

6 Conclusões

As análises químicas por fluorescência de raios-X revelaram que os três tipos de materiais estudados são considerados calcários calcíticos, pois são ricos em cálcio e pobres em magnésio. De maneira geral, foram encontrados os mesmos elementos químicos nas amostras de travertino romano e nas amostras de travertino turco, variando apenas as concentrações. Este fato sugere que a área fonte e os processos geológicos que formaram estas rochas possam ser similares, apesar da grande distância geográfica que os separam.

A difração de raios-X constatou nos travertinos romanos e turcos apenas a presença de calcita. Já nos travertinos de Itaboraí, além da calcita, foi detectado quartzo.

As análises termogravimétricas realizadas constataram que os travertinos turcos e romanos começam a perder massa em temperaturas próximas a 70°C enquanto que os travertinos fitados de Itaboraí em temperaturas próximas a 100°C. Os travertinos romanos foram, entre os demais, os que apresentaram a maior perda de massa a temperatura de 500°C. Até este nível de temperatura, a perda de massa verificada está associada a evaporação da água presente nos poros.

A técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio se mostrou útil na determinação da porosidade dos materiais. No entanto, verificou-se uma influência na dimensão do penetrômetro nos resultados em função da heterogeneidade dos corpos de prova (*i.e.*, fator escala). Os ensaios realizados no CENPES/Petrobras com um penetrômetro de 15cm³ apresentaram valores bem superiores aos ensaios realizados na PUC com penetrômetros de 3 e 5 cm³.

No ensaio de porosimetria de mercúrio notou-se que os valores da porosidade obtidos nos corpos de prova que foram submetidos previamente a uma temperatura de 150°C foram mais elevados que os valores obtidos nos corpos de prova que foram submetidos previamente a uma temperatura de 65°C. A temperatura mais baixa foi utilizada para replicar os protocolos de ensaios comumente empregados no CENPES/Petrobras e na PUC-Rio. Já a temperatura

mais elevada foi empregada seguindo a orientação da norma ASTM D 4404 (2010) recentemente publicada.

Os resultados sugerem que a submissão a temperatura de 65°C foi insuficiente para eliminar a umidade presente nos poros das amostras, o que dificultou a penetração do mercúrio e, conseqüentemente, em valores mais baixos de porosidade.

Para validar esta hipótese foram realizados ensaios de termogravimetria nos diferentes materiais. Nos travertinos turco e romano observou-se perda de massa a temperaturas superiores a 70°C, enquanto no travertino fitado de Itaboraí a perda de massa só foi observada a temperaturas superiores a 95°C. Os resultados indicam a necessidade de reavaliação dos protocolos existentes no CENPES/Petrobras e na PUC-Rio posto que o aquecimento da amostra na temperatura especificada não é suficiente para eliminar a umidade presente nas amostras.

Por outro lado, a aplicação de 150°C na amostra pode resultar em uma alteração na estrutura dos poros caso haja a presença de argilominerais em sua composição. A norma ASTM D 4404 (2010) já alerta para este fato, e recomenda que o corpo de prova seja submetido ao processo de liofilização.

A técnica de determinação da porosidade através do processamento digital de lâminas petrográficas demonstrou ser um método bastante promissor. Os resultados das análises no travertino romano foram similares aos obtidos pela porosimetria de mercúrio. No entanto, houve uma grande discrepância com os resultados das análises de travertino turco e travertino de Itaboraí. A diferença entre os resultados pode ser creditada a representatividade da lâmina a ser analisada (*i.e.*, efeito escala).

Por outro lado, um dos fatores limitantes que mais influenciam os resultados obtidos reside na forma na qual a lâmina petrográfica é confeccionada. Verificou-se nas lâminas de travertino turco que alguns poros não foram impregnados pela solução de azul de metileno, o que subestimou o cálculo da porosidade.

A análise da porosidade utilizando água deionizada como fluido de intrusão mostrou-se bastante eficaz. Esta é uma técnica simples, de fácil realização e que não necessita de muitos recursos. No entanto, ela apresenta sérias limitações na determinação da meso e a microporosidade devido a dificuldade da água em penetrar os poros de reduzidas dimensões.

Devido ao fato do mercúrio penetrar mais facilmente em uma maior quantidade de poros do que a água, a porosimetria de mercúrio permite obter

valores mais exatos da densidade esquelética quando comparada com os dados obtidos na execução dos índices físicos. Face à existência de mesoporos detectados pela porosimetria de mercúrio, os valores de densidade esquelética obtida pela intrusão de mercúrio são geralmente superiores àqueles obtidos por absorção de água.

A análise de porosimetria por intrusão de gás nitrogênio se mostrou uma boa técnica para medição da porosidade, já que o gás nitrogênio apresenta uma melhor capacidade de penetração que os outros fluidos utilizados para medição da porosidade (mercúrio e a água).

A técnica de microtomografia se mostrou útil na realização de análises de porosidade, distribuição dos tamanhos dos poros e na visualização do arranjo dos poros na matriz rochosa. A microtomografia também permitiu detectar a conectividade dos poros no interior da rocha. A metodologia empregada no processamento das imagens foi satisfatória. Os modelos gerados representaram fielmente as amostras analisadas.

Os valores de resistência à compressão simples determinados nos corpos de prova obtidos de blocos de travertino de Itaboraí apresentaram-se dentro da faixa de variação de rochas carbonáticas presentes na literatura. No entanto, era esperado que os corpos de prova apresentassem uma maior resistência dada a baixa porosidade, alta densidade aparente, e alta velocidade de ondas longitudinais. Acredita-se que a resistência deste material seja fortemente influenciada pelo seu arranjo estrutural.

Os resultados dos ensaios de propagação da velocidade de ondas ultrassônicas permitiram identificar a anisotropia do material. Os valores de velocidade de ondas longitudinais (V_p) encontrados foram bastante elevados. Já os valores das velocidades de ondas transversais V_{s1} e V_{s2} variaram dependendo da laminação dos corpos de prova.

Os resultados dos ensaios de esclerometria permitiram identificar zonas no material com diferentes resistências. Estas zonas foram mapeadas através do uso da geoestatística. As zonas mais coesas, menos porosas apresentaram valores mais elevados do índice de esclerométrico.

O ensaio Cerchar foi útil para a determinação da abrasividade dos materiais rochosos. As amostras de travertino romano e turco apresentaram valores idênticos, enquanto que a amostra de travertino de Itaboraí apresentou um valor mais baixo. Devido aos travertinos de Itaboraí possuírem em sua composição minerais de quartzo esperava-se determinar valores mais elevados de abrasividade. A explicação para tal fato é que estes travertinos foram

coletados em afloramento, que provavelmente sofreram atividade intempérica, o que deixou a superfície da amostra mais cerosa, diminuindo o valor da abrasividade do material.

O Scratch test foi o ensaio mais representativo do processo de perfuração realizado nesta dissertação. Ele fornece a resistência ao corte, que por sua vez está diretamente associada à taxa de perfuração e, conseqüentemente, aos custos de perfuração. Verificou-se que o travertino de Itaboraí apresentou maior resistência ao corte dos materiais analisados, embora tenha apresentado uma baixa resistência à compressão.

De posse dos resultados do programa experimental procedeu-se uma análise com o intuito de buscar correlações entre os índices/propriedades/parâmetros determinados. Verificou-se que a resistência à compressão simples dos materiais é diretamente proporcional à densidade, à velocidade de propagação de ondas e ao índice esclerométrico; e inversamente proporcional à porosidade. Constatou-se ainda que a velocidade de propagação de ondas dos materiais é diretamente proporcional à densidade e inversamente proporcional à porosidade.

6.1.Recomendações para trabalhos futuros

Sugere-se que seja realizada uma série de ensaios de porosimetria de mercúrio para verificar a real influência da dimensão do penetrômetro na determinação da porosidade de rochas carbonáticas. Recomenda-se que o objetivo deste estudo seja determinar a dimensão ideal do penetrômetro.

Em trabalhos futuros, propõe-se que o ensaio de termogravimetria seja conduzido *a priori* para determinar a temperatura na qual haverá a eliminação de umidade dos poros da rocha.

Sugere-se o desenvolvimento de novas técnicas de confecção de lâminas petrográficas para que, durante o processamento de imagens, haja um maior contraste entre as partículas sólidas e os poros.