

# ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DE ROCHAS POR MEIO DE MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS X INTEGRADA À PETROGRAFIA

Angela Pacheco LOPES <sup>1</sup>, Alberto Pio FIORI <sup>1</sup>, José Manoel dos REIS NETO <sup>1</sup>,  
Clarice MARCHESE <sup>1</sup>, Eleonora Maria Gouvea VASCONCELLOS <sup>1</sup>,  
Barbara TRZASKOS <sup>1</sup>, Célia Tiemi ONISHI <sup>2</sup>, Cristina Valle PINTO-COELHO <sup>1</sup>,  
Rodrigo SECCHI <sup>1</sup>, Gabriel Fischer da SILVA <sup>1</sup>

- (1) Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, UFPR. Centro Politécnico – Jardim das Américas. Caixa Postal 19001. CEP 81531-990. Curitiba, PR. Endereços eletrônicos: angelalopes@ufpr.br; fiori@ufpr.br; jmreis@ufpr.br; clamarchese@hotmail.com; eleonora@ufpr.br; barbaratraskos@gmail.com; cristinavpc@ufpr.br; rosecchi@yahoo.com.br; fischergab@hotmail.com
- (2) United States Geological Survey, USGS. Menlo Park, CA 94025, USA. E-mail: tonishi@usgs.gov

## Introdução

Análise Petrográfica por Tomografia Computadorizada de Raios X  
Microtomografia Computadorizada de Raios X – Procedimento Analítico  
Análise Tridimensional – Discussão  
Análise Petrográfica Integrada à Micro-CT  
Análise Microestrutural por Micro-CT  
Conclusões e Recomendações  
Agradecimentos  
Referências Bibliográficas

**RESUMO** – A tomografia computadorizada de raios X é uma técnica não destrutiva utilizada nas geociências desde a década de 80, cuja maior limitação, na época, era a resolução. Atualmente, o avanço tecnológico possibilita a análise em microescala. Este trabalho demonstra que a integração da microtomografia à petrografia permite a análise da forma, tamanho, conectividade e volume de cavidades em pumice, auxiliando na interpretação do vulcanismo associado. O estudo de fases minerais de atenuação de raios X contrastantes em granodiorito possibilita a compreensão da distribuição e formato tridimensional dos minerais, além de quantificações automatizadas no volume. Na análise microestrutural em protomilonito é possível a obtenção de medidas de foliações, indicadores cinemáticos e microfraturamentos diretamente nas centenas de seções microtomográficas reproduzidas na análise, além de visualização tridimensional destas microestruturas. E em arenito, a visualização tridimensional da banda de deformação, concomitante à quantificação da porosidade, fornece informações essenciais para a investigação da permoporosidade e entendimento petrogenético de reservatórios fraturados. As análises apresentadas demonstram que algumas informações obtidas em análise por microscopia óptica não podem ser obtidas em uma análise de microtomografia. No entanto, esta técnica pode ser uma grande aliada da petrografia, tornando viável a análise tridimensional qualitativa e quantitativa em rochas.

**Palavras-chave:** Microtomografia computadorizada de raios X, petrografia, microestrutural, análise tridimensional.

**ABSTRACT** – *A.P. Lopes, A.P. Fiori, J.M. dos Reis Neto, C. Marchese, E.M.G. Vasconcellos, B. Trzaskos, C.T. Onishi, C.V. Pinto-Coelho, R. Secchi, G.F. da Silva - X-Ray Microtomography as tool for microstructural and mineral phase analysis.* X-Ray microtomography, a non-destructive technique is applied in Earth Sciences since the 80's. Resolution has been the main constraint; however technological advances have improved it to microscale resolution. In volcanic rocks, void shape, size and connectivity are visualized and are useful in relating them to type of volcanism. Mineral phase attenuation of x-ray in granodiorite provides an understanding of 3D distribution and shape of minerals and an automate volume quantification. In protomilonite it is possible to measure foliation, to identify kinematic indicators and to characterize microfracturing in 3D. Deformation bands in sandstone are visualized and porosity measured giving detail information about permo-porosity variations in fractured reservoir. As an auxiliary tool for optical petrography, X-ray microtomography provides qualitative and quantitative 3D characterization of geologic materials.

**Keywords:** X-ray computed microtomography, petrographic, microstructural, 3D analysis.

## INTRODUÇÃO

O diagnóstico médico por imagens por meio da tomografia computadorizada de raios X teve início por volta de 1970 (Hounsfield, 1973; Cnudde et al., 2006). Na década seguinte, os geocientistas começaram a divulgar seus trabalhos com a técnica aplicada a

meteoritos (Arnold et al., 1982), geologia do petróleo (Vinegar, 1986), geotecnia (Raynaud et al., 1989) entre outros. Na medicina permanece como uma técnica de extrema importância para avaliação de partes internas do corpo humano e nas geociências as aplicações vêm

sendo ampliadas com o aperfeiçoamento dos equipamentos. A maior limitação da tomografia de raios X era a resolução atingida (Duliu, 1999). Entretanto, o avanço tecnológico da técnica é notado em vários setores do conhecimento. Atualmente, as análises microtomográficas em rocha estão bastante difundidas (Geet et al., 2000; Tricart et al., 2000; Císlarová & Votrubová, 2002; Carlson et al., 2003; Ketcham, 2005; Ketcham & Iturrino, 2005; Gualda & Rivers, 2006; Remeysen & Swennen, 2008; Jerram et al., 2009; Long et al., 2009; Izgec et al., 2010; entre outros). Outra contribuição foi da área computacional, que atualmente permite a integração de centenas de imagens em alta resolução.

A tomografia de raios X está fundamentada nos mesmos princípios de uma radiografia convencional, onde as diferentes partes de uma amostra absorvem distintamente a radiação X. Este tipo de análise física permite o estudo de seções transversais não destrutivas e de modelos tridimensionais, o que possibilita a visualização e quantificação de partes específicas da estrutura interna do material. 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. O microtomógrafo de raios X utilizado neste trabalho (modelo 1172 da Skyscan), adquirido no âmbito do Projeto Falhas/PETROBRAS, devido à alta resolução, permite análises em microescala. As possibilidades de aplicação em rocha são variadas e incluem estudos petrofísicos, pedológicos, sedimentológicos, paleontológicos, hidrológicos, petrológicos, estruturais, geotécnicos, entre outros.

Este trabalho apresenta estudos em minerais e rochas analisados por microtomografia de raios X (micro-CT), com intuito de demonstrar o potencial desta ferramenta no estudo tridimensional de fases minerais com atenuações de raios X contrastantes e microestruturas. Os dados obtidos pela micro-CT foram integrados e comparados com dados fornecidos pela análise petrográfica, essencial para a identificação das fases minerais e análise de consistência do método. As possibilidades de análise virtual das rochas nos programas computacionais são diversas e incluem vídeos tridimensionais que possibilitam a análise interna das amostras, mas estes não podem ser transcritos neste artigo e são representados por imagens tridimensionais compactadas.

## ANÁLISE PETROGRÁFICA POR TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS X

A tomografia computadorizada tem como princípio básico a equação de atenuação dos raios X, que estabelece que a intensidade da radiação medida por um detector é proporcional ao número de fótons (menor quantidade de qualquer tipo de radiação eletromagnética) presentes no feixe de radiação. Esta intensidade diminui quando o feixe atravessa os materiais, antes de chegar ao detector. Portanto, a atenuação, fator muito importante em análises tomográficas, está vinculada à redução de intensidade de um feixe, conforme ele atravessa a matéria. A redução da intensidade medida por um detector ao atravessar o material é expressa por:

$$I = I_0 e^{-\mu \cdot x}$$

onde:  $I_0$  é a intensidade medida sem o elemento atenuador;  $I$  é a intensidade medida após o elemento atenuador;  $\mu$  é o coeficiente de atenuação linear e,  $x$  é a espessura do objeto atenuador.

Ao passarem pela amostra, os raios X são atenuados em intensidades distintas, dependendo das diferenças entre os coeficientes de atenuação linear das fases. A densidade e o número atômico efetivo dos objetos são os principais fatores que determinam o

grau de absorção dos raios X (Mees et al., 2003).

A influência maior da densidade ou do número atômico efetivo na atenuação dos raios X nos materiais está relacionada à interação dos fótons com a matéria. As formas mais comuns de interação são: efeito fotoelétrico e efeito Compton. Pode-se dizer que a probabilidade de ocorrer o efeito fotoelétrico é proporcional à densidade do material que o fóton atinge e aumenta com o número atômico efetivo da amostra. Como exemplo, Duliu (1999) demonstra que o efeito Compton é mais comum em calcita e dolomita, e o efeito fotoelétrico em pirita. Considerando as variações nos minerais e na energia da fonte de raios X, estas interações podem se tornar inusitadas.

Mesmo com as dificuldades intrínsecas à técnica, Gualda & Rivers (2006) propõem padrões para as quantificações petrográficas volumétricas de quartzo, sanidina, biotita e magnetita, por meio da tomografia computadorizada de alta resolução. Considerando-os cristais ideais, os autores apresentam uma tabela para codificação de voxel (pixel ao cubo) em fases minerais, demonstrando uma zona de ocorrência na escala de cinza resultante nas seções tomográficas para os minerais estudados. Entretanto, é necessário considerar que

a maioria dos cristais não é perfeita pois possuem lamelas de exsolução, fraturas, alteração, inclusões e zoneamento, o que dificulta uma padronização.

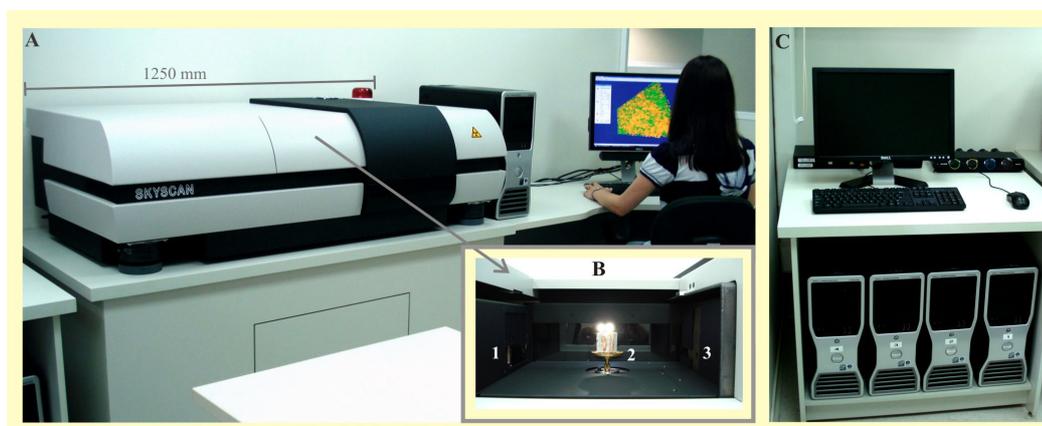
Em estudos voltados para medicina, o padrão está estabelecido para o corpo humano, sendo as variações de tons de cinza resultantes nas seções tomográficas normalmente correlacionadas a Unidades de Hounsfield (HU - Hounsfield, 1973), que comportam o padrão estabelecido pelo autor. O mais complicado para os médicos é a interpretação de anomalias, onde o diagnóstico nem sempre fica claro pela técnica. Neste trabalho, a comparação de minerais em rochas distintas nas escalas de cinza resultantes nas seções tomográficas, mesmo com os mesmos parâmetros estabelecidos para as diferentes aquisições de dados em rochas semelhantes, não permite qualquer padronização. A correlação mineral das fases detectadas pela micro-CT foi executada pela associação direta com a análise petrográfica, geralmente com auxílio da microscopia óptica, em lâminas petrográficas confeccionadas da própria rocha analisada tridimensionalmente.

#### MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS X (MICRO-CT) – PROCEDIMENTO ANALÍTICO

Apesar de a técnica ser utilizada em estudos geocientíficos há décadas (Arnold et al., 1982; Vinegar, 1986; Raynaud et al., 1989), a alta resolução recentemente alcançada dos equipamentos de tomografia tem permitido aplicações inviáveis com os tomógrafos mais antigos. O microtomógrafo de raios X utilizado neste trabalho é da marca Skyscan, modelo 1172. O equipamento possui a fonte de raios X com geometria em feixe cônico (cone bean – Sarkar et al., 2004), rotação com passos precisos (alguns décimos de graus)

e pequena abertura (5  $\mu\text{m}$ ) que reduz a dispersão. O detector consiste em uma câmera de 10 megapixels (4000 x 2300) com CCD (dispositivo de carga acoplada) de 12 bits e cintilador por fibra óptica (Figura 1). 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. O indicado é que o tamanho do pixel seja duas vezes menor que a resolução desejada. Cada pixel da imagem corresponde à média de absorção e, quanto maior o número de pixels, melhor será a resolução espacial. No processo de reconstrução da imagem, onde as fatias transversais da amostra são unidas para produção da imagem tridimensional, o pixel é transformado matematicamente em voxel, capaz de representar a profundidade na imagem radiológica. As amostras não necessitam de nenhum tipo de preparação, porém, é importante que sejam bem fixadas no porta-amostra e que o material de fixação não seja submetido à compressão ou dilatação durante a análise, pois isso pode anular o resultado.

Neste trabalho, a micro-CT empregada como ferramenta no estudo de minerais e rochas é resumida em três etapas: i) aquisição das imagens de projeção dos raios X nas amostras por meio do microtomógrafo, utilizando o *software* Skyscan 1172 control (Sassov, 2009) no computador central de comandos; ii) reconstituição das seções de micro-CT no *software* NRecon (Liu, 2010a), com o cluster (Figura 1), por meio do cálculo algorítmico de FDK-Feldkamp-Davis-Kress (Feldkamp et al., 1984); e iii) tratamento de dados, executado nos seguintes *softwares* da SkyScan: CTAnalyser - CTAn (Kharitonov, 2003); CTVol realistic 3D-visualization (Kharitonov, 2010); CTVox



**FIGURA 1.** Sistema de microtomografia de raios X utilizado (Laboratório de Análise de Minerais e Rochas da Universidade Federal do Paraná). A) Microtomógrafo de raios X, modelo 1172 da Skyscan, ao lado do computador central de comandos. B) Detalhe do compartimento interno do microtomógrafo de raios X (1: localização do detector; 2: porta-amostra com amostra de rocha fixada; 3: localização da fonte de raios X. C) Cluster de computadores utilizado para reconstrução das seções microtomográficas.

(Boons, 2010); e Dataviewer (Liu, 2010b), todos em Sistema Windows. Devido às inúmeras possibilidades, o tratamento de dados é direcionado ao objetivo do estudo na amostra, sendo os detalhes do procedimento adotado apresentados no item relacionado aos resultados.

Na etapa de aquisição dos dados no microtomógrafo de raios X, os dois parâmetros normalmente alterados no controle do feixe são a tensão e a corrente elétrica. No equipamento utilizado, a corrente pode variar de 0 a 300  $\mu\text{A}$  e a tensão entre 20 e 100 kV. Estes fatores influenciam diretamente na intensidade e na energia do feixe produzido, ou seja, alteram a quantidade e a qualidade dos fótons emitidos. A corrente elétrica influencia no número de elétrons energéticos que serão submetidos a interações para a produção da radiação. Quanto maior o número de elétrons disponíveis para o choque com os átomos, maior será o número de interações e consequentemente, do feixe de fótons gerado. A tensão aplicada a uma ampola provoca um aumento da energia dos elétrons gerados, preparando-os para interagirem com os átomos, que por sua vez, produzirão radiação. A escolha da tensão e corrente adequadas para as análises dependem principalmente do tamanho e da densidade da rocha. Nas análises das rochas estudadas neste trabalho foi utilizada a tensão máxima do equipamento (100 kV), com corrente de 100  $\mu\text{A}$ . 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 tamanhos centimétricos 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 acréscimo do tempo analítico, os resultados nas amostras não foram melhores que os obtidos com 100 kV e menor tempo de exposição dos raios X. Alguns trabalhos utilizam o recurso de variação na tensão da fonte de raios X do microtomógrafo e, com duas aquisições em tensões diferentes, conseguem estabelecer parâmetros para identificação e quantificação de fases minerais com coeficientes de atenuação semelhantes, método denominado dual energy (Geet et al., 2000; Geet & Swennen, 2001; Lovea et al., 2009; Remeysen & Swennen, 2008). Os microtomógrafos utilizados para aplicação deste método possuem tensão máxima superior a 100 kV.

Filtros são utilizados na aquisição das projeções de raios X de amostras densas para filtrar os raios X de baixa energia, com intuito de reduzir o efeito denominado “endurecimento do feixe” (*beam hardening*), comum na análise de rochas. Isso ocorre porque a camada superficial de amostras densas funciona como filtro de raios X para o material do interior da amostra. A radiação de baixa energia é absorvida nesta camada

superficial e somente os raios X de alta energia conseguem atravessar a amostra sem sofrer absorção significativa. Este problema pode ocasionar uma distorção da distribuição de densidade na reconstrução, causando a impressão de que a superfície é mais densa que o interior. O filtro selecionado é posicionado em frente à câmera, o que permite alterar a sensibilidade da câmera à radiação policromática da fonte de raios X. Os filtros aplicados neste trabalho são de alumínio e cobre, recomendados na análise de rochas. Não se utiliza filtro, por exemplo, para objetos com baixa absorção de raios X, pois os raios secundários podem contribuir neste caso. A opção no equipamento pode ser feita antes da aquisição, por meio de visualização de imagens radiográficas de projeções da amostra com as opções de filtro e escolha da imagem com maior contraste visual. Portanto, a filtragem é uma opção utilizada com objetivo de eliminar as partículas ou os fótons que não são úteis para o propósito.

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. Outros artefatos podem ser gerados na imagem devido a fatores diversos. Caso os detectores não sejam equivalentes ou intercalibrados com precisão, a projeção posterior para cadaanel de dados é 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 do equipamento pode diminuir os diferentes artefatos, que tendem a ser menor em equipamentos modernos como o utilizado neste estudo. Além do controle e manutenção do equipamento, os parâmetros aplicados na aquisição dos dados 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.

Após uma análise criteriosa da melhor tensão, dos filtros, da magnificação, do passo de rotação da amostra, do tempo de exposição dos raios X para cada passo, do número de quadros (*frames*) executado para média final (*averaging*) em cada passo de rotação, a aquisição de dados pode ser iniciada. Como a escolha dos

parâmetros certos interfere na geração de boas imagens e as variáveis ideais dependem principalmente do tamanho e da composição da rocha, é difícil padronizar as análises. O tempo de aquisição dos dados é extremamente variável, indo desde minutos até horas, dependendo do tamanho das amostras e dos parâmetros escolhidos. Portanto, a relação custo-benefício tem que ser avaliada. O tempo de reconstrução das seções microtomográficas está associado principalmente ao

tamanho da amostra e a resolução atribuída às imagens. Nesta etapa é possível aplicar correções de artefatos que não puderam ser evitados no momento da aquisição. Com o cluster de quatro computadores, esta etapa é acelerada para alguns minutos. Após a obtenção das seções microtomográficas das rochas, o tratamento dos dados dependerá da aplicação em geociências. A seguir serão demonstradas algumas possibilidades.

## ANÁLISE TRIDIMENSIONAL – DISCUSSÃO

Estudos tridimensionais por análise de imagens, semelhantes aos executados por micro-CT, são feitos por meio de escaneamento de várias lâminas petrográficas de uma mesma amostra e cálculos matemáticos que geram uma projeção tridimensional (Diógenes, 2009). Porém, se o objeto de estudo possuir coeficiente de atenuação contrastante com o restante da rocha, a micro-CT integrada à petrografia fornece resultados automatizados e mais representativos.

Após a aquisição de dados de projeção dos raios X nas amostras e reconstrução das seções microtomográficas, interpretações podem ser feitas na rocha apenas com a observação de seus cortes virtuais. No entanto, é a análise petrográfica que permite a identificação de fases minerais por meio de correlação direta de imagens geradas pelas duas técnicas. Há diversas formas para estudo das seções microtomográficas. Neste trabalho foram utilizados os *softwares* da Skyscan, sendo que o CTAn concentra toda parte de quantificação, medição e visualização das seções microtomográficas. É neste *software* que é executada a separação das fases minerais, etapa denominada binarização. O nome se deve ao processo de separação, efetuado por meio de um sistema binário, onde a fase selecionada fica branca e as demais pretas. Após o isolamento das fases e reconstrução de modelos tridimensionais executados neste programa, a visualização em 3D é por meio do *software* CTVol, que permite a análise detalhada de feições em profundidade e tratamento da imagem para ressaltar o objeto de estudo. Os volumes selecionados para as análises tridimensionais são de dimensões milimétricas, mesmo com a capacidade de análise de rochas de dimensões centimétricas em alta resolução pelo microtomógrafo, devido a limitações do sistema computacional das máquinas disponíveis no Laboratório (memória RAM de quatro gigabytes), que nesta etapa, não permitem a reconstrução no cluster. O *software* CTVox possibilita uma visualização interna tridimensional da amostra sem o processo de binarização. No entanto, as quantificações de volume só podem ser efetuadas com a separação das fases.

A binarização mais simples nas imagens de rocha é entre poro (ar) e rocha (sólido), devido ao intenso contraste entre os coeficientes de atenuação linear destas fases. Embora a resolução possa dificultar a delimitação de poros menores, caso a dimensão esteja próxima ao tamanho de pixel pré-estabelecido nas imagens microtomográficas. Como os raios X passam pelos poros sem serem atenuados, estes ficam pretos nas imagens microtomográficas. A rocha produzirá tons de cinza que são relacionados aos coeficientes de atenuação linear dos minerais, conforme explicado. A análise de poros por micro-CT em rochas sedimentares está bastante difundida (Geet et al., 2000; Wildenschild et al., 2002; Ketcham & Itririno, 2005; Appoloni et al., 2007; Flukiger & Bernard, 2009; Tsakiroglou et al., 2009 e Izgec et al., 2010), porém, raramente é integrada a estudos petrográficos. Para demonstrar o uso da micro-CT como ferramenta na análise petrográfica tridimensional foi escolhida primeiramente uma rocha vulcânica com alta porcentagem de cavidades, com o intuito de ampliar as possibilidades de utilização da técnica na análise de poros e suas aplicações petrogenéticas.

Os principais critérios considerados na escolha das rochas apresentadas neste trabalho para análises por micro-CT que envolvem fases minerais são contraste de atenuação e tamanho dos objetos visualizados e/ou quantificados. O primeiro diz respeito à atenuação dos raios X, que deve ter contraste suficiente para discriminação e separação na escala de cinza gerada na imagem. O segundo é a resolução máxima na amostra, que no equipamento utilizado depende do tamanho e forma da mesma. Caso o mineral não tenha contraste suficiente de atenuação com o restante da rocha, é necessário trabalhar com fases minerais. A análise de uma amostra de granodiorito fornece uma melhor compreensão da metodologia neste caso.

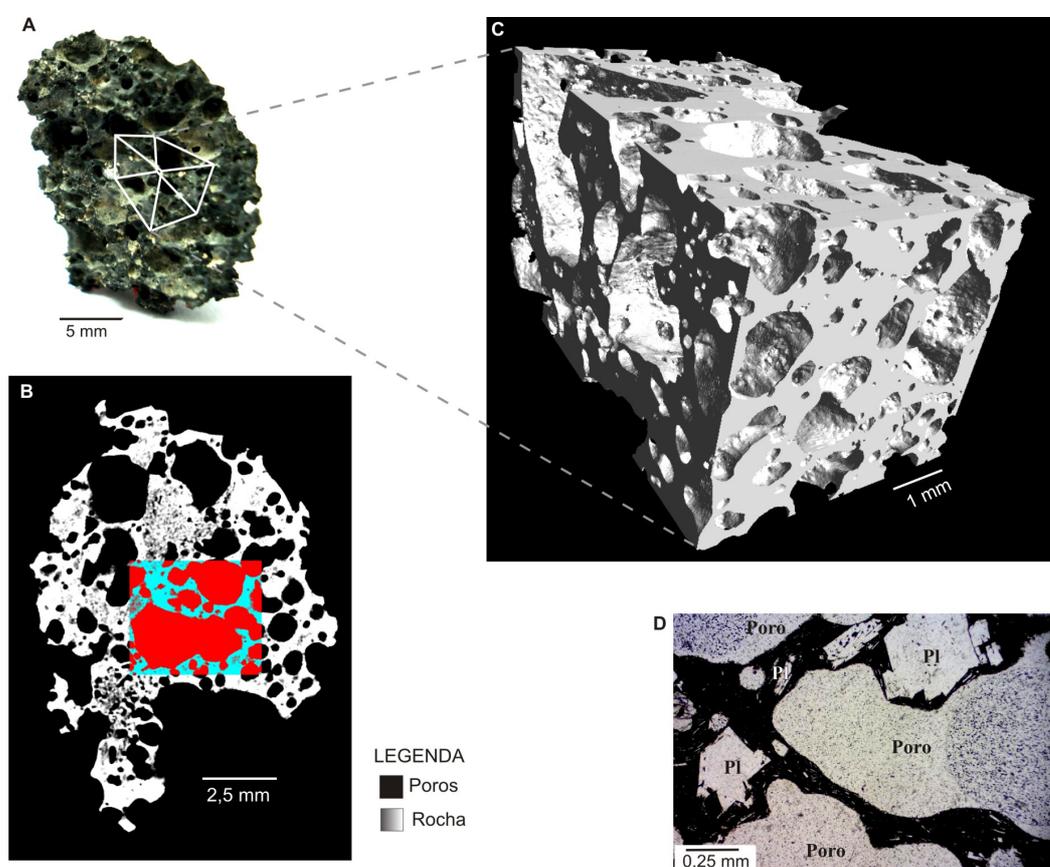
A análise microestrutural por meio da micro-CT deve seguir o mesmo princípio explicado para a análise de fases minerais. Portanto, é possível analisar estruturas, desde que estas sejam marcadas por fases contrastantes de atenuação e que estejam adequadas para a resolução atingida na amostra. Para detalhar a

análise microestrutural por micro-CT integrada à petrografia foi escolhida uma amostra de protomilonito com deformação rúptil sobreposta à deformação dúctil. Por último, é apresentada uma amostra de banda de deformação em arenito (cataclasito), que integra a análise microestrutural à análise de porosidade, auxiliando na avaliação da anisotropia de reservatórios fraturados.

### ANÁLISE PETROGRÁFICA INTEGRADA À MICRO-CT

O púmice é uma rocha vulcânica vesiculada com uma rede de cavidades separadas por finas paredes de material vítreo, amorfo. A rocha analisada possui cor cinza escura, granulação muito fina e alta porcentagem de poros, onde as cavidades atingem até 5 mm

de diâmetro (Figura 2A). A aquisição dos dados de projeção dos raios X na amostra (dimensões de aproximadamente 15 x 20 x 5 mm) por micro-CT foi executada com tamanho de pixel de 10  $\mu\text{m}$ , averagin de 2, no tempo de quinze minutos. A reconstrução das seções microtomográficas durou dois minutos. Uma das 722 seções microtomográficas é representada na Figura 2B, onde se observam os poros em preto e a rocha em tons de cinza a branco. A partir das seções microtomográficas foi executada a separação poro/rocha nas imagens. Com as fases binarizadas, prosseguiu-se o estudo tridimensional isolado de cada uma delas (minerais ou poros) e a sobreposição das mesmas para o estudo integrado de toda rocha. A análise em programas e vídeos tridimensionais da rocha



#### QUANTIFICAÇÕES PRINCIPAIS NO VOLUME SELECIONADO

Total de seções micro-CT = 722  
 Tamanho de pixel = 10,4  $\mu\text{m}$   
 Volume total = 134,43  $\text{mm}^3$   
 Volume de rocha = 55,05  $\text{mm}^3$  (40,95%)

Volume de porosidade total = 79,37  $\text{mm}^3$  (59,04%)  
 Volume de porosidade com conectividade = 78,79  $\text{mm}^3$  (58,61%)

**FIGURA 2.** Análise de porosidade por micro-CT em púmice. A) Fotografia da rocha analisada com demarcação do volume selecionado para análise tridimensional. B) Seção microtomográfica demonstrando a correlação na escala de cinza da imagem com as fases que foram isoladas. C) Modelo tridimensional da rocha executado após o isolamento de fases (binarização). A escala no modelo tridimensional é inferida com base na escala da seção microtomográfica. D) Fotomicrografia (em luz plano polarizada) demonstrando a porosidade da rocha em meio ao material vítreo e cristais de plagioclásio (Pl).

vulcânica, com a possibilidade de visualização da porção interna em profundidade, demonstra alta conectividade entre os poros, que por sua vez possuem tamanhos e formas variados, conforme representado na Figura 2C por meio da imagem tridimensional capturada durante o estudo. Na figura nota-se estrutura esponjosa, típica deste tipo de rocha. A comparação com a análise por microscopia óptica em lâmina confeccionada da mesma rocha demonstra que a porosidade observada na fotomicrografia da Figura 2D (restrita ao bidimensional) pode não ter representatividade quantitativa e da geometria real do arcabouço poroso, principalmente em rochas com poros irregulares, de tamanhos variados e distribuição heterogênea. Na fotomicrografia da Figura 2D estão representados, além dos poros, plagioclásio subédrico a euédrico, de até 0,4 mm de comprimento (eixo c), em meio à rocha de granulação muito fina. No entanto, estes minerais não foram isolados na análise por micro-CT pelo contraste insuficiente de atenuação, sendo, portanto, inseridos na fase rocha. A análise quantitativa por micro-CT, automatizada após a separação das fases, demonstra que em um volume de 134,42 mm<sup>3</sup>, 55,05 mm<sup>3</sup> (40,95%) são constituídos por rocha, 79,37 mm<sup>3</sup> (59,04%) correspondem ao volume de poros, sendo que 78,79 mm<sup>3</sup> (58,61%) são representados por poros com conectividade.

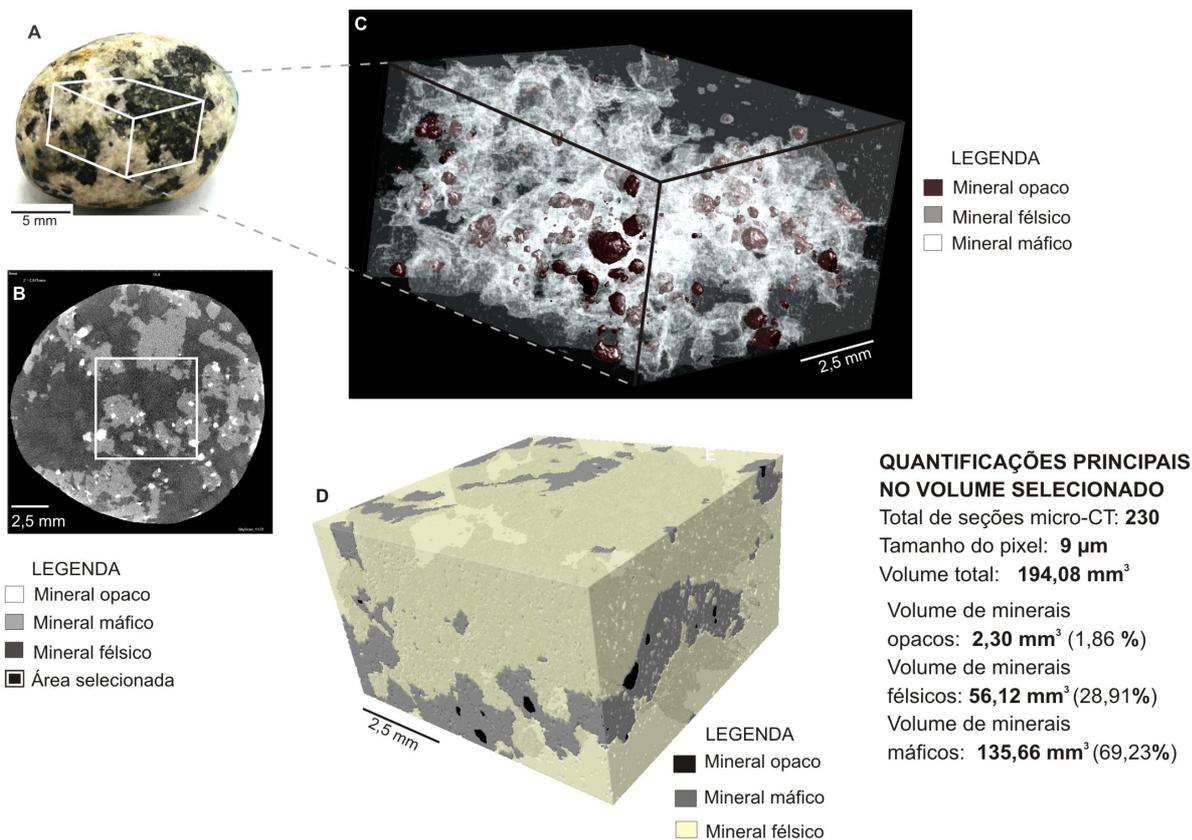
Shin et al. (2005) apresentam análises por micro-CT da estrutura vesicular de basaltos, onde a técnica possibilita quantificação e análise detalhada da geometria das vesículas, contribuindo para o entendimento genético. Teste em rocha basáltica (com formato cúbico e aproximadamente 10 mm de lado) realizado neste Projeto forneceu imagens microtomográficas que permitem a separação e quantificação das três principais fases minerais que constituem esta rocha (plagioclásio, piroxênio e minerais opacos), identificadas pela correlação com a microscopia óptica. Neste caso, a micro-CT fornece dados quantitativos de porcentagens minerais pelo contraste de atenuação das três fases minerais presentes no basalto, além da porosidade, que integrados às informações obtidas nas análises petrográficas, geram dados inéditos para análise petrográfica tridimensional. Porém, se o mineral enfocado não tiver um contraste de atenuação suficiente para diferenciá-lo do meio em que se encontra, é necessário trabalhar com fases minerais.

A rocha selecionada para a análise de fases minerais possui minerais anédricos e é isotrópica. É constituída por aproximadamente 40% de plagioclásio, 25% de quartzo, 10% de feldspato potássico, 15% de biotita e 10% de anfibólio, sendo classificada como granodiorito (Le Maitre et al., 2005). O tempo de aquisição dos dados de projeção de raios X na amostra foi de uma hora e dez minutos, com averagin de 4 e

tamanho de pixel 9 µm. A reconstrução das seções microtomográficas durou cerca de dez minutos. As semelhanças entre os coeficientes de atenuação linear de alguns minerais não permitem a individualização, portanto as fases foram denominadas: félsica (quartzo e feldspato), máfica (anfibólio e biotita) e minerais opacos, conforme visualizado na seção microtomográfica da Figura 3B, onde a forma anédrica dos minerais fica evidente. A varredura executada nas 230 seções microtomográficas e representada na Figura 3B demonstra que os minerais opacos ocorrem principalmente no contato entre as fases de minerais félsicos e máficos. O estudo das fases minerais nos programas tridimensionais permite investigar a relação entre elas em profundidade. Dois modelos tridimensionais são apresentados: no primeiro (Figura 3C), foi aplicada transparência nas fases de minerais félsicos e máficos, privilegiando a observação tridimensional dos minerais opacos no interior da amostra; no segundo (Figura 3D), a transparência maior foi aplicada à fase de minerais félsicos, permitindo a observação da fase de minerais máficos, que envolve os minerais opacos. Do volume selecionado (194,08 mm<sup>3</sup>), 2,30 mm<sup>3</sup> (1,86%) correspondem ao volume de minerais opacos, 56,12 mm<sup>3</sup> (28,91%) representam o volume de minerais félsicos, e 135,66 mm<sup>3</sup> (69,23%) correspondem ao volume de minerais máficos.

A caracterização de um minério por análise petrográfica integrada à micro-CT pode seguir a mesma metodologia apresentada para análise de fases minerais, considerando que o minério tenha contraste de atenuação suficiente com o restante da rocha, como os minerais opacos no granodiorito. A quantificação volumétrica automatizada pode auxiliar na estimativa de porcentagem do minério e a análise tridimensional na disposição deste no interior da rocha. Em algumas situações, fases minerais densas são responsáveis por inibir o caminho de fluidos, afetando a permeabilidade da rocha, conforme demonstrado por Ketcham & Iturrino (2005) por meio de análises de micro-CT em veios sulfetados em quartzo.

Outro trabalho que aproveita o contraste de atenuação de minerais para análises de micro-CT é apresentado por Jerram et al. (2009), que contribuem com uma metodologia para análise tridimensional de cristais de olivina em kimberlitos. As análises de seções microtomográficas e de modelos tridimensionais dos cristais auxiliam na interpretação da distribuição do mineral no interior da rocha, análise da geometria dos cristais e nas quantificações automatizadas do volume. O mesmo princípio metodológico é aplicado na varredura por micro-CT de kimberlito e eclogito para detecção e análise de diamante (Anand et al., 2004; Kuper et al., 2007; Liu et al., 2009).



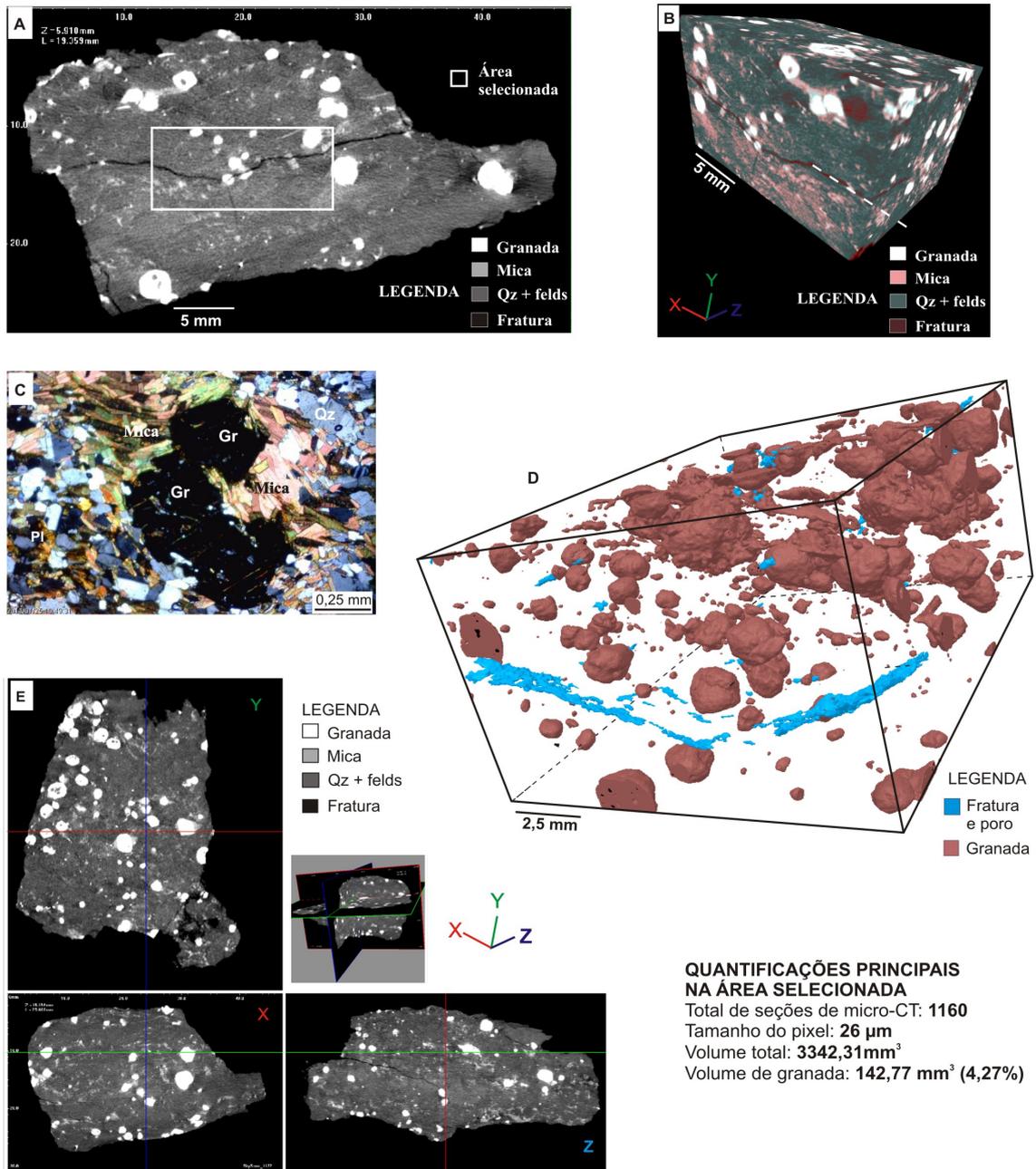
**FIGURA 3.** Análise de fases minerais por micro-CT em granodiorito. A) Fotografia da amostra com o volume demarcado para tratamento dos dados. B) Seção de micro-CT, onde fica evidente a separação das fases de minerais opacos, máficos e félsicos, marcadas por tons de cinza diferenciados. C) Modelo tridimensional que permite observar a disposição tridimensional dos minerais opacos, em meio aos minerais máficos. D) Modelo tridimensional que evidencia a fase de minerais máficos em meio à fase de minerais félsicos.

Com o microtomógrafo de raios X da Skyscan modelo 1072, que atinge a tensão de 130 Kv, Remeysen & Swennen (2008) aplicam o método de *dual energy*, que permite a separação de fases com coeficientes de atenuação lineares semelhantes. Com medidas em duas tensões (95 e 130 Kv) sob uma corrente de 300 μA em amostras de carbonatos puros, os autores avaliam a absorção em cada uma das aquisições e, por meio de equações geradas, sugerem padrões para distinção mineral automatizada. Os autores analisam qualitativamente e quantitativamente quatro fases: poros, anidrita, calcita e dolomita, o que demonstra um grande potencial deste método. Para a sua aplicação, o ideal é uma amplitude maior de tensão que a fornecida pelo microtomógrafo 1172 Skyscan.

### ANÁLISE MICROESTRUTURAL POR MICRO-CT

A amostra utilizada para detalhar o método de integração da micro-CT com a análise petrográfica no estudo microestrutural é um protomilonito constituído por níveis quartzo-feldspáticos alternados a níveis com concentração maior de micas e granada. A amostra possui formato irregular e dimensões de aproxima-

damente 35 x 40 x 50 mm. O tempo de aquisição de dados de micro-CT em amostras com esta dimensão é mais longo do que o tempo de aquisição em amostras de até 15 mm de diâmetro (considerando-a cilíndrica), pois a aquisição deve ser executada em etapas (modos *oversize* e *camera offset*). A junção das mesmas é automatizada na reconstrução das seções microtomográficas. Na amostra de protomilonito, a aquisição foi executada em quatro etapas, totalizando 10 horas de aquisição. O tamanho de pixel atribuído para as imagens nesta etapa foi de 26 μm, a fim de permitir o tratamento de dados em um volume maior. Na seção microtomográfica (Figura 4A), o maior contraste de atenuação é o da granada, que apresenta cor branca na imagem. Alguns cristais ocorrem rotacionados, com sombra de pressão assimétrica definida pelas micas, que são visualizadas em um tom de cinza claro. Na parte central da seção microtomográfica verifica-se um microfraturamento cortando as estruturas dúcteis. Na análise contínua das 1160 seções geradas percebe-se que à medida que a fratura diminui, a dificuldade de binarização torna-se maior para a resolução atingida na imagem. Caso a individualização das microfieções



**FIGURA 4.** Análise microestrutural tridimensional em protomilonito. A) Seção microtomográfica gerada na análise, com indicação da área selecionada para detalhamento. Observar foliação, cristais de granada rotacionados e fraturamento sobreposto. B) Modelo tridimensional executado diretamente da junção das seções microtomográficas (sem separação de fases), onde o tratamento da imagem permite evidenciar as microestruturas citadas. C) Fotomicrografia (em luz polarizada) da lâmina petrográfica utilizada para correlação mineral e microestrutural, mostrando cristais de granada com sombra de pressão assimétrica envolvidos por micas, em meio a níveis com maior concentração de quartzo e feldspato. D) Modelo demonstrando a distribuição tridimensional da granada, fratura e poros. E) Uma das formas de visualização simultânea das estruturas nos três planos (X, Y e Z) em um ponto, no interior da amostra.

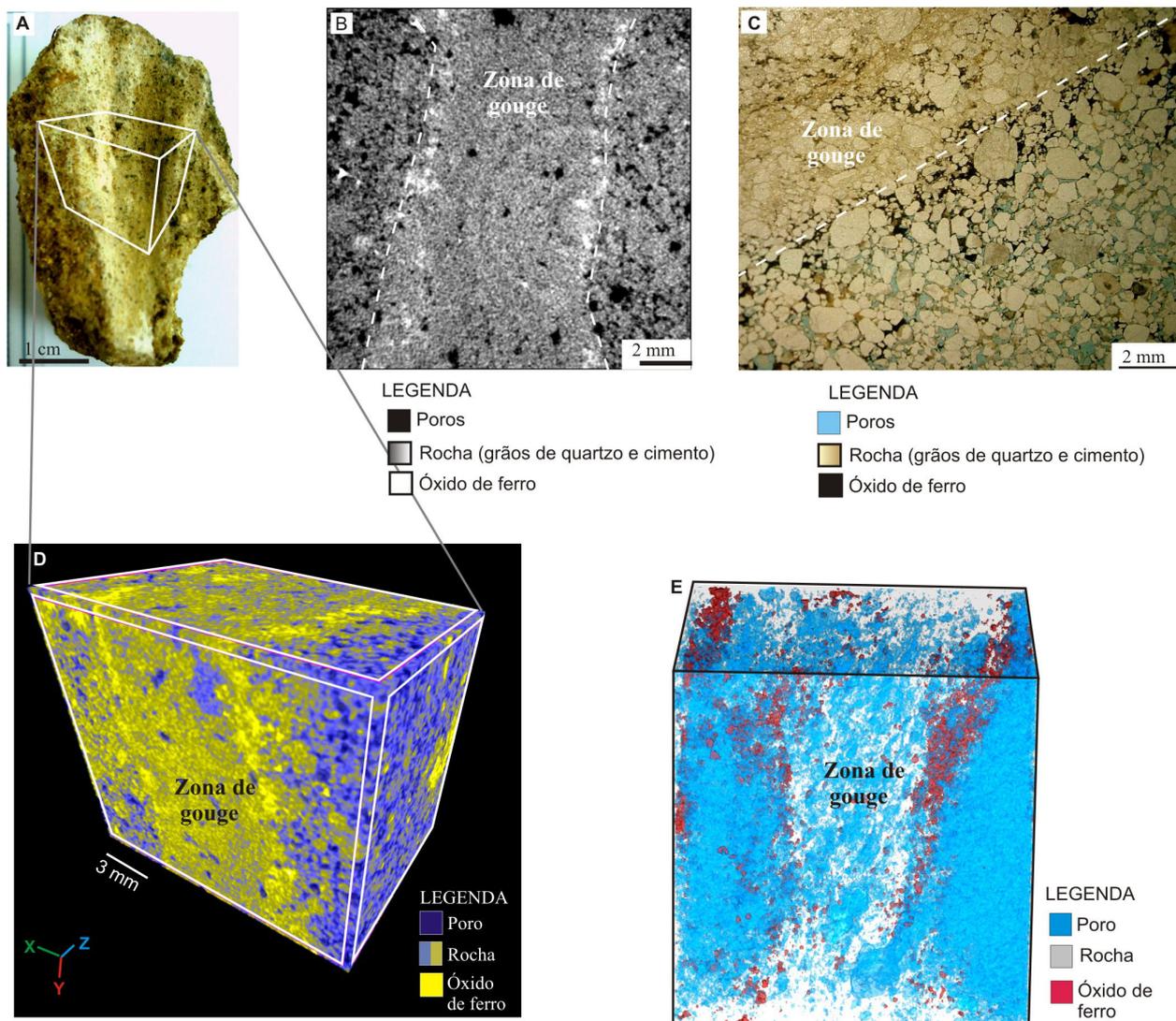
não seja possível devido à dimensão inadequada à resolução, mas seja visível nas seções microtomográficas, é possível analisar as microestruturas e executar medidas diretamente nas imagens de micro-CT, com ferramentas como réguas e transferidor virtual, no qual tabelas são automaticamente criadas. As estruturas também podem ser visualizadas no modelo tridimensional gerado diretamente da junção das seções de micro-CT (sem binarização). Com o aumento do contraste de atenuação dos minerais micáceos é possível ressaltar feições como a foliação e as sombras de pressão na granada (Figura 4B). A identificação mineral foi executada por meio de comparações com a análise por microscopia óptica, onde as relações minerais são visualizadas detalhadamente. A fotomicrografia da Figura 4C mostra cristais de granada envolvidos por cristais de mica branca e biotita, concentrados em um nível preferencial, alternados a níveis de maior concentração de quartzo e feldspato, coerente com as microfeições observadas na análise tridimensional. Após a binarização da granada e dos poros na micro-CT, foi elaborado o modelo que permite estudar a disposição deste mineral isoladamente, onde a distribuição, tamanho e forma da granada ficam nítidos no volume (Figura 4D). Em um volume total de 3342,31 mm<sup>3</sup>, 142,77 mm<sup>3</sup> (4,27%) correspondem ao volume de granada. A visualização simultânea dos planos X, Y e Z no *software* DataViewer auxilia na compreensão da geometria das estruturas em três dimensões conforme representado na Figura 4E.

Carlson et al. (2003) apresentam exemplos de aplicação da tomografia de alta resolução em análises de texturas metamórficas em xistos pelíticos, com possibilidade de isolamento e análise tridimensional individual de estauroлита, além de granada. Amostras de granada-cianita xisto foram analisadas por Ketcham (2005), que separou por micro-CT as fases da granada, cianita, biotita e quartzo+feldspato. Com a individualização tridimensional destas fases, o autor executa análise microestrutural na rocha, por meio de medidas quantitativas realizadas nas seções microtomográficas, estendendo para o volume.

Simulação de elementos finitos em cálculos de deformação a partir de dados obtidos por micro-CT encontra-se em Madi et al. (2007). Os autores utilizam um material sintético com alta concentração de zircônia. No entanto, a técnica pode ser estendida para análises minerais. Estudos de aplicação da micro-CT na análise quantitativa e qualitativa de fraturas (Geet & Swennen, 2001; Landis et al., 2003; Sellers et al., 2003; Vandersteen et al., 2003; Zabler et al., 2008; Renard et al., 2009) demonstram o potencial da técnica para caracterização destas estruturas e simulações de resistência na rocha. Porém a petrografia é uma ferramenta

ainda pouco utilizada nestes casos.

Zonas de falhas podem ser responsáveis pelo controle da permoporosidade em rochas. 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 e de estruturas que podem estar relacionadas à gênese dos poros. A análise petrográfica por microscopia óptica permite a visualização e quantificação dos poros e microestruturas, porém está restrita ao espaço bidimensional, sendo as quantificações menos representativas. A amostra de banda de deformação é um quartzarenito fino a médio, com seleção granulométrica pobre a moderada, submetida à deformação rúptil (Trzaskos et al., 2007). Na Figura 5A observa-se a representação do volume selecionado para análise tridimensional, demarcado no centro da banda de deformação (cor branca). Óxidos de ferro (cor preta) ocorrem disseminados por toda rocha, que possui cor acastanhada fora da zona de gouge. Esta banda de deformação é gerada por intenso cisalhamento e consequente cominuição de grãos (Engelder, 1974). A aquisição de dados de micro-CT na amostra com tamanho de pixel de 25 µm durou três horas, onde foram geradas 636 seções microtomográficas. A seção selecionada (Figura 5B) demonstra a zona de gouge (porção central) claramente marcada pela diferença de porosidade (em preto), granulometria dos grãos (em cinza) e maior concentração de óxidos (em branco) nas bordas. A correlação com a análise por microscopia óptica permite identificar os grãos de quartzo e sua relação textural com o cimento, os poros e os óxidos (Figura 5C). A separação da zona de gouge do restante da rocha na lâmina petrográfica é também marcada pela maior concentração de óxidos, diminuição granulométrica dos grãos e redução da porosidade. No entanto, a análise por micro-CT permite a análise de centenas de seções e automatização dos dados quantitativos. O modelo capturado demonstra a geometria tridimensional da zona de gouge (Figura 5D). A Figura 5E representa o modelo tridimensional executado após a separação de fases. É nítida a redução de porosidade na zona de gouge e a concentração de óxidos nas suas paredes internas. A concentração de óxidos sugere forte controle da banda de deformação na circulação de fluidos superficiais. As quantificações comparativas foram executadas por meio da separação do mesmo volume no interior da zona de gouge e fora dela. Na rocha matriz, do volume total de poros 8,53 mm<sup>3</sup> (6,6%), 5,58 mm<sup>3</sup> (4,32%) correspondem à porosidade com conectividade. Na zona de gouge, o volume total de poros é de 2,28 mm<sup>3</sup> (1,73%), onde 1,17 mm<sup>3</sup> (0,89%) são constituídos por poros com conectividade.



#### QUANTIFICAÇÕES PRINCIPAIS

##### Rocha matriz

Volume total de poros: **8,53 mm<sup>3</sup> (6,60%)**  
 Volume de poros com conectividade: **5,58 mm<sup>3</sup> (4,32%)**  
 Volume de poros isolados: **2,94 mm<sup>3</sup> (2,28%)**

##### Zona de gouge

Volume total de poros: **2,28 mm<sup>3</sup> (1,73%)**  
 Volume de poros com conectividade: **1,17 mm<sup>3</sup> (0,89%)**  
 Volume de poros isolados: **1,11 mm<sup>3</sup> (0,85%)**

**FIGURA 5.** Bandas de deformação em arenito analisado por micro-CT e petrografia.

- A) Fotografia da amostra de arenito com demarcação do volume selecionado, incluindo zona de gouge na porção central. B) Zona de gouge na seção microtomográfica demonstrando a diminuição de porosidade em seu interior. C) Fotomicrografia (em luz plano polarizada) mostrando a cominuição dos grãos de quartzo na zona de gouge. D) Modelo (sem binarização) executado para observação tridimensional da geometria na zona de gouge. E) Modelo tridimensional executado após a separação das fases poro, rocha e óxido de ferro, evidenciando a diferença de porosidade na zona de gouge.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A possibilidade de visualização tridimensional não destrutiva do interior de rochas e análises quantitativas automatizadas nas centenas de seções microtomográficas e no volume são as principais contribuições que a microtomografia de raios X fornece aos estudos petrográficos e microestruturais. Diversas informações

obtidas em uma análise petrográfica por microscopia óptica não podem ser reproduzidas em uma análise de microtomografia. No entanto, a micro-CT pode ser uma grande aliada da petrografia, complementando-a. Fases minerais com contraste de atenuação dos raios X, por meio da correlação petrográfica, podem ser analisadas

e quantificadas tridimensionalmente, fornecendo informações não permitidas pela análise em microscopia óptica.

Na análise do púmice, rocha vulcânica com alta porcentagem de cavidades, a microtomografia de raios X possibilita a visualização do arcaço poroso em programas tridimensionais, onde é possível analisar a forma, tamanho, distribuição e conectividade dos poros, além de quantificações nas seções de micro-CT e no volume, que contribuem para a interpretação petrogenética do vulcanismo responsável pela geração deste tipo de rocha. O estudo de micro-CT aplicado ao granodiorito demonstra possibilidades para o trabalho com fases minerais e minerais isolados, que podem ser analisados tridimensionalmente e quantificados de forma automatizada. Da mesma maneira, a investigação de minérios pode ser executada por meio da integração das duas ferramentas, auxiliando na estimativa e interpretação petrogenética de jazidas.

Análise microestrutural dúctil e rútil por micro-CT integrada à petrografia fornece avanços significativos em rochas com níveis, porções ou minerais de atenuação de raios X contrastantes. As microestruturas podem ser analisadas em programas tridimensionais, inclusive por meio de isolamento de fases minerais para a análise individualizada, conforme demonstrado na análise do protomilonito. Por meio de amostras orientadas e representativas do trabalho de campo, foliações, dobramentos, indicadores cinemáticos e fraturamentos podem ser medidos nas centenas de

seções microtomográficas da amostra, fornecendo análise estatística automatizada de dados microestruturais. Por não necessitar de qualquer tipo de preparação, a análise de micro-CT em amostras fraturadas e friáveis é ideal, pois evita interferência antrópica nas estruturas.

A aplicação da micro-CT integrada à análise petrográfica na investigação da permoporosidade de reservatórios fraturados fornece resultados dificilmente adquiridos por meio de outras técnicas, pois permite a visualização e medidas das estruturas, concomitantemente à quantificação dos poros, conforme demonstrado no procedimento adotado para a amostra de banda de deformação em arenito. Neste caso, além de quantificações comparativas, a união das duas técnicas contribui para entendimento da geração, conservação ou diminuição da porosidade nas rochas e para compreensão da deformação que atuou nestes processos.

As principais limitações da técnica para o estudo petrográfico e microestrutural são o tamanho da amostra e a resolução atingida na análise. Recomenda-se, portanto, o escaneamento de uma amostra com o tamanho máximo permitido pelo equipamento (até 50 mm de diâmetro e até 70 mm de altura, considerando-a no formato cilíndrico), na menor resolução (tamanho de pixel de 25  $\mu\text{m}$ ). Caso o objeto de estudo não esteja na resolução adequada na imagem, a sugestão é o detalhamento por meio de análises da mesma amostra em dimensões menores e mais alta resolução para posterior integração dos dados e escalas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Rede de Estudos Geotectônicos da PETROBRAS, que por meio do Projeto Falhas (Subprojeto Confocal), 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, principalmente aos do LAMIR, que auxiliaram no desenvolvimento dos métodos aplicados. Aos membros da Skyscan/Intrutecnica, que transmitiram parte do conhecimento básico sobre o equipamento e a técnica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANAND, M.; TAYLOR, L.A.; MISRA, K.C.; CARLSON, W.D.; SOBOLEV, N.V. Nature of Diamonds in Yakutian eclogites: views from eclogite tomography and mineral inclusions in diamonds. *Lithos*, v. 77, p. 333-348, 2004.
2. APPOLONI, C.R.; FERNANDES, C.P.; RODRIGUES, C.R.O. X-ray microtomography of a sandstone reservoir rock. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, v. 580, p. 629-632, 2007.
3. ARNOLD, J.R.; TESTA, J.P.J.; FREIEDMAN, P.J.; MAMBIC, G.X. Computed tomographic analysis of meteoric inclusions. *Science*, v. 219, p. 383-384, 1982.
4. BOONS, S. *Software CTVox*, version 1.0.0.r479. Kontich, Bélgica, 2010. Disponível em: <http://www.skyscan.be/products/downloads.htm>. Acessado em: jun2010.
5. CARLSON, W.D.; ROWE, T.; KETCHAN, R.A.; COLCERT, M.W. Applications of computed tomography in petrology meteoritics and paleontology. In: MEES, F.; SWENNEN, R.; GEET, M.V.; JACOBS, P. (Coords.), **Applications of X-ray Computed Tomography in Geosciences**. London: Geological Society, Special Publications, p. 7-22, 2003.
6. CÍSLEROVÁ, M. & VOTRUBOVÁ, J. CT derived porosity distribution and flow domains. *Journal of Hydrology*, v. 267, p. 186-200, 2002.
7. CNUDE, V.; MASSCHAELE, B.; DIERICK, M.; VLASSENVROECK, J.; HOOREBEKE, L.V.; JACOBS, P. Recent progress in X-ray CT as a geosciences tool. *Applied Geochemistry*, v. 21, p. 826-832, 2006.

8. DIÓGENES, A.N. **Reconstrução tridimensional de meios porosos utilizando técnicas de simulated annealing**. Florianópolis, 2009. 147 p. Tese (Doutorado) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
9. DULIU, O. Computer axial tomography in geosciences: an overview. **Earth Science Reviews**, v. 48, p. 265-281, 1999.
10. ENGELDER, J.T. Cataclasis and the generation of fault gouge. **Geological Society of America Bulletin**, v. 85, p. 1515-1522, 1974.
11. FELDKAMP, L.A.; DAVIS, L.C.; KRESS, J.W. Practical cone-beam algorithm. **Journal of the Society of America**, v. 1, n. 6, 1984.
12. FLUKIGER, F. & BERNARD, D. A new numerical model for pore scale dissolution of calcite due to CO<sub>2</sub> saturated water flow in 3D realistic geometry: principles and first results. **Chemical Geology**, v. 265, p. 171-180, 2009.
13. GEET, M.V. & SWENNEN, R. Quantitative 3D-fracture analysis by means of microfocus X-ray computer tomography ( $\mu$ CT): an example from coal. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 17, p. 3333-3336, 2001.
14. GEET, M.V.; SWENNEN, R.; WEVERS, M. Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocus X-ray computerized tomography. **Sedimentary Geology**, v. 132, p. 25-36, 2000.
15. GUALDA, G.A.R. & RIVERS, M. Quantitative 3D petrography using x-ray tomography: Application to Bishop Tuff pumice clasts. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 154, p. 48-62, 2006.
16. HOUNSFIELD, G.N. Computerized transverse axial scanning (tomography). Part 1: Description of system. **British Journal of Radiology**, v. 46, p. 1016-1022, 1973.
17. IZGEC, O.; ZHU, D.; HILL, A.D. Numerical and experimental investigation of acid wormholing during acidization of vuggy carbonate rocks. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 74, p. 51-66, 2010.
18. JERRAM, D.A.; MOCK, A.; DAVIS, G.R.; FIELD, M.; BROWN, R.J. 3D crystal size distributions: A case study on quantifying olivine populations in kimberlites. **Lithos**, v. 1125, p. 223-235, 2009.
19. KETCHAM, R.A. Three-dimensional grain fabric measurements using high-resolution X-ray computed tomography. **Journal of Structural Geology**, v. 27, p. 1217-1228, 2005.
20. KETCHAM, R.A. & ITURRINO, G.J. Nondestructive high-resolution visualization and measurement of anisotropic effective porosity in complex lithologies using high-resolution X-ray computed tomography. **Journal of Hydrology**, v. 302, p. 92-106, 2005.
21. KHARITONOV, V. **Software CTAnalyser**, version 1.10.9.0. Kontich, Bélgica, 2003. DVD licenciado.
22. KHARITONOV, V. **Software CTVol realistic 3D-visualization**, version 2.2.0.0. Kontich, Bélgica. 2010. DVD licenciado.
23. KUPER, K.E.; ZEDGENIZOV, D.A.; RAGOZIN, A.L.; SHATSKY, V.S.; POROSEV, V.V.; ZOLOTAREV, K.V.; BABICHEV, E.A.; IVANOV, S.A. Three-dimensional distribution of mineral in diamondiferous eclogites, obtained by the method of high-resolution X-ray computed tomography. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, v. 575, p. 255-258, 2007.
24. LANDIS, E.N.; NAGI, E.N.; KEANE, D.T. Microstructure and fracture in three dimensions. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 70, p. 911-925, 2003.
25. LE MAITRE, R.W.; STRECKEISEN, A.; ZANETTIN, B.; LE BAS, M.J. **Igneous Rocks: A classification and glossary of terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks**, 2005.
26. LIU, Y.; TAYLOR, L.A.; SARBADHIKARI, A.B.; VALLEY, J.W.; USHIKUBO, T.; SPICUZZA, M.J.; KITA, N.; KETCHAM, R.A.; CARLSON, W. Metasomatic origin of diamonds in the world's largest diamondiferous eclogite. **Lithos**, v. 112S, p. 1014-1024, 2009.
27. LIU, X. **Software NRecon**, version 1.6.3.0. Kontich, Bélgica, 2010 (a). DVD licenciado.
28. LIU, X. **Software Dataviewer**, version 1.4.3. Kontich, Bélgica, 2010 (b). DVD licenciado.
29. LONG, H.; SWENNEN, R.; FOUBERT, A.; DIERICK, M.; JACOBS, P. 3D quantification of mineral components and porosity contribution in Westphalian C sandstone by microfocus X-ray computed tomography. **Sedimentary Geology**, v. 220, p. 126-125, 2009.
30. LOVEA, M.; OIAIE, G.; RICMAN, C.; MATEIASI, G.; NEAGU, M.; SZOBOTKA, S.; DULIU, O.G. Dual-energy X-ray computer axial tomography and digital radiography investigation of cores and other objects of geological interest. **Engineering Geology**, v. 103, p. 119-126, 2009.
31. MADI, K.; FOREST, S.; BOUSSUGUE, M.; GAILLIÈGUE S.; LATASTE, E.; BUFFIÈRE, J.Y.; BERNARD, D.; JEULIN, D. Finite element simulation of the deformation of fused-cast refractories based on X-ray computed tomography. **Computational Materials Science**, v. 39, p. 224-229, 2007.
32. MEES, F.; SWENNEN, R.; GEET, M.V.; JACOBS, P. Applications of x-ray computed tomography in geosciences. London: **Geological Society**, Special Publications, p. 1-6, 2003.
33. RAYNAUD, S.; FABRE, D.; MAZEROLLE, F.; GÉRAUD, Y.; LATIÈRE, H.J. Analysis of the internal structure of rocks and characterization of mechanical deformation by a non-destructive method: x-ray tomodensitometry. **Tecnophysics**, v. 159, p. 149-159, 1989.
34. REMEYSEN, K. & SWENNEN, R. Application of microfocus computed tomography in carbonate reservoir characterization: possibilities and limitations. **Marine and Petroleum Geology**, v. 25, p. 486-499, 2008.
35. RENARD, F.; BERNARD, D.; DESRUES, J.; SIMONIN, A.O. 3D imaging of fracture propagation using synchrotron X-ray microtomography. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 286, p. 285-291, 2009.
36. SARKAR, P.S.; SINHA, A.; KASHYAP, Y.; MORE, M.R.; GODWAL, B.K. Development and characterization of a 3D cone beam tomography system. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, v. 524, p. 377-384, 2004.
37. SASSOV, A. **Software Skyscan 1172 control**, versão 1.5.8.0. Kontich, Bélgica, 2009. DVD licenciado.
38. SELLERS, E.; VERVOORT, A.; CLEYNENBREUGEL, V. Three-dimensional visualization of fractures in rock test samples, simulating deep level mining excavations, using X-ray computed tomography. In: MEES, F.; SWENNEN, R.; GEET, M. V.; JACOBS, P. (Coords.), **Applications of X-ray Computed Tomography in Geosciences**. London: Geological Society, Special Publications, p. 69-80, 2003.
39. SHIN, H.; LINDQUIST, W.B.; SAHAGIAN, D.L.; SONG, S.R. Analysis of the vesicular structure of basalt. **Computers & Geosciences**, v. 31, p. 473-487, 2005.
40. TRICART, J.P.; GEET, M.V.; SASOV, A. Using micro-CT for 3D-characterization of geological materials. **Microscopy and Analysis**, v. 65, 31 p., 2000.
41. TRZASKOS, B.; ROSTIROLLA, S.P.; BOCADI, L.B. Bandas de deformação em arenitos permocarboníferos da bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, p. 27-43, 2007.
42. TSAKIROGLOU, C.D.; LOANNIDIS, M. ; AMIRTHARAJ, E.; VIZIKA, O. A new approach for the characterization of the pore structure of dual porosity rocks. **Chemical Engineering Science**, v. 64, p. 847-859, 2009.

43. VANDERSTEEN, K.; BUSSELEN, B.; ABEELE K.V.D.; CARMELIET, J. Quantitative characterization of fracture apertures using microfocus computed tomography. In: MEES, F.; SWENNEN, R.; GEET, M. V.; JACOBS, P. (Coords.), **Applications of X-ray Computed Tomography in Geosciences**. London: Geological Society, Special Publications, v. 215, p. 61-68, 2003.
44. VINEGAR, H.J. X-ray CT and NMR imaging of rocks. **Journal of Petroleum Technology**, v. 38, p. 257-259, 1986.
45. WILDENSCHILD, D.; HOPMANS, J.W.; VAZ, C.M.P.; RIVERS, M.L.; RICARD, D.; CHRISTENSEN, B.S.B. Using X-ray computed tomography in hydrology: systems, resolutions and limitations. **Journal of Hydrology**, v. 267, p. 285-297, 2002.
46. ZABLER, S.; RACK, A.; MANKE, I.; THERMANN, K.; TIEDEMANN, J.; HARTHILL, N.; RIESEMEIER, H. High-resolution tomography of cracks, voids and micro-structure in greywacke and limestone. **Journal of Structure Geology**, v. 30, p. 876-887, 2008.

*Manuscrito Recebido em: 6 de abril de 2011  
Revisado e Aceito em: 4 de julho de 2011*