

Determinação de Parâmetros Microestruturais e Reconstrução de Imagens 3-D de Rochas Reservatório por Microtomografia de Raios X

Microstructure Parameters Determination and Reconstruction 3-D Images of Reservoir Rocks for X-Ray Microtomography

Jaquiel Salvi Fernandes

Universidade Estadual de Londrina - UEL
Departamento de Física, Londrina, PR
jaquielfernandes@yahoo.com.br

Carlos Roberto Appoloni

Universidade Estadual de Londrina - UEL
Departamento de Física, Londrina, PR
appoloni@uel.br

Celso Peres Fernandes

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC
Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC
celso@lmpt.ufsc.br

Resumo: A microtomografia computadorizada de raios X (μ -CT) tem se mostrado uma técnica bastante útil para a análise de rochas reservatório, pois fornece parâmetros microestruturais importantes, tais como, porosidade, permeabilidade e distribuição de tamanho de poros. A microtomografia de raios X é uma técnica não destrutiva, que além de possibilitar a reutilização das amostras já medidas, também fornece imagens 2-D e 3-D da amostra. Para a aquisição dos dados microtomográficos das rochas reservatório, foi utilizado um microtomógrafo Skyscan, modelo 1172, o primeiro instalado no Brasil. Este equipamento forneceu imagens com resolução espacial de 2,5 μ m para a amostra analisada. As imagens microtomográficas 2-D foram analisadas com o software Imago. Este trabalho

apresenta resultados para um siltito da Formação Rio Bonito (MC16), coletado na Bacia do Rio Tibagi no Estado do Paraná, Brasil. Para esta amostra, foram obtidas 490 seções 2-D, as quais foram usadas para a análise microestrutural. A amostra MC16 apresentou uma porosidade total média de $(7,0 \pm 0,2) \%$. A distribuição de tamanho de poros da amostra mostrou que, 95 % da fase porosa refere-se a poros com raios entre 2,5 e 10,2 μm . Foi reconstruído a imagem 3-D real da amostra através do *software* CTan.

Palavras-chave: distribuição de tamanho de poros; microtomografia de raios X; porosidade; siltito.

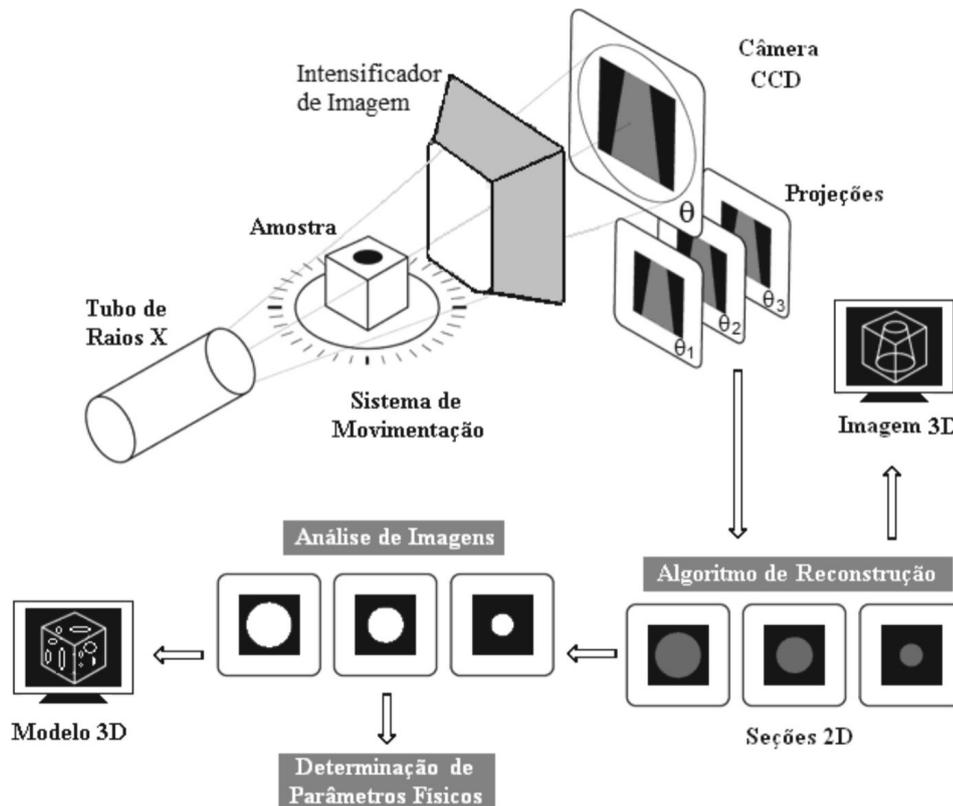
Abstract: X-ray computerized microtomography (μ -CT) has been a quite useful method for the analysis of these reservoir rocks, because it provides important microstructural parameters, such as, porosity, permeability and pore size distribution. X-ray microtomography is a non destructive technique that besides facilitating the reuse of the samples yet measured, it also provides 3-D and 2-D images of the samples. For the acquisition of microtomographics data of the reservoir rock, a μ -CT scanner Skyscan, model 1172, was used. This equipment provided images with 2.5 μm space resolution for the geometry and size of the considered sample. 2-D microtomographics images were analyzed with the Imago software. This research presents results for a siltstone from the Rio Bonito Formation (MC16), collected in Tibagi river basin in the State of Paraná, Brazil. For this sample we obtain 490 2-D sections, that were used for the microstructural analysis. The MC16 sample presented total average porosity of $(7.0 \pm 0.2) \%$. The average pore size distribution of the samples showed that 95 % of the pores are between 2.5 and 10.2 μm . The real image 3-D of the sample was reconstructed by the CTan software.

Key words: porosity; pore size distribution; siltstone; X-ray microtomography.

1 Introdução

A técnica de microtomografia computadorizada de raios X (μ -CT) é uma técnica não destrutiva que mede variações de densidade do material. A técnica usa um conjunto de projeções bidimensionais de um objeto para reconstruir sua estrutura tridimensional, usando um algoritmo matemático [1-5]. Um esquema ilustrativo da aquisição, reconstrução e geração da imagem e modelo 3-D é apresentado na figura 1.

Figura 1. Esquema ilustrativo da aquisição, reconstrução e geração das imagens e modelos tridimensionais



Fonte: Os autores

Como os raios X passam através do objeto que é escaneado, o sinal é atenuado por espalhamento e absorção. A equação básica para atenuação

de um feixe monoenergético por um material homogêneo é dada pela lei de Lambert-Beer [6]:

$$I = I_0 \exp[-\mu x] \quad (1)$$

em que I_0 e I é a intensidade de raios X incidentes e transmitidos, respectivamente, μ é o coeficiente de atenuação linear para o material que está sendo escaneado, e x é a espessura da amostra que o feixe irá percorrer no material. Como o objeto escaneado é composto por um número diferente de materiais, a equação se torna:

$$I = I_0 \exp\left[\sum_i (-\mu_i x_i)\right] \quad (2)$$

em que cada incremento i reflete um único material com coeficiente de atenuação μ_i em cima de uma extensão linear x_i .

A μ -CT é utilizada em diversas áreas, na farmacêutica por exemplo, Farber et al. [7] utilizaram a microtomografia de raios X para avaliar a microestrutura de grânulos farmacêuticos. Os parâmetros estudados foram a porosidade total, a distribuição de tamanho de poros e a estrutura geométrica dos poros nos grânulos. Os autores compararam a porosidade e a distribuição de tamanho de poros com os resultados encontrados com técnica da Porosimetria de Hg [8, 9]. Para este caso, concluíram que a microtomografia fornece informações morfológica importantes que não podem ser medidas com a porosimetria de Hg. Além disso, ela fornece medida mais precisa da distribuição de tamanho de poros.

No campo da celulose, Rolland du Roscoat et al. [10] determinaram, através da microtomografia de raios X *synchrotron*, a porosidade e a área da superfície específica para quatro tipos de papeis. Também, analisaram a variação destas propriedades com a orientação do papel. Por fim, determinaram o volume elementar representativo das amostras analisadas.

Em trabalhos anteriores Appoloni et al. [11, 12] utilizaram um *scanner* de microtomografia computadorizada de raios X para caracterizar o espaço poroso de rochas reservatório (arenitos). Neste trabalho, são evidenciados os conceitos relacionados à metodologia empregada. Foi utilizado um microtomógrafo Skyscan, modelo 1072. A metodologia mostrou-se de alta confiabilidade para tal estudo,

fornecendo os perfis de porosidade ao longo da amostra, assim como a porosidade global média e a distribuição de tamanho de poros média.

Os imageamentos, bidimensional e tridimensional, de amostras de rochas reservatório usando tomografia computadorizada (CT) e/ou microtomografia computadorizada (μ -CT) de raios X estão se tornando uma prática padrão na indústria petrolífera, com aplicação de novas metodologias e análises [13]. Geralmente, injeção de água é usada para a extração de petróleo em rochas reservatório e as técnicas de CT e μ -CT estão sendo usadas para determinar parâmetros importantes neste processo, tais como, porosidade, distribuição de tamanho de poros e permeabilidade.

É muito comum na indústria petrolífera a utilização de outros métodos para a determinação destes parâmetros, onde os mais difundidos são a porosimetria de intrusão de mercúrio e o método de Arquimedes, porém o uso destes métodos, muitas vezes, inviabiliza a utilização das amostras para análises futuras, pois são métodos considerados destrutivos. Já as técnicas de CT e μ -CT, além de possibilitar análises futuras da amostra já medida, como é o caso das amostras de rochas carbonáticas do pré-sal, que estão sendo microtomografadas pela equipe do Laboratório de Física Nuclear Aplicada (LFNA) da Universidade Estadual de Londrina (UEL) e não podem ser inutilizadas, também possibilitam a visualização interna da amostra através das imagens tridimensionais (3-D).

2 Materiais e métodos

2.1 Equipamentos utilizados

Para este trabalho, foi utilizado um microtomógrafo da Skyscan, modelo, 1172 do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento (CENPES) da PETROBRAS, Rio de Janeiro(RJ). As imagens microtomográficas foram reconstruídas pelo *software* NRecon [14]. A porosidade e a distribuição de tamanho de poros foram obtidas através do *software* Imago [15], desenvolvido no Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas de Materiais (LMPT) do Departamento de Engenharia

Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, em Florianópolis(SC), em associação com a companhia de *software* brasileira ESSS (Engineering Simulation and Scientific Software). Outro software utilizado foi o CTan [14], no qual foi realizada a reconstrução da imagem 3-D da amostra. A figura 2 mostra uma foto do microtomógrafo Skyscan 1172 instalado no CENPES.

Figura 2. Microtomógrafo Skyscan 1171, fonte de raios X de 20 – 100 kV, potência máxima de 10 W



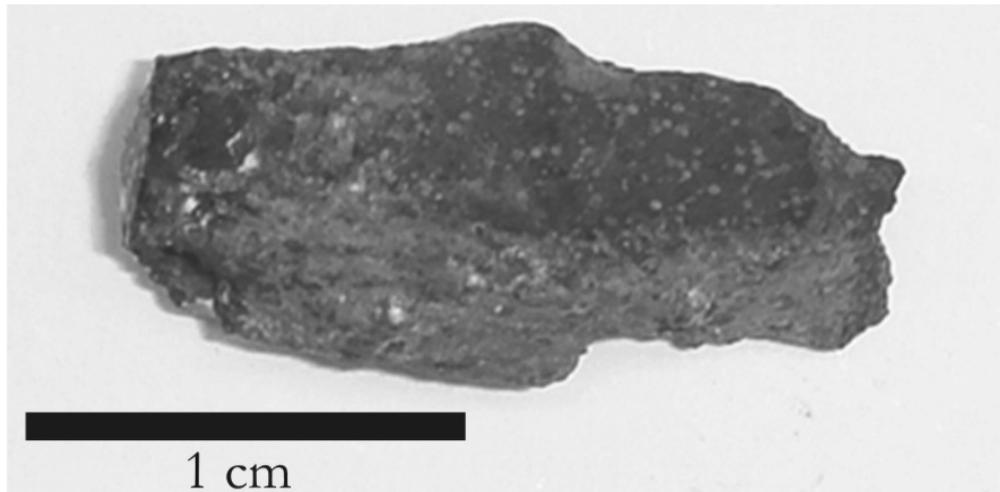
Fonte: Os autores

O tubo de raios X possui uma potência máxima de 10 W. Para esta aplicação, a tensão utilizada foi de 70 kV, com uma corrente de 142 μA . A amostra foi posicionada entre o tubo de raios X e a câmara CCD de 2000 x 1048 *pixels*, a uma distância de 1,9 cm do tubo e 32,6 cm da CCD, resultando em uma resolução espacial de 2,5 μm .

2.2 Amostras analisadas

A amostra analisada foi um siltito da formação Rio Bonito, retirada na região da cidade de Figueira, Paraná, com dimensões aproximadas de 4 x 5 x 16 mm, como pode ser observado na figura 3. A amostra foi rotacionada de 0° a 180°, com passos angulares de 0,25°, totalizando 938 projeções. Estas projeções foram reconstruídas pelo *software* NRecon, resultando em 490 imagens bidimensionais em escala de cinza. Para aquisição destes dados, foi utilizado um filtro de Alumínio de 1 mm de espessura, no qual seu objetivo principal foi diminuir o efeito de *beam hardening* [16] na amostra. Tais parâmetros foram determinados pela pré-análise das projeções e baseados em testes realizados para outras amostras com as mesmas características, onde tais parâmetros foram variados e os resultados avaliados.

Figura 3. Amostras de siltito da formação Rio Bonito



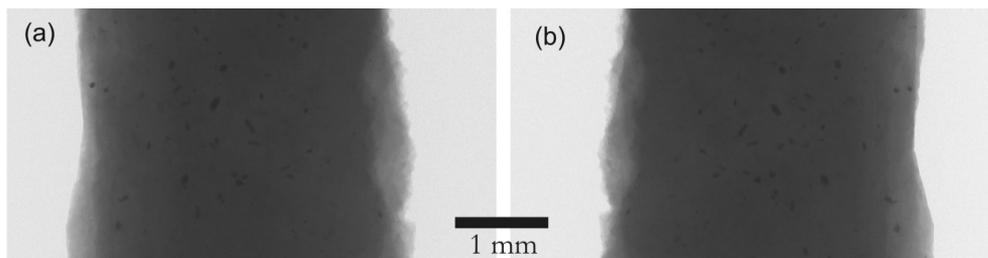
Fonte: Os autores

2.3 Processamento das imagens

A figura 4 mostra duas projeções, 0° e 180°, formadas na câmara CCD. Estas projeções são usadas pelo *software* NRecon, que utiliza um algoritmo de reconstrução de feixe cônico [3], resultando em imagens 2-D em escala de cinza, como pode ser visto na figura 5a. Após a geração das imagens 2-D, estas são analisadas pelo *software* Imago, onde é definida uma região de interesse (ROI) e

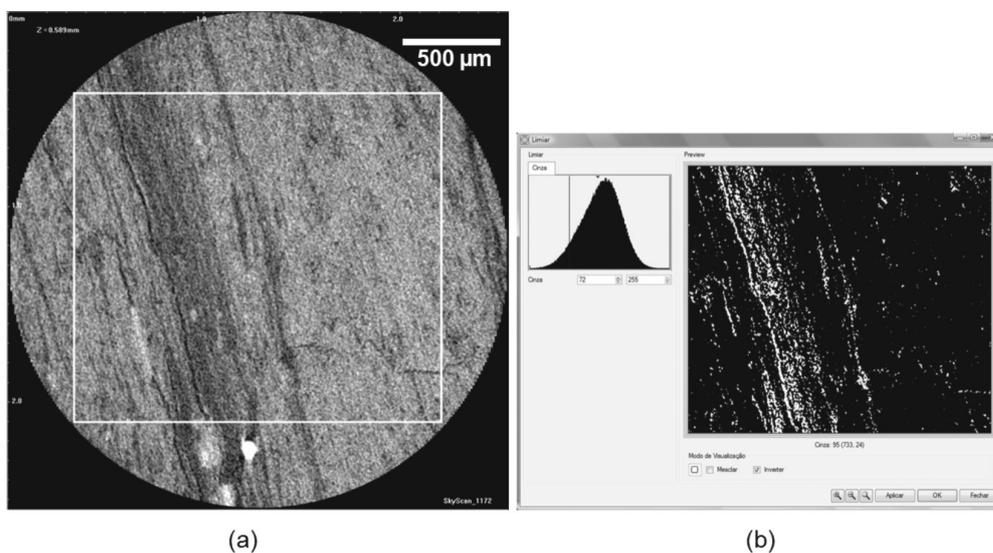
realizada a binarização, transformando a imagem em preto e branco, onde o preto representa a fase sólida e o branco a fase porosa, como pode ser visto na figuras 5b. Estas imagens possuem resolução espacial de 2,5 μm .

Figura 4. Projeções da amostra de siltito MC16; (a) imagem obtida na posição 0°; (b) imagem obtida na posição 180°



Fonte: Os autores.

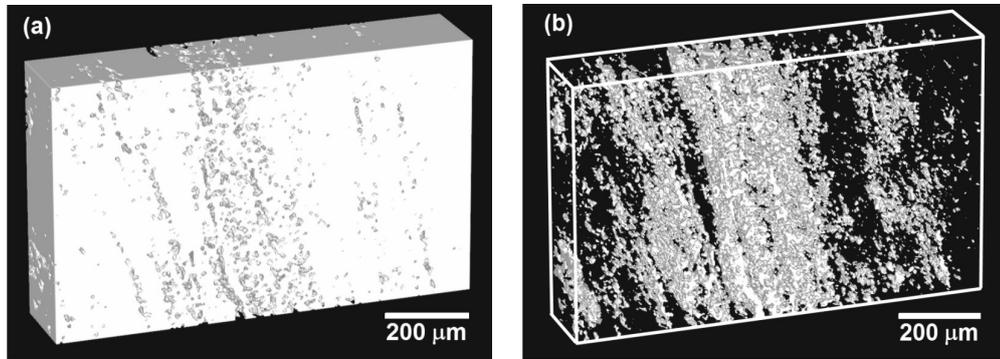
Figura 5. Imagens da amostra MC16 reconstruídas pelo software NRecon; (a) imagem 2-D em escala de cinza; (b) imagem 2-D binarizada, preto representa a fase sólida e o branco a fase porosa



Fonte: Os autores

Com as imagens 2-D também foi possível a reconstrução de uma imagem 3-D, onde foi utilizado o software CTan para reconstruir a fase sólida (Figura 6a) e a fase porosa (Figura 6b) da amostra.

Figura 6. Volume 3-D reconstruído da amostra MC16; (a) fase sólida reconstruída; (b) fase porosa reconstruída

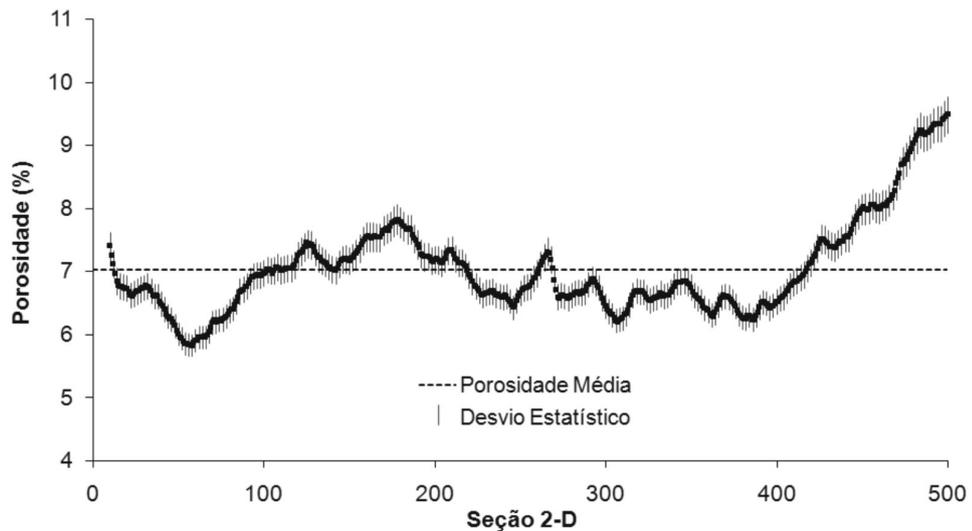


Fonte: Os autores

3 Resultados

O perfil de porosidade da amostra MC16 obtido pelo *software* Imago, para cada seção 2-D, está representado no gráfico da figura 7, em que a linha pontilhada indica a porosidade média ($7,0 \pm 0,2$ %) e as barras indicam o desvio estatístico [17], com 95 % de confiança.

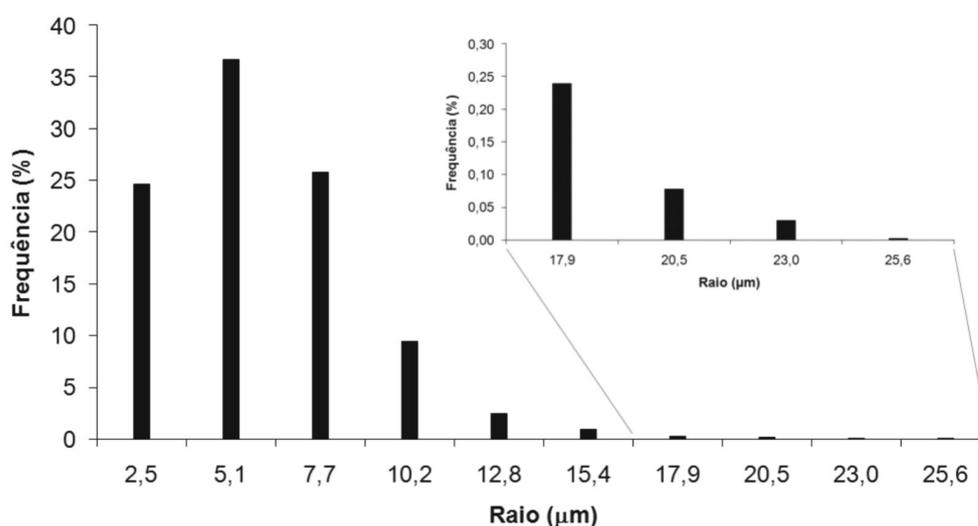
Figura 7. Perfil de porosidade das 490 seções 2-D da amostra de siltito MC16 da formação Rio Bonito



Fonte: Os autores

Na figura 8 pode ser observada a média da distribuição de tamanho de poros para as 490 seções 2-D da amostra MC16. Também pode ser observado que 95 % da fase porosa referem-se a poros com raio de 2,5 a 10,2 μm , apresentando uma maior frequência (37,5 %) em 5,1 μm de raio. Já para os poros entre 17,9 e 25,6 μm de raio a contribuição é relativamente pequena, sendo possível visualizar este intervalo no gráfico com escala ampliada.

Figura 8. Média da distribuição de tamanho de poros para as 490 seções 2-D da amostra MC16



Fonte: Os autores

Através das imagens 3-D é possível verificar que a amostra possui poros alinhados, ou seja, poros em uma determinada direção, isto é devido a característica da amostra que apresenta uma estratigrafia bem definida na forma de folhelho em algumas regiões.

4 Conclusões

A caracterização de rochas reservatório, tais como o siltito estudado, são de grande importância para a indústria petrolífera. Estes dados são geralmente

medidos através de métodos considerados destrutivos, tais como porosimetria de intrusão de mercúrio e método de Arquimedes.

A metodologia da microtomografia de raios X possibilita a caracterização detalhada de propriedades petrofísicas importantes de rochas reservatório, tais como, porosidade e distribuição de tamanho de poros e permeabilidade. A interconectividade dos poros pode ser visualizada e caracterizada analisando as imagens 3-D através de softwares específicos. Existem vários softwares de análise de imagens, alguns possibilitam navegar pelo interior da amostra, dessa forma, visualizar como os poros estão distribuídos e se estão ou não conectados.

A porosidade total da amostra analisada, calculada pelo software Imago, foi de $7,0 \pm 0,2$ %. Entre os poros encontrados podemos observar poros de $2,5 \mu\text{m}$ (resolução espacial utilizada no $\mu\text{-CT}$) até $25,6 \mu\text{m}$ de raio. A alta frequência de poros com raio de $2,5 \mu\text{m}$ dá indícios de que existem poros ainda menores, que não foram detectados devido a resolução utilizada. Portanto, é indicado que se faça uma nova aquisição de dados, só que desta vez com uma resolução espacial mais adequada, $1 \mu\text{m}$ por exemplo, para constatar tal suspeita.

A utilização de imagens 3-D da estrutura real de rochas é revolucionária para a indústria petrolífera, uma vez que anteriormente não se conhecia como os poros das rochas estavam distribuídos pelo seu interior, e as simulações de escoamento de fluidos eram feitas apenas com modelos matemáticos que tentavam se aproximar da real estrutura das rochas, o que geralmente não era alcançado. Agora tais simulações podem ser feitas diretamente nas imagens 3-D das rochas, tornando o método de simulação mais confiável.

5 Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem ao apoio fornecido pela CAPES, CNPq, CENPES/PETROBRAS, Universidade Federal de Santa Catarina e Universidade Estadual de Londrina.

6 Referências

- [1] CORMACK, A. M. Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications, Part I, *J. Appl. Phys.* v. 34, p. 2722-2727, 1963.
- [2] _____. Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications, Part II, *J. Appl. Phys.* v. 35, p. 2908-2913, 1964.
- [3] FELDKAMP, L. A., DAVIS, L. C., and KRESS, J. W. Practical Cone Beam Algorithm. *J. Opt. Soc. Am.* v. 1, n. 6, p. 612-619, 1984.
- [4] WELLINGTON, S. L., and VINEGAR, H. J. X-ray computed tomography, *J. Pet. Technol.* v. 39, p. 885-898, 1987.
- [5] FLANNERY, B. P., et al. Threedimensional X-ray microtomography, *Science*, v. 237, p. 1439-1444, 1987.
- [6] SIEGBAHN, K. *Alpha-, Beta- And Gamma-Ray Spectroscopy*. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, New York, Oxford, p. 37-76, 1965.
- [7] FARBER, L., TARDOS, G. and MICHAELS, J. N. Use of X-ray tomography to study the porosity and morphology of granules. *Powder Technol.* v. 132, p. 57-63, 2003.
- [8] WEBB, P. A. and ORR, C. *Analytical Methods in Fine Particle Technology*. Micromeritics Instrument Corporation, Norcross, USA, 1997, 301 p.
- [9] GOUVEIA, D. Porosimetria ao Mercúrio. Disponível em: <http://www.angelfire.com/crazy3/qfl2308/1_multipart_xF8FF_7_Porosimetria_ao_Mercurio_PMI-2201.pdf>. Acesso: nov 2009.
- [10] ROLLAND DU ROSCOAT, S., et al. Estimation of microstructural properties from synchrotron X-ray microtomography and determination of the REV in paper materials. *Acta Mater.* v. 55, p. 2841-2850, 2007.
- [11] APPOLONI, C. R., RODRIGUES, C. R. O., and FERNANDES, C. P. *Porous microstructure characterization of a sandstone reservoir using high-resolution X-ray microtomography*. In: International Symposium of the Society of Core Analysts. Toronto, Canada, 2005, 21-25.

- [12] APPOLONI, C. R., FERNANDES, C. P., and RODRIGUES, C. R. O. X-ray microtomography study of a sandstone reservoir rock. *Nucl. Instrum. Meth. A* v. 580, p. 629-632, 2007.
- [13] RIBEIRO, J. L. B., QUEIROZ, J. C., LOPES, R. T., ANJOS, M. J., BIANCO, L. C. B., D'ALMEIDA, A. R., and CAMPOS, E. F. New methodology for analysis of performance for diverting agents in unconsolidated sandstones in real time with physical simulator using computed tomography. *Nucl. Instrum. Meth. A* v. 579, n. 1, p. 481-485, 2007.
- [14] Software NRecon e CTan de reconstrução bidimensional e tridimensional. <http://www.skyscan.be/products/downloads.htm> Acesso: nov. de 2007.
- [15] Software Imago de análise de imagens bidimensionais e tridimensionais. <<http://www.imagosystem.com.br/?show=technology>>. Acesso: nov 2007.
- [16] KETCHAM, R. A., and CARLSON, W. D. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences. *Comput. Geosci.* v. 27, p. 381-400, 2001.
- [17] APPOLONI, C. R. and CESAREO, R. Microscanning and Microtomography with X-Ray Tubes - Università Degli Studi Di Roma - Centro Interdipartimentale Di Ricerca Per L'Analisi Dei Modelli E Dell'Informazione Nei Sistemi Biomedici (CISB) – Dezembro, 1994.