



## Aplicação da Técnica de Microtomografia Computadorizada de Raios X no Imageamento de Estruturas Sedimentares em Rochas Microclásticas

Thiago Gonçalves CARELLI; Alessandra Silveira MACHADO & Leonardo BORGHI  
Laboratório de Geologia Sedimentar (Lagesed) - Universidade Federal do Rio de Janeiro

Copyright 2014, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

*Este texto foi preparado para a apresentação no VI Simpósio Brasileiro de Geofísica, Porto Alegre, 14 a 16 de outubro de 2014. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VI SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.*

### Abstract

Better known as “shales”, microclastic sedimentary rocks contain numerous microstructures not noticed in a microscopic examination, especially those that occur in submillimeter and millimeter (microscale) scales. When preserved, microstructures provide important information on sedimentary processes and paleoenvironmental conditions, besides directly influencing hydrocarbon exploration and exploitation. The purpose of this initial study was sedimentary microstructure imaging of 4 samples of Devonian aged microclastic rocks using the X-ray microtomography technique ( $\mu$ -CT). Two samples (P1 and P2) were from Pimenteiras Formation (Parnaíba basin) and the other two (JAG 1 and JAG 2) from the Jaguariáiva Member of the Ponta Grossa Formation (Paraná basin). The results proved that  $\mu$ -CT is an efficient technique for the characterization of those samples, mainly the biogenic in relation to the hydrodynamics due to higher density contrast, especially when there is occurrence of pyrite ( $\text{FeS}_2$ ) in the walls or inside the microstructures (tubes). The images revealed that most of the microstructures are interconnected, forming a network of tubes or across different layers with different properties which favors that they act as migration routes of free gas, when these rocks constitute possible unconventional reservoirs (shale gas).

### Introdução

O estudo de rochas sedimentares microclásticas (< 0,062 mm), mais conhecidas como “folhelhos” tem constituído um tema de fronteira dentro da Geologia sedimentar. Estas rochas, que englobam uma ampla gama de litologias e nomenclaturas (q.v. Picard, 1971; Macquaker & Adams, 2003), representando aproximadamente dois terços do volume de rochas sedimentares do registro geológico (cf. Potter et al., 2005), são bem caracterizadas pelo seu potencial de geração de hidrocarbonetos (associado ao conteúdo orgânico), embora carentes tratando-se de uma abordagem sedimentológica visando sua atuação como rochas selantes ou mesmo reservatórios de baixa permeabilidade (*gas shale*) em sistemas petrolíferos. Ou ainda, do ponto de vista dos processos deposicionais e condições paleoambientais, melhor compreendido pelo estudo das estruturas

(hidrodinâmicas e biogênicas) presentes na rocha (q.v. Schieber, 1991 O'Brien & Slatt, 1990; Lobza & Schieber, 1999).

Quando preservadas, tais estruturas trazem consigo informações importantes sobre os processos sedimentares atuantes durante deposição das mesmas, além de apresentar implicações diretas na exploração e exploração de hidrocarbonetos (q.v. Buatois et al., 2002), uma vez que podem estar associadas ao incremento da capacidade reservatório ou diminuição da efetividade do selo (Dawson & Almon, 2002).

Porém, ainda hoje inúmeras estruturas passam despercebidas ao exame macroscópico devido a sua escala de ocorrência. Desta forma faz-se necessária a utilização de técnicas não rotineiras de análise, muitas das quais onerosas e por vezes destrutivas, porém essenciais ao estudo.

Neste contexto a microtomografia de raios X ( $\mu$ -CT) oferece os benefícios de se obter mapas tridimensionais de estruturas internas da rocha, principalmente as que ocorrem em escala milimétrica a submilimétrica e por tratar-se de um método não destrutivo, vêm ganhando aplicações em diversas áreas da Geologia.

Com resoluções na ordem de micrômetros os equipamentos de  $\mu$ -CT possuem o tubo de raios X e o detector fixos, sendo a amostra rotacionada durante o processo de aquisição das imagens. O tubo de raios X apresenta o tamanho reduzido (microfoco), constituindo esta, uma das principais características deste equipamento. Pois quanto menor o foco, maior será a nitidez, resultando em uma melhor qualidade nas imagens adquiridas pelo equipamento (Lima, et. al., 2007).

### Material e Método

Este estudo têm por objetivo o imageamento (seções 2D e 3D) de microestruturas sedimentares em rochas microclásticas, cuja finalidade é subsidiar discussões sobre seu efeito no incremento da porosidade e permeabilidade, tratando-se de potenciais reservatórios de baixa permeabilidade.

O material de Estudo consta de 4 amostras (plugues) de rochas microclásticas de idade devoniana. Destas, 2 amostras (P1 e P2) oriundas de um testemunho de sondagem do poço 2-NA-1-TO, cujo intervalo amostrado representa a Formação Pimenteiras (bacia do Parnaíba), e outras 2 amostras (JAG 1 e JAG 2) coletadas através de plugagem em um afloramento do Membro Jaguariáiva

da Formação Ponta Grossa (Borda Leste, bacia do Paraná)

As amostras referentes a Formação Pimenteiras são caracterizadas por siltitos argilosos de cores cinza claro, exibindo abundantes estruturas sedimentares biogênicas e hidrodinâmicas. Já as amostras referentes ao Membro Jaguariaíva são caracterizadas por siltitos areno-argilosos com estruturas biogênicas frequentemente indistintas e piritizadas, além da ausência de microestruturas hidrodinâmicas.

As imagens de  $\mu$ -CT foram obtidas em um sistema de microtomografia de alta energia - Skyscan / Bruker, modelo 1173 HE (figura 1). Este sistema utiliza geometria de feixe de raios X em forma de cone para aquisição das imagens, durante essa etapa o objeto pode rotacionar  $180^\circ$  ou  $360^\circ$  com um passo fixo, a cada passo uma imagem transmitida é adquirida sendo salvas como arquivos 16 bit TIFF. Após o processo de aquisição, as imagens capturadas são reconstruídas utilizando um algoritmo próprio para reconstrução (Feldkamp, et. al., 1984). Quando essa última etapa é finalizada, a imagem está pronta para ser processada e analisada.

Para o escaneamento das amostras utilizados nesse estudo o equipamento operou com tensão de 130kV e corrente de  $61\mu\text{A}$  e de forma a reduzir a contribuição de fótons de baixa energia do feixe de raios X, foi utilizado uma combinação de dois filtros: um interno de alumínio (1,0 mm de espessura) e outro externo de cobre (0,50 mm de espessura). Os tamanhos de pixel empregados seguem um range de ( $22\mu\text{m}$  -  $26\mu\text{m}$ ) representando uma resolução aproximada de ( $48\mu\text{m}$  -  $58\mu\text{m}$ ).

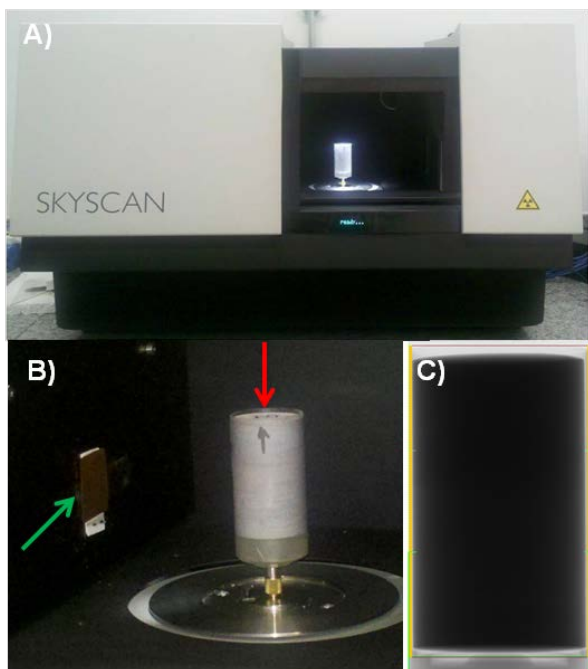


Figura 1 – (a) Equipamento de  $\mu$ -CT; (b) a seta vermelha apresenta uma amostra fixada dentro do equipamento e a seta verde indica o filtro de 0,5 mm de Cu; (c) Projeção de uma das amostras.

## Resultados

As imagens obtidas permitiram a observação de inúmeras estruturas, principalmente aquelas atribuídas a atividade de organismos (biogênicas), além de fósseis que ocorrem internamente a rocha. As estruturas biogênicas ocorrem frequentemente sob a forma de tubos horizontais e verticais em diferentes planos (figuras 2 e 3) e, em alguns casos, atravessando diferentes camadas (figura 3).

As amostras P1 e P2, referentes a Formação Pimenteiras, revelaram inúmeras estruturas, contudo devido ao baixo contraste de densidade não foi possível gerar um imageamento tridimensional nítido, exceto por aqueles que apresentavam-se piritizadas. Contudo, a análise de seções transversais permite a geração de um modelo aproximado a partir de mudanças nas projeções das estruturas através da rocha (figura 2). Já as amostras JAG 1 e JAG 2, referentes ao Membro Jaguariaíva apresentam abundantes estruturas horizontalizadas e poucas verticalizadas, além de um maior contraste de densidade, o que permitiu gerar imagens tridimensionais da interconexão dos tubos (figuras 4 e 5) e visualizar tubos que atravessam diferentes camadas com propriedades distintas, servindo como possíveis rotas de migração de gás livre (figura 3).

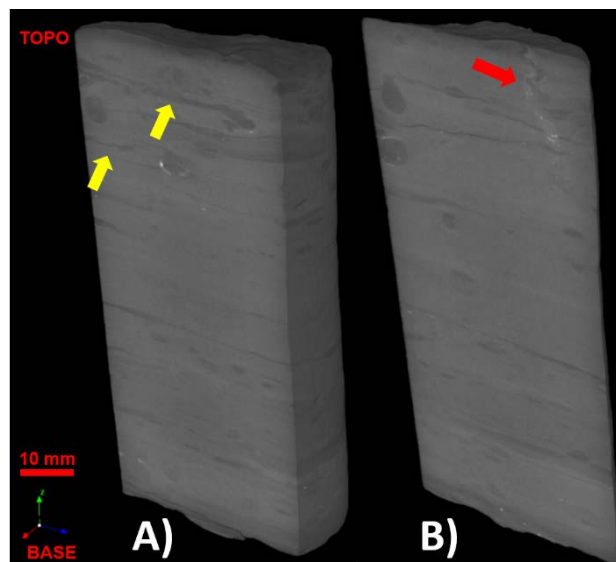


Figura 2 – Imagem obtida através da microtomografia de Raios X para a amostra P1 (Formação Pimenteiras) em diferentes planos. A) Note tubos (estruturas biogênicas) horizontalizados, indicados pelas setas amarelas. B) Note tubo verticalizado com padrão helicoidal indicado pela seta vermelha.

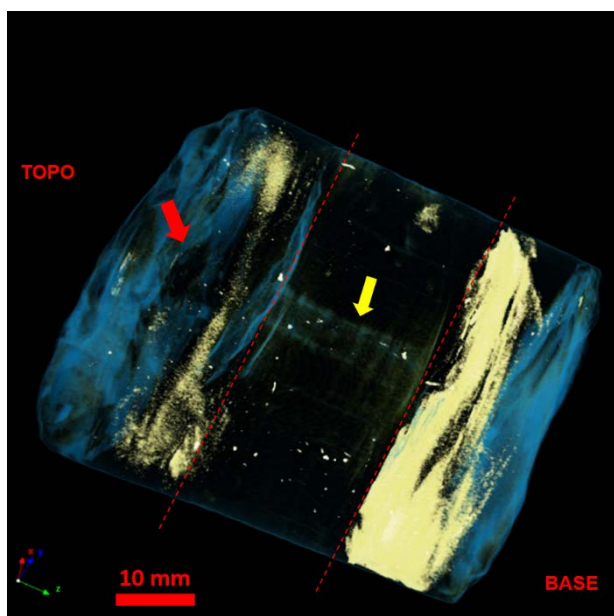


Figura 3 – Imagem obtida através da  $\mu$ -CT para a amostra P2 (Formação Pimenteiras). Note tubo (estruturas biogênicas) verticalizado indicado pela seta amarela conectando diferentes camadas. A seta vermelha indica a projeção do tubo no plano superior da amostra

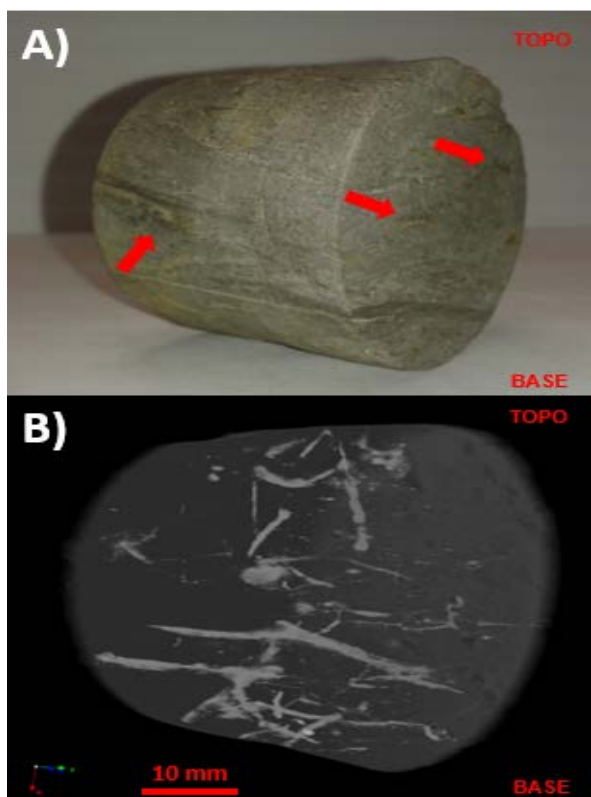


Figura 4 – Imagem obtida através da  $\mu$ -CT para a amostra JAG 1 (Membro Jaguariáiva). A) Note estruturas biogênicas indistintas e piritizadas indicadas pelas setas Vermelhas. B) Note o alto grau de interconexão dos tubos na parte basal.

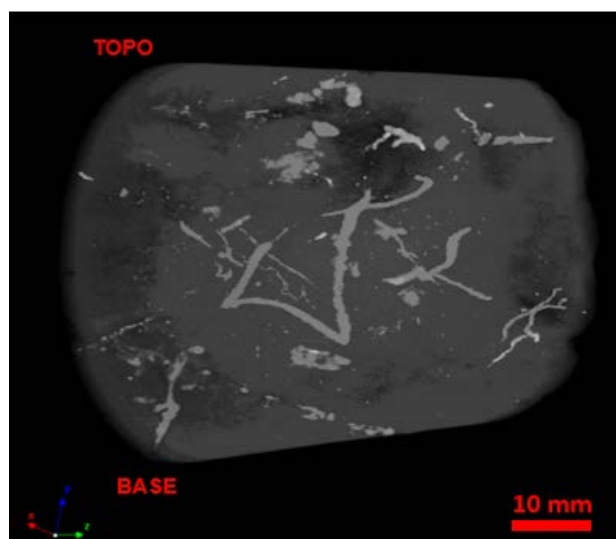


Figura 5 – Imagem obtida através  $\mu$ -CT para a amostra JAG 2 (Membro Jaguariáiva). Note tubos horizontalizados com baixo grau de interconexão.

### Discussão e Conclusões

A técnica de Microtomografia de Raios X se mostrou eficiente na visualização de estruturas em rochas microclásticas, principalmente as biogênicas em relação às hidrodinâmicas devido ao maior contraste de densidade. Sobretudo quando da ocorrência de pirita ( $\text{FeS}_2$ ) nas paredes ou interior das microestruturas (tubos), como observado nas amostras JAG 1 e JAG 2.

Este aspecto revela que as mesmas foram geradas num substrato *firmground* com certo nível de oxigenação e compactação, no qual o organismo produz um muco que facilita sua locomoção no substrato. Segundo Schieber (2002) este muco segregado pelos organismos bentônicos é importante para a produção inicial de pirita diagenética induzida por bactérias.

As imagens revelam um alto índice de reelaboração do substrato pela atividade de organismos, fato atestado pelas inúmeras estruturas observadas, que ocorrem na maioria dos casos sob a forma de tubos exibindo certo grau de interconexão. Esses tubos que representam variações composicionais e/ou mudanças nas características petrofísicas, podem atuar como rotas de migração de gás livre no caso dessas rochas virem a constituir possíveis reservatórios de baixa permeabilidade (*gas shale*).

### Referências

Buatois, L. A.; Mángano, M. G. & Aceñolaza, F. G. (Eds.). 2002. Trazas Fósiles: Señales de comportamiento en el registro estratigráfico. MEF- Museo Paleontológico Egidio Feruglio, Bahía Blanca, p. 382.

Dawson, W. C. & Almon, W. R. S., 2002. Top Seal Potential of Tertiary Deep-Water Gulf of Mexico Shales. Gulf Coast Association of geological Societies Transactions, v. 52, p. 167-176.

Feldkamp L. A., Davis L. C., Kress J. W., 1984 "Practical cone beam algorithm", Journal of Optical Society of America. Res.1(6), p. 612-619.

Lima, I., et. al., 2007. Characterization of osteoporotic bone structures by bidimensional images through x-ray microfluorescence with synchrotron radiation. X-Ray Spectrometry. v. 37, p. 249-254.

Lobza, V. & Schieber J. 1999. Biogenic sedimentary structures produced by worms in soupy, soft muds: Observations from the Chattanooga shale (Upper devonian) and experiments. Journal of Sedimentary Research, v. 69, p. 1041-1049.

Macquaker, J. H. S. & Adams, A. E., 2003. Maximizing information from fine-grained sedimentary rocks: an inclusive nomenclature for mudstones. Journal of Sedimentary Research, v.73 (5), p. 735-744.

O'Brien, N. R. & Slatt, R. M., 1990. Argillaceous rock Atlas. New York: Springer Verlag, p.141.

Picard, M. D., 1971. Classification of fine-grained sedimentary rocks. Journal of Sedimentary Research, v.41 (1), p. 179-195.

Potter, P. E., Maynard, J. B. & Depetris, P. J. (Eds.) 2005. Mud and Mudstones. Springer Verlag, Berlin, p. 297.

Schieber, J. 1991. Sedimentary structures: textures and depositional settings of shales from the lower belt supergroup, mid-proterozoic, Montana, U. S. A. In: R. H.

SCHIEBER, J., 2002. The role of an organic slime matrix in the formation of pyritized burrow trails and pyrite concretions. Palaios, v. 17, p.104-109.