

A microtomografia computadorizada de raios x integrada à petrografia no estudo tridimensional de porosidade em rochas

José Manoel dos Reis Neto^{1,2}, Alberto Pio Fiori¹, Angela Pacheco Lopes¹, Clarice Marchese², Cristina Valle Pinto-Coelho¹, Eleonora Maria Gouvea Vasconcellos¹, Gabriel Fischer da Silva¹ & Rodrigo Secchi²

Resumo A porosidade contida nas rochas é objeto de estudo de geocientistas devido a diversas implicações genéticas destas feições. Porém, o que vem motivando a busca por novas técnicas analíticas para estudo dos poros são as análises petrofísicas. As técnicas experimentais de análise de porosidade, como injeção de mercúrio ou gás, possibilitam uma aproximação quantitativa, mas não permitem a visualização do arcabouço poroso. A análise petrográfica por microscopia óptica permite a visualização e quantificação dos poros intergranulares, porém, está restrita ao espaço bidimensional, sendo as quantificações menos representativas. O avanço tecnológico na microtomografia computadorizada de raios X (micro-CT) permite a análise tridimensional dos poros em microescala, além de quantificações automatizadas no volume. As análises em mármore, quartzito, arenito e brecha carbonática representadas neste trabalho, executadas no âmbito do PROJETO FALHAS/PETROBRAS/UFPR, mostram a forma, tamanho, conectividade, tortuosidade, distribuição e volume dos poros nestes litotipos, demonstrando as diferenças nos arcabouços porosos das rochas. A integração da micro-CT à petrografia possibilita a identificação de fases minerais com atenuação de raios X contrastantes, situando a incidência de porosidade no contexto mineralógico em três dimensões, além de contribuir para a consistência do método. Embora a resolução seja limitada no microtomógrafo de raios X utilizado (modelo 1172 da *Skyscan*), que não atinge o menor tamanho de poro de alguns litotipos, a integração das duas técnicas fornece informações inéditas e de extrema importância para investigação de microfeições relacionadas aos poros em rocha, auxiliando em interpretações genéticas e contribuindo significativamente para análise de reservatórios.

Palavras-chave: Microtomografia computadorizada de raios X, porosidade, rochas.

Abstract *X-ray computed microtomography integrated to petrography for the three-dimensional study of rock porosity.* The porosity contained in rocks is object of study by geoscientists due to the various genetic implications of these features. However, what have been motivating the search for new analytical techniques to study pores are the petrophysical analyses. The experimental techniques for porosity analysis, such as mercury or gas injection, allow a quantitative approach, but do not allow the visualization of the porous framework. Petrographic analysis by optical microscopy allows the visualization and quantification of intergranular pores, but it is restricted to the two-dimensional space and quantifications are less representative. Technological advances in X-ray computed microtomography (micro-CT) allowed three-dimensional analysis of pore geometry in microscale, in addition to automated volume measurements. The analyses of marble, quartzite, sandstone and dolomite breccia represented in this work and performed under the Project *Falhas/PETROBRAS/UFPR*, show the shape, size, connectivity, tortuosity, pore volume and distribution in these rocks, demonstrating the differences in the rocks' porous frameworks. The integration of micro-CT to petrography allows the identification of mineral phases with attenuation of contrasting X-rays, placing the incidence of porosity in the mineralogical context in three dimensions, in addition to the contribution to the consistency of the method. Although the resolution is limited in the X-ray microtomograph that was used (the *Skyscan* model 1172), which does not reach the smallest pore size of some rocks, the integration of both techniques provides new information, of extreme importance for the research about micro-features related to the pores in rocks, helping in genetic interpretations and significantly contributing for the analyses of reservoirs.

Keywords: X-ray computed microtomography, porosity, rocks.

1 - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), Brasil. E-mail: jmreis@ufpr.br, fiori@ufpr.br, angelalopes@ufpr.br, cristinavpc@ufpr.br, eleonora@ufpr.br, fischergab@hotmail.com

2 - Laboratório de Análise de Minerais e Rochas, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), Brasil. E-mail: clamarchese@hotmail.com, rosecchi@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO Recursos energéticos como água, gás e petróleo ocupam os espaços vazios contidos nas rochas, o que torna essencial o conhecimento das feições relacionadas aos poros para investigação de reservatórios. As pesquisas em laboratório têm contribuído para caracterização e correlação dos litotipos com a capacidade de armazenamento de fluidos. Na investigação dos aspectos petrofísicos, os dados quantitativos relacionados à porosidade e à distribuição do tamanho do poro em rocha são determinados tanto diretamente em lâminas petrográficas, quanto por métodos indiretos que utilizam injeção de gás ou mercúrio em picnômetros. Porém, nenhuma técnica é completa. A quantificação por petrografia necessita um trabalho minucioso, que despende muito tempo, e normalmente os resultados são limitados à análise bidimensional das lâminas. No caso dos métodos indiretos, apesar de fornecerem informações sobre o volume de porosidade, as técnicas não permitem observação direta dos poros, além dos problemas relacionados à penetração ineficiente do gás, e a geração de porosidade na própria injeção de mercúrio. A microtomografia de raios X (micro-CT) aplicada ao estudo da porosidade visa suprir algumas deficiências destas técnicas, complementando a análise de porosidade nas rochas.

A micro-CT, também denominada de tomografia computadorizada de alta resolução, é uma técnica não destrutiva, que permite a análise de centenas de seções microtomográficas e visualização tridimensional interna das amostras, além de quantificações automatizadas de área e/ou volume. No estudo da porosidade em rochas são fornecidos dados qualitativos e quantitativos relacionados à forma, tamanho, distribuição, volume, área e conectividade dos poros, em microescala. Além dos poros, é possível separar e quantificar fases minerais com atenuações distintas de raios X. A maior limitação da tomografia de raios X é a resolução atingida (Duliu 1999, Cnudde *et al.* 2006). No entanto, o avanço tecnológico da técnica possibilita atualmente a análise em microescala de materiais variados, inclusive em amostras de alta densidade, como minerais e rochas. A técnica se tornou mais acurada para estudos em microescala por volta do ano 2000 e, cada vez mais trabalhos são publicados sobre a aplicação da micro-CT no estudo de porosidade e permeabilidade em rochas (Geet *et al.* 2000, Wildenschild *et al.* 2002, Appoloni *et al.* 2007, Cnudde *et al.* 2009, Flukiger & Bernard 2009, Long *et al.* 2009, Tsakiroglou *et al.* 2009, Izgec *et al.* 2010), no entanto, raramente são integrados à análises petrográficas.

Este trabalho apresenta o processo analítico e resultados obtidos em métodos de análise por micro-CT, desenvolvidos durante o PROJETO FALHAS/PE-TROBRAS/UFPR. Foram selecionadas quatro amostras diferenciadas de rocha, uma de mármore, uma de quartzito, uma de arenito e uma de brecha dolomítica, demonstrando as diferenças nos arcabouços porosos dos distintos litotipos, e o potencial da técnica de micro-CT para estudos petrofísicos integrados à petrografia. A possibilidade de visualização tridimensional dos

poros e de fases minerais de atenuação contrastantes, e as quantificações automatizadas do volume fornecidas pela micro-CT, integradas com as informações petrográficas, torna a técnica uma grande aliada na caracterização e compreensão da porosidade em rochas.

MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS X (MICRO-CT)

A radiação X é produzida artificialmente por meio da aceleração de elétrons contra um material metálico de alto número atômico. O resultado é uma radiação eletromagnética caracterizada por alta frequência, pequeno comprimento de onda e alto poder de penetração. A menor quantidade de qualquer tipo de radiação eletromagnética é designada fóton. O feixe de raios X corresponde ao conjunto de fótons que foram gerados com o bombardeamento de elétrons de alta energia cinética. A atenuação está vinculada à redução de intensidade de um feixe, conforme ele atravessa a matéria. Neste caso, pode ocorrer absorção da radiação pelo meio, ou dispersão do feixe. Para melhor compreensão das investigações que envolvem os raios X é importante compreender o conceito de atenuação. Tanto a radiografia convencional, como a tomografia computadorizada, baseiam-se na equação de atenuação dos raios X, que estabelece que a intensidade da radiação medida por um detector é proporcional ao número de fótons presentes no feixe de radiação. Esta intensidade diminui quando o feixe atravessa os materiais, antes de chegar ao detector. A redução da intensidade medida por um detector ao atravessar o material é expressa por: $I = I^0 e^{-\mu x}$, onde I é a intensidade medida sem o elemento atenuador, I^0 é a intensidade medida após o elemento atenuador, μ é o coeficiente de atenuação linear e x é a espessura do objeto atenuador. Quando os raios X passam pela amostra, eles são atenuados em intensidades distintas, dependendo das diferenças entre os coeficientes de atenuação linear das fases contidas. A densidade e o número atômico efetivo dos objetos são os principais fatores que determinam o grau de absorção dos raios X.

Exames com raios X têm sido utilizados nas geociências há décadas (Calvert & Veevers 1962, Bouma 1964). No entanto, a projeção em plano do material analisado gera uma sobreposição de estruturas que oblitera informações. Na tomografia denominada linear, que antecedeu a tomografia computadorizada, a imagem era produzida mediante o obscurecimento da imagem em regiões indesejadas, o que torna a técnica limitada. Na tomografia computadorizada é feita uma reconstrução matemática com os dados adquiridos das projeções de raios X na amostra, para produção de cortes transversais, perpendiculares à dimensão axial do material analisado. A tomografia computadorizada produz uma imagem mais próxima do real por apresentar a atenuação média de cada pequeno elemento de volume, ordenando a informação de atenuação do feixe de raios X, e traduzindo a informação de forma quantitativa, com uma precisão muito maior que a obtida por técnicas convencionais.

Os componentes básicos de um tomógrafo são: fonte de raios X, detector e um sistema de rotação (Mees *et al.* 2003). Os tomógrafos mais antigos possuem a geometria do feixe de raios X em paralelo, onde a fonte realiza movimentos de rotação e translação. O advento da geometria do feixe em leque teve a principal função de eliminar o movimento translacional e diminuir o tempo de varredura, possibilitando a magnificação das projeções e visualização de objetos menores (Ketcham & Carlson 2001). A geometria em feixe cônico (Sarkar *et al.* 2004, Lima *et al.* 2009) acoplada a uma matriz de detectores, como a do microtomógrafo utilizado neste trabalho, permite reconstruir vários cortes com uma só varredura, desde que o objeto reconstruído atinja todo o detector. O microtomógrafo de raios X, modelo 1172 (*Skyscan*), possui uma rotação com passos precisos (alguns décimos de graus), pequenas aberturas que reduzem a dispersão, e são utilizados com uma relação fixa entre o tubo e o detector. O grau de dispersão é, então, controlado por colimação dos detectores. O detector do equipamento utilizado nas análises apresentadas consiste em uma câmera de 10 megapixels (4000 x 2300) com CCD (dispositivo de carga acoplado) de 12 bits, e cintilador por fibra ótica. Como é produzida uma equação para os valores individuais de μ (coeficiente de atenuação linear) para cada elemento da matriz, em cada medida de projeção do raio, nestes microtomógrafos multicortes é necessário um sistema computacional potente e de alta velocidade. Nas análises apresentadas foi utilizado um *cluster* de quatro computadores, com quatro gigabytes de memória RAM cada, para aplicação do cálculo algoritmo de *Feldkamp-Davis-Kress* (FDK), adequado para a geometria em feixe cônico, aplicado na reconstrução das seções microtomográficas.

Geet *et al.* (2000) e Geet & Swennen (2001) explicam que mesmo com o aperfeiçoamento dos equipamentos, a técnica não está livre de artefatos de interferência. Um problema que afeta a capacidade de um tomógrafo de representar exatamente o material analisado é o ruído. A semelhança nos coeficientes de atenuação dos materiais dificulta a diferenciação entre determinadas partes da amostra. No processamento computacional do valor do pixel pode ocorrer um erro na forma de variação estatística e esta variação limita a resolução da densidade final. Esta variação representa o ruído e aparece na imagem com um fundo granuloso ou mosqueado. Com relação à dispersão de raios X, a dificuldade é devido ao detector não discriminar entre um fóton primário diretamente da fonte e um fóton disperso originado de uma área que não está na linha de projeção do raio. O resultado é uma diminuição concomitante da resolução da densidade e da resolução espacial. Outros artefatos podem ser gerados na imagem devido a fatores diversos. Os artefatos em listas e anéis normalmente são originados por problemas nos detectores. Caso os detectores não sejam equivalentes ou intercalibrados com precisão, por exemplo, a projeção posterior para cada anel de dados seria diferente, produzindo anéis múltiplos. O mau alinhamento do tubo e do detector causa erro de posicionamento dos valores

calculados, o que também pode gerar artefatos, como o borramento das bordas ou listas. A manutenção preventiva pode diminuir os diferentes artefatos, que tendem a ser menor em equipamentos modernos.

Os parâmetros aplicados na aquisição dos dados na amostra podem interferir incisivamente na geração ou eliminação de artefatos. Portanto, é necessário conhecimento suficiente da técnica e do equipamento para obtenção de boas imagens nas diferentes amostras. Vários testes foram realizados para melhor compreensão da atenuação dos raios X nas diferentes rochas com as possibilidades permitidas pelo equipamento. A escolha da tensão e corrente adequadas para as análises dependerá principalmente do tamanho e da densidade da amostra. Os melhores resultados nas rochas analisadas foram obtidos com a tensão máxima do equipamento (100 kV) e corrente de 100 μ A. Outros testes com tensão mais baixa foram realizados, porém os resultados não foram satisfatórios. Para aplicação de tensão menor que 100 kV em rochas de dimensões centimétricas (1 a 5 cm, sendo este o tamanho máximo permitido pelo equipamento), é necessário aumentar o tempo de exposição dos raios X em cada passo de rotação da amostra, aumentando substancialmente o tempo de aquisição. Além do aumento do tempo analítico, os resultados nas amostras não foram melhores que os obtidos com 100 kV e menor tempo de exposição dos raios X.

Os filtros aplicados nas amostras neste trabalho foram de alumínio e cobre, utilizados a fim de filtrar a radiação de baixa energia, que comumente não contribui na análise de amostras densas. Nestes casos, os raios secundários não conseguem atravessar a amostra e chegar ao detector. Testes realizados com filtros de Al e menor tensão não forneceram resultados melhores. A resolução máxima na amostra com o equipamento utilizado depende do tamanho e forma da mesma. O tamanho da amostra influencia na resolução adquirida pela possibilidade de aproximação da fonte de raios X em relação à amostra, além da escolha da resolução da câmera. A resolução espacial não pode ser melhor que o tamanho representado pelo pixel. O ideal é que o tamanho do pixel seja duas vezes menor que a resolução desejada. Nas amostras analisadas, o tamanho do pixel variou entre 4 e 9 μ m. Na reconstrução dos modelos tridimensionais, o pixel da imagem é transformado matematicamente em voxel, capaz de representar a profundidade radiológica.

A análise de micro-CT aplicada a minerais e rochas realizada nesta pesquisa pode ser resumida em três etapas: i) aquisição das imagens de raios X no microtomógrafo, utilizando o *software Skyscan 1172 Control Program* (Sassov 2009); ii) reconstituição das seções de micro-CT no *software NRecon* (Liu 2010); e iii) tratamento de dados. A etapa de aquisição é a única que necessita ser realizada com o microtomógrafo de raios X. O tempo de aquisição dos dados é extremamente variável, pode demorar de minutos a horas, dependendo do tamanho das amostras e dos parâmetros escolhidos. Portanto, a relação custo-benefício deve ser avaliada. Os resultados desta etapa constituem

centenas de imagens de projeções de raios X da amostra, com extensão TIFF ou BMP, que serão utilizadas para a reconstituição das seções microtomográficas. Estas são geradas por meio do cálculo algorítmico de FDK utilizando o *cluster* de quatro computadores. Os resultados desta etapa são centenas de imagens TIFF ou BMP das seções microtomográficas das amostras. A partir desta etapa, os dados podem ser tratados em qualquer computador, desde que este tenha memória RAM suficiente (de preferência, acima de quatro gigabytes), sistema operacional preferencialmente de 64 bits, e um processador com no mínimo quatro núcleos. Neste trabalho foram utilizados os programas computacionais da *SkyScan: CTAnalyser - CTAn* (Kharitonov 2003), *CTVol* (Kharitonov 2010) e *CTVox* (Boons 2010), para tratamento dos dados, no sistema Windows. Esta etapa depende do objetivo da análise e exige conhecimento prévio das amostras para obtenção de melhores interpretações. Os resultados constituem tabelas em extensão TXT, imagens bidimensionais e tridimensionais em formatos JPG, TIFF e BMP, e vídeos com diversas extensões, dentre elas, AVI.

As imagens obtidas na microtomografia de raios X são correlacionadas neste trabalho com informações obtidas por análise petrográfica, incluindo microscopia óptica (microscópio Olympus BX60) em lâminas confeccionadas a partir da mesma rocha. A identificação das fases minerais presentes nas seções microtomográficas é resultado desta integração, o que demonstra que a descrição petrográfica é muito importante para auxiliar no entendimento da gênese dos poros. Porém, na análise permoporosa é recomendável a análise tridimensional dos poros e obtenção de dados quantitativos no volume, fornecidos pela micro-CT, para maior aproximação nos cálculos petrofísicos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO Durante o desenvolvimento da pesquisa foram realizadas análises em tipos variados de rocha, com diversos tamanhos, sendo que na aquisição dos dados de projeção de raios X foram testadas combinações (de tensão, corrente, filtros, ampliações, tempos de exposição em cada passo de rotação, médias para cada tempo de exposição, entre outros), a fim de aperfeiçoar as imagens resultantes. Procurou-se obter melhores imagens para cada rocha, com o objetivo de demonstrar as possibilidades no estudo do meio poroso em mármore, quartzito, arenito e brecha dolomítica. Para análises quantitativas comparativas, recomenda-se aqui o estabelecimento de uma análise padrão em amostras de mesmo tamanho. As amostras não necessitam de preparação, no entanto, resultados melhores são obtidos em amostras com maior simetria.

A figura 1A mostra uma rocha carbonática homogênea (mármore), de cor cinza clara, granulação muito fina, cortada em forma aproximadamente cúbica (com cerca de 15 mm de lado), selecionada para demonstrar uma análise simplificada de porosidade. Na aquisição dos dados de projeção dos raios X desta amostra foi

selecionado o tamanho de pixel de 5,78 μm . O tempo de aquisição foi de uma hora e seis minutos, e a reconstrução das seções microtomográficas no *cluster* durou oito minutos. A fotografia da amostra contém um desenho representativo do volume selecionado no tratamento dos dados apresentados (Fig. 1A). Uma das 665 seções microtomográficas geradas na análise da amostra pode ser visualizada na figura 1B, com demarcação da área selecionada. Nesta rocha carbonática, devido à homogeneidade, foi possível separar apenas rocha (minerais carbonáticos), poro e minerais opacos. A separação das fases nas seções microtomográficas é comumente denominada de binarização, onde o que está sendo selecionado fica branco na imagem, e o restante, preto. No caso desta amostra, a atenuação dos raios X na rocha gerou um tom de cinza intermediário nas seções microtomográficas. Os minerais opacos estão em branco, por possuírem maior coeficiente de atenuação, porém ocorrem em fração muito fina; e os poros aparecem em preto (Fig. 1B). A figura 1C demonstra a binarização dos poros (em branco) da área demarcada na figura 1B. As fases com atenuações distintas foram isoladas e quantificadas. O modelo tridimensional foi executado após a binarização das fases no programa *CTAn* e o tratamento da imagem no programa *CTVol*. Com as fases sobrepostas foi aplicada transparência na fase rocha, possibilitando a visualização dos poros no seu interior (Fig. 1D). É importante ressaltar que esta é só uma imagem capturada durante o estudo tridimensional, que nos programas computacionais possibilita a visualização da profundidade, inclusive com a utilização de óculos 3D. Na análise tridimensional dos poros observa-se que as paredes são rugosas, e a conectividade é maior do que a verificada na análise por microscopia óptica. Os poros possuem formas irregulares, típicas de dissolução, conforme verificado também na análise microscópica (fotomicrografia - Fig. 1E), onde é possível observar minerais carbonáticos microgranulares. O volume total selecionado para análise tridimensional (demarcado na figura 1A) foi de 186,11 mm^3 , onde 179,67 mm^3 (96,55%) correspondem ao volume de rocha carbonática e 0,006 mm^3 (0,0035%) são constituídos por minerais opacos. Do volume total de poros (6,43 mm^3 ou 3,46%), 4,44 mm^3 (2,36%) correspondem ao volume de porosidade com conectividade, e 1,99 mm^3 (1,10%) constituem porosidade isolada.

Uma amostra de quartzito friável, de granulação fina a média (Fig. 2A), foi escolhida para demonstrar o seu arcabouço poroso diferenciado. A rocha de cor branca é constituída essencialmente por quartzo, com a ocorrência de aproximadamente 1% de cristais de turmalina com até 2 mm de comprimento (no eixo c). A coesão entre os grãos na rocha é muito sutil, o que dificulta uma análise quantitativa de porosidade por métodos experimentais. Com tamanho de pixel de 9 μm , o tempo de aquisição dos dados de projeção dos raios X foi de 50 min e a reconstrução das seções microtomográficas durou 4 min. A seção de micro-CT selecionada, dentre as 480 geradas na análise, mostra os grãos de quartzo suturados, porém desagregados (Fig. 2B).

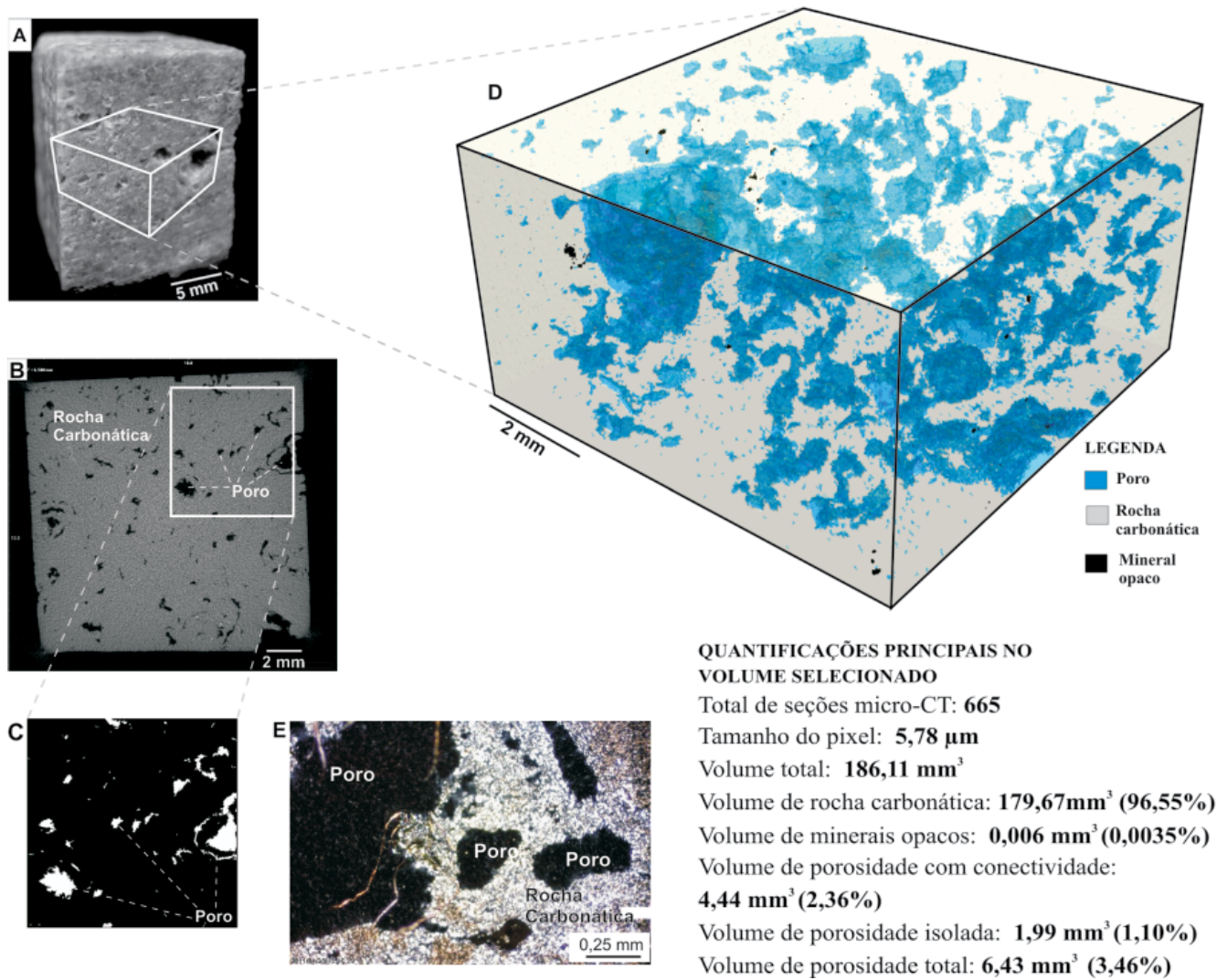


Figura 1 - Resultados de uma análise simples de porosidade por micro-CT e microscopia óptica em mármore. A) Fotografia da rocha carbonática com demarcação do volume para tratamento dos dados. B) Seção microtomográfica com indicação da área selecionada. C) Área demarcada na figura B, onde os poros foram binarizados (selecionados em branco). D) Modelo tridimensional gerado após a separação dos poros, rocha e minerais opacos. E) Fotomicrografia mostrando a ocorrência dos poros entre os minerais carbonáticos. Obs: a escala no modelo tridimensional é inferida com base na escala da seção microtomográfica.

Os minerais com maior atenuação, que correspondem à cor branca na imagem, são cristais de turmalinas definidos na análise macroscópica. O quartzo ocorre com uma coloração intermediária de cinza e os poros em preto. Um modelo tridimensional gerado diretamente da junção das seções microtomográficas, executado no programa computacional *CTVox*, utilizando um volume de 161,12 mm^3 , é mostrado na figura 2C. No programa é possível executar cortes diversos, inclusive de forma progressiva na amostra, possibilitando investigação detalhada dos poros, típicos de desagregação mecânica dos grãos. A análise tridimensional isolada da turmalina mostra orientação preferencial desta fase mineral (Fig. 2D). Com a amostra orientada em campo e no equipamento durante a análise, a direção da orientação pode ser medida e correlacionada com outras medidas

estruturais. As três fases detectadas na análise de micro-CT foram separadas no programa *CTAn*, e identificadas pela correlação com a análise petrográfica. No programa *CTVol*, o tratamento da imagem permite ressaltar o meio poroso (Fig. 2E). Devido à desagregação dos grãos de quartzo, o modelo demonstra um arcabouço poroso totalmente conectado, com espaços vazios ao redor dos grãos de quartzo. Do volume selecionado, 135,54 mm^3 correspondem a grãos de quartzo, 0,11 mm^3 são definidos como cristais de turmalina, e 26,47 mm^3 é o volume de porosidade.

Em arenito mal selecionado, com grãos subarredondados a arredondados e empacotamento aberto (representado na figura 3) verifica-se a possibilidade de separação entre o cimento e os grãos de quartzo, além dos poros e minerais opacos. A amostra de arenito

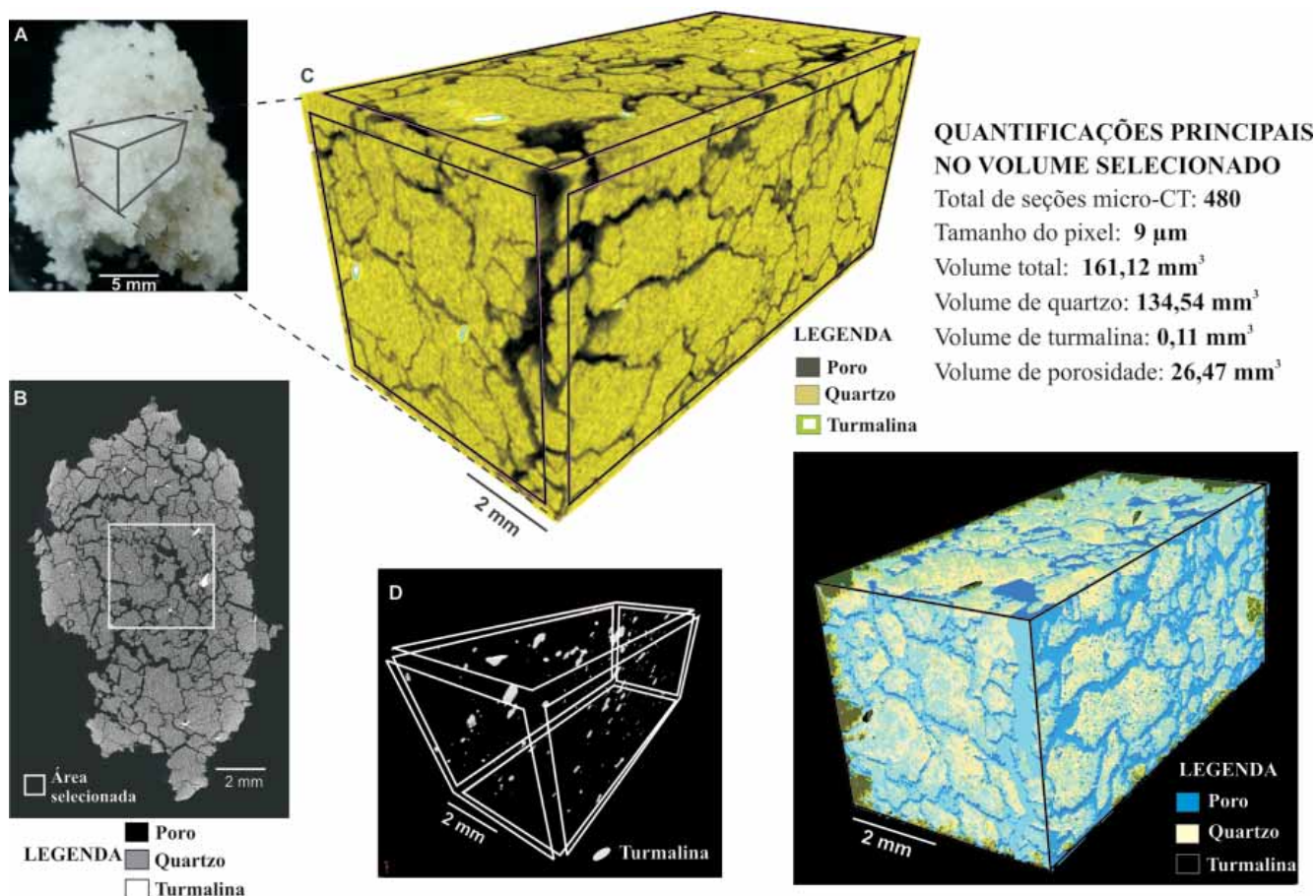


Figura 2 - Quartzito analisado por micro-CT. A) Aspecto geral da amostra com demarcação do volume selecionado para tratamento dos dados. B) Seção microtomográfica com demarcação da área selecionada. C) Modelo tridimensional executado diretamente das seções microtomográficas, sem separação de fases. D) Cristais de turmalina orientados. E) Modelo tridimensional elaborado após a binarização, onde os poros são ressaltados pela aplicação de transparência no quartzo. Obs: a escala nos modelos tridimensionais é inferida com base na escala da seção microtomográfica.

analisada pode ser visualizada na figura 3A, que contém o volume selecionado para as quantificações e modelos tridimensionais executados por micro-CT. A figura 3B representa uma das 887 seções microtomográficas obtidas durante a análise de toda amostra, onde o tamanho de pixel é de 6,5 μm . Os minerais opacos, com maior atenuação, aparecem em branco nas seções microtomográficas; depois o quartzo, com tom de cinza mais claro; o cimento em cinza escuro; e por fim os poros, que por não atenuarem os raios X, aparecem em preto (Fig. 3B). A área selecionada na seção microtomográfica está demarcada na imagem e a ampliação desta área está exposta na figura 3C, com a seleção da fase de atenuação que corresponde aos grãos de quartzo, demarcados em branco na imagem. É possível limitar na escala de cinza das seções microtomográficas as mesmas fases observadas em lâmina petrográfica por microscopia óptica, conforme a fotomicrografia da figura 3D. Nesta, os grãos arredondados de quartzo são visualizados cimentados por quartzo microcristalino, com pequenas ocorrências de minerais opacos e poros.

Um dos modelos tridimensionais gerados após a separação das fases está representado na figura 3E. Na análise tridimensional das fases isoladas e/ou sobrepostas e, até mesmo observando as seções microtomográficas individualmente, percebe-se que as informações morfológicas observadas em lâminas petrográficas podem ser limitadas. Isso se torna mais evidente em poros que aparentam não possuir conectividade na análise bidimensional, porém ocorrem com grande conectividade na análise tridimensional. A porosidade concentrada em partes heterogêneas no modelo tridimensional (Fig. 3E) sugere uma dissolução do cimento, possivelmente causada por percolação de caminhos de fluidos. No volume de 35,52 mm^3 selecionado da amostra de arenito, 21,37 mm^3 (60,38%) correspondem ao volume de grãos de quartzo, 10,29 mm^3 (29,02%) são constituídos por cimento silicoso, 0,005 mm^3 (0,014%) representam o volume de minerais opacos, e 0,96 mm^3 (2,70%) correspondem ao volume de porosidade total.

Na amostra de rocha carbonática heterogênea (brecha dolomítica) de dimensões de aproximadamente

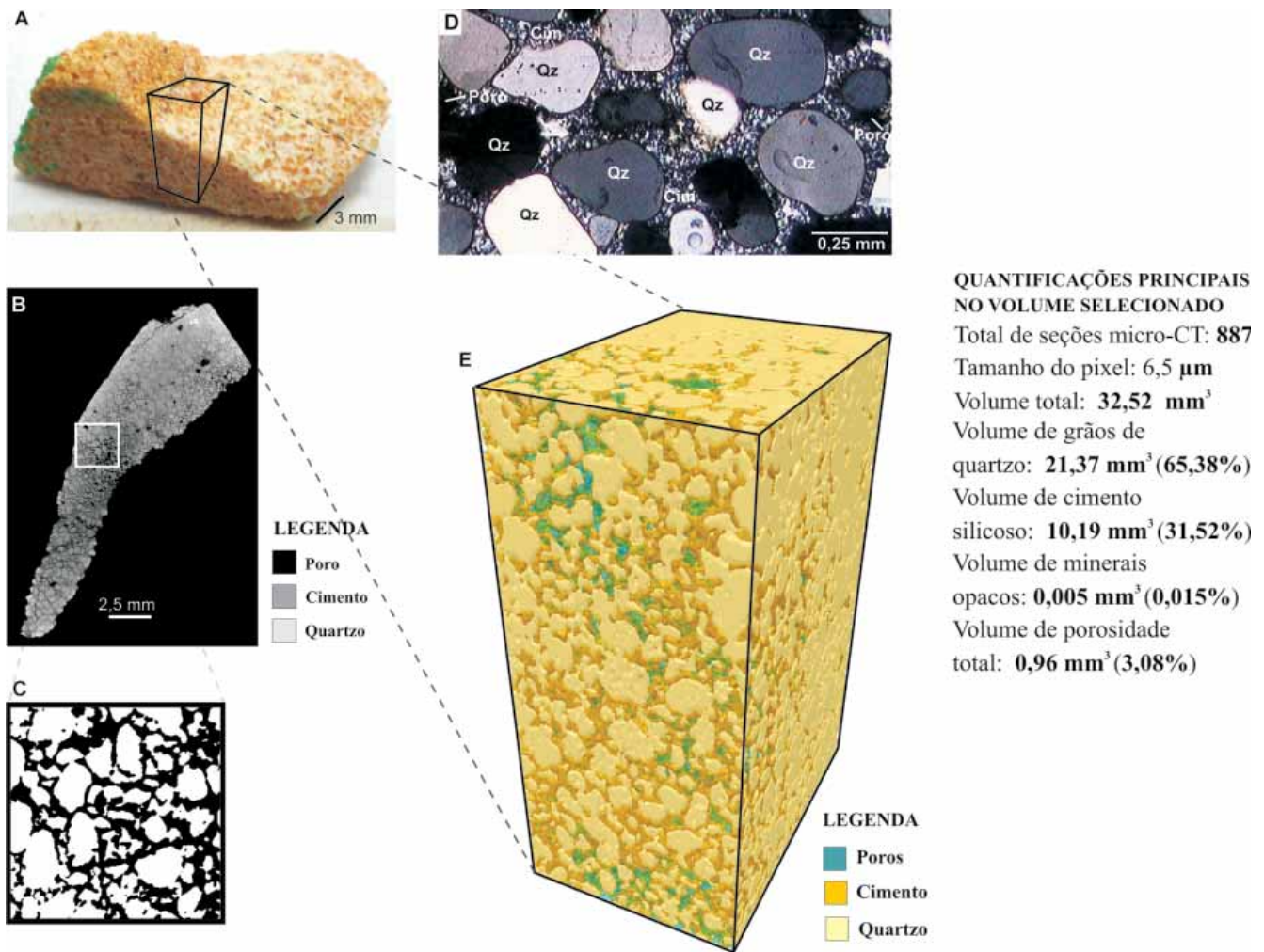


Figura 3 - Integração da micro-CT à petrografia na análise de arenito com cimento silicoso, mostrando o potencial para separação entre o cimento e os grãos de quartzo, além dos poros. A) Aspecto geral da amostra com demarcação do volume selecionado. B) Seção microtomográfica com a área selecionada. C) Quartzo binarizado (demarcado em branco) na área selecionada na figura B. D) Fotomicrografia da lâmina petrográfica utilizada para correlação com a escala de cinza resultante nas seções de micro-CT, mostrando os grãos de quartzo (Qz) em meio ao cimento silicoso (cim.). E) Modelo tridimensional com três fases (quartzo, cimento e poro) sobrepostas. Obs: a escala no modelo tridimensional é inferida com base na escala da seção microtomográfica.

10 x 10 x 15 mm (Fig. 4A), a aquisição dos dados no microtomógrafo foi executada em 1 h e 25 min, com tamanho de pixel de 26 μm . A rocha possui composição heterogênea, com porções de cor branca constituídas por calcita, porções de cor alaranjada com predomínio de dolomita e níveis pretos formados por minerais opacos. A figura 4B representa a seção transversal da rocha onde se observa um nível de minerais opacos entre a fase de maior concentração de dolomita e a fase com maior concentração de calcita. Este corte foi efetuado fisicamente na amostra para correspondência das fases minerais, determinadas em microscópio óptico, com as seções microtomográficas. Na lâmina petrográfica observam-se porções ricas em calcita e porções ricas em dolomita, onde se visualiza o hábito dos cristais de dolomita em ponta de lança, com exsolução de mineral rico em ferro em superfícies de clivagem, típicas da

dolomita em sela (Pinto-Coelho 2008), com porosidade diretamente associada a esta fase (Fig. 4C). Os coeficientes de atenuação da dolomita e da calcita são muito semelhantes, porém, o alto teor de ferro comumente detectado nestes tipos de cristais de dolomita, gera contraste na atenuação, que permite a distinção nas seções de micro-CT. A figura 4D demonstra que a zonação de ferro que ocorre em cristais de dolomita também pode ser detectada na análise microtomográfica, onde é visível o hábito em ponta de lança. A porosidade associada à fase de dolomitização e com maior incidência próxima ao nível de minerais opacos fica mais nítida na análise das 1.168 seções microtomográficas. A aplicação de transparência nas fases carbonáticas do modelo tridimensional possibilita observar a maior concentração de porosidade próxima aos minerais opacos, que estão em um nível preferencial (Fig. 4E), correspondente ao

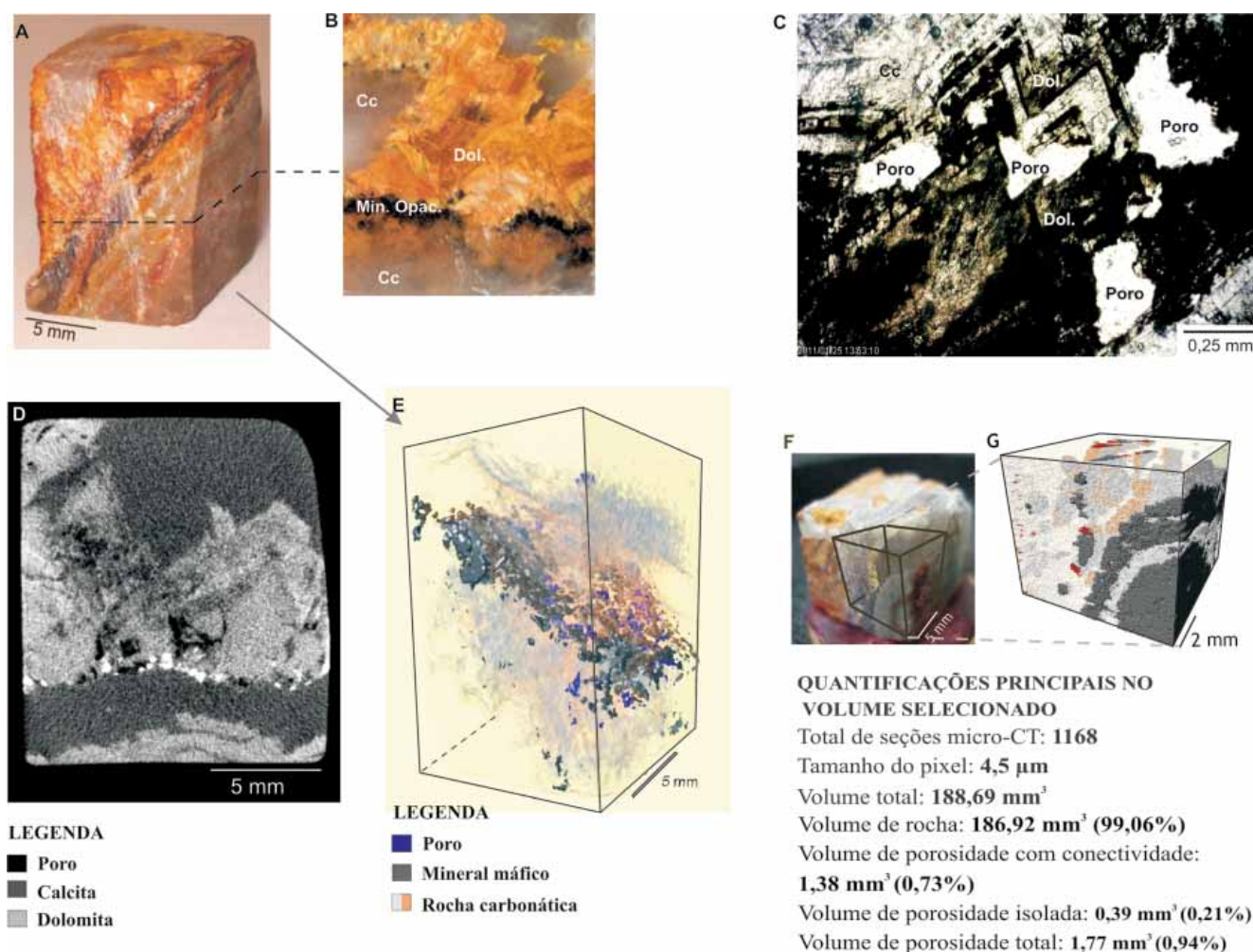


Figura 4 - Análise de porosidade por micro-CT integrada à petrografia em brecha dolomítica. A) Fotografia da rocha carbonática. B) Corte efetuado na amostra a fim de obter melhor correlação com os cortes virtuais executados por micro-CT (Cc: calcita; Dol: dolomita; Min. Opac: mineral opaco). C) Fotomicrografia mostrando a ocorrência dos poros junto aos cristais de dolomitas em sela. D) Seção microtomográfica selecionada com demarcação das fases correlacionadas com a petrografia. Observar microporosidade incidindo na dolomita em sela e próximo à concentração de minerais opacos. E) Modelo tridimensional gerado após a separação das fases nas seções microtomográficas. Observar a concentração de poros principalmente junto ao nível de minerais opacos. F) Fotografia da rocha utilizada para as quantificações apresentadas, com o volume selecionado demarcado. G) Um dos modelos tridimensionais gerados a partir do volume selecionado para quantificação. Obs: as escalas dos modelos tridimensionais são inferidas com base na escala da seção microtomográfica.

observado na análise macroscópica da amostra (Fig. 4A). A quantificação das fases minerais foi executada na rocha visualizada na figura 4F, que corresponde à outra parte da rocha cortada em dimensões menores, a fim de atingir melhor resolução (pixel de 4,5 μm). A figura 4G é um modelo tridimensional do volume selecionado na figura 4F, onde estruturas macroscópicas podem ser correlacionadas no modelo virtual. Em um volume total de 188,69 mm^3 , 186,92 mm^3 (99,06%) correspondem à rocha, 1,38 mm^3 (0,73%) tratam-se de porosidade com conectividade e 0,39 mm^3 (0,21%) são considerados como porosidade sem conectividade.

A análise de microporosidade nas quatro rochas analisadas demonstra o potencial da micro-CT

integrada à petrografia para o estudo dos diferentes arcabouços porosos. Na amostra de rocha carbonática homogênea, a porosidade é típica de dissolução, com cavidades predominantemente conectadas. O quartzo friável, devido à desagregação mecânica entre os grãos, mostra um arcabouço poroso altamente conectado, com uma trama resultante do espaço entre os grãos de quartzo, que possuem a forma típica da desagregação dos grãos anteriormente suturados. A análise de microfaturas em diversos tipos de rocha pode seguir uma metodologia semelhante. No arenito com cimento silicoso, a porosidade ocorre de forma heterogênea, sugerindo dissoluções localizadas do cimento, com porosidade menor que nas demais amostras estudadas. É

interessante observar, ainda, a diferença na forma do quartzo na amostra de quartzito e do arenito, onde os contatos suturados no quartzito contrastam com os grãos arredondados identificados no arenito com cimento silicoso. Neste caso, a micro-CT possibilita uma análise dos minerais, contribuindo para melhor entendimento genético da porosidade. Além de separação entre poro, rocha, cimento e minerais opacos, as análises de porosidade apresentadas demonstram a possibilidade de associação dos poros com fases minerais contrastantes de atenuação, que podem ser identificadas em microscopia óptica. Na amostra de brecha dolomítica, a distinção por micro-CT entre as fases ricas em calcita e as fases ricas em dolomita, permite verificar a associação de porosidade com a fase de dolomitização, e com maior incidência próxima à concentração de níveis de minerais opacos. Neste caso, a possibilidade de caracterização da dolomita em sela também é interessante, por se tratar de um indicador hidrotermal, que pode estar associado à alta porcentagem de porosidade em um reservatório (Radke & Mathis 1980, Zhang *et al.* 2009, entre outros).

Gaspari *et al.* (2004) apresentam comparações entre dados de porosidade obtidos por análise de imagens microtomográficas e dados experimentais. Os autores explicam que, o fato de as imagens não possuírem resolução suficiente para detecção do menor tamanho de poro contribui para resultados quantitativos mais baixos nas análises por imagens, que naqueles fornecidos por métodos quantitativos experimentais. No entanto, é necessário considerar que a análise pelos métodos quantitativos pode gerar poros durante a injeção de gás ou fluido e até mesmo fornecer dados aparentes de tamanho de poros por ligações estreitas entre os mesmos, que necessitam maior pressão para penetração na rocha. Após análise aprofundada, Gaspari *et al.* (2004) consideram a técnica de micro-CT confiável para análise de porosidade e permeabilidade intrínseca, em rochas. Pesquisas de permoporosidade em rochas por análise de imagens, semelhantes às realizadas com a microtomografia, eram feitas por varredura de lâminas petrográficas impregnadas e escaneadas, e reconstruções tridimensionais por modelos matemáticos (Diógenes 2009). Esta técnica pode ser considerada precursora da análise de microporosidade em rocha por imagem, que agora permite a automatização dos resultados, além dos cortes não destrutivos das amostras.

A permeabilidade não pode ser medida diretamente nas análises de micro-CT, mas pode ser estimada por meio de cálculos e simulações a partir das imagens e dados gerados pela técnica. Métodos de aplicação dos dados obtidos por microtomografia computadorizada em análises qualitativas e quantitativas de permeabilidade e de fluxo dinâmico demonstram a importância dos dados fornecidos pela micro-CT nestes estudos petrofísicos (Císlarová & Votrubová 2002, Akin & Rousek 2003, Géraud *et al.* 2003, Daňan *et al.* 2004, Karpyn *et al.* 2009, Ovaysi & Piri 2010). Estes trabalhos demonstram, inclusive, métodos aplicados com ferramentas que permitem

a geração de gráficos de distribuição de tamanho de poro, entre outros, executáveis no *software CTAN*. Além destes, imagens tridimensionais resultantes das análises de porosidade por micro-CT podem ser utilizadas em simulações virtuais diversas, como em testes de resistência. Este tipo de teste pode ser efetuado também de forma experimental nas amostras por meio do acessório de tração e compressão da *Skyscan*, que é inserido no interior do microtomógrafo.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES O avanço tecnológico na tomografia computadorizada de raios X a torna uma técnica inovadora no estudo de porosidade de rochas em laboratório. A micro-CT permite a visualização de centenas de cortes não destrutivos, visualização tridimensional de porções específicas e quantificações automatizadas nas amostras. Quando integrada com a petrografia, permite a identificação de fases minerais de atenuações contrastantes, possibilitando o melhor entendimento do meio poroso e das relações entre as diferentes fases. As etapas de aquisição dos dados no microtomógrafo de raios X e reconstrução das seções microtomográficas necessitam experiência do pesquisador e conhecimento aprofundado do equipamento. Somente a partir de boas imagens podem-se obter resultados fidedignos no tratamento dos dados.

A limitação na análise da porosidade por micro-CT é a resolução atingida na amostra, que pode não atingir o menor tamanho de poro. Se a resolução não for suficiente, isso pode dificultar a parte de individualização (binarização) dos poros na imagem. No entanto, mesmo com esta limitação, diversos trabalhos como os citados anteriormente têm demonstrado que a aplicação dos dados de micro-CT em cálculos e simulações de permeabilidade contribui significativamente para avaliação do potencial de um reservatório. A resolução atingida nas imagens depende do tamanho da amostra. Neste caso, para resultados quantitativos mais precisos recomenda-se um trabalho com integração de escalas, com aquisições diferenciadas na mesma amostra, analisada em diferentes tamanhos/resoluções. Ou ainda, a integração de dados de micro-CT com os obtidos com os nanotomógrafos, microtomógrafos acoplados a um *synchrotron* (acelerador de partículas cíclico) e/ou análise fractal.

Os resultados apresentados para os quatro tipos de rocha demonstram a capacidade da micro-CT para caracterização de arcabouços porosos distintos, possibilitando a análise qualitativa e quantitativa da forma, tamanho, volume, distribuição e conectividade dos poros. Além disso, é uma excelente ferramenta que integra tridimensionalmente aspectos petrofísicos à petrografia. A possibilidade de detectar fases minerais com a técnica permite um entendimento ainda melhor do arcabouço poroso e a observação tridimensional da fase ou região da amostra em que ocorre a maior parte dos poros, auxiliando no entendimento da gênese. A varredura na rocha por microtomografia de raios X comporta ainda a detecção de dolomita em sela, importante

indicador de alteração hidrotermal, que pode estar associado à geração de alta porcentagem de porosidade.

Como nenhuma técnica de análise de poros é totalmente satisfatória, para melhor compreensão, o aconselhável é integrar resultados fornecidos pelos diversos métodos. Este trabalho demonstra que os dados fornecidos pela micro-CT, integrados às análises petrográficas, podem fornecer informações surpreendentes, contribuindo significativamente para análise de um reservatório.

Agradecimentos Os autores agradecem à Rede de Estudos Geotectônicos da PETROBRAS, que por meio do PROJETO FALHAS, permitiu a compra do microtomógrafo de raios X e o desenvolvimento da pesquisa apresentada. A todos os professores, funcionários e alunos da Universidade Federal do Paraná, que auxiliaram no desenvolvimento dos métodos aplicados, em especial, ao Grupo LAMIR. Aos membros da *Skyscan/Instrutécnica*, que transmitiram parte do conhecimento básico sobre o equipamento e a técnica.

Referências

- Akin S. & Rousek A.R. 2003. Computed tomography in petroleum engineering research. *In*: F. Mees, R. Swennen, M. V. Geet, P. Jacobs. (eds.) *Applications of x-ray computed tomography in geosciences*. London, Geological Society Special Publications, p. 23-38.
- Appoloni C.R., Fernandes C.P., Rodrigues C.R.O. 2007. X-ray microtomography of a sandstone reservoir rock. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, **580**:629-632.
- Boons S. 2010. *Software CTVox, version 1.0.0.r479*. Kontich, Bélgica, 2010. Disponível em: <http://www.skyscan.be/products/downloads.htm>.
- Bouma A.H. 1964. Notes on X-ray Interpretation of Marine sediments. *Marine geology*, **2**:278-309.
- Calvert S.E. & Veevers J.J. 1962. Minor structures of unconsolidated marine sediments revealed by X-radiography. *Sedimentology*, **1**:287-295.
- Císlarová M. & Votrubová J. 2002. CT derived porosity distribution and flow domains. *Journal of Hydrology*, **267**:186-200.
- Cnudde V., Masschaele B., Dierick M., Vlassenvroeck J., Hoorebeke L.V., Jacobs P. 2006. Recent progress in X-ray CT as a geosciences tool. *Applied Geochemistry*, **21**:826-832.
- Cnudde V., Silversmit G., Matthieu B., Jan D., Björn D.S., Schoonjans T., Denis V.L., Yoni D.W., Marlina E., Laszlo V., Luc V.H., Patric J. 2009. Multi-disciplinary characterization of a sandstone crust. *Science of the Total Environment*, **407**:5417-5427.
- Dañan J.F., Fernandes C.P., Philippi P.C., Bellini da Cunha Neto, J. A. 2004. 3D reconstitution of porous media from image processing data using a multiscale percolation system. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **42**:15-28.
- Duliu O. 1999. Computer axial tomography in geosciences: an overview. *Earth Science Reviews*, **48**:265-281.
- Diógenes A.N. 2009. *Reconstrução tridimensional de meios porosos utilizando técnicas de simulated annealing*. Tese de Doutorado, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 147 p.
- Flukiger F. & Bernard D. 2009. A new numerical model for pore scale dissolution of calcite due to CO₂ saturated water flow in 3D realistic geometry: principles and first results. *Chemical Geology*, **265**:171-180.
- Gaspari H.C., Fernandes C.P., Philippi P.C., Rodrigues C.R. O. 2004. Determinação Computacional da Permeabilidade de Rochas Reservatório. *In*: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 3, *Anais*, p. 1-6.
- Geet M.V. & Swennen R. 2001. Quantitative 3D-fracture analysis by means of microfocus X-ray computer tomography (μ CT): an example from coal. *Geophysical Research Letters*, **28**(17):3333-3336.
- Geet M.V., Swennen R., Wevers M. 2000. Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocus X-ray computerized tomography. *Sedimentary Geology*, **132**:25-36.
- Géraud Y., Surma F., Mazerolle F. 2003. Porosity and flow characterization of granites by capillary wetting using X-ray computed tomography. *In*: Mees F., Swennen R., Geet M.V., Jacobs P. (eds.) *Applications of x-ray computed tomography in geosciences*. London, Geological Society Special Publications, p. 95-105.
- Izgec O., Zhu D., Hill A.D. 2010. Numerical and experimental investigation of acid wormholing during acidization of vuggy carbonate rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **74**:51-66.
- Karpyn Z.T., Alajmi A., Radaelli F., Halleck P.M., Grader A.S. 2009. X-ray CT and hydraulic evidence for a relationship between fracture conductivity and adjacent matrix porosity. *Engineering Geology*, **103**:139-145.
- Ketcham R.A. & Carlson W.D. 2001. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences. *Computers & Geosciences*, **27**:381-400
- Kharitonov V. 2003. *Software CTAnalyser, version 1.10.9.0*. Kontich, Bélgica, 2003, 1 DVD.
- Kharitonov V. 2010. *Software CTVol realistic 3D-visualization, version 2.2.0.0*. Kontich, Bélgica, 2010, 1 DVD.
- Lima I., Assis J.T., Lopes R.T. 2009. Three-dimensional conic beam X-ray microtomography in bone quality. *Spectrochimica acta part B*, **64**:1173-1179.
- Liu X. 2010. *Software NRecon, version 1.6.3.0*. Kontich, Bélgica, 2010. Disponível em: <http://www.skyscan.be/products/downloads.htm>.
- Long H., Swennen R., Foubert A., Dierick M., Jacobs P. 2009. 3D quantification of mineral components and porosity contribution in Westphalian C sandstone by microfocus X-ray computed tomography. *Sedimentary Geology*, **220**:126-125.
- Mees F., Swennen R., Geet M.V., Jacobs P. 2003. *Applications of x-ray computed tomography in geosciences*. London, Geological Society Special Publications, p. 1-6.

- Ovaysi S. & Piri M. 2010. Direct pore-level modeling of incompressible fluid flow in porous media. *Journal of Computational Physics*, **229**:7456-7476.
- Pinto-Coelho C.V., Reis Neto J.M., Matsuda N.S., Eeva S.T. 2008. Dolomitização multifásica em rochas metacarbonáticas do Grupo Açungui, Proterozóico do Estado do Paraná, Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **16**:103-120.
- Radke B.M. & Mathis R.L. 1980. On the formation and occurrence of saddle dolomite. *Journal of sedimentary petrology*, **50**(4):1149-1168.
- Sarkar P.S., Sinha A., Kashyap Y., More M.R., Godwal B.K. 2004. Development and characterization of a 3D cone beam tomography system. *Nuclear Instruments and methods in physics research*, **524**:377-384.
- Sassov A. 2009. *Software Skyscan 1172 control, versão 1.5.8.0*. Kontich, Bélgica, 2009. 1 DVD.
- Tsakiroglou C.D., Loannidis M.A., Amirtharaj E., Vizika O. 2009. A new approach for the characterization of the pore structure of dual porosity rocks. *Chemical Engineering Science*, **64**:847-859.
- Wildenschild D., Hopmans J.W., Vaz C.M.P., Rivers M.L., Ricard D., Christensen B.S.B. 2002. Using X-ray computed tomography in hydrology: systems, resolutions and limitations. *Journal of Hydrology*, **267**:285-297.
- Zhang J., Wenxuan H., Qian Y., Wang X., Cao J., Zhu J., Li Q., Xie X. 2009. Formation of saddle dolomites in upper Cambrian carbonates, western Tarina Basin (northwest China): implications for fault-related fluid flow. *Marine and petroleum Geology*, **26**:1429-1440.

Manuscrito ID 21068

Submetido em 23 de março de 2011

Aceito em 18 de agosto de 2011