

## DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS MICROESTRUTURAIS DE ROCHAS RESERVATÓRIO DO AQUÍFERO GUARANI ATRAVÉS DA ANÁLISE DE IMAGENS 2-D E 3-D OBTIDAS COM A MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS-X

*Francieli Antunes de Lima<sup>1</sup>; Jaquiel Salvi Fernandes<sup>2</sup>; Solange Francieli Vieira<sup>3</sup>;  
Paola dos Santos Balestieri<sup>4</sup>*

### INTRODUÇÃO

A caracterização da geometria do espaço poroso e a determinação computacional de propriedades microestruturais de rochas reservatório é de grande importância para a determinação do tamanho de um reservatório, tanto de água, como petróleo ou gás. O sistema poroso das rochas apresenta uma geometria complexa, envolvendo os aspectos de forma dos poros (morfologia) e da conectividade entre os poros (topologia). As propriedades físicas macroscópicas desses materiais são fortemente dependentes da sua microestrutura. A permeabilidade intrínseca, por exemplo, depende da porosidade efetiva ao escoamento de fluidos, da distribuição de tamanho de poros e do grau de interconexão entre os poros. Desta forma, a descrição quantitativa da microestrutura dos materiais porosos assume fundamental importância, permitindo uma melhor compreensão de como a microestrutura influencia fenômenos físicos que ocorrem no seio do material, bem como a determinação numérica de suas propriedades microestruturais.

O recente desenvolvimento de microtomógrafos permite a caracterização de materiais porosos com resolução espacial entre 0,5 e 5  $\mu\text{m}$ , utilizando um tubo de raios X. Têm-se assim resultados equivalentes ao de um acelerador Síncrotron, porém, em um laboratório convencional.

<sup>1</sup> Ex-aluna do IFC – Câmpus Videira, curso Técnico Integrado em Informática, turma 2011. E-mail: fal.franci@gmail.com

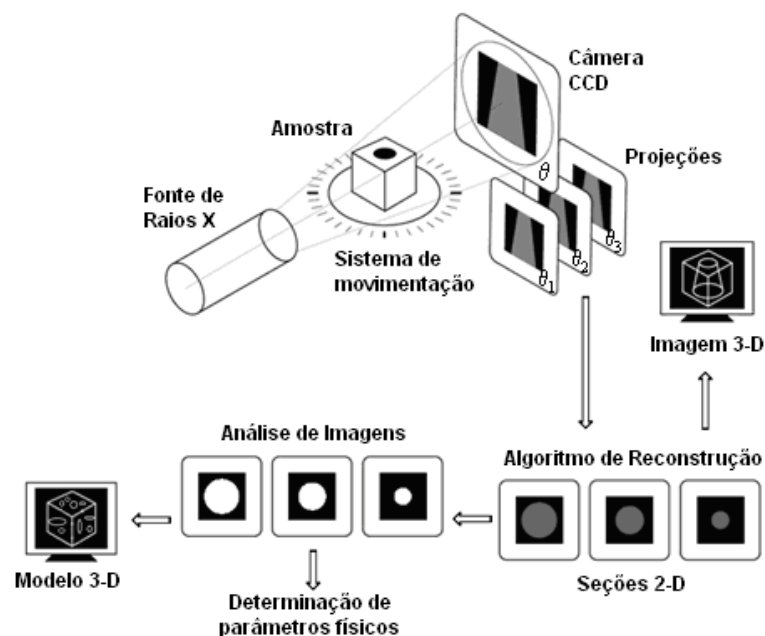
<sup>2</sup> Professor Orientador do IFC – Câmpus Videira. E-mail: jaquiel.fernandes@ifc-videira.edu.br

<sup>3</sup> Professora Co-orientadora do IFC – Câmpus Videira. E-mail: solangevieira@ifc-videira.edu.br

<sup>4</sup> Aluna do IFC – Câmpus Videira, curso Técnico integrado em Informática, turma 2013. E-mail: paola.balestieri@gmail.com

A técnica da microtomografia de raios X é um método de inspeção que permite a obtenção de dados da microestrutura interna de materiais, na forma de imagens das seções transversais, a partir da irradiação externa das amostras (APPOLONI, 2004). Esta técnica necessita da utilização de softwares adequados de tratamento e análise de imagens, que possibilitam a determinação de parâmetros importantes para o melhor conhecimento do material analisado. A partir das imagens das seções transversais das rochas, realiza-se um processo de renderização, obtendo-se imagens tridimensionais (3-D) (APPOLONI, 2002; 2005; 2007). Estas imagens são utilizadas inicialmente para a caracterização de propriedades como: distribuição de tamanho de poro e de grãos, superfície específica e conectividade do sistema poroso, porosidade efetiva e permeabilidade. 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.



Além desta caracterização, as imagens 3-D são utilizadas diretamente em simulações numéricas de fenômenos físicos de equilíbrio e de transporte de fluidos, visando determinar suas propriedades microestruturais. Neste procedimento, leis

físicas fundamentais são aplicadas na escala de poro. Esta técnica visa a caracterização da geometria do sistema poroso e a determinação de algumas propriedades microestruturais.

O Aquífero Guarani ocupa uma área total de 1,2 milhões de km<sup>2</sup> e localiza-se na região centro oeste da América do Sul, estando inserido dentro dos limites de quatro países, sendo eles: Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai. Dentro do Estado de Santa Catarina ele ocupa uma área de aproximadamente 49.200 km<sup>2</sup>. Como a espessura média do aquífero é de 228 m, podemos calcular que o volume aproximado do aquífero sob Santa Catarina é de 11.218 km<sup>3</sup> (ROSA FILHO, 2003).

O município de Videira está localizado sobre a região do aquífero. Este aquífero é considerado um dos maiores reservatórios subterrâneos de água doce do mundo, sendo constituído basicamente por arenito da formação Botucatu.

A preservação das águas subterrâneas é crucial para a humanidade, pois as águas superficiais presentes nos rios e lagos estão cada vez mais poluídas e escassas, situação agravada pelo desmatamento e uso abusivo de agrotóxicos. Torna-se, assim, de extrema importância o conhecimento da capacidade de armazenamento dos aquíferos pela população.

Neste contexto, este artigo quantifica a porosidade de rochas que formam o aquífero Guarani através da microtomografia de raios X, onde foi possível estimar a quantidade de água que o aquífero pode armazenar, pois determinando a porosidade das rochas e sabendo o volume total destas rochas, pode-se estimar a quantidade de água existente.

## **PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

### **Equipamentos Utilizados**

Para este trabalho, foi utilizado um microtomógrafo da Skyscan, modelo, 1172, instalado no Laboratório de Física Nuclear Aplicada (LFNA) da Universidade Estadual de Londrina (UEL), no Paraná. As imagens microtomográficas foram reconstruídas pelo software NRecon (SKYSCAN, 2013). A porosidade e a

distribuição de tamanho de poros foram obtidas através do software Imago (ESSS, 2013), 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). 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.



O tubo de raios X possui uma potência máxima de 10 W. Para esta aplicação a tensão utilizada foi de 80 kV e uma corrente de 124  $\mu$ A. A amostra foi posicionada entre o tubo de raios X e a câmara CCD de 2000 x 1048 pixels, a uma distância de 5,9 cm do tubo e 15,1 cm da CCD.

### **Amostras Analisadas**

As amostras estudadas foram arenitos da formação Botucatu, retiradas de dois poços artesianos perfurados na região de Videira-SC, com coordenadas UTM 0551412, 7022236 para a profundidade de 250 metros e coordenadas 0487041,

7013997 para a profundidade de 400 metros. A amostra de arenito retirada na profundidade de 250 m (arenito250) possui as dimensões de 4 x 5 x 10 mm e a retirada na profundidade de 400 m (arenito400) 6 x 6 x 14 mm. As amostras foram rotacionadas de 0° a 180°, com passos angulares de 0,25°, totalizando 1442 projeções. Estas projeções foram reconstruídas pelo software NRecon, resultando em 900 imagens bidimensionais para cada amostra. 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” na amostra (KETCHAM, 2001).

### Processamento das Imagens

A Figura 3 mostra duas projeções longitudinais da amostra, 0° e 180°, formadas na câmara CCD. Estas projeções são reconstruídas pelo software NRecon usando um algoritmo de reconstrução de feixe cônico (FELDKAMP, 1984), resultando em imagens 2-D das seções transversais da amostra, em escala de cinza, como pode ser visto nas Figuras 4a e 5a. Após a geração das imagens 2-D, as mesmas 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 nas Figuras 4b e 5b. Estas imagens possuem uma resolução espacial de 4,8 µm.

Figure 3 – Projeções da amostra da formação Botucatu – arenito400. (a) imagem obtida na posição 0°; (b) imagem obtida na posição 180°.

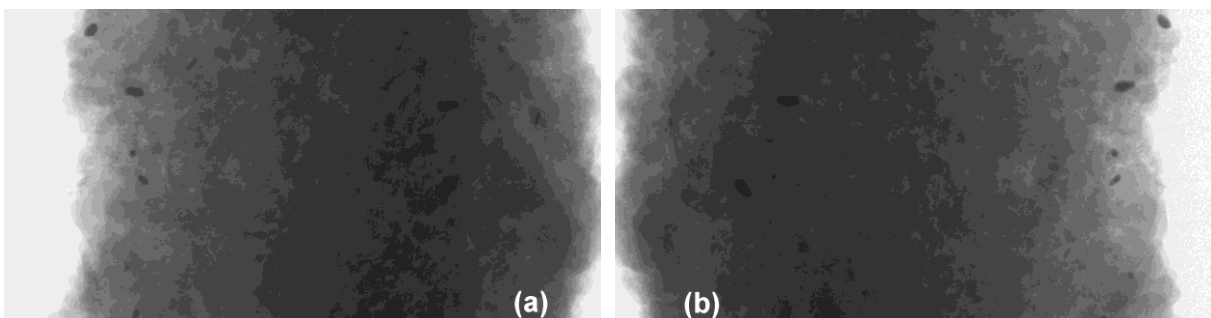


Figura 4 – Imagens do arenito250 reconstruídas pelo software NRecon; (a) imagem 2-D em escala de cinza; (b) imagem 2-D binarizada, preto representa a fase sólida e o branco a fase porosa.

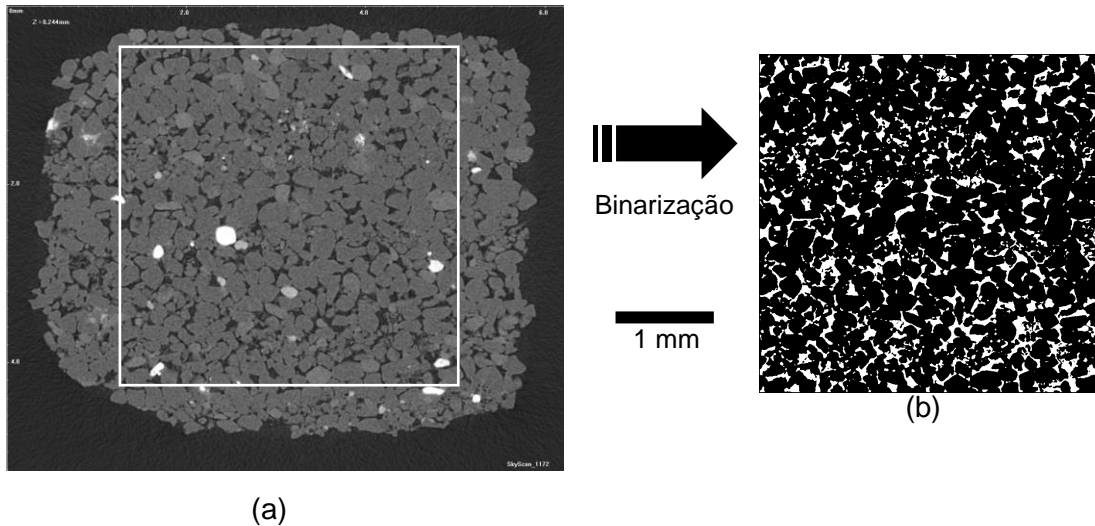
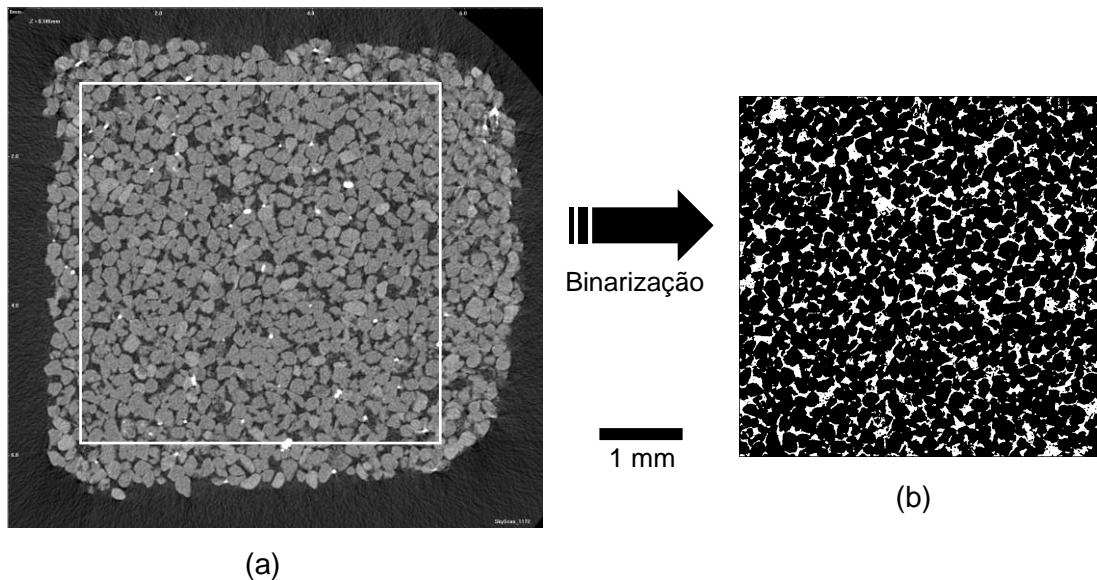


Figura 5 – Imagens do arenito400 reconstruídas pelo software NRecon; (a) imagem 2-D em escala de cinza; (b) imagem 2-D binarizada, preto representa a fase sólida e o branco a fase porosa.



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 7a) e a fase porosa (Figura 6b e 7b) das amostras arenito250 e arenito400, respectivamente.

Figura 6 – Volume 3-D reconstruído o arenito250; (a) fase sólida reconstruída; (b) fase porosa reconstruída.

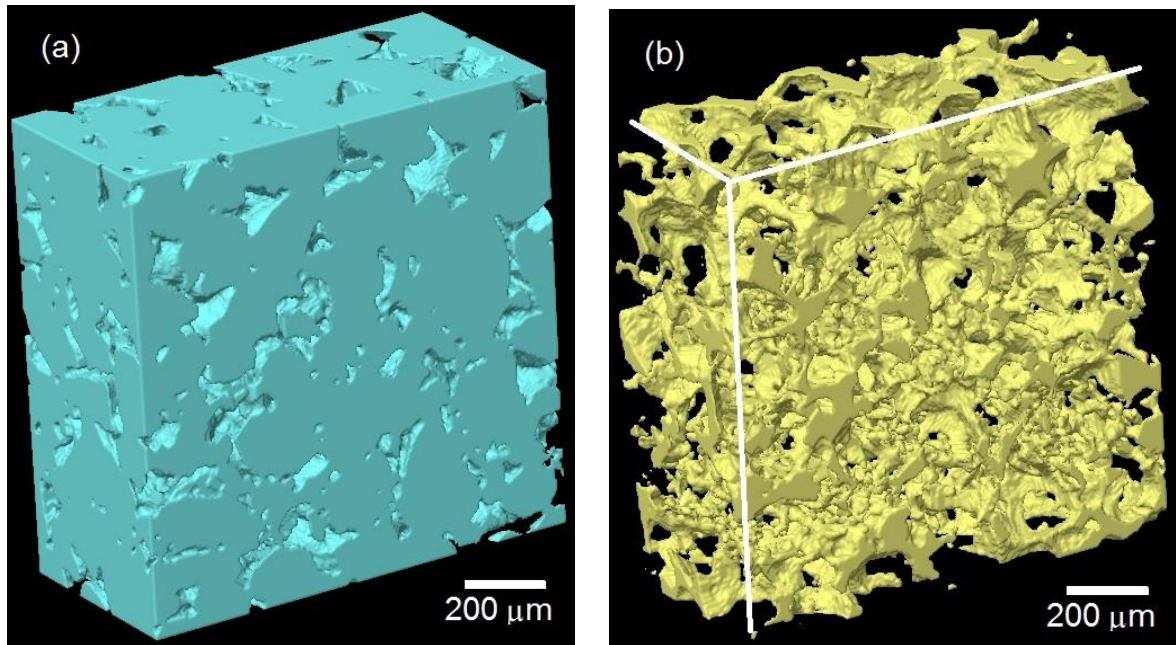
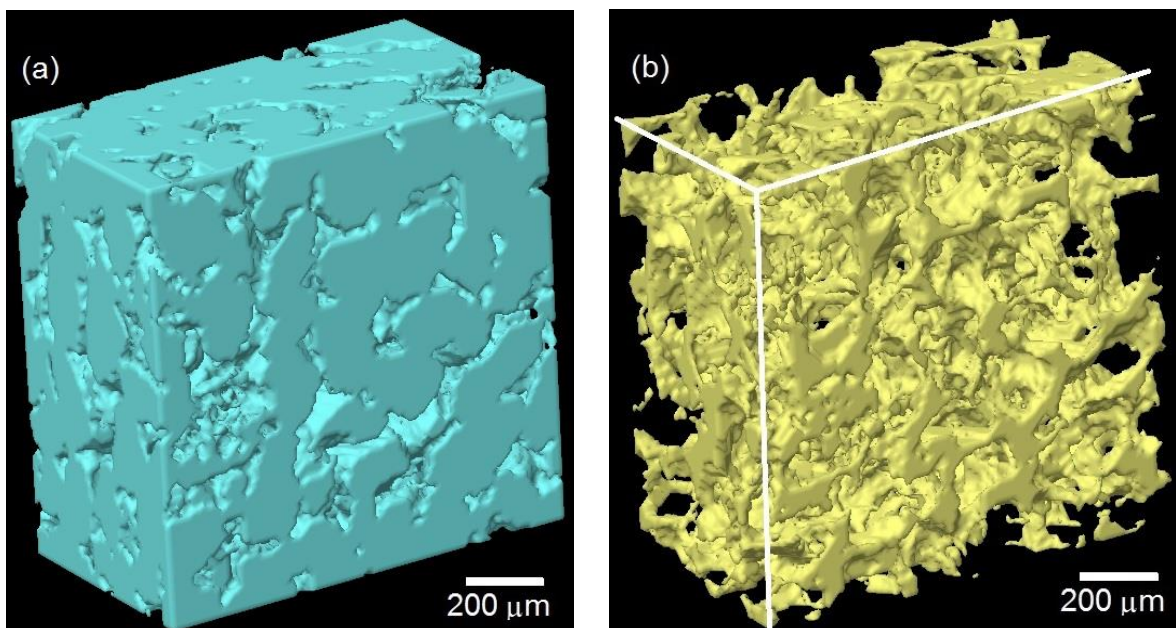


Figura 7 – Volume 3-D reconstruído do arenito400; (a) fase sólida reconstruída; (b) fase porosa reconstruída.



## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A porosidade das amostras arenito250 e arenito400, obtidas pelo software Imago, para cada seção 2-D, estão representadas no gráfico das Figuras 8 e 9, respectivamente, onde as linhas pretas indicam a porosidade média ( $18,8 \pm 0,6 \%$  e  $20,8 \pm 0,7 \%$ , respectivamente) e as barras vermelhas indicam o desvio estatístico de  $\pm 3,2 \%$  para cada seção, com 95 % de confiança.

Uma das vantagens da metodologia microtomográfica é a geração de imagens 3-D, que além das imagens apresentadas neste artigo, várias outras foram geradas para visualização, onde foi possível a navegação pelo interior das mesmas, através dos softwares específicos, o que possibilitou o acompanhamento/mapeamento da rede porosa com maiores detalhes. Não basta a rocha ter porosidade, é necessário que seus poros sejam conectados entre si e que possibilitem o escoamento da água.

Figura 8 – Porosidade das 900 seções 2-D da amostra de arenito para a profundidade de 250 metros e resolução espacial de  $4,8 \mu\text{m}$ .

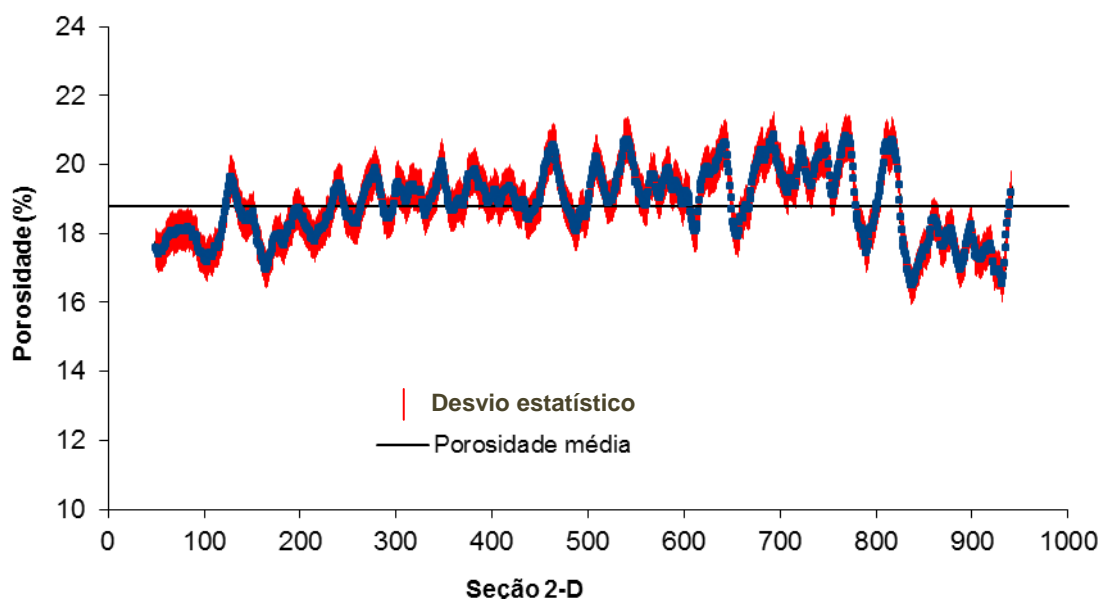
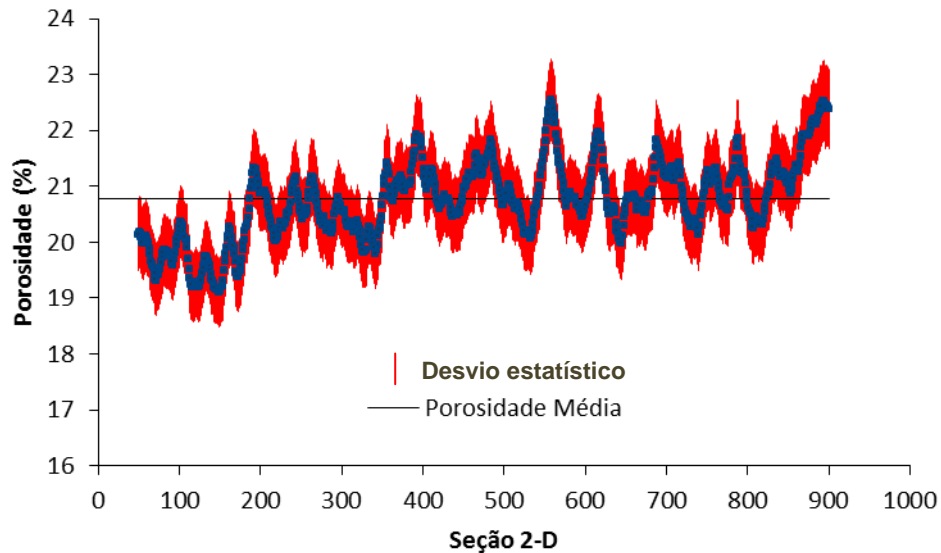


Figura 9 – Porosidade das 900 seções 2-D da amostra de arenito para a profundidade de 400 metros e resolução espacial de 4,8  $\mu\text{m}$ .



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a análise dos resultados foi possível verificar que a porosidade média destas rochas variou entre 18,8 e 20,8 %. Como o volume do aquífero é estimado em 272.460  $\text{km}^3$ , pode-se sugerir um volume de água armazenada que varia entre 51.222  $\text{km}^3$  a 56.671  $\text{km}^3$ . No entanto vale ressaltar que este trabalho analisou apenas rochas de dois poços artesianos, sendo assim tais resultados devem ser ratificados através da análise de mais amostras, para que, assim, se possa ter uma conclusão mais precisa quanto à porosidade destas rochas, consequentemente, da sua capacidade de armazenamento.

## REFERÊNCIAS

APPOLONI, C. R.; FERNANDES, C. P.; INNOCENTINI, M. D. M.; MACEDO, A. Ceramic foams porous microstructure characterization by X-ray microtomography. **Materials Research**, v. 7, n. 4, p. 557-564, 2004.

APPOLONI, C. R.; MACEDO, A.; FERNANDES, C. P.; PHILIPPI, P. C. Caracterização de Microestruturas Porosas por Microtomografia de Raios. XVII Seminário Latino Americano de Análises por Técnicas de Raios X – VII SARX São Pedro, SP, **Anais do VII SARX**, p. 419-424, 2002.

APPOLONI, C. R.; FERNANDES, C. P.; RODRIGUES, C. R. O. X-ray microtomography study of a sandstone reservoir rock. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A**, v. 580, Issue 1, p. 629-632, 2007.

APPOLONI, C. R., RODRIGUES, C. R. O., FERNANDES, C. P. Reservoir Sandstone Porous Microstructure Characterization By High-Resolution X-Ray Microtomography. 19th International Symposium of the Society of Core Analysts Toronto, August, p. 21-25, 2005.

ESSS. Imago, Software de análise de imagens.  
[http://www.esss.com.br/servicos\\_desenvolvimento\\_projetos\\_imago.php](http://www.esss.com.br/servicos_desenvolvimento_projetos_imago.php) (acesso em nov. 2013).

FELDKAMP, L. A.; et al. Practical cone-beam algorithm. **Journal of the Optical Society of America A**, n. 1, p. 612-619, 1984.

KETCHAM, R. A.; CARLSON, W. D. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences. **Computers & Geosciences**, n. 27, p. 381–400, 2001.

ROSA FILHO, E. F. Sistema aquífero guarani – considerações preliminares sobre a influência do arco de ponta grossa no fluxo das águas subterrâneas. **Rev. Águas Subterrâneas**, n. 17, p. 91–112, 2003.

SKYSCAN. NRecon, Software de reconstrução bidimensional.  
<http://www.skyscan.be/products/downloads.htm> (acesso em out. 2013).