

5 Resultados

Este capítulo contém os resultados obtidos nos ensaios e análises efetuadas em cada uma das etapas do desenvolvimento da presente pesquisa de dissertação.

5.1. Composição Química

As análises de Fluorescência de Raios-X (Figura 5.1) e química elementar mostraram a presença de elevados teores de Ca, C e O na composição da rocha, com traços de K, S, Sr, H, Fe e N, como se mostra na Tabela 5.1. Não tendo sido disponibilizada informação relativa à margem de erro do equipamento, admite-se que esses traços possam estar dentro desse intervalo.

Tabela 5.1 Composição química do travertino Romano.

Elemento	M1 %m/m	M 2 %m/m	M 3 %m/m
Ca	47,950	48,839	47,109
C	12,838	12,633	13,001
O	38,514	37,899	39,003
K	0,196	0,000	0,186
S	0,167	0,185	0,143
Sr	0,092	0,115	0,103
H	0,155	0,136	0,177
Fe	0,033	0,170	0,170
N	0,055	0,022	0,109
Total	100	100	100

Considerando que não foi achada a presença de Mg na composição química, a rocha pode ser classificada como um calcário calcítico, de acordo com a classificação de rochas carbonáticas quanto à razão MgO/CaO (Domingues, 2011).

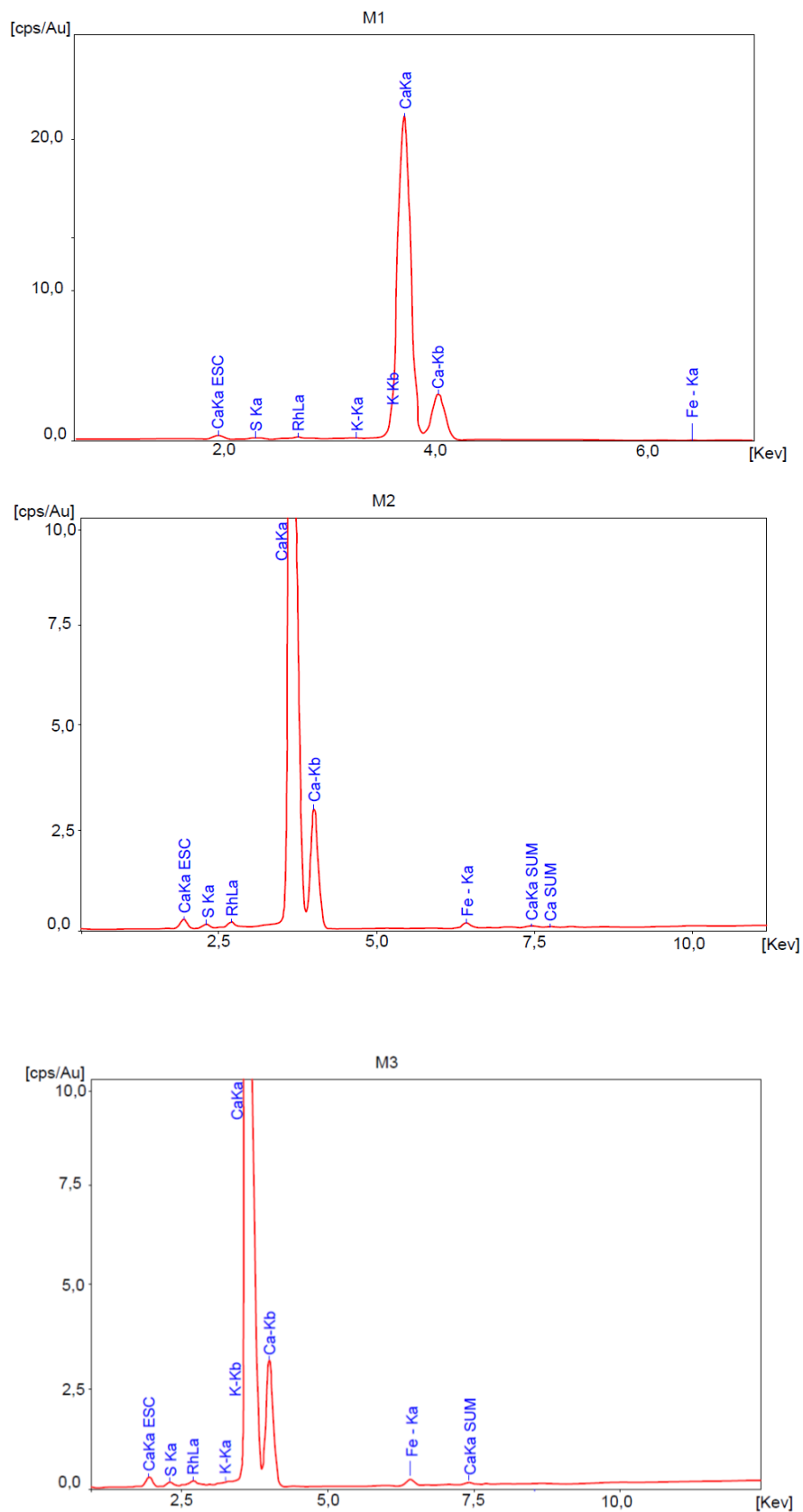


Figura 5.1 Espectros da Fluorescência de raios-X da amostra M1, M2, M3.

5.2. Análise Mineralógica

Os resultados das análises de difratometria mostrados na Figura 5.2 indicaram que a mineralogia do travertino é composta completamente por calcita (Tabela 5.2). Não obstante, na amostra M1 se sinalizou 0,128% de quartzo, o qual indica a presença de sílica isolada, mas não representativa, já que nas análises químicas não se tem percentagens de Si na sua composição química.

Tabela 5.2 Resultados da difração de raios-X, mineralogia do travertino.

	M1 (%)	M2 (%)	M3 (%)
Calcita	99,872	100	100
Quartzo	0,128		

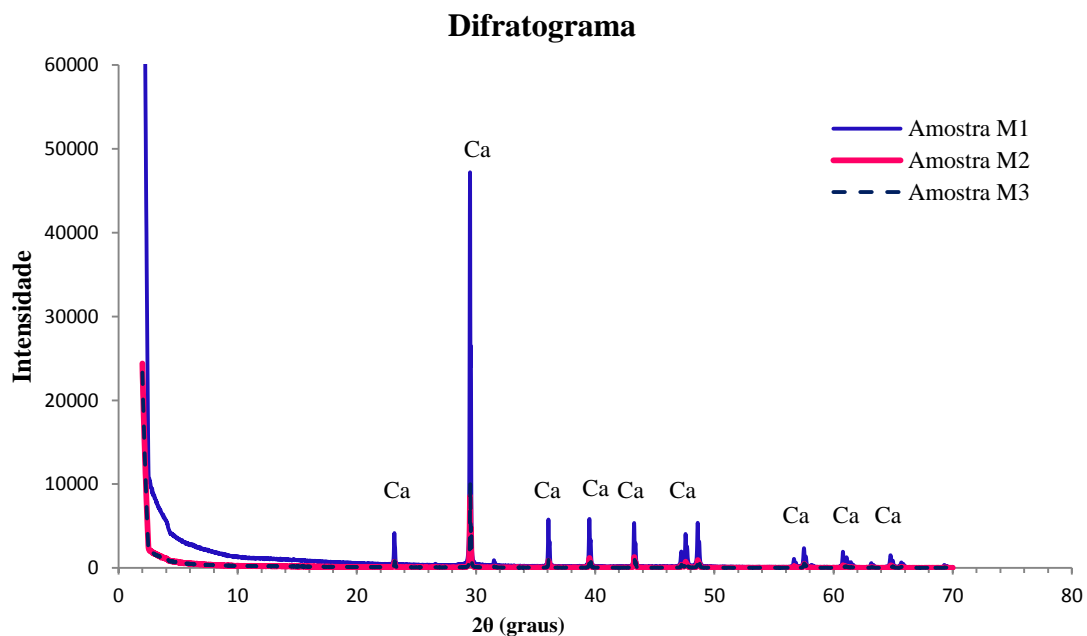


Figura 5.2 Difratograma das amostras de travertino analisadas (calcita: Ca).

5.3. Análise Macroscópica

Esta análise foi realizada nas amostras de mão, observando-se a olho nu que a rocha é uma rocha dura, não friável, de cor bege claro, com textura densa, oolítica e porosa. A avaliação visual da porosidade mostra que esta encontra-se

distribuída em zonas de alta e baixa porosidade no intervalo de 5% a 30%, sendo principalmente do tipo vugular (vuggy), fenestral e estrutura de crescimento (perpendiculares à deposição), com tamanhos variados desde 0,1 mm a vários centímetros (macroporos), de formas alargadas, esferóide, mas geralmente irregulares (Figura 5.3).



Figura 5.3 Porosidade Vugular, fenestral e framework com dimensões milimétricas a centimétrica, se observa a pouca interconectividade dos poros tipo vugular.

A rocha apresentou uma dureza entre 3 – 3,5 na escala de Mohs e reagiu fortemente ao ácido clorídrico frio (na proporção de uma parte de ácido para dez partes de água), o que confirma a presença de calcita, sendo este o mineral principal. Como mineral acessório apresentou ferro na forma de óxido de ferro. Além disso, a rocha mostrou ter uma fratura irregular e um brilho não metálico característico.

5.4. Análise com Microscópio Óptico

As imagens obtidas da análise microscópica indicam a presença de calcita microcristalina ou micrita e calcita espática com cristais isométricos (Figura 5.4), esta última principalmente na superfície dos poros e junto às estruturas micríticas, apresentando um calcário com contato difuso entre estes componentes.

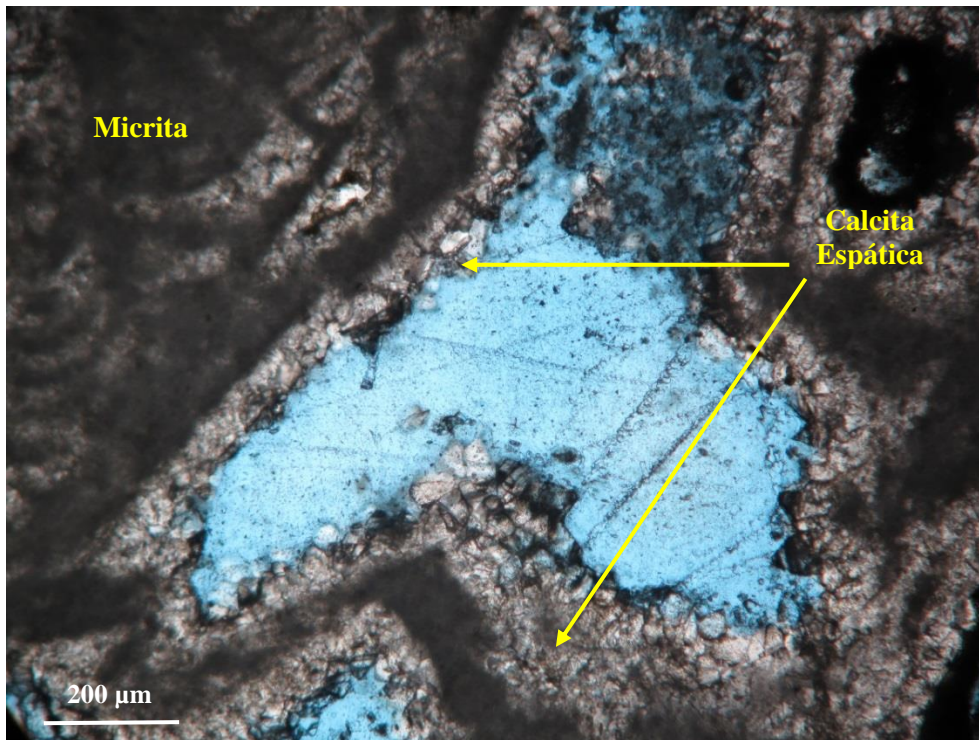


Figura 5.4 Poro mostrando a calcita espática na superfície, e Micrita de uma cor cinza escuro.

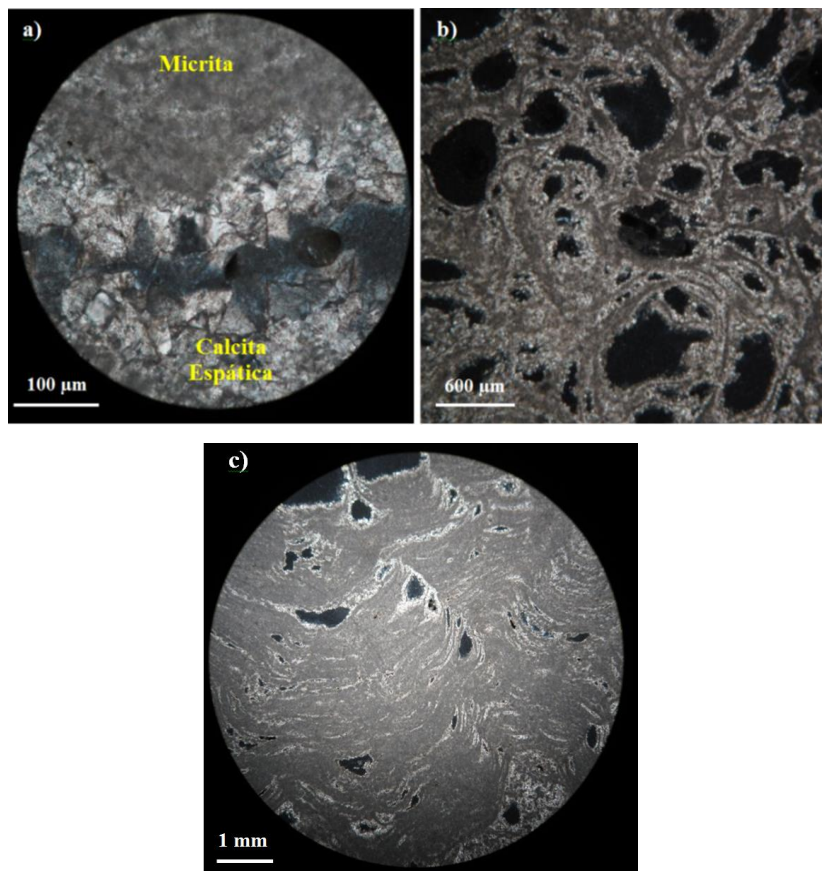


Figura 5.5 (a) Garganta com calcita espática de cristais isométricos e Micrita com uma textura microcristalina de aspecto grumoso. (b), (c) Calcita microcristalina na forma de fibras ou de aspecto plumoso.

A Micrita foi observada geralmente com uma textura afanítica² de aspecto grumoso e cor gris escuro (Figura 5.5a), às vezes na forma de lamelas mostrando uma textura fibrosa às vezes com aspecto plumoso, mas sempre acompanhada da calcita espática, como se mostra na Figura 5.5b, c. Nota-se também que os cristais de calcita se apresentaram na forma escalenoédrica (Figura 5.5a, Figura 5.6). É importante destacar que não foi observada nenhuma forma de grãos aloquímicos na rocha, isto indica que a formação do travertino foi realizada por precipitação química com pouco ou nenhum transporte significativo.

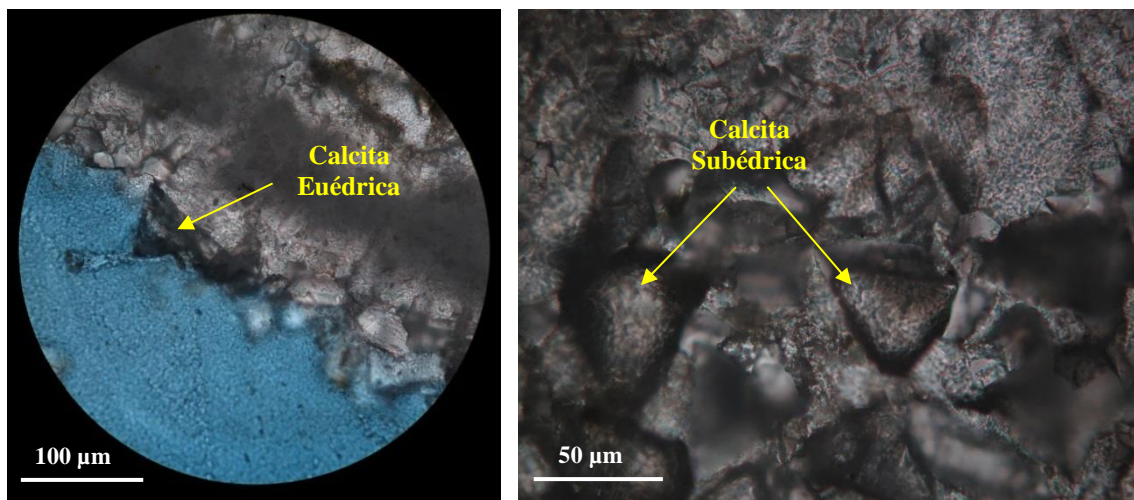


Figura 5.6 Calcita cristalizada na superfície dos poros.

5.5. Análise com Microscópio Eletrônico de Varredura

As imagens do MEV e EDS confirmam que a rocha é composta principalmente por carbonato de cálcio; na forma cristalina de grãos não cimentados, ou seja, sem a presença de cimento entre os cristais da calcita como se mostra na Figura 5.7 e no apêndice I.

No EDS também foram registrados traços de Na, Mg, K, Si, Al e Fe, mas em pontos isolados, como é observado na Figura 5.8, onde o ponto 2 corresponderia à ocorrência de um silicato de sódio e alumínio. Na área 1 o EDS só registrou componentes do carbonato de cálcio.

² Textura afanítica é aquela onde os grãos ou cristais da rocha não podem ser reconhecidos facilmente com instrumentos ópticos, apresentado geralmente um aspeto homogêneo.

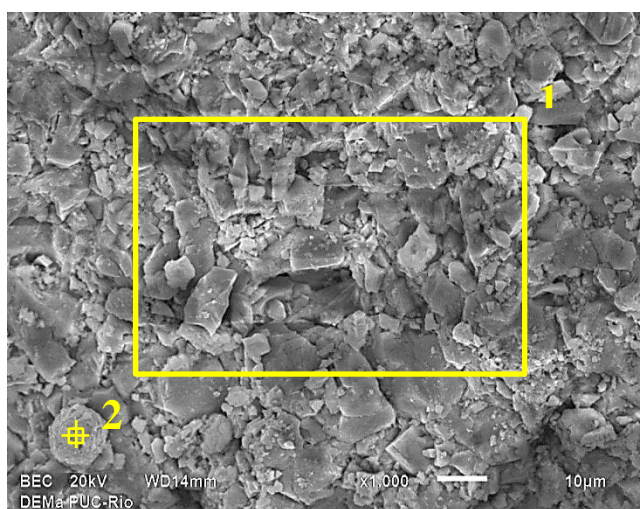
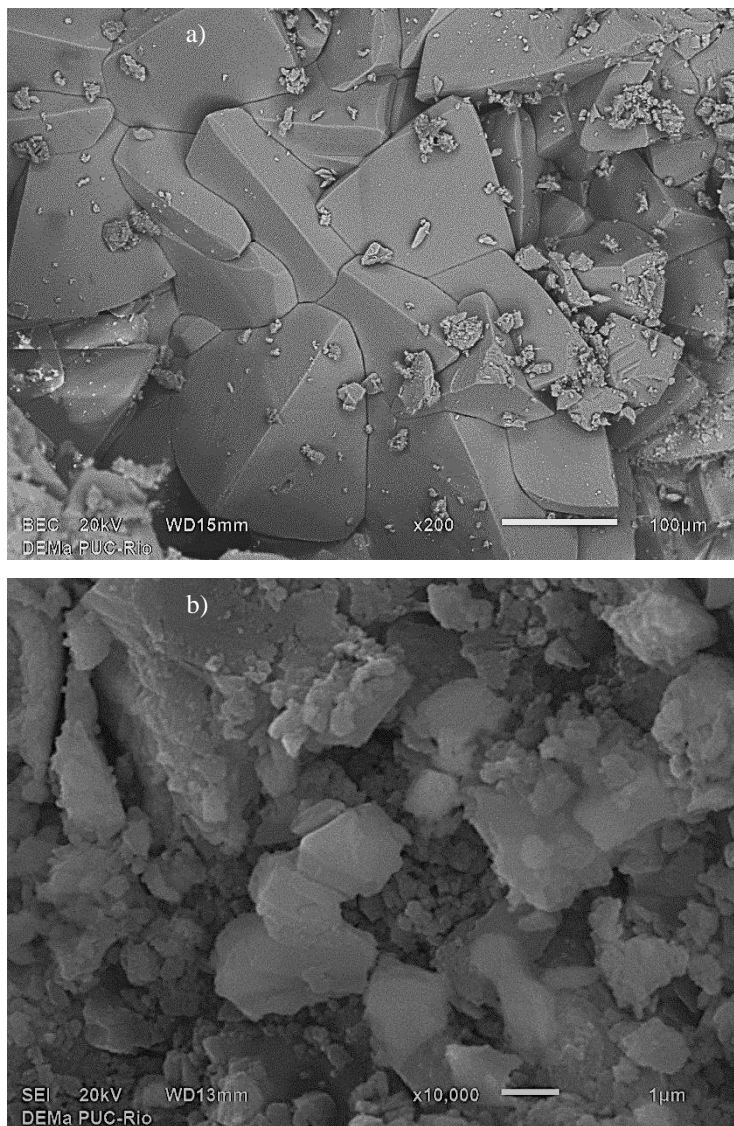


Figura 5.8 Área (1) e ponto (2) analisados no EDS

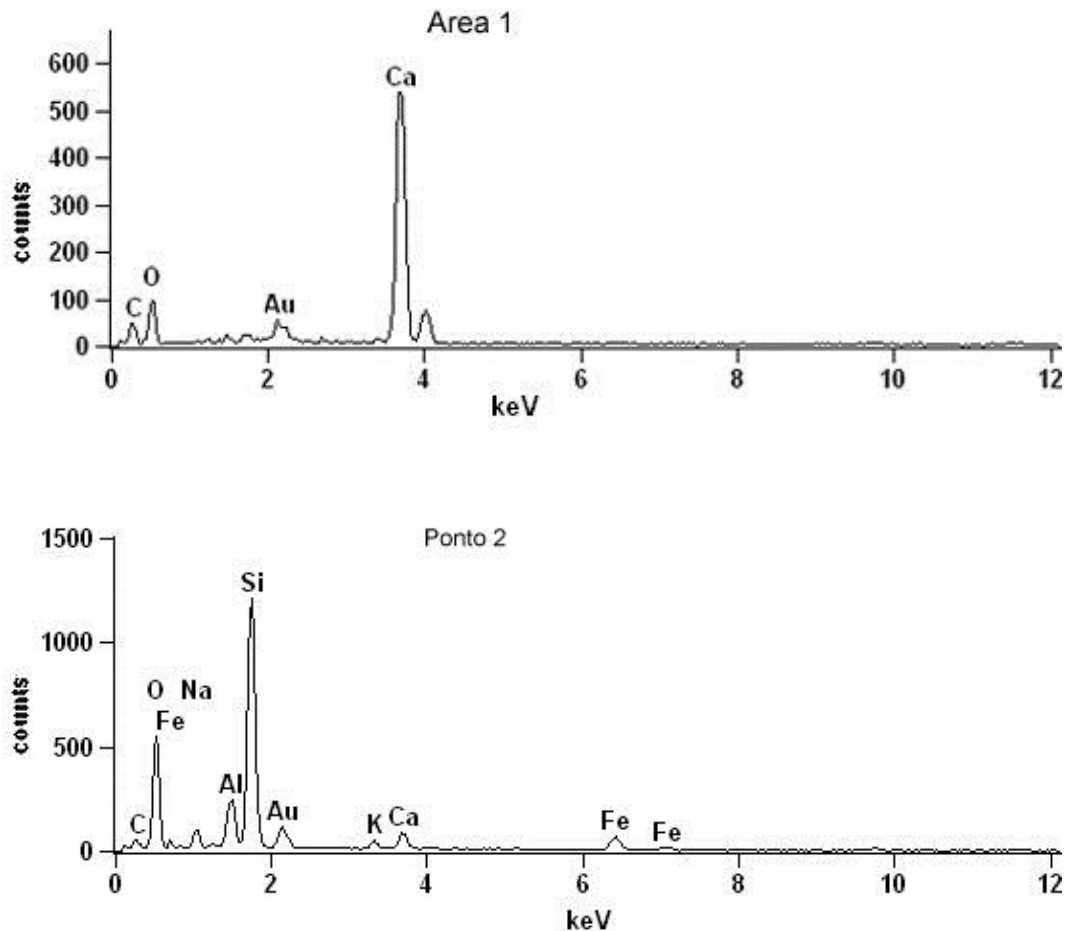


Figura 5.9 Resultados do EDS mostrando a distinta composição do travertino

De acordo com as feições sedimentares observadas nestas análises, são definidas as fácies seguintes:

- A fácies massiva, formada por camadas com largura de 0,5 a 5 cm, compactas e baixa porosidade de aproximadamente 5%.
- A fácies bandeada com camadas de 0,5 a 6 cm e caracterizada por zonas de porosidade a 6% até aproximadamente 30 %.

Estas fácies no mesmo corpo de prova mostram que a rocha tem fortes mudanças do valor da porosidade, pela presença de fácies bandeadas com elevada porosidade junto a fácies massivas.

A partir destas análises também foram definidas três texturas: a textura micrítica com cristais menores a 2 μm (Figura 5.7 b); textura cristalina com cristais de calcita isométrica com dimensões maiores a 2 μm (Figura 5.7 a); textura fibrosa, formada por micrita, no modo de fibras formando uma textura fibrosa ou com aspecto plumoso (Figura 5.5 b, c).



Figura 5.10 Fácies massiva e bandeada presentes no travertino.

De acordo aos resultados o travertino Romano é um travertino Termal Inorgânico (Pentecost & Viles, 1994), e considerando sua natureza carbonática este travertino é uma Dismicrita Espática (Folk, 1962) ou *Mud Mound Cement reef* (Riding, 2002).

5.6. Estrutura porosa

A identificação e descrição a diferente escala da estrutura porosa é efetuada nesta seção.

5.6.1. Análise com Microscópio Óptico

Figura 5.11 mostra poros e garganta de geometria irregular, observadas no microscópio óptico, definindo a estrutura porosa da rocha.

Porosidade intercrystalina foi localizada perto da zona de calcita espática, mas aparentemente não estão conectados, como se mostra na Figura 5.11 b.

Na Figura 5.12 se observam poros de geometria irregular, distribuídos de forma dispersa e elevada densidade, distinguindo-se a porosidade com tamanhos maiores a 100 micras do tipo fenestral e vugular com pouca conectividade, como

se observa na Figura 5.12 e Figura 5.13, onde as gargantas que unem os poros apresentaram diferentes larguras que variam desde dezenas até alguns centos de micras.

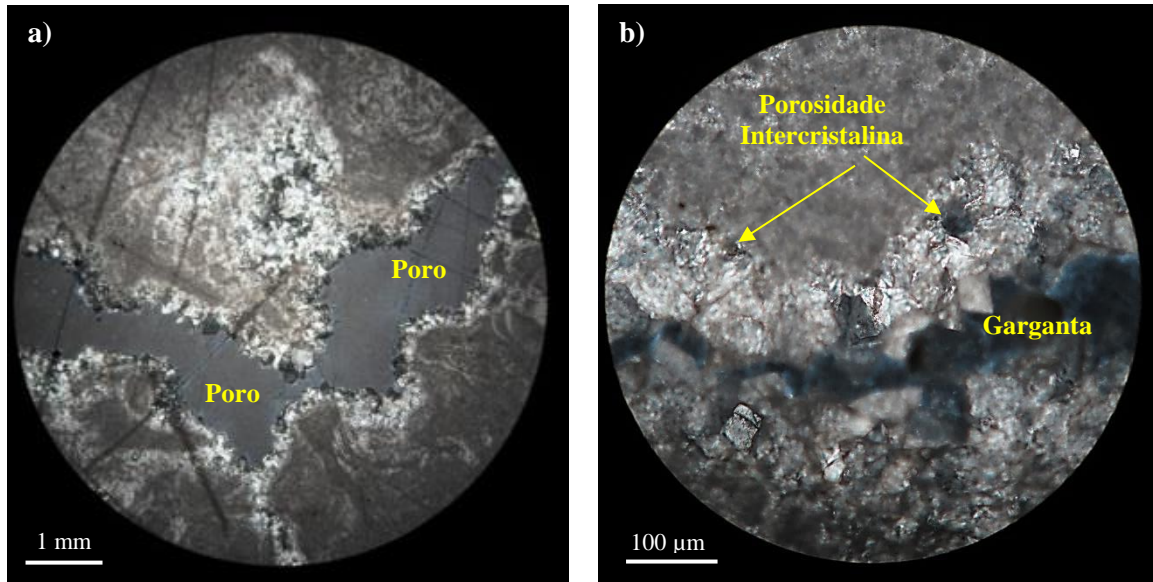


Figura 5.11 (a) (b) corte transversal dos poros conectados e garganta na direção da deposição, (b) porosidade intercristalina na calcita espática.

Notou-se nas lâminas delgadas o pouco preenchimento dos poros pelo corante azul, não permitindo fazer o reconhecimento da totalidade dos poros pelo uso do corante, sugerindo assim uma pouca conectividade dos poros.

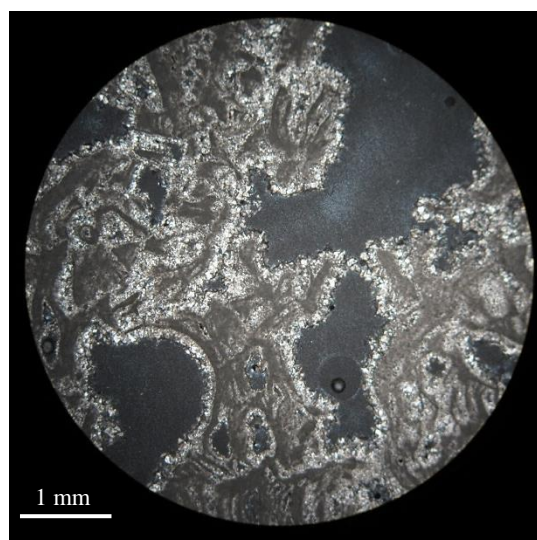


Figura 5.12 Distribuição dispersa e geometria irregular dos poros do tipo fenestral e vugular observadas pelo microscópio óptico.

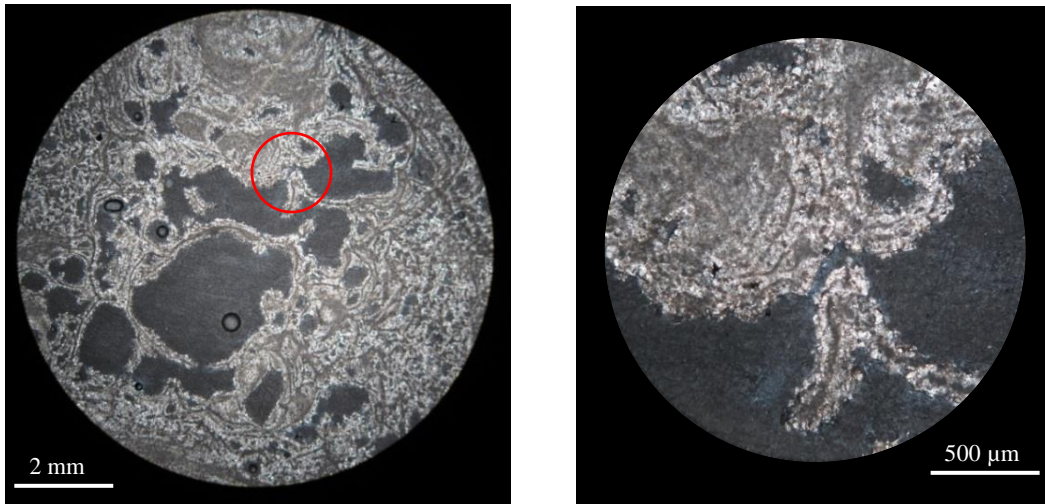


Figura 5.13 Poros conectados por gargantas de diferentes larguras e uma ampliação da garganta de menor largura.

5.6.2. Análise com Microscópio Eletrônico de Varredura

Nas imagens do MEV, além da porosidade fenestral e vugular se observaram poros menores do tipo intercrystalina e intrapartícula sobre a rocha (Figura 5.7 b, Figura 5.14 e Figura 5.15), não sendo encontrado nenhum material preenchendo os poros.

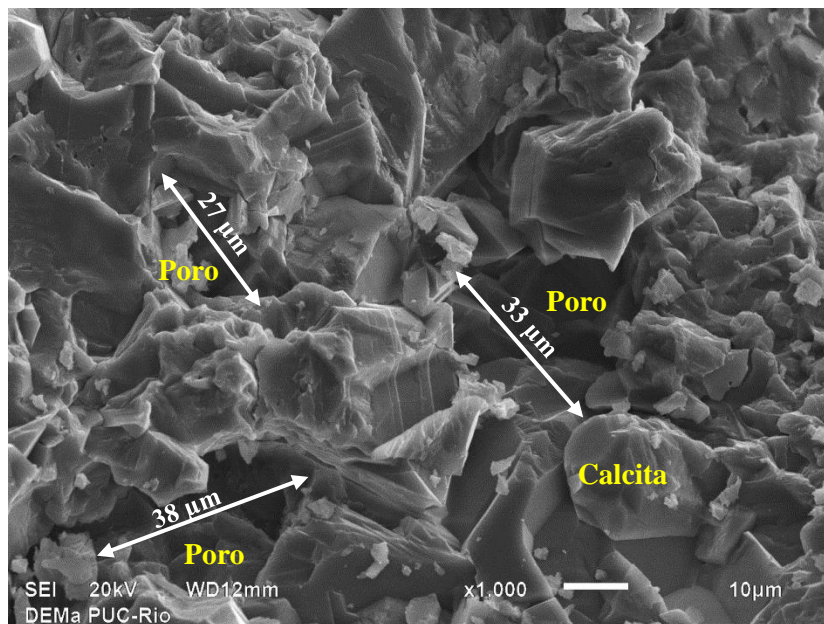


Figura 5.14 Porosidade intercrystalina formada pelos grãos de calcita.

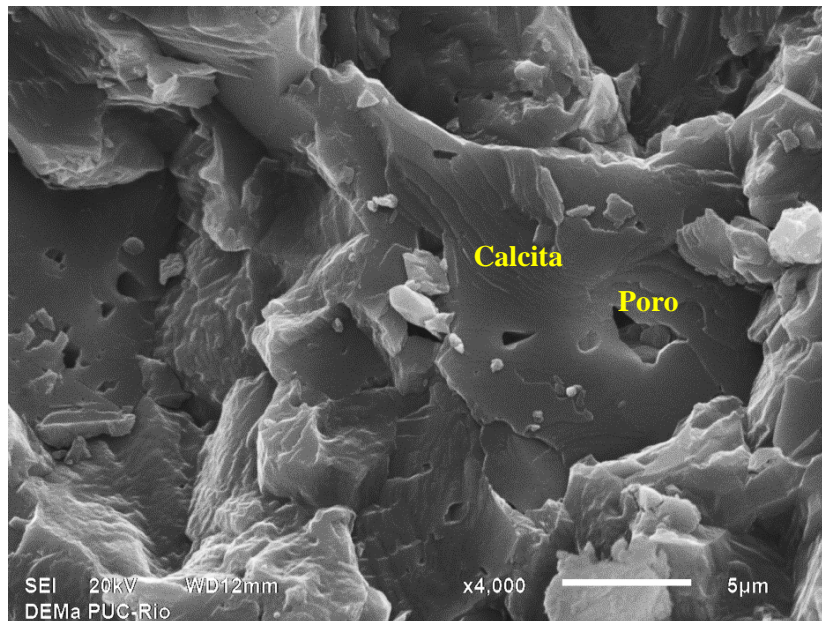


Figura 5.15 Poros tipo Intrapartícula localizados dentro dos cristais de calcita de forma irregular e sem nenhum material preenchendo os poros.

Observou-se que a macroporosidade é constituída por poros do tipo fenestral e vugular, e a microporosidade por poros do tipo intercrystalina e intrapartícula (Figura 5.7, Figura 5.14 e Figura 5.15).

Observou-se também que os poros tipo fenestral apresentam maior conectividade que a porosidade vugular, que se mostra pouco conectada, ou seja Vug-separada (Lucia, 1983), não foi notado nenhum tipo de conectividade entre os microporos. Isto indicaria que a porosidade efetiva da rocha vai depender em maior grau da macroporosidade, mas a microporosidade é importante no armazenamento do fluido, já que foi observado que os poros intercrystalais têm conexão com alguns macroporos como se mostra Figura 5.16.

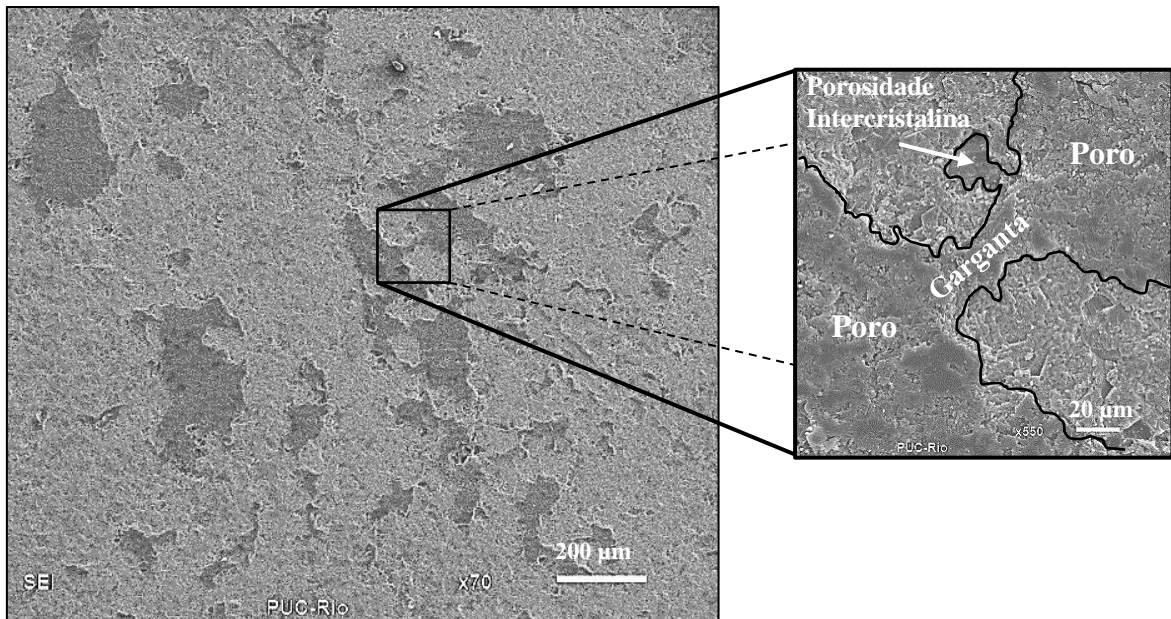


Figura 5.16 Elementos da estrutura porosa observada pelo MEV, poros e garganta dos poros de forma irregular e distribuição dispersa.

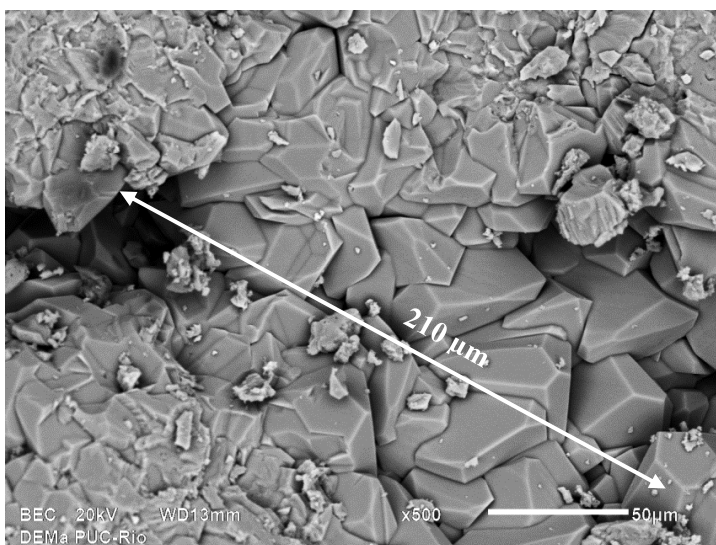


Figura 5.17 Porosidade fenestral vista no MEV.

5.6.3. Análise com Micro-tomógrafo de Raios-X

A Figura 5.18 mostra imagens geradas pelo micro-tomógrafo, com tamanhos de 1250 x 1250 x 1250 pixels para os CP cúbicos e 880 x 880 x 1700 pixels para os CP cilíndricos, as quais permitiram visualizar os poros internos ao longo de todo o corpo de prova, onde os poros têm cor preta e a rocha cor cinza.

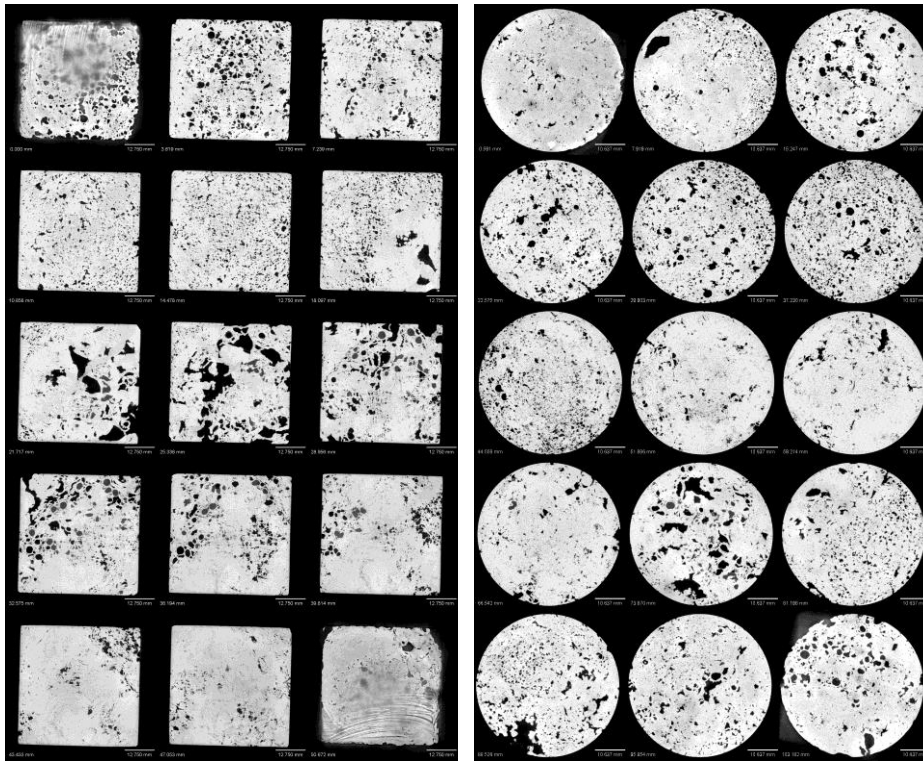


Figura 5.18 Imagens tomográficas de um corpos de prova cúbicos e cilíndrico.

Uma avaliação visual das imagens do tomógrafo permitiu verificar nos corpos de prova a existência de regiões com poros de grande tamanho, mas sem contato com a superfície, principalmente do tipo vugular e fenestral, mostrando uma das principais vantagens desta técnica, ou seja, o fato de conhecer o interior da rocha sem a necessidade de quebra-la.

Os resultados de porosidade média obtidos das análises das imagens tomográficas são mostrados na Tabela 5.3. Estes resultados mostram o amplo intervalo da porosidade do travertino, variando desde 8,63% até 23,90%, com uma média de 13,70% e um desvio padrão de 3,36%. Este amplo intervalo da variação da porosidade era o esperado pelas diferentes fácies presentes na rocha.

A Figura 5.19 mostra o perfil da porosidade, gerado com objetivo de conseguir uma representação da variação da porosidade ao longo do corpo de prova, verificando-se mudanças da porosidade de 3% até 23%, entre as imagens 1000 a 1200 (12 mm). Este é um exemplo da brusca variação da porosidade no corpo de prova e mostra mais uma vez a heterogeneidade e complexidade da estrutura porosa do travertino, já que o número ou tamanho dos poros variou rapidamente em um pequeno comprimento.

Tabela 5.3 Porosidade média obtida das imagens do micro CT.

Corpo de Prova	Porosidade média (%)	Resolução da tomografia (μm)
C1	21,48 \pm 7,53	41,146
C2	15,69 \pm 5,07	41,130
C3	16,05 \pm 8,40	41,144
C4	12,88 \pm 1,43	41,144
C5	13,22 \pm 2,75	41,144
C6	23,90 \pm 5,53	41,144
C7	13,29 \pm 2,74	41,144
C8	11,43 \pm 1,94	41,144
C9	12,83 \pm 3,57	41,144
C10	13,61 \pm 6,79	41,144
C11	14,02 \pm 4,27	41,144
TR1	10,62 \pm 4,00	61,701
TR2	8,63 \pm 2,83	61,701
TR3	12,22 \pm 5,81	61,701
TR4	12,55 \pm 3,72	59,438
TR5	12,22 \pm 3,26	59,438
TR6	10,64 \pm 3,65	59,096
TR7	10,28 \pm 4,13	59,879
TR8	9,87 \pm 3,94	60,025
TR9	14,21 \pm 7,69	59,745
TR10	14,04 \pm 4,71	60,025
TR11	12,11 \pm 4,64	60,129
TR12	15,05 \pm 5,23	59,949
TR13	15,51 \pm 5,56	59,949
TR14	16,14 \pm 8,47	59,745

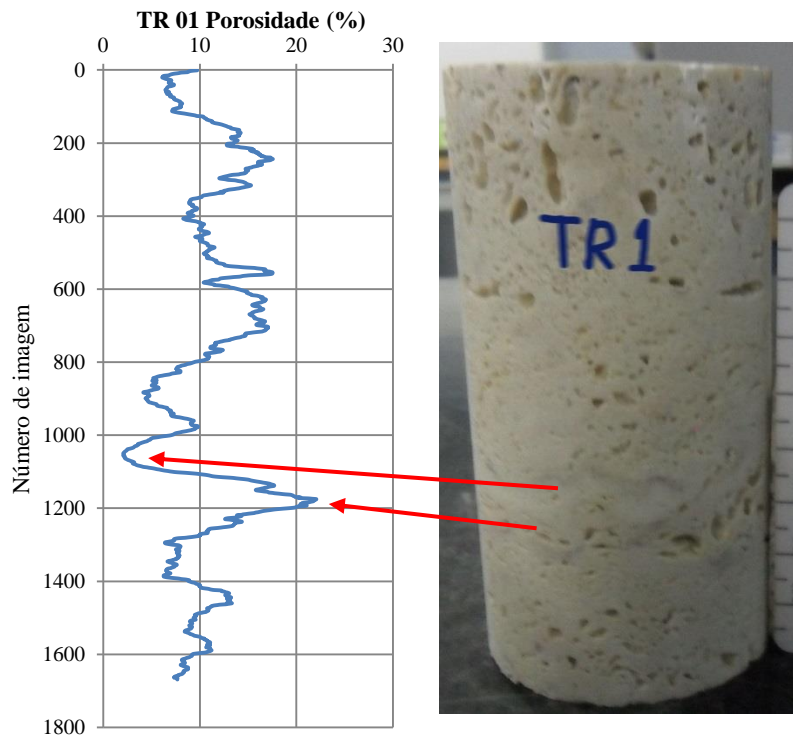


Figura 5.19 Perfil da porosidade ao longo do corpo de prova TR1.

A distribuição do tamanho dos poros visada mediante um histograma de frequência relativa (Figura 5.20) onde, de acordo com a classificação do tamanho dos poros sugerida por Knackstedt *et al.* (2006) (Tabela 5.4), se mostra que aproximadamente 45% corresponderiam à porosidade intercrystalina e 55% corresponderiam à porosidade do tipo Vugular, fenestral e estrutura de crescimento, sendo o menor tamanho de poro registrado de 58,269 μm e o máximo de 32 mm. No entanto, no bloco de rocha foram observados poros de tamanhos maiores (Figura 5.21).

Tabela 5.4 Tipo de poros de acordo a seu diâmetro (Fonte: Modificado Knackstedt *et al.*, 2006).

Tipo de porosidade	Diâmetro do poro
Vugular-Fenestral	Maior a 200 μm
Intergranular/intercrystalina	Maior ou igual que 10 μm
Intragranular/intrapartícula	Menor de 10 μm

Os tamanhos associados com os tipos de porosidade podem variar ao longo dos estudos e são dadas apenas como valores indicativos. Estas características distinguem as propriedades petrofísicas e produtividade dos campos de carbonato

de outras rochas sedimentares, incluindo arenitos e folhelhos (Knackstedt *et al.*, 2006).

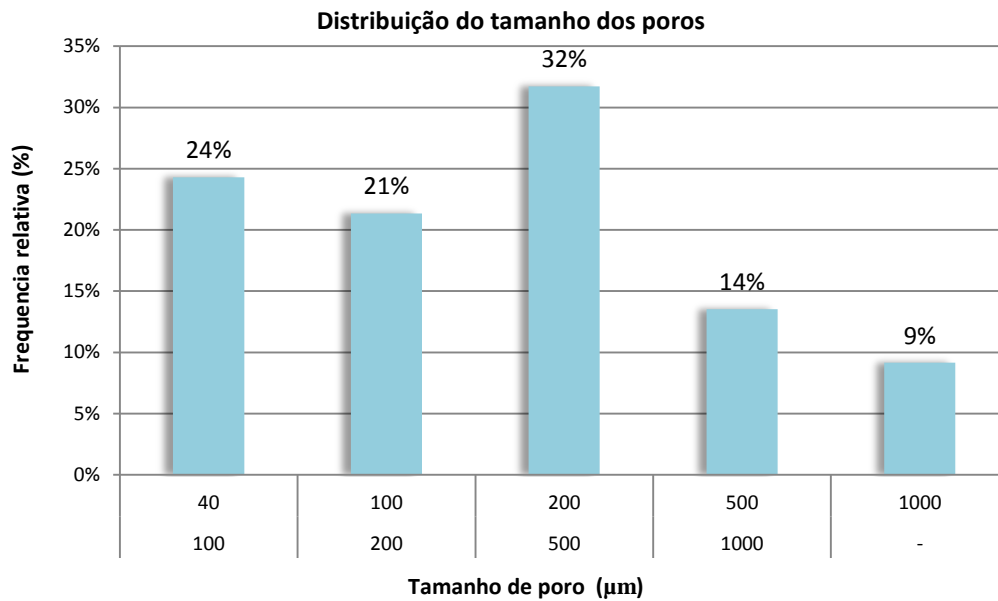


Figura 5.20 Distribuição do tamanho dos poros.



Figura 5.21 Plugues NX (54 mm) com poros maiores aos registrados no micro-tomógrafo.

As imagens 3D geradas pela segmentação e reconstituição das imagens do micro-tomógrafo mostradas nas Figura 5.22 até a Figura 5.25 e no anexo II facilitaram uma visão tridimensional da estrutura porosa e do sólido de cada um dos corpos de prova submetidos a este processamento.

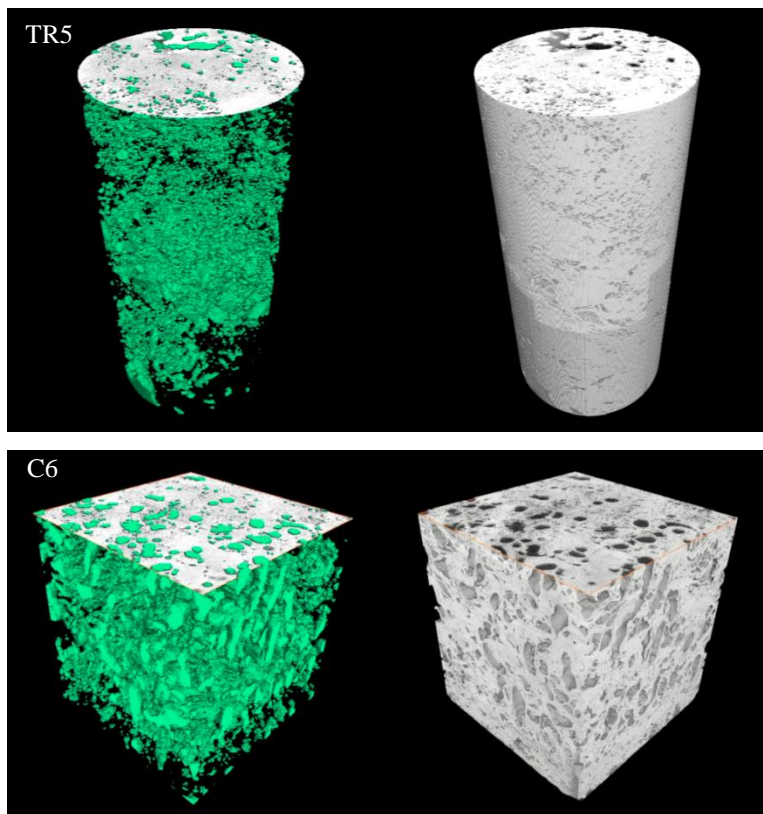


Figura 5.22 Estrutura porosa e solido dos CP TR5 e C6, reconstituída no programa Avizo Fire 8.0.

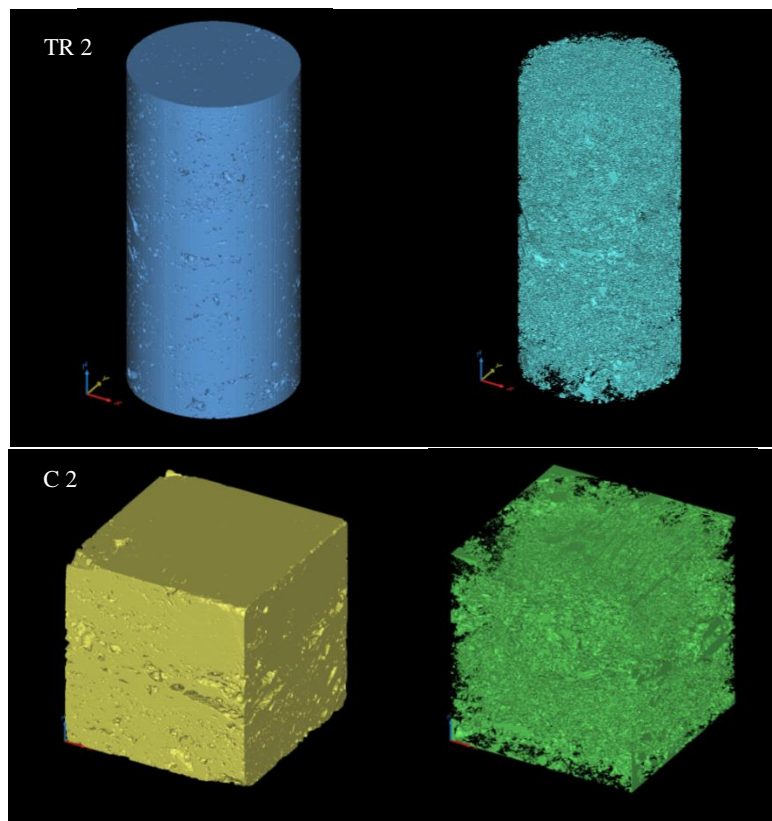


Figura 5.23 Solido e estrutura porosa dos CP TR2 e C2, reconstituída no programa Mimics 16.0.

A visão tridimensional confirmou o observado no perfil da porosidade, havendo determinadas regiões no interior do CP com maior e menor concentração de poros (Figura 5.25), isto também permite diferenciar a fácies massiva que apresenta porosidade baixa inferior a 5 %, e a fácies bandeada com porosidade superior a 6 %.

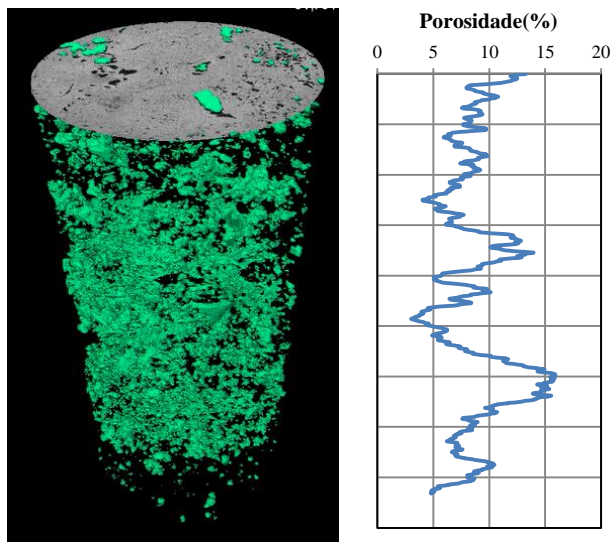


Figura 5.24 Imagem 3D e perfil mostrando a variação da porosidade no interior do CP TR 2.

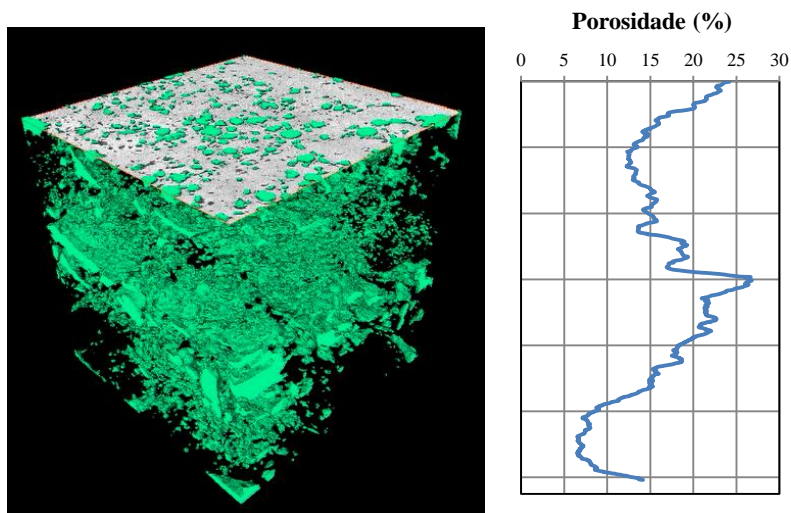


Figura 5.25 Imagem 3D e perfil mostrando a variação da porosidade no interior do CP C 2.

A conectividade de alguns poros foi apreciada em cilindros menores elaborados no programa Mimics (Figura 5.26). Além disso, este programa permitiu converter esta estrutura porosa em voxels (Figura 5.27), que são objetos

utilizados para a modelagem numérica das propriedades da rocha como a permeabilidade (Petunin *et al.*, 2011; Arns *et al.*, 2005).

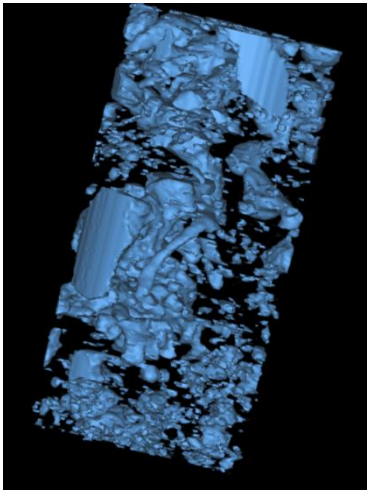


Figura 5.26 Objeto solido criado no Mimics 16.0 mostrando a conectividade dos poros.

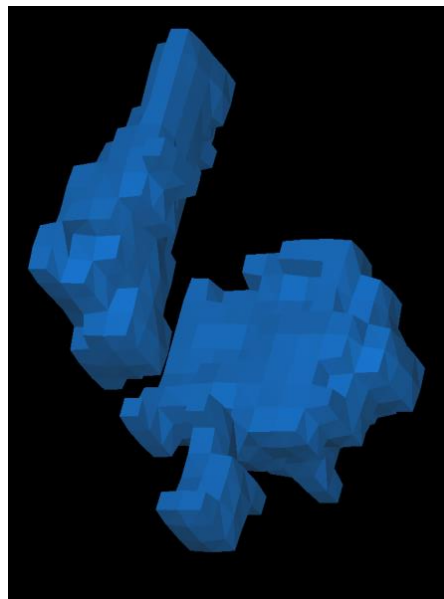
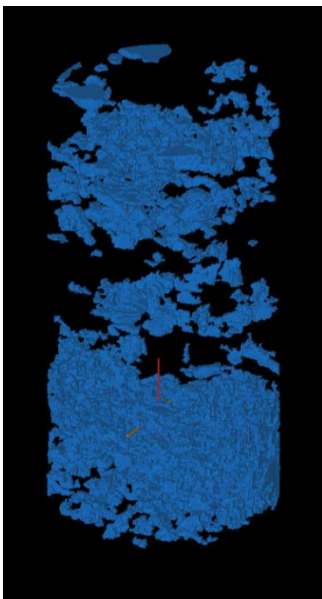


Figura 5.27 porosidade obtida na reconstituição da imagem 3D convertida a voxels.

A visualização 3D dos corpos de prova reconstituídos nos programas Avizo e Mimics apresenta diferenças significativas, como pode se ver nas Figura 5.23, Figura 5.24 e Figura 5.25. O Mimics apresenta uma porosidade mais densa que o Avizo (estes valores são mostrados na Tabela 5.5) apresentando uma média de 19,95% e o desvio padrão de 6,37%, localizando-se os resultados do laboratório e do image J no limite inferior dos resultados do Mimics.

Tabela 5.5 Valores da porosidade determinada no programa Mimics

CP	Porosidade Mimics (%)
C2	19,64
C6	33,22
TR1	17,28
TR2	11,20
TR5	15,83
TR10	18,99
TR13	21,92
TR14	21,56

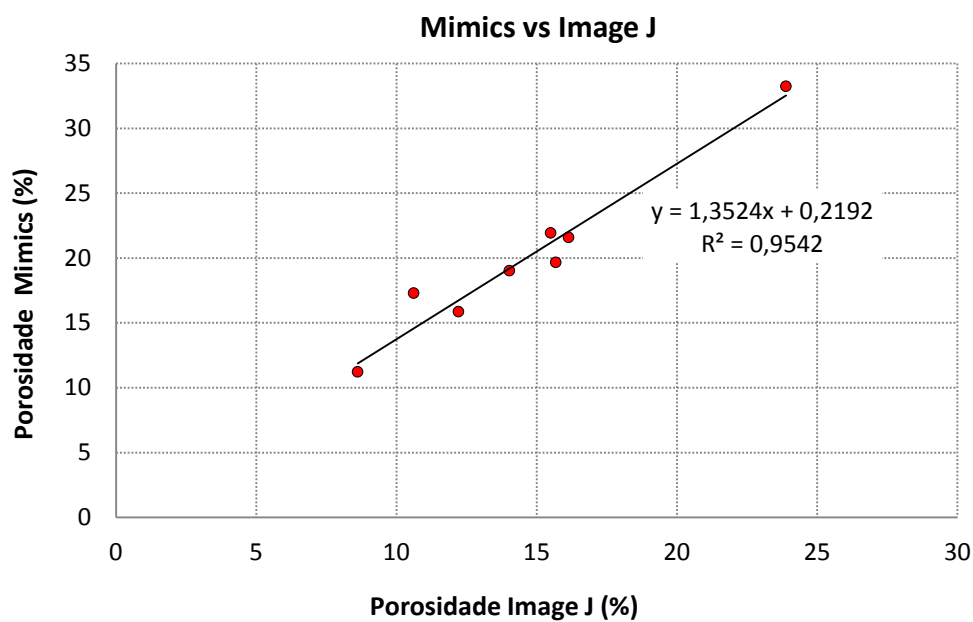


Figura 5.28 Relação dos valores da porosidade do processamento de imagem J e do Mimics.

A Figura 5.28 mostra a uma boa relação linear direta entre os valores da porosidade obtidos no Image J e no Mimics, porém os resultados do Mimics são aproximadamente 37 % mais elevados que os obtidos no Image J.

Finalmente no Apêndice II são apresentadas as imagens dos corpos de prova reconstituídos, tanto no programa Avizo Fire 8.0 como no Mimics 16.0.

5.7. Índices Físicos

A Tabela 5.6 mostra os resultados da determinação dos índices físicos obtidos no laboratório.

Dada a composição do travertino maioritariamente calcítica e sabendo-se a massa e o volume aparente dos CP, foi estimada a porosidade total considerando a seguinte equação.

$$n \% = \frac{\gamma_{teo} - \gamma_s}{\gamma_{teo}} \times 100$$

onde $\gamma_{teo} = 2,7 \text{ g/cm}^3$ e γ_s é a massa específica seca aparente determinada no laboratório.

Tabela 5.6 Propriedades físicas do travertino.

Corpo de prova	Massa específica seca (g/cm ³)	Massa específica sat. (g/cm ³)	Porosidade efetiva (%)	Porosidade total (%)
C1	2,02	2,21	19,66	25,31
C2	2,25	2,39	13,53	16,66
C3	2,10	2,26	15,29	22,15
C4	2,27	2,39	12,08	16,10
C5	2,28	2,41	13,35	15,56
C6	1,94	2,16	21,53	28,00
C7	2,22	2,36	14,32	17,74
C8	2,26	2,38	11,30	16,18
C9	2,29	2,40	10,74	15,02
C10	2,31	2,41	10,73	14,59
C11	2,24	2,36	11,26	16,89
TR1	2,31	2,40	8,57	14,40
TR2	2,35	2,44	8,40	12,94
TR3	2,28	2,39	11,62	15,76
TR4	2,24	2,37	12,54	17,04
TR5	2,26	2,37	10,83	16,33
TR6	2,32	2,41	9,38	14,14
TR7	2,33	2,42	8,89	13,55
TR8	2,33	2,42	9,02	13,74
TR9	2,23	2,36	13,21	17,38
TR10	2,19	2,33	13,94	18,79
TR11	2,27	2,38	11,08	15,95
TR12	2,18	2,32	14,20	19,22
TR13	2,17	2,32	14,66	19,67
TR14	2,15	2,30	14,53	20,23

Pode-se verificar que a porosidade efetiva do travertino variou de 8,41% até 21,53% com uma média de 12,59% e um desvio padrão de 3,17 %. Os elevados valores de porosidade efetiva estão relacionados com a porosidade aberta sobre a

superfície dos corpos de prova, já que nas imagens do micro-tomógrafo não foi observado uma boa conectividade entre os poros superficiais e internos. Este fato confirma-se constatando que foi estimada uma porosidade total média de 17,33% com um desvio padrão de 3,60 %, o que representa valores consideravelmente mais altos relativamente à porosidade efetiva.

A rocha apresentou uma massa específica seca média de $2,23 \pm 0,07 \text{ g/cm}^3$, e uma massa específica saturada média de $2,36 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$, estando estas variações ligadas à porosidade, como se observa na Figura 5.29, onde se tem uma boa relação linear inversa entre a porosidade e a massa específica seca.

A pequena inclinação da reta mostra que a taxa de variação da massa específica seca é de aproximadamente -3% da taxa de variação da porosidade, isto permite inferir valores da porosidade segundo a variação da massa específica seca e vice-versa.

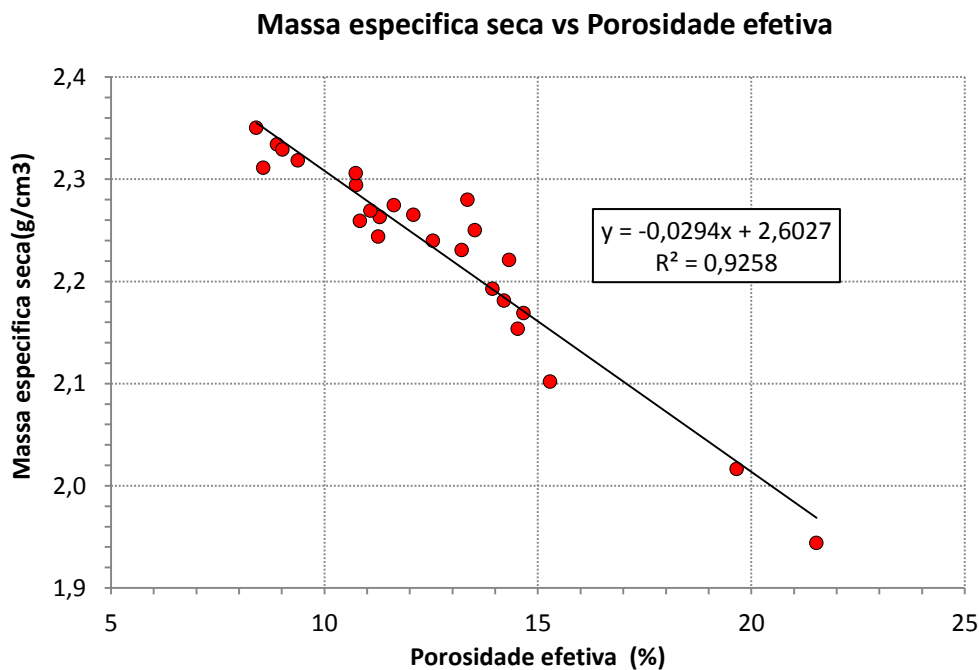


Figura 5.29 Gráfico da massa específica seca em função da porosidade, obtidos na determinação dos índices físicos.

A Figura 5.30 mostra que o valor da porosidade experimental é geralmente inferior aos valores obtidos com o processamento de imagem, com uma diferença de aproximadamente 10% (Figura 5.31). Isto foi devido a que no cálculo da porosidade efetuado nas imagens do micro-tomógrafo são contabilizados poros internos não conectados com os poros superficiais. Só no C5 e C7 a porosidade

experimental é superior à porosidade do Image J, isto indicaria uma maior conectividade dos poros superficiais e internos.

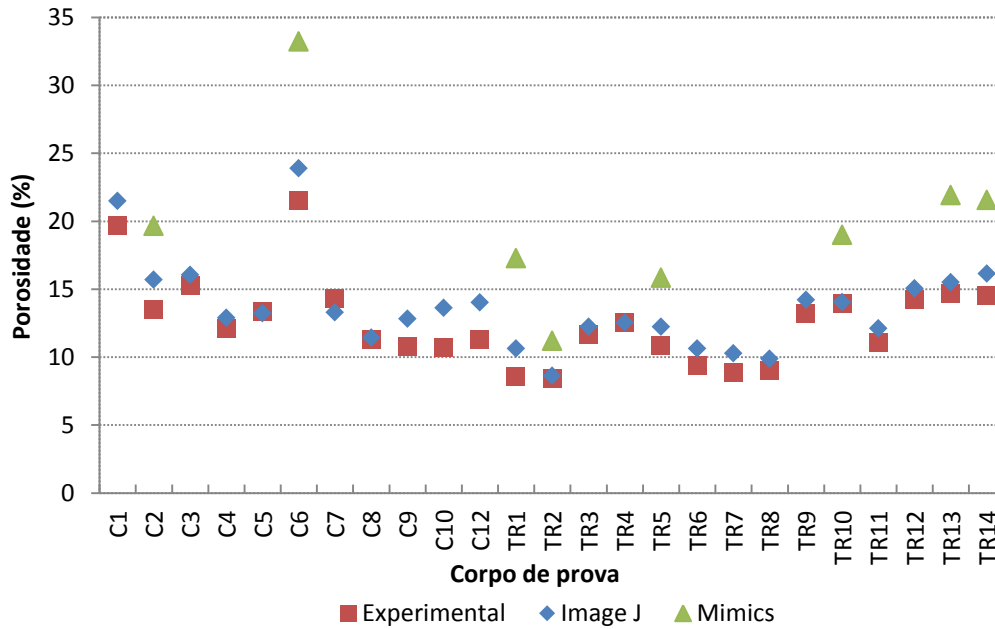


Figura 5.30 Comparação dos valores da porosidade obtidos experimentalmente (porosidade efetiva) e nos programas Image J e Mimics.

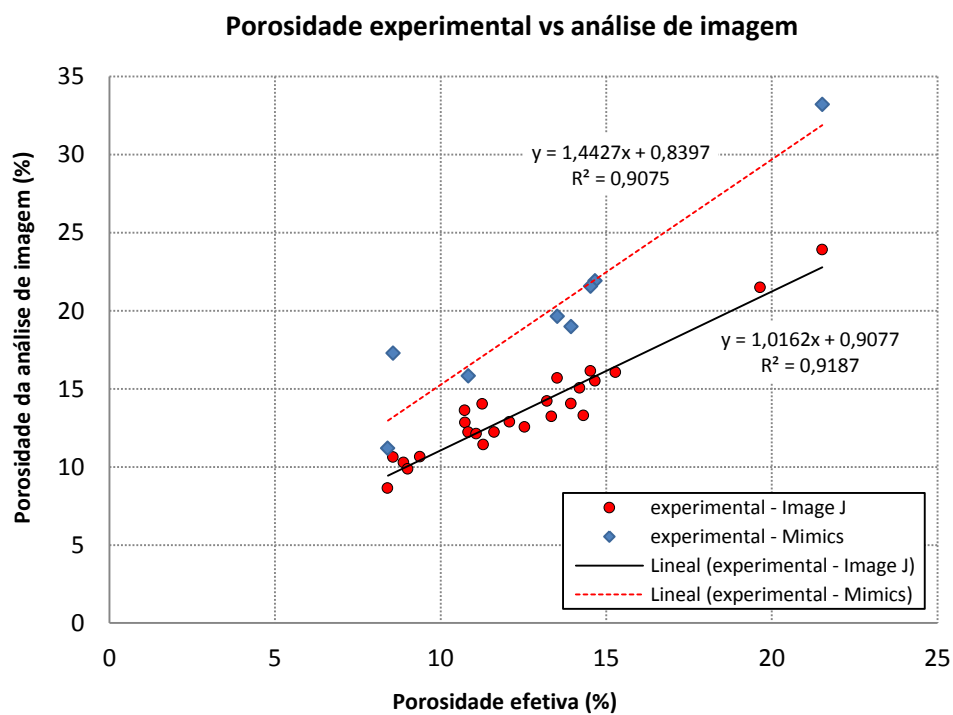


Figura 5.31 Correlações entre a porosidade efetiva (experimental) e a porosidade do processamento das imagens do micro-tomógrafo.

Já no caso do Mimics apresenta elevados valores de porosidade comparados com os valores do laboratório e do image J, mostrando uma diferença de aproximadamente 50 %. Isto devido a que no processamento realizado no Mimics, se fez o cálculo do objeto 3D com qualidade média do programa originando um subamostragem com perda de resolução, uma vez que o computador não conseguiu trabalhar no modo ótimo devido ao grande número de objetos gerados (aproximadamente 60 milhões de objetos) incluídos no cálculo originando falta de memória no computador.

A relação linear direta da porosidade experimental ou de laboratório com os resultados do processamento de imagem mostram a coerência dos resultados, no sentido que elevadas porosidades obtidas no laboratório, correspondem a elevadas porosidades no processamento de imagem do micro-tomógrafo.

É evidente que neste caso os resultados das análises de processamento de imagem são referenciais, já que estes sempre são influenciados pelo limite da resolução das imagens (neste trabalho a resolução mínima registrada foi de 58,269 μm), o que sugere que poros menores que esta dimensão não foram reconhecidos, indicando uma subestimação da porosidade real. Ainda assim a apreciação visual da porosidade apresenta-se como muito interessante e informativa.

5.8. Resistência Mecânica

Nesta seção são apresentados os diferentes resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica levados a cabo na célula triaxial axissimétrica.

5.8.1. Resistência Uniaxial

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial (UCS) ou simplesmente resistência uniaxial, são resumidos na Tabela 5.7, assim como a porosidade, módulo elástico ou de Young (E), coeficiente de Poisson (ν), deformação máxima axial na ruptura e módulo razão da rocha.

O cálculo do módulo de Young foi efetuado usando a inclinação da reta obtida do método de mínimos quadrados dos dados correspondentes à porção reta da curva tensão-deformação (ASTM D7012-13).

Tabela 5.7 Resultados dos ensaios de resistência uniaxial e módulos elásticos e módulo razão

CP	Porosidade efetiva (%)	UCS (Mpa)	E (GPa)	Coefficiente de Poisson (v)	Deformação axial de ruptura (%)	Módulo razão E/UCS	Tempo (min)	Tipo de ruptura
TR 01	8,57	35,98	32,27	0,23	0,11	897	2,7	Cisalhamento
TR 02	8,40	48,04	39,67	0,37	0,12	826	2,5	Fendilhamento
TR 03	11,62	19,31	37,33	0,38	0,06	1933	1,2	Fendilhamento colapso de poros
TR 09	13,21	16,32	27,57	0,22	0,05	1689	0,9	Colapso de poros
TR 13	14,66	13,26	57,17	0,34	0,03	4310	0,7	Fendilhamento colapso de poros

O emprego da massa corrida com finalidade de cobrir os poros superficiais da rocha foi bem sucedido, evitando que a membrana furasse pelo efeito da pressão confinante.

Admite-se que a massa corrida não tenha tido significativa influência na resistência das amostras. Comparando a resistência de TR3 (testado com massa corrida) com TR9 e TR13 (testados sem massa corrida) verifica-se que a redução de porosidade devida à colocação da massa não apresenta diferenças significativas no comportamento tensão-deformação (seção 5.9, Figura 5.46).



Figura 5.32 Corpos de prova testados com (TR3) e sem (TR13) a massa corrida preenchendo os poros.

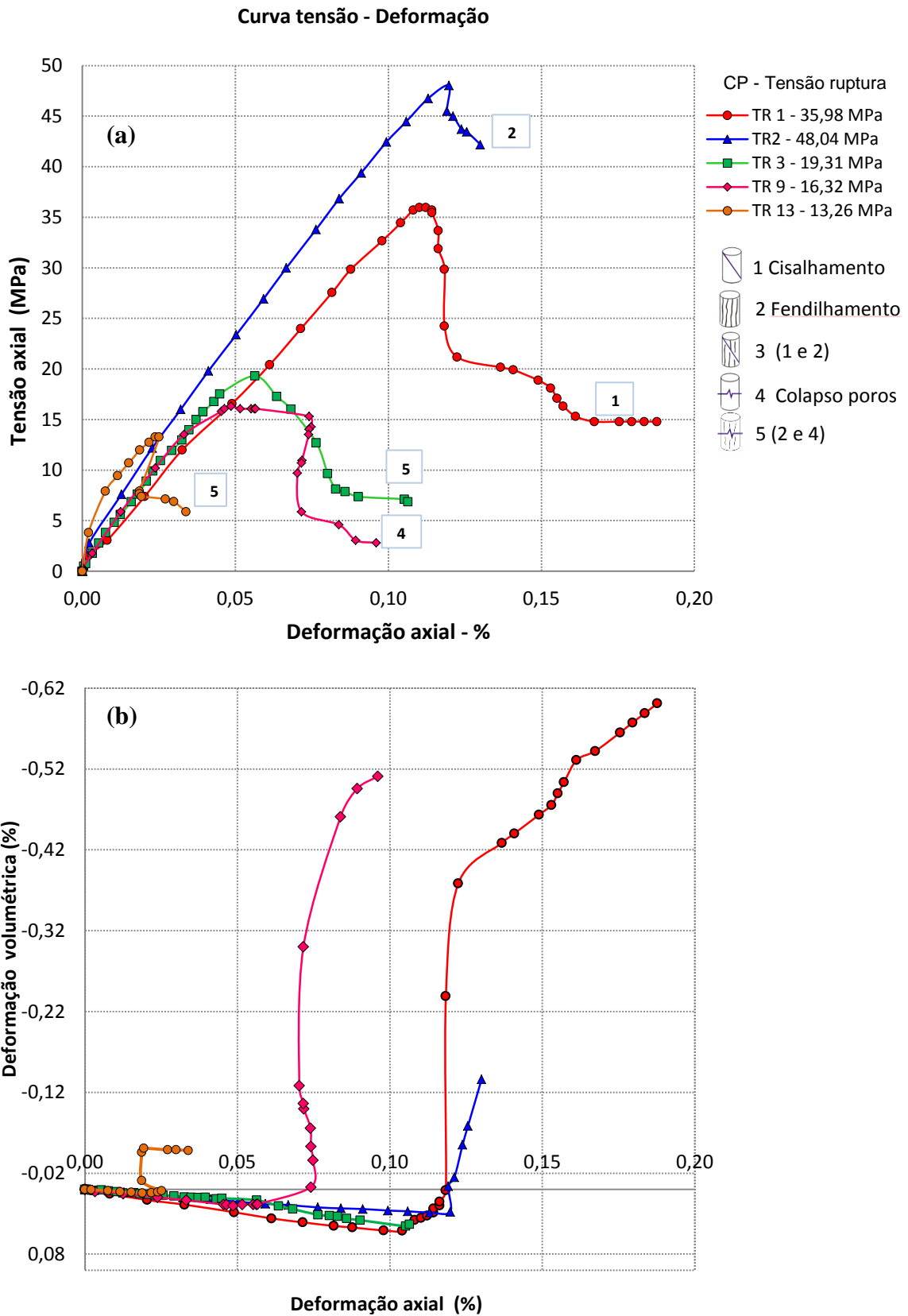


Figura 5.33 (a) Curva tensão axial versus deformação axial dos ensaios de resistência uniaxial, (b) Deformação volumétrica em função da deformação axial.

As curvas tensão axial versus deformação axial são mostradas na Figura 5.33(a), sendo esquematizado também o tipo de ruptura apresentado em cada um dos corpos de prova - fendilhamento e cisalhamento - assim como o colapso de poros. Neste último caso se poderia indicar que o colapso dos poros haveria acontecido com tensões entre os 19,31 e 13,26 MPa para valores de porosidades de 11,62 e 14,66%, respectivamente. Note-se também que para os CP com menor porosidade o colapso não aconteceu.

De acordo com a forma da curva tensão deformação, o travertino pode se comportar como uma rocha de classe I (TR1, TR2 e TR3), ou seja, com deformação monótona crescente. No entanto também foi observado o comportamento de classe II (TR9 e TR 13) onde a deformação não é monótona crescente (Wawersik, 1968).

Verifica-se que as curvas que apresentam um comportamento de classe I correspondem aos CP com menor porosidade e maior resistência à compressão, além de se constatar uma maior deformação antes de atingir à ruptura, as quais foram do tipo fendilhamento e cisalhamento.

No caso das curvas com comportamento de classe II, foi observado que os CP têm maior porosidade e uma menor resistência à compressão, atingindo à ruptura com pequenas deformações (Tabela 5.7), apresentando fraturas do tipo fendilhamento, acompanhadas com colapso dos poros, principalmente nas fácies bandeadas, as quais têm valores de porosidades superiores a 15% como mostra nos perfis de porosidade (Apêndice II).

Na Figura 5.33(b) pode notar-se um comportamento dilatante após a resistência de pico na maioria dos corpos de prova, exceto no CP TR3, o qual apresenta um comportamento compressivo durante todo o ensaio. Isto pode ter acontecido devido a uma possível debilitação da rocha pelas fraturas do tipo fendilhamento, as quais propiciaram o colapso dos poros no extremo superior (região com porosidade entre 10 - 30%) (Figura 5.34). Este colapso permitiu um deslocamento axial maior que o radial, refletindo-se assim no comportamento compressivo da curva deformação volumétrica versus deformação axial.

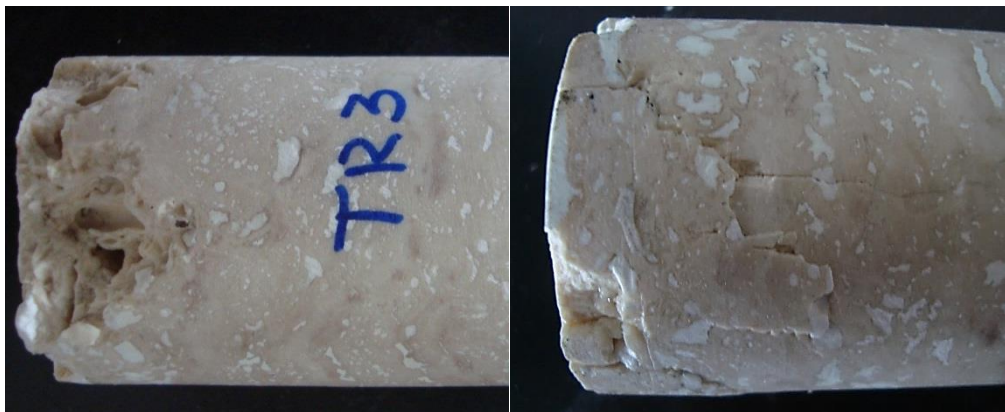


Figura 5.34 Corpo de prova TR 3 depois do ensaio de compressão uniaxial, com ruptura tipo fendilhamento acompanhada de colapso dos poros.

É importante ressaltar que este comportamento mecânico associado à porosidade sugere que os corpos de prova com menor porosidade e menor presença de fácies bandeadas oferecem uma maior resistência à compressão que os corpos de prova com elevada porosidade e maior número de fácies bandeadas. Acredita-se que porosidade permita concentrar maiores tensões na estrutura rochosa que divide os poros, devido à diminuição da área de carregamento, o que pode originar o fraturamento desta.



Figura 5.35 Corpo de prova TR 9 fraturado devido ao colapso de poros durante o ensaio de resistência uniaxial.

Em geral a resistência à compressão uniaxial do travertino em estudo, apresenta valores baixos a muito baixos, sendo inclusos na classe D – E (Figura

5.36) da classificação de rochas intactas de Deere & Miller (1966) variando de 13,3 a 48,0 MPa com uma média de 26,58 MPa.

O módulo de Young versus a resistência uniaxial foi plotado no gráfico da classificação da rocha intacta sedimentar de Deere & Miller (1966), como é mostrado na Figura 5.36. Nota-se que estes pontos se encontram na região de elevado módulo Young e fora da área características para os carbonatos (exceto TR 2), Segundo Deere & Miller (1966) esta dispersão dos pontos ocorre devido à textura, mineralogia e anisotropia dos carbonatos. Este três fatores influenciam na dispersão dos pontos na classificação do travertino, sendo sua textura e a mineralogia vinculada com os elevados valores do módulo razão e anisotropia (respeito com a porosidade) com a baixa resistência.

Acredita-se que a estrutura do espaço poroso e consequente estrutura do arcabouço, especialmente nas fácies bandeadas, tenha contribuído para a redução drástica na resistência uniaxial com pouco impacto sobre a rigidez das amostras. Ainda, a heterogeneidade do material e a eventual ruptura fora das zonas instrumentadas pode ter colaborado para a dispersão destes dados.

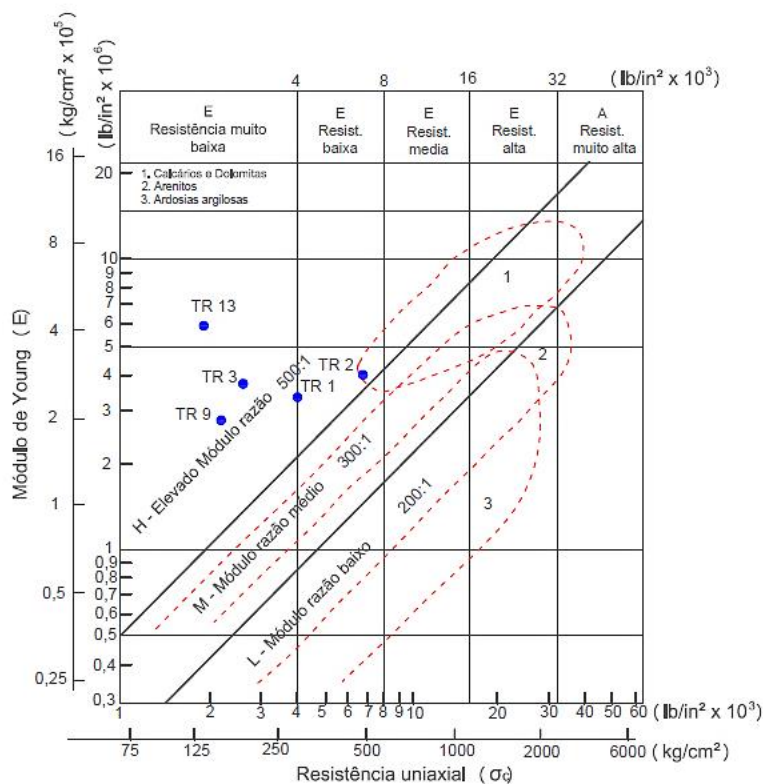


Figura 5.36 Classificação da rocha intacta de Deere & Miller (1966)

5.8.2. Resistência Triaxial

Na Tabela 5.8 mostram-se os resultados obtidos nos ensaios triaxiais, e no apêndice III são apresentadas imagens das rochas fraturadas após estes ensaios.

Tabela 5.8 Resultados dos ensaios triaxiais, parâmetros elásticos e porosidade.

CP	σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)	Tensão desviadora (MPa)	E (GPa)	Coefficiente de Poisson (ν)	Porosidade (%)	Tipo de ruptura
TR 04	22,26	4,14	18,12	22,32	0,23	12,54	Colapso
TR 05	44,92	6,89	38,03	33,24	0,25	10,84	Colapso
TR 06	35,27	4,14	31,13	6,11	0,45	9,38	Cisalhamento
TR 07	52,36	2,76	49,60	36,73	0,28	8,89	Fendilhamento
TR 08	64,05	5,52	58,53	36,65	0,25	9,02	Cisalhamento Fendilhamento
TR 12	53,26	8,27	44,99	43,52	0,28	14,20	Fendilhamento Colapso

Cabe mencionar que no caso do CP TR 12 o ensaio parou antes do previsto devido ao aparecimento de um furo na membrana.

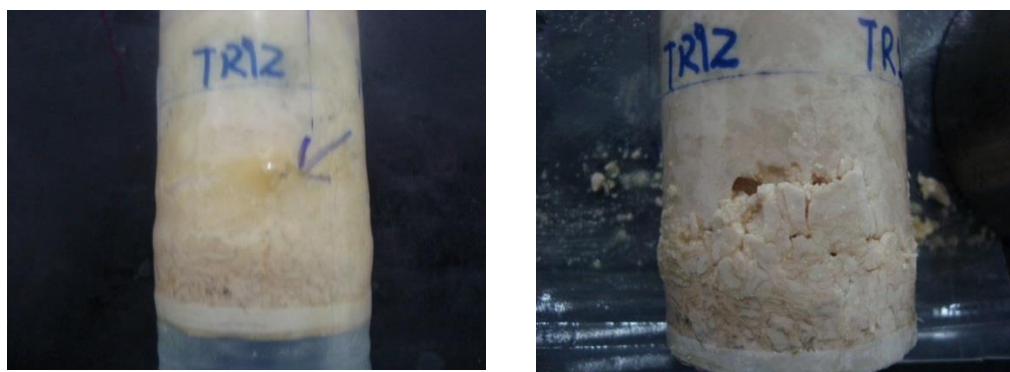


Figura 5.37 Membrana furada e poros colapsados no corpo de prova TR 12.

Figura 5.38 mostra a variação do módulo elástico, obtido da porção linear da curva e do ciclo de carregamento e descarregamento, sendo observada uma grande diferença entre os módulos, segundo Goodman (1989) a melhor forma de determinar o módulo elástico é após de um ciclo completo de descarregamento e

descarregamento, mas para uniformizar os resultados neste trabalho foram adotadas as recomendações sugeridas pela ISRM e ASTM.

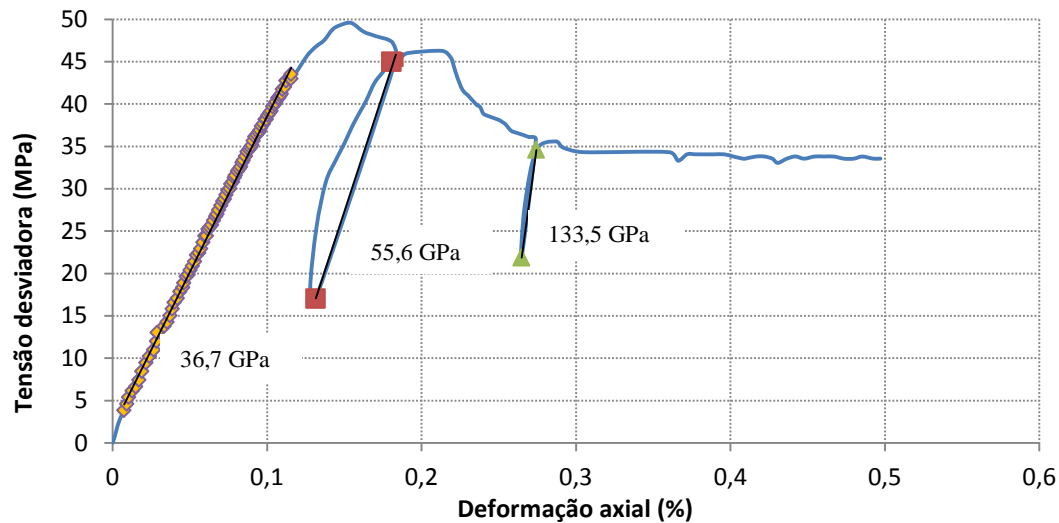


Figura 5.38 Variação do módulo elástico com a deformação axial.

A Figura 5.39a mostra as curvas de tensão desviadora versus deformação axial e a Figura 5.39b a variação da deformação volumétrica em função da deformação axial.

A Figura 5.39 mostra um incremento da resistência com o incremento da pressão confinante. Todas as curvas mostram um comportamento frágil, exceto as curvas correspondentes ao CP TR5, que apresentou colapso dos poros e uma curva do tipo amolecimento, e TR6 apresentou fratura cisalhante com um comportamento dúctil, o qual não era o esperado conforme a sua porosidade ($n = 9,38\%$), mas este pode haver acontecido por uma possível danificação durante a aproximação do pistão axial (Figura 5.40).

Na Figura 5.39(b) as curvas de deformação volumétrica em função da deformação axial mostram um comportamento compressivo para maiores níveis de tensão confinante, o qual se pode explicar como consequência do livre deslocamento lateral da rocha quando baixos valores de tensão confinante são aplicados, mas quando a tensão confinante é incrementada o deslocamento radial e a fissuração são impedidas, o qual permite ter um ganho na resistência da rocha.

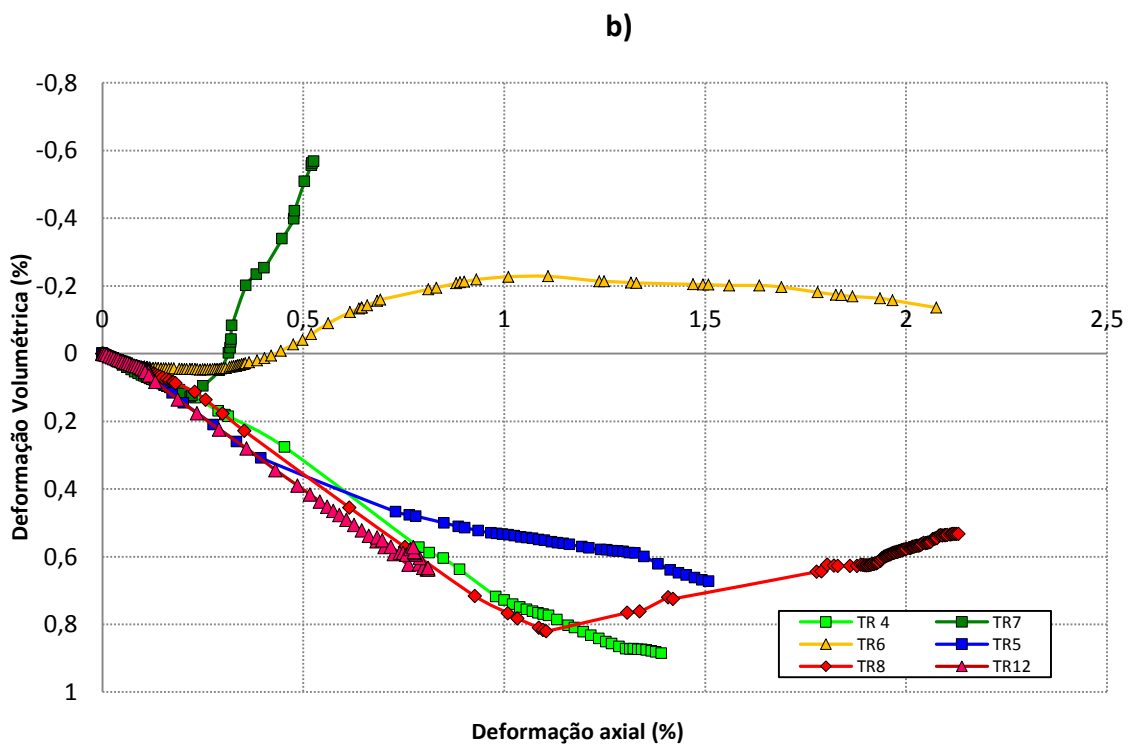
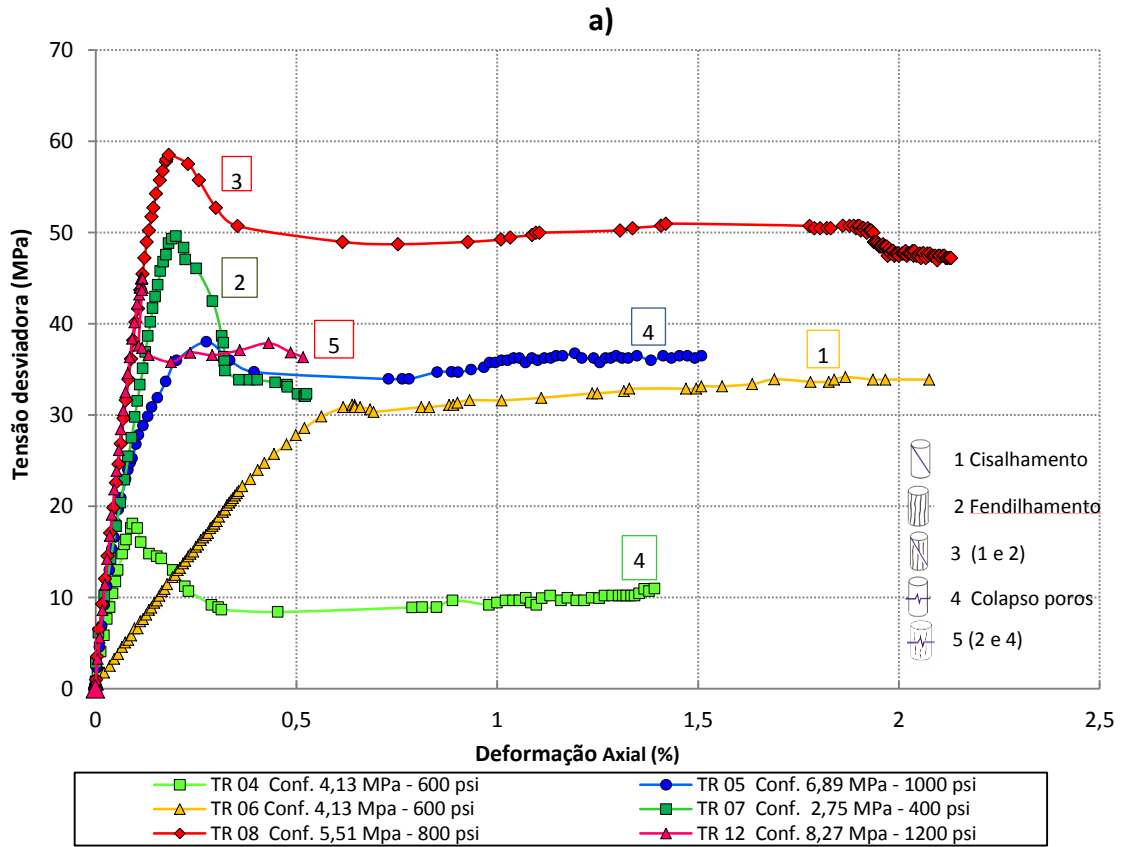


Figura 5.39 (a) Curvas tensão desviadora versus deformação axial, (b) Curva deformação volumétrica versus a deformação axial.

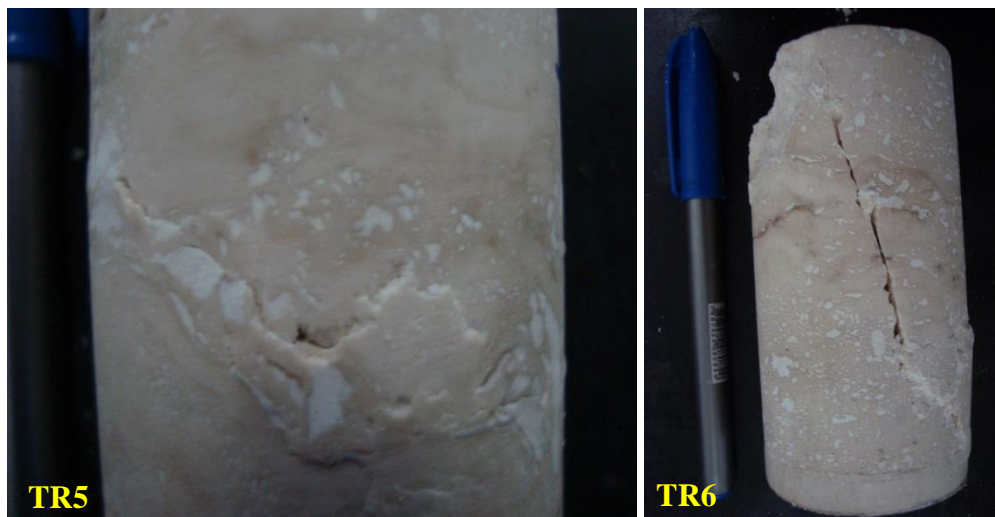


Figura 5.40 Corpos de prova TR5 e TR6 fraturados

Para caracterizar a resistência mecânica, diversos critérios foram empregados, sendo estes o critério de Mohr-Coulomb, Hoek & Brown e Kim & Lade.

O critério de Mohr-Coulomb indica que o material rompe pela combinação das forças normal e de cisalhamento, e não devido à máxima tensão normal ou de cisalhamento isoladamente. Portanto a relação funcional entre a tensão normal e a tensão de cisalhamento em um plano de ruptura pode ser expressa mediante uma função linear da tensão de cisalhamento em função da tensão normal (Das, 2012), a qual é escrita na equação 5.1,

$$\tau = c + \sigma_n \tan(\phi) \quad (5.1)$$

onde c é a coesão e ϕ é o ângulo de atrito interno do material.

O critério de Hoek & Brown é um critério empírico baseado em uma função de potência para descrever a condição de ruptura em um espaço de tensões principais efetivas (Azevedo & Marques, 2002), a qual é expressa pela equação 5.2:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_i \cdot C_o \cdot \sigma_3 + s C_o)^a \quad (5.2)$$

onde σ_1, σ_3 : tensões principais; C_o : resistência uniaxial; m_i parâmetro da rocha intacta, $s = 1$ e $a = 0,5$ para a rocha intacta.

O critério ruptura de Lade e Kim simplificado (1984) Trata-se de um critério geral, tridimensional, proposto para solos, concreto, rochas e outros materiais com

atrito interno. Este critério de ruptura depende do primeiro e terceiro invariantes do tensor de tensões (Ibañez, 2003), sendo expresso pela equação 5.3.

$$\left(\frac{I_1^3}{I_3} - 27\right) \left(\frac{I_1}{p_a}\right)^m = n, \quad (5.3)$$

onde os parâmetros m e n são constantes adimensionais e p_a : pressão atmosférica.

Os resultados dos ensaios uniaxiais e triaxiais foram processados no programa RocData 3.0, com o objetivo de obter as envolventes e os parâmetros dos critérios de ruptura de Mohr-Coulomb e Hoek & Brown. Também foi obtida a envolvente de ruptura e os parâmetros do critério de Kim & Lade (1984) seguindo o procedimento estabelecido pelos autores, este resultados são apresentados na Tabela 5.9 e na Figura 5.41, Figura 5.42 e Figura 5.43 respectivamente.

Tabela 5.9 Parâmetros dos critérios de ruptura Mohr-Coulomb, Hoek-Brown e Kim-Lade.

Mohr - Coulomb	Hoek & Brown	Kim & Lade
$c = 7,56 \text{ MPa}$	$m_i = 6,07$	$n = 2,9 \times 10^6$
$\phi = 32^\circ$	$C_0 = 27,06 \text{ MPa}$	$m = 1,42$
	$s = 1$	
	$a = 0,5$	

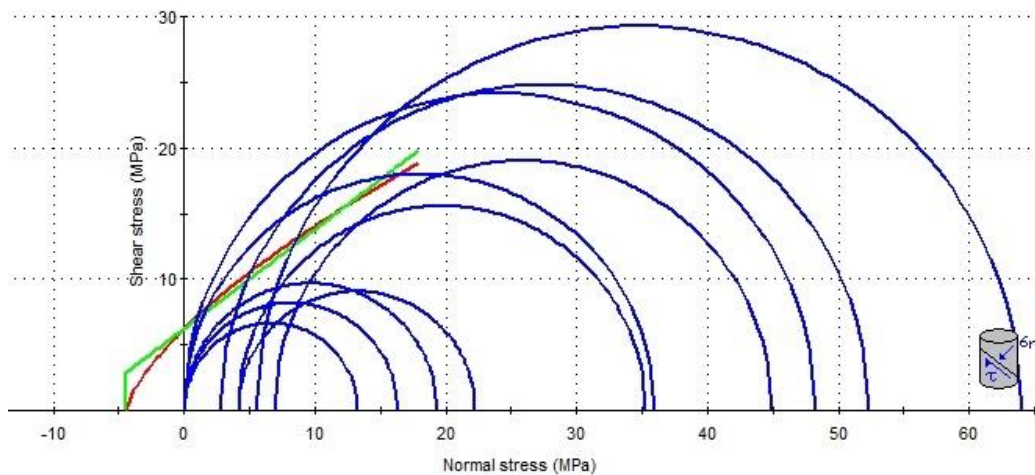


Figura 5.41 Círculos de Mohr e envolventes de ruptura de Mohr Coulomb (verde) e Hoek & Brown (vermelha) plotados no espaço τ vs σ no programa RocData 3.0.

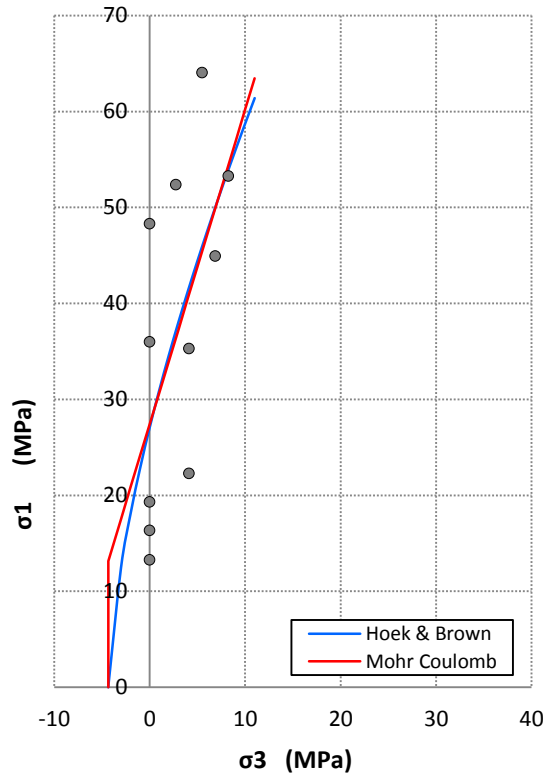


Figura 5.42 Envoltórias de Mohr - Coulomb e Hoek & Brown no espaço σ_1 vs σ_3 obtidas dos ensaios triaxiais e uniaxiais.

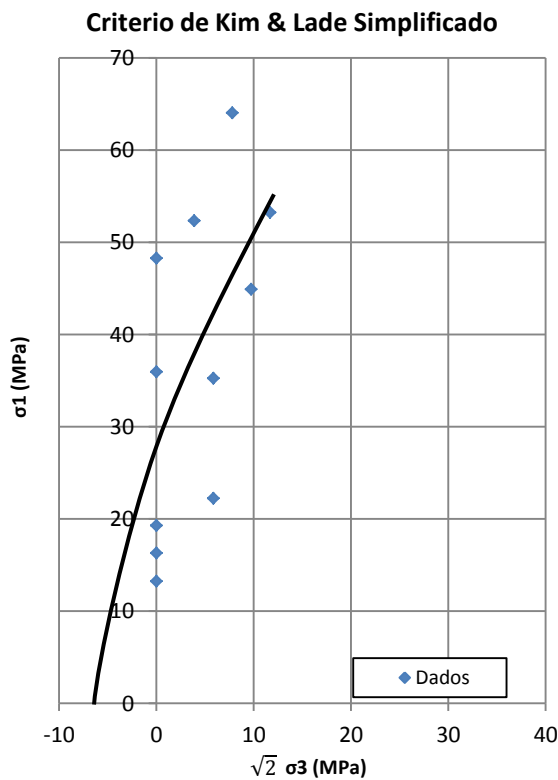


Figura 5.43 Envoltória de ruptura de Kim & Lade para o travertino.

Na Figura 5.44 se observa que a resistência não é só influenciada pela tensão confinante, mas também pela porosidade, embora com efeitos opostos, ou seja, verifica-se aumento da resistência com o incremento da pressão confinante, e uma diminuição da resistência com o incremento da porosidade.

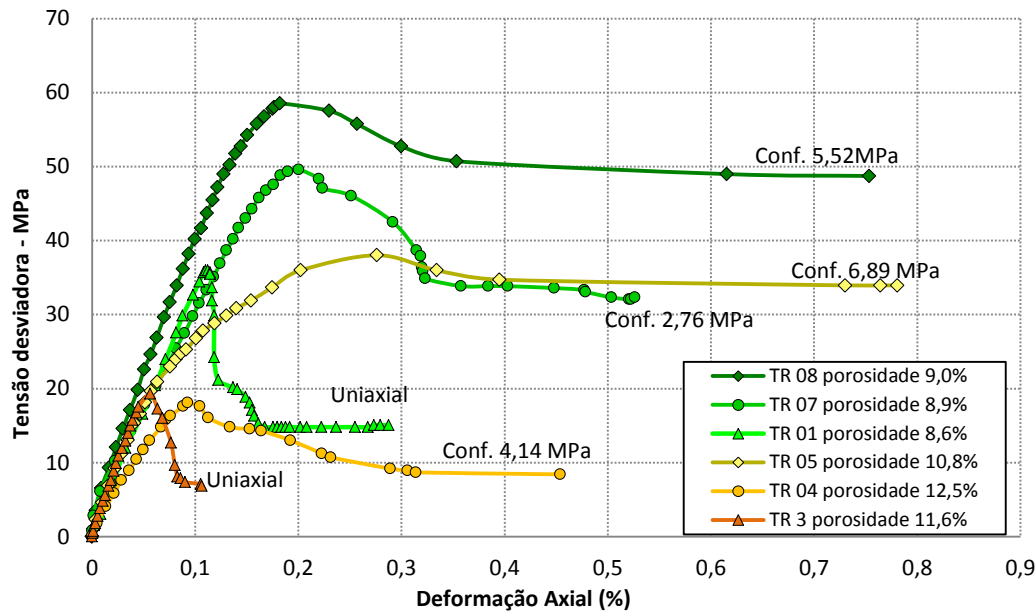


Figura 5.44 Influência do confinamento e da porosidade na resistência da rocha.

Considerando o critério de Hoek & Brown, Mohr - Coulomb e a influência da porosidade na resistência, se separaram os dados com porosidades maiores e menores a 10%, determinando-se um limite inferior e superior que define uma faixa da variação da envolvente de ruptura para o travertino com porosidades entre 8 e 15%, os parâmetros que definem estes limites tanto para o critério de Hoek & Brown como para o critério de Mohr-Coulomb são apresentados na Tabela 5.10, nota-se que as envolventes do critério de Hoek & Brown tem um bom ajuste aos dados, os quais apresentam um comportamento não linear (Figura 5.45).

Tabela 5.10 Parâmetros para os limites das envolventes de ruptura superior e inferior do travertino.

	Hoek & Brown				Mohr - Coulomb	
	C_0 (MPa)	m_i	s	a	c (MPa)	ϕ (°)
Limite superior	41,93	6,93	1	0,5	10,57	36
Limite inferior	15,35	10,15	1	0,5	3,60	38

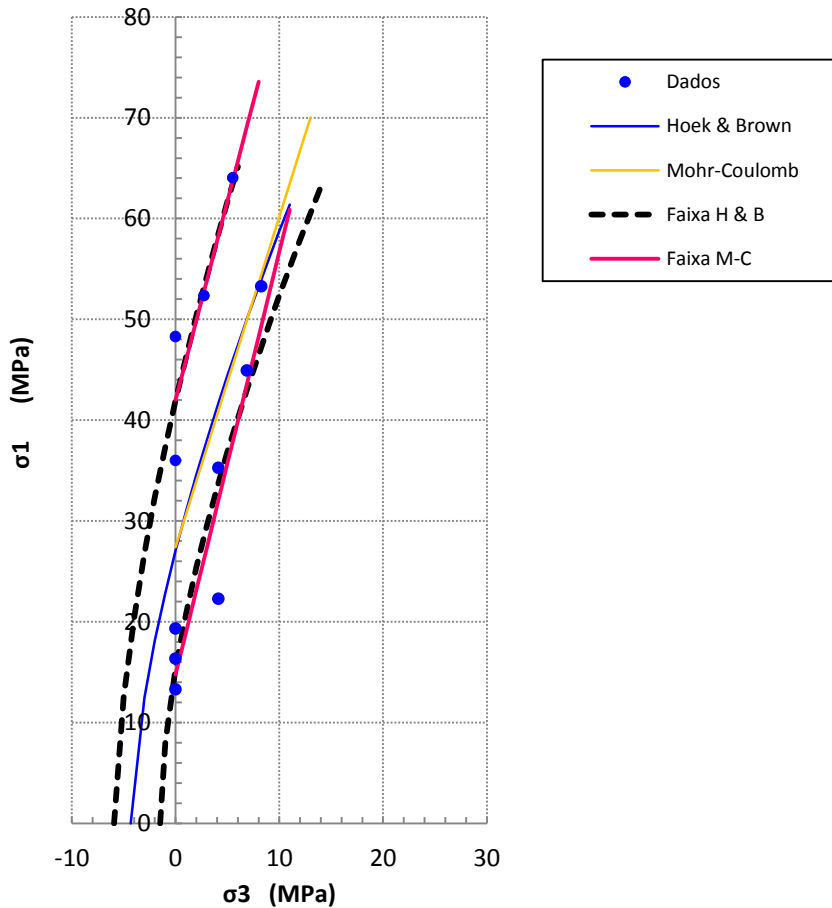


Figura 5.45 Faixa da variação da envoltória de ruptura.

5.9. Correlações

Na Figura 5.46 se mostra a resistência uniaxial em função da porosidade (experimental e análise de imagem), a qual mostrou grande influência sobre a resistência uniaxial e triaxial da rocha. As curvas de tendência obtidas apresentam bom ajuste para curvas de tendência do tipo potencial. Isto mostra um rápido decréscimo da resistência com o incremento da porosidade.

Nota-se que para porosidades menores que 10%, a resistência uniaxial se incrementa consideravelmente com pequenos decréscimos da porosidade. Mas, para porosidades superiores a 10%, a resistência apresenta pequenos decréscimos com maiores incremento da porosidade.

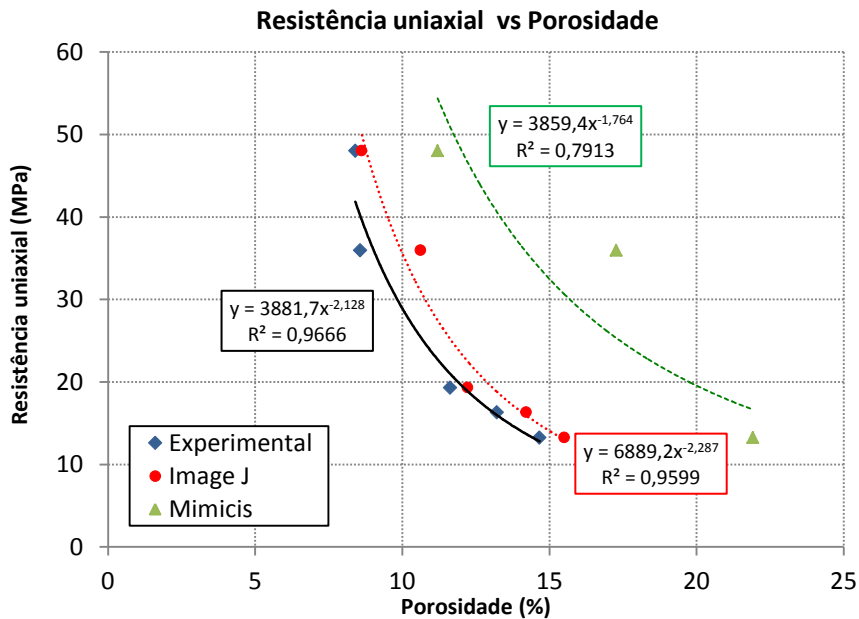


Figura 5.46 Influência da porosidade na resistência uniaxial

Pode-se admitir que a mudança da inclinação do gráfico da Figura 5.46, a partir de 10% da porosidade, ocorre devido a mudanças nas características da estrutura porosa. Porosidades menores que 10% estariam associadas a uma menor presença de poros com $d > 1$ mm no corpo de prova (Figura 5.47), e valores de porosidade maiores estariam associados a uma maior presença deste tipo de poros. No entanto, há que ter em conta que uma pequena variação dos poros com $d > 2$ mm poderia implicar um significativo incremento da porosidade.

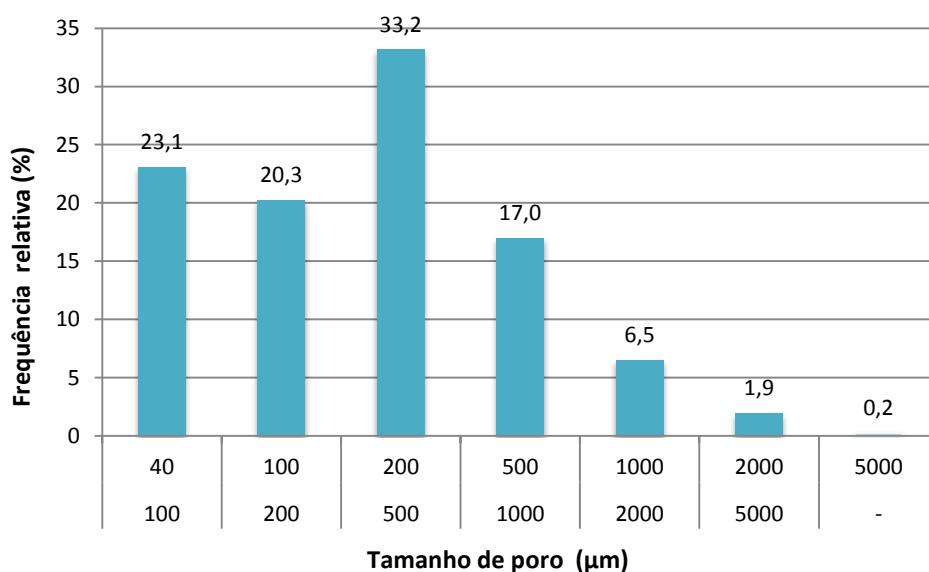


Figura 5.47 Distribuição do tamanho dos poros para o CP TR2, com porosidade menor a 10 %.

De acordo com a Figura 5.47 o surgimento das fraturas do tipo fendilhamento e cisalhamento estariam vinculados com os poros de diâmetro menor a 1 mm, onde a direção da fratura seria paralela à direção da tensão máxima.

Foi também observado que o início das fraturas se deu nas pontas dos poros alongados (Figura 5.48), aparentemente seguindo o critério de Griffith (Fossen, 2010) relacionado com início das fraturas devido a microdefeitos (microporos), que indica que a maior concentração de tensões estaria no extremo do microporo com menor raio de curvatura.

Mas foi observada que a direção da fratura não segue necessariamente a direção do poro, mas sim uma direção relacionada à direção de menor resistência da rocha, de menor tensão ou uma composição das duas.



Figura 5.48 Propagação da fratura no ensaio de resistência mecânica.

A Figura 5.49 mostra que a massa específica seca e a porosidade estão relacionadas linearmente, indicando que a massa específica seca diminui linearmente com o incremento da porosidade.

A Figura 5.50 apresenta a resistência uniaxial em função da massa específica seca, mostrando uma relação exponencial entre estas duas propriedades da rocha, evidenciando que a resistência da rocha é incrementada com o incremento da massa específica seca.

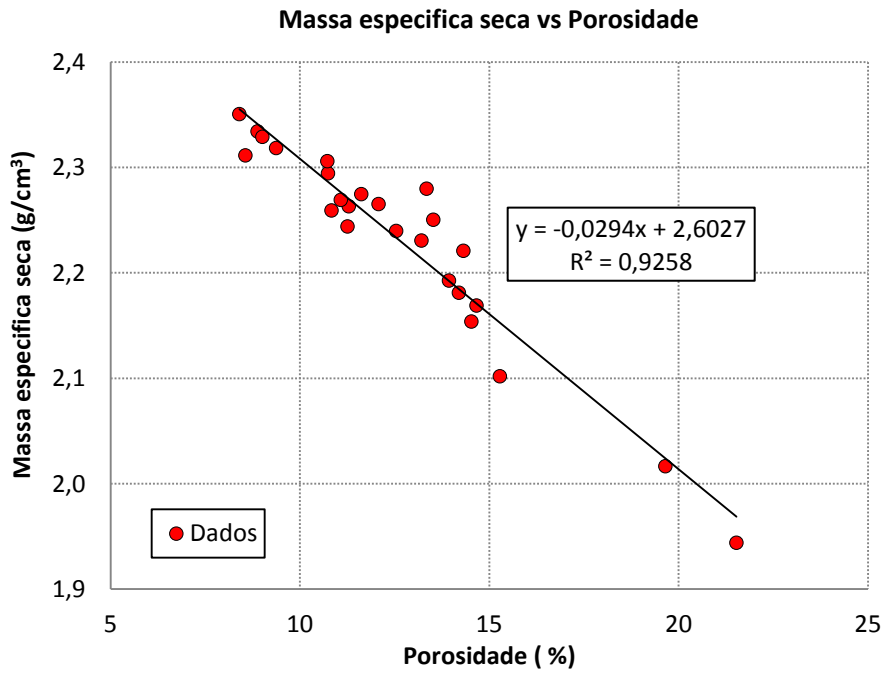


Figura 5.49 Massa específica seca em função da porosidade.

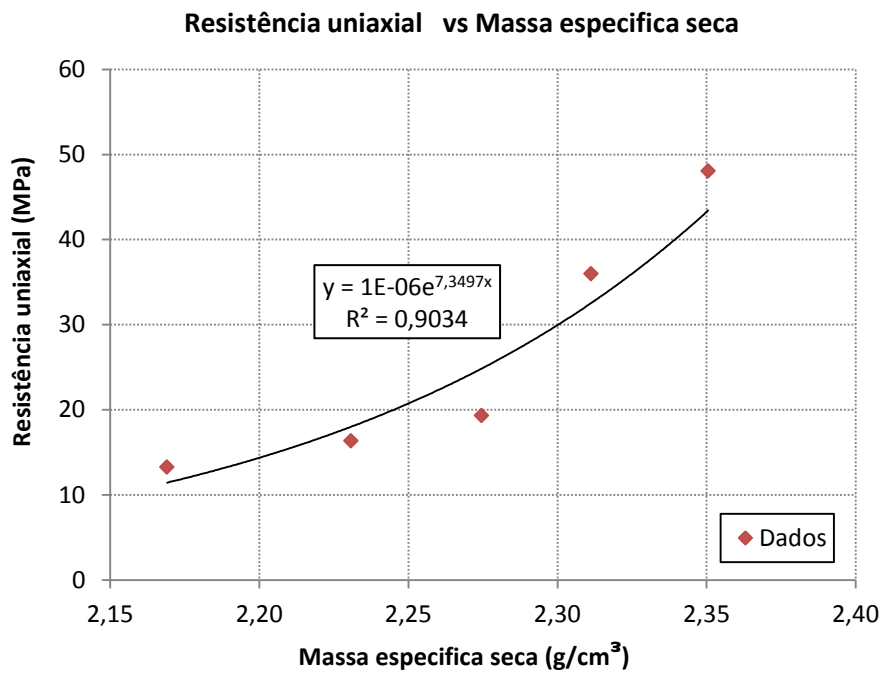


Figura 5.50 Resistência uniaxial em função da massa específica seca.

Desde a Figura 5.51 até a Figura 5.55 se apresentam correlações feitas em diferentes pesquisas de travertinos turcos, húngaros e de Itaboraí, dolomitos de Turquia e carbonatos de Israel, sendo comparados com os resultados do travertino Romano estudado no presente trabalho.

Na Figura 5.51 foram plotados os resultados do módulo de Young em função da porosidade da pesquisa de Vásárhelyi (2005), Domingues (2011) e Palchik (2011) junto à presente pesquisa, sendo observada uma tendência geral de decréscimo do módulo de Young com o incremento da porosidade.

Se observa que o módulo de Young apresenta valores muito baixos para elevados valores de porosidade ($n\% > 30\%$), isto indica que os carbonatos perdem rapidamente sua rigidez com o incremento da porosidade.

Nota-se que o travertino Romano tem um valor do módulo de Young de médio a alto de acordo com a nuvem de pontos, mas o travertino de Itaboraí tem valores ainda mais elevados, indicando que é mais rígido que a maioria dos carbonatos mostrados.

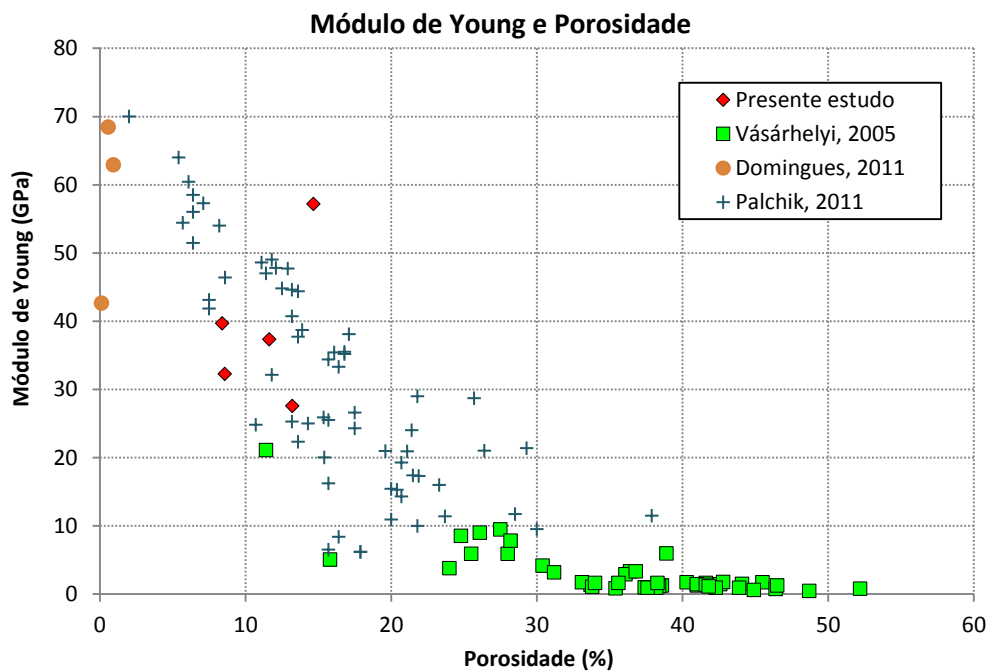


Figura 5.51 Gráficos do módulo de Young em função da porosidade.

Considerando as pesquisas anteriores foram plotados o módulo razão em função da porosidade, verificando-se que os carbonatos estudados nas outras pesquisas pelo geral apresentam módulos razão bem menores que o travertino romano (Figura 5.52). Isto poderia indicar uma maior anisotropia e heterogeneidade deste travertino com respeito aos outros carbonatos.

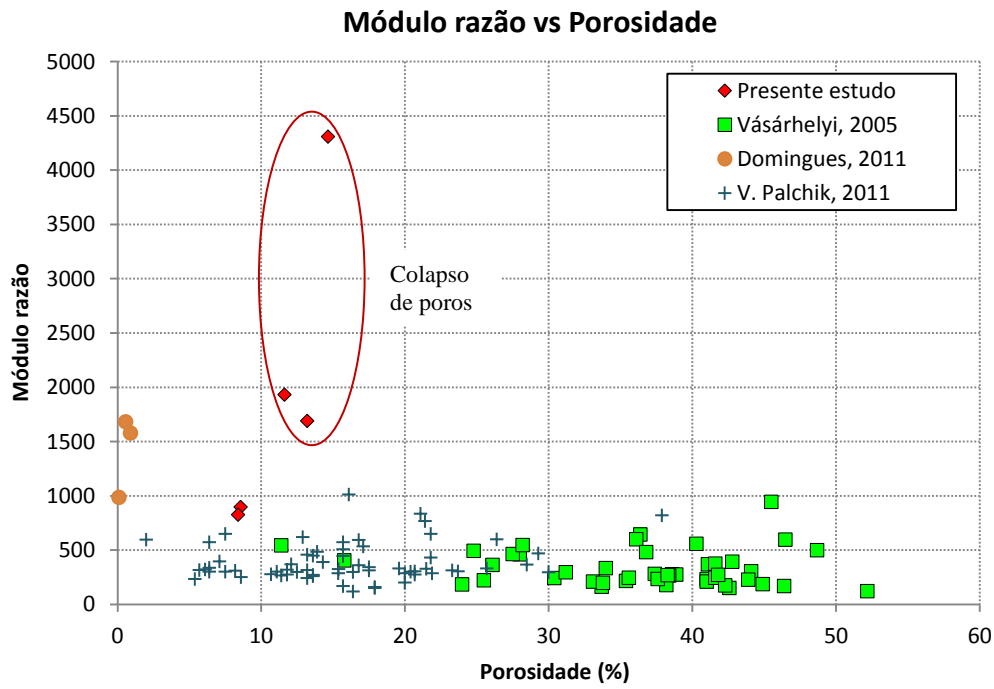


Figura 5.52 Gráficos de correlação do módulo razão em função da porosidade.

Na Figura 5.53 se observa que o travertino romano apresenta uma maior rigidez que os outros travertino e carbonatos com similar resistência.

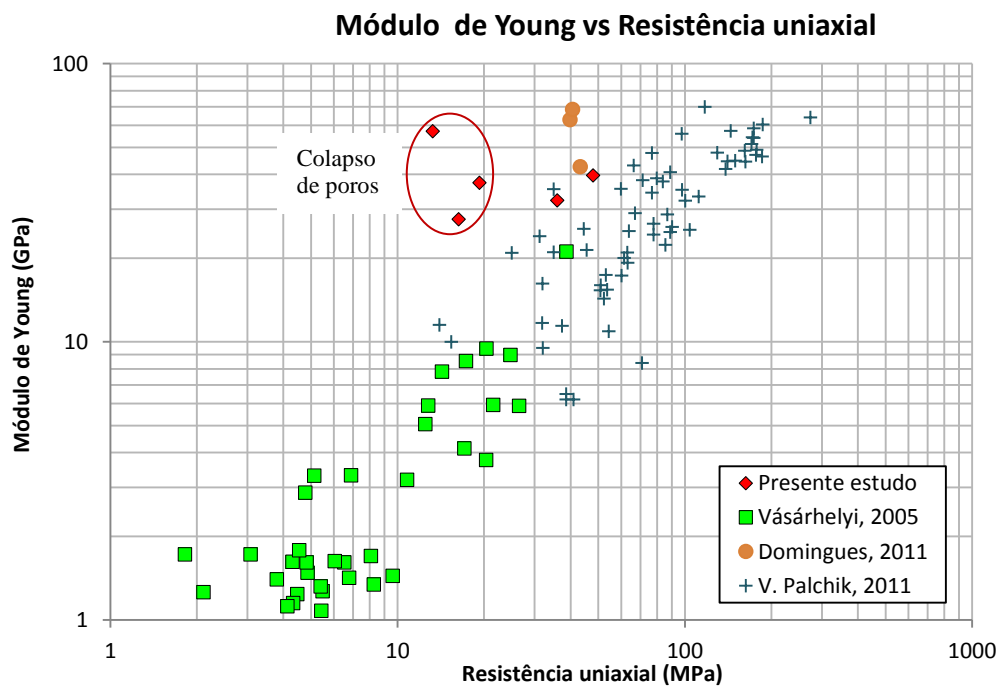


Figura 5.53 Gráficos de correlação do módulo de Young em função da resistência.

A Figura 5.54 mostra que, de modo geral, a resistência decresce com o incremento da porosidade.

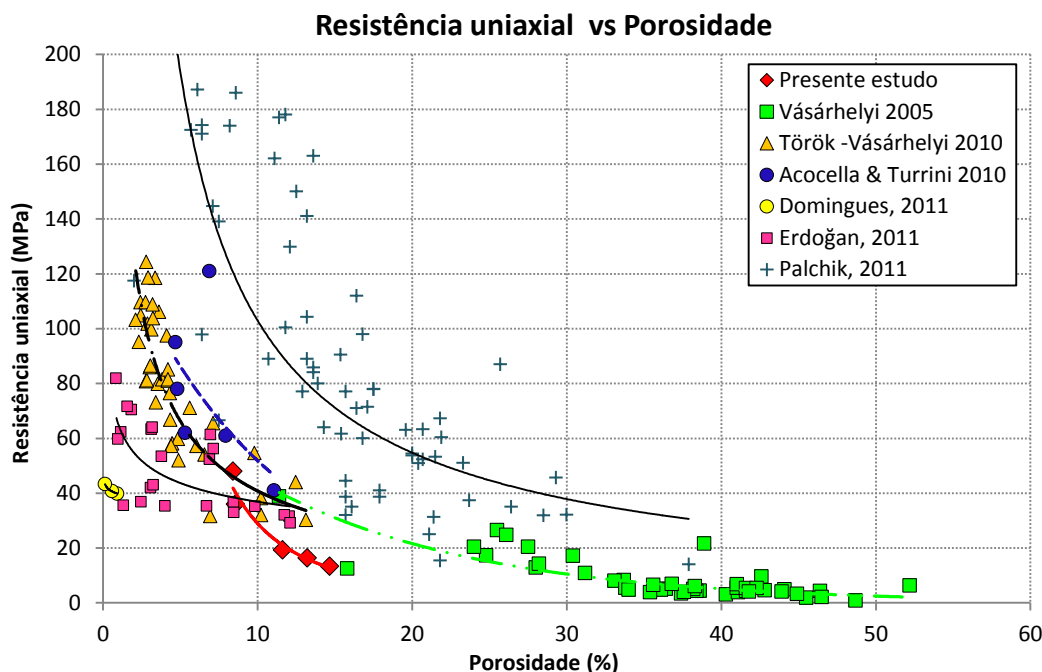


Figura 5.54 Gráficos de correlação da Resistência uniaxial em função da porosidade de diferentes pesquisas.

Também se pode observar que os resultados do travertino Romano se localizam na zona com maior densidade de pontos de outros travertinos, mostrando a boa coerência dos resultados com outras pesquisas (Vásárhelyi, 2005; Török – Vásárhelyi, 2010; Acocela – Turrini, 2010; Domingues, 2011; Palchik, 2011; Erdoğan, 2011).

Neste mesmo gráfico se mostra o amplo intervalo da variação da resistência e da porosidade dos carbonatos. Sendo os calcários, dolomitos e chalk estudados por Palchik (2011) os que mostram uma maior dispersão.

Na Tabela 5.11 apresentam-se as equações de regressão e os índices de correlação obtidos no presente estudo e de cada um dos estudos plotados na Figura 5.54.

Tabela 5.11 Equações de regressão e índices de correlação da resistência uniaxial em função da porosidade de diferentes estudos.

Equação	R ²	Litologia	Referência
$3881,7n^{-2,128}$	0,967	Travertino Romano	Presente estudo
$91,546 e^{-0,072n}$	0,614	Calcário	Vásárhelyi 2005
$204,34n^{-0,7}$	0,763	Travertino Húngaro	Török - Vásárhelyi 2010
$143,55 e^{-0,102n}$	0,436	Travertino	Acocela – Turrini 2010
$39,746 n^{-0,04}$	0,999	Travertino Itaboraí	Domingues 2011
$836,6 e^{-0,91n}$	0,531	Carbonatos	Palchik, 2011
$64,812 n^{-0,245}$	0,425	Travertino Turco	Erdoğan, 2011

A Figura 5.55 mostra as correlações entre a resistência uniaxial e a massa específica seca de diferentes carbonatos, mostrando o incremento da resistência com o incremento da massa específica seca. Os resultados do presente estudo têm um bom ajuste com a nuvem de pontos, mas o travertino de Itaboraí encontra-se pouco distante da nuvem de pontos, mostrando baixa resistência apesar de ter uma massa específica seca maior.

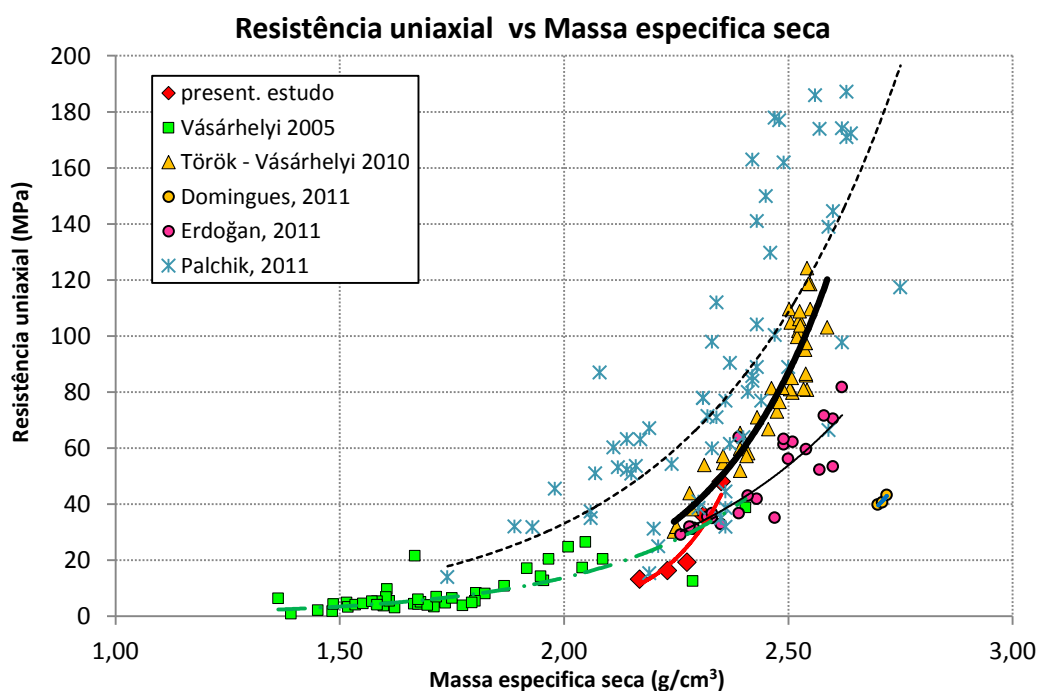


Figura 5.55 Correlações da Resistência uniaxial em função da massa específica seca de diferentes pesquisas.

A Tabela 5.12 apresenta a equações de regressão e os índices de correlação obtidos no presente estudo e em cada um dos estudos plotados na Figura 5.55.

Tabela 5.12 Equações de regressão e índices de correlação da resistência uniaxial em função da massa específica seca de diferentes estudos.

Equação	R ²	Litologia	Referência
$10^{-6}e^{7,350\gamma}$	0,903	Travertino Romano	Presente estudo
$0,0561 e^{2,75\gamma}$	0,641	Calcário	Vásárhelyi, 2005
$0,008e^{3,172\gamma}$	0,892	Travertino Húngaro	Török - Vásárhelyi, 2010
$0,0006 e^{4,127\gamma}$	0,923	Travertino Itaboraí	Domingues, 2011
$0,2858 e^{2,376\gamma}$	0,597	Carbonatos	Palchik, 2011
$0,1333e^{2,4\gamma}$	0,749	Travertino Turco	Erdoğan, 2011
$0,0574 e^{2,916\gamma}$	0,741	Travertino Turco	Çobanoğlu & Çelik, 2012