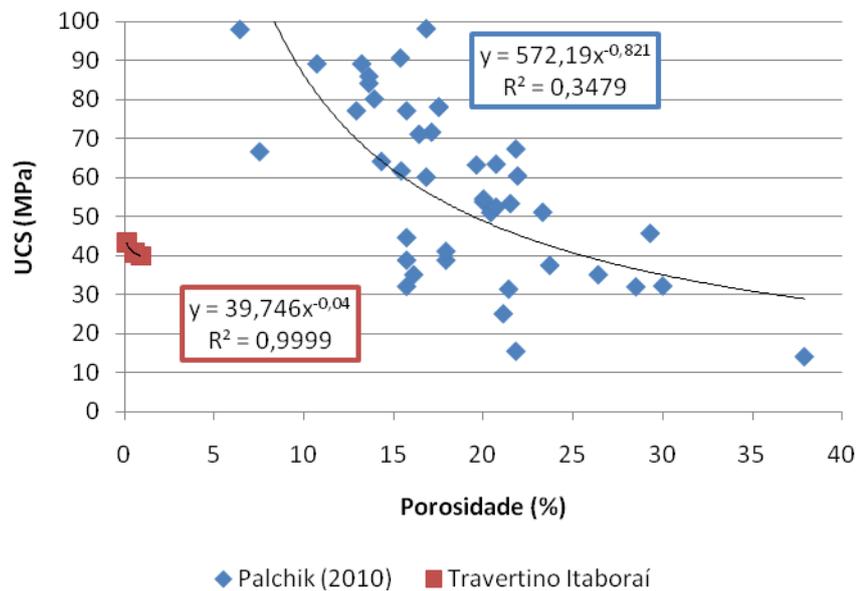


Figura 5.116 – Gráfico de correlação da resistência à compressão simples (UCS) com a porosidade.

A Figura 5.117 apresenta a comparação entre as correlações do módulo de Young com a porosidade obtidas para os diferentes de rochas carbonáticas, compreendendo dolomitos, calcários e chalk, e os travertinos de Itaboraí. Nas rochas estudadas por Palchik (2010), verificou-se que os valores do módulo de Young decresciam com o aumento da porosidade. Já nos corpos de prova de travertinos de Itaboraí verificou-se justamente o contrário.

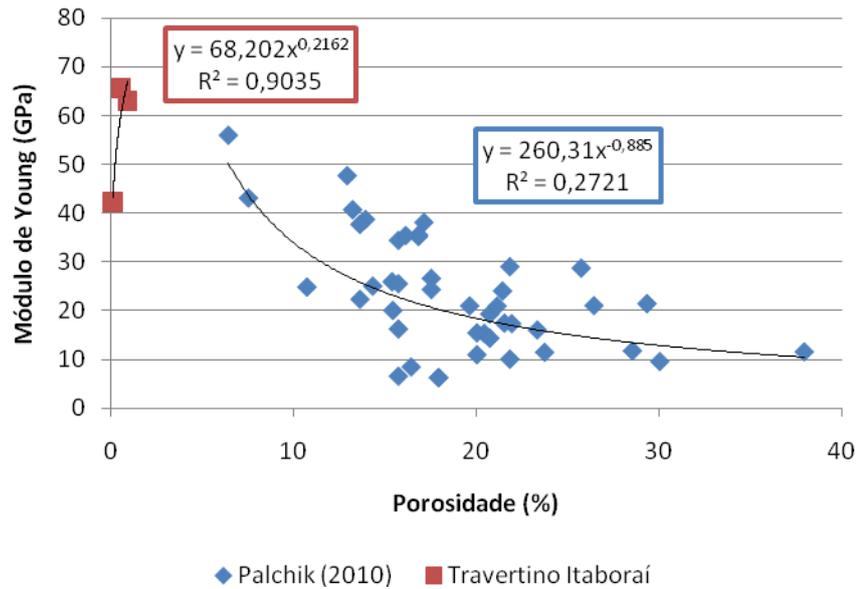


Figura 5. 117 – Gráfico de correlação do módulo de Young (Et) com a porosidade