

Caracterização do sistema poroso de rochas-reservatório com microtomografia computadorizada de raios X

Characterization of the porous system of reservoir rocks with X-ray computed microtomography

Celso Peres Fernandes | Anderson Camargo Moreira | Iara Frangiotti Mantovani | Carlos Roberto Appoloni | Jaquiel Salvi Fernandes | Marcos Klotz de Souza | Viviane Sampaio Santiago dos Santos

resumo

A caracterização do sistema poroso de amostras de rochas-reservatório é um tópico importante concernente à análise de sistemas petrolíferos. Várias técnicas têm sido utilizadas com este propósito, destacando-se àquelas baseadas na análise de imagens bidimensionais ou tridimensionais do espaço poroso. A análise de imagens obtidas com microscopia a partir de lâminas delgadas restringe a caracterização do sistema poroso ao espaço bidimensional. Atualmente, utilizam-se técnicas que permitem a obtenção de imagens tridimensionais, como a microtomografia computadorizada de raios X (microCT). No presente artigo apresentam-se os princípios da técnica microCT, aplicando-a no imageamento do sistema

poroso 3D de amostras de rochas-reservatório. Para mostrar as potencialidades da técnica, foram medidas três amostras de arenitos considerados homogêneos (sem a presença significativa de argilas) e uma amostra carbonática com distribuição multiescalar de poros. As medidas microtomográficas foram realizadas em um equipamento comercial SkyScan 1172 que atinge resolução espacial máxima em torno de $1\mu\text{m}$. Apresentam-se análises qualitativas e quantitativas, determinando-se o perfil de porosidades e a distribuição de tamanho de poros para duas amostras de arenito. Finalmente, discorre-se sobre a utilização da tomografia computadorizada de raios X no imageamento de sistemas porosos heterogêneos.

Palavras-chave: microtomografia | rochas-reservatório | sistema poroso multiescala | carbonatos

abstract

The structural characterization of the porous media of reservoir rocks plays an important role in petroleum systems research. Several techniques have been used for this purpose, for instance, 2D and 3D image analysis. Images captured from thin sections and other 2D techniques restrict the porous system characterization to a surface. Currently, X-ray computed microtomography (microCT) has been used to provide three-dimensional images of the samples structures. This paper shows the principles of the microCT technique applied to get 3D images of reservoir rocks. In order to demonstrate the potentiality of this technique, three sandstones samples (without significant clay formation within their porous phase) and one carbonate with multi-scalar pore sizes sample were analyzed. The microtomography measurements were accomplished with the SkyScan 1172 equipment, which can reach 1 μ m of spatial image resolution. A qualitative approach is followed by a quantitative analysis, where the porosity profiles and pore size distribution of the samples are measured. The employment of X-ray microtomography to get images of complex heterogeneous is discussed.

(Expanded abstract available at the end of the paper).

Keywords: *microtomography | rock reservoir | multiscale porous system | carbonates*

introdução

A caracterização do sistema poroso de rochas-reservatório de petróleo é usualmente feita a partir de lâminas delgadas analisando-se imagens 2D obtidas com microscopia ótica ou eletrônica de varredura. Com esta análise, restrita ao espaço bidimensional, pode-se caracterizar a morfologia e estimar a organização espacial do sistema poroso, determinando-se parâmetros como a porosidade efetiva, a distribuição de tamanho de poros e a correlação a dois pontos (Adler *et al.*, 1990; Ioannidis *et al.*, 1995; Liang *et al.*, 1998; Santos *et al.*, 2002). Ainda que a porosidade de um dado volume de amostra possa ser determinada em imagens 2D, a distribuição de poros e a conectividade do sistema poroso obtidas através destas imagens são apenas estimativas. De fato, tradicionalmente, os dados fornecidos pelas análises 2D são dados de entrada para a criação de sistemas 3D em processos conhecidos como reconstrução estocástica. Diversas técnicas foram propostas para a geração estocástica de estruturas porosas 3D a partir de informações obtidas em seções 2D como: os sistemas de percolação multiescala (Fernandes *et al.*, 1996; Daïan *et al.*, 2004); o truncamento de campos gaussianos, conservando-se a correlação a dois pontos (Quiblier, 1984; Adler *et al.*, 1990; Liang *et al.*, 1998); os chamados métodos diagenéticos, que procuram simular a sedimentação e diagênese (Bakke e Oren, 1997) e a técnica de estatística multiponto (Okabe e Blunt, 2004). A reconstrução estocástica se apresenta adequada para a representação de vários tipos de estruturas 3D. Contudo, geralmente se mostra limitada na conservação da conectividade de estruturas fortemente correlacionadas espacialmente (Okabe e Blunt, 2004; Appoloni *et al.*, 2007).

Por outro lado, de forma complementar à análise de lâminas delgadas e à reconstrução estocástica 3D, pode-se atualmente obter imagens 3D de meios porosos de alta resolução espacial diretamente com a microtomografia computadorizada de raios X (microCT) (Coles *et al.*, 1998; Knackstedt *et al.*, 2006; Appoloni *et al.*, 2007). Esta técnica tem sido largamente utilizada na obtenção de imagens 3D de amostras biológicas, geológicas e produtos manufaturados, entre outros. É baseada no mapeamento da absorção de um feixe de raios X que atravessa uma amostra, permitindo a descrição de sua estrutura interna. Esta absorção depende da

composição do material e da energia dos raios X: materiais de maior massa atômica e/ou maior densidade absorvem mais energia.

No presente artigo, apresenta-se a técnica de microtomografia computadorizada de raios X e suas limitações, aplicando-a para a determinação de imagens 2D e 3D de rochas-reservatório selecionadas. Com técnicas usuais de processamento de imagens, o sistema poroso das rochas é caracterizado medindo-se o perfil de porosidade e a distribuição de tamanho de poros. Deve ser enfatizado que o intuito no presente artigo é a caracterização de rochas, cujo sistema poroso é homogêneo. Sistemas porosos heterogêneos, como exemplo dos arenitos com fase argila e como muitos carbonatos, apresentam escalas de tamanho de poros bastante distintas e podem ser muito complexos. Desta maneira, a complexidade destes sistemas exige uma análise multiescala, cada uma associada a um dado comprimento característico. Neste trabalho, a análise de uma amostra carbonática heterogênea é apresentada de forma qualitativa, com o intuito de evidenciar as características distintas de sua fase porosa. No caso analisado, o equipamento utilizado não possui resolução suficiente para quantificar os poros de menor dimensão, abaixo da melhor resolução possível associada à aquisição das imagens. No final do artigo, discorre-se acerca das perspectivas das análises microtomográficas de sistemas porosos multiescalares.

microtomografia de raios X

nascimento da tomografia

A microtomografia de raios X sucede a tomografia computadorizada utilizada em diagnósticos médicos, conhecida como Computed Axial Tomography – CAT (Tesei *et al.*, 2005). A história da tomografia abrange mais de um século de pesquisas, tanto na área médica como na das ciências exatas. Desde a descoberta dos raios X em 1895 pelo físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen, esta categoria de radiação tem sido utilizada como método de diagnóstico na medicina através da radiologia e da radioscopia. Em 1901, Röntgen ganhou o Nobel de física pela sua descoberta. Posteriormente, vários outros cientistas receberam o mesmo prêmio com pesquisas sobre o assunto. Com o passar do tempo, o diagnóstico radiológico passou por significativo avanço

tecnológico, ganhando em qualidade e melhor aproveitamento da radiação nas medidas. Fato marcante desta evolução se deu com a introdução do computador na medicina, que possibilitou a solução de cálculos matemáticos complexos a partir da informação baseada na intensidade dos fótons de raios X. Em 1972, o engenheiro eletrônico inglês Godfrey Newbold Hounsfield, com a ajuda do médico neurorradiologista sul-africano James Abraham Edward Ambrose, apresentou um novo método de utilização da radiação X para medir descontinuidades de densidades do corpo de pacientes na forma de imagens. Nascia, então, a tomografia computadorizada, que recebeu fundamental contribuição matemática do físico sul-africano Allan McLeod Cormack. A invenção da CAT rendeu à Hounsfield e à Cormack o prêmio Nobel de medicina de 1979 (Carvalho, 2007). A Unidade de Hounsfield, ou simplesmente HU – escala de medida de densidades radiológicas adotadas na tomografia – é uma homenagem ao principal inventor da técnica. Em 2009, os físicos Charles K. Kao, Willard S. Boyle e George E. Smith, que em 1969 inventaram o Charge-Coupled Device (CCD) sistema de detecção utilizado na técnica de tomografia computadorizada – também foram agraciados com o prêmio Nobel de física.

Adequada para a análise de amostras com pequenas dimensões, a microtomografia de raios X também passa por constante evolução. Alguns equipamentos já atingem resoluções espaciais na escala nanométrica, o que sugere a mudança de nomenclatura para nanotomografia de raios X.

princípios da técnica

O princípio básico da técnica é a obtenção de imagens a partir da medida da atenuação da radiação pelos diferentes materiais que formam uma amostra. Quando um objeto é exposto a uma radiação eletromagnética de determinada energia, ele pode absorver parcialmente ou totalmente tal radiação. O parâmetro que vai definir a taxa de absorção radiativa pela matéria é o coeficiente de atenuação linear. Este coeficiente é uma propriedade intrínseca de cada material, com densidade e número atômico definidos, dependendo da energia dos fótons do feixe. Em se tratando de materiais com variação de densidade e de composição química, cada um dos volumes elementares que compõem o volume total do objeto apresenta um coeficiente de atenuação linear particular. A absorção

Figura 1

Esquema do processo de projeção de imagem na microtomografia de raios X (Landis e Keane, 2010).

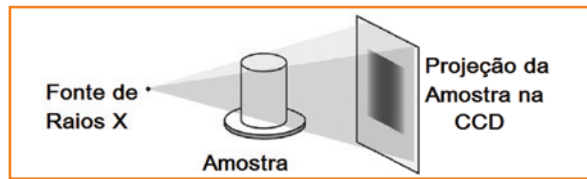


Figure 1

Scheme of the image projection process in the X ray microtomography (Landis and Keane, 2010).

exponencial que caracteriza a passagem de uma radiação eletromagnética monoenergética através de um material homogêneo é dada pela lei de absorção de radiações dada por:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

Um detector fotônico converte fótons captados em pulsos elétricos mensuráveis pelo sistema de detecção. Cada pulso computado é chamado de contagem. A intensidade de radiação de uma fonte " I_0 " é dada pela razão entre o número de contagens " n " e o tempo de medida " s ", ou seja, o tempo de exposição do detector à radiação (n/s). A intensidade " I " do feixe que foi atenuado ao atravessar o objeto, com espessura x (cm), é quantificada da mesma forma. O coeficiente de atenuação linear é denotado por μ (cm^{-1}).

Como a maioria das amostras analisadas são compostas por diferentes densidades e composições, a equação 1 se torna:

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

onde o índice i reflete um volume elementar com coeficiente de atenuação μ_i e extensão linear x_i atravessado pelo feixe.

Para gerar as imagens, a técnica faz um mapeamento dos coeficientes de atenuação linear referentes

aos volumes elementares componentes da amostra. O mapeamento é realizado através de projeções da amostra na câmera CCD, que é um arranjo bidimensional de pequenos detectores com dimensões que variam de câmera para câmera. Considerando o feixe como uma linha que atravessa o objeto, o tom de cinza de um *pixel* é formado a partir de uma distribuição da atenuação do raio X ao longo desta linha, a integral sobre ela representa a atenuação total sofrida pelo feixe que atravessa a amostra. Sistemas microtomográficos convencionais utilizam como fonte tubos de raios X com feixe cônico, que abrange toda a região da amostra a ser medida, realizando a projeção com uma só exposição. Na figura 1, pode ser observado de que forma um meio poroso cilíndrico é "iluminado" pelo feixe de raios X e tem a sua "sombra" projetada na câmera CCD.

Para a geração das imagens são necessárias informações dos coeficientes de atenuação linear sob diferentes ângulos de exposição. Por isso, várias projeções da amostra são realizadas. Quanto maior for o número de projeções, maior definição terá a imagem gerada. Com este intuito, a amostra é rotacionada com pequenos passos angulares e a cada passo uma projeção é realizada. Dependendo da complexidade da amostra ou do tempo disponível para a medida, a rotação pode completar 180° ou 360° e os passos angulares são frações de grau, por exemplo, $0,1^\circ$ ou $0,25^\circ$.

Para que se obtenha um modelo tridimensional do meio poroso imageado, é necessário que um algoritmo de reconstrução seja aplicado às projeções obtidas.

O método de reconstrução de imagens mais utilizado é chamado de Retroprojeção Filtrada (Feldkamp, 1984). Este método utiliza um algoritmo de reconstrução que consiste em realizar a junção de todas as informações contidas nas projeções para a geração das imagens bidimensionais. Detalhamentos matemáticos do algoritmo podem ser encontrados no trabalho de Kak e Slaney, 1999. A figura 2 ilustra como seria a geração de imagens bidimensionais de um objeto a partir de diferentes números de projeções.

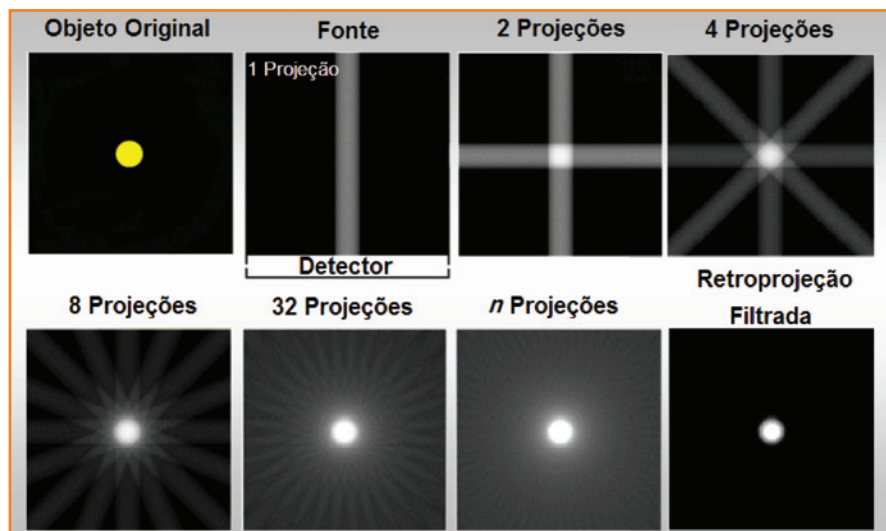
A retroprojeção usa o artifício de distribuir na imagem a projeção do objeto para o lado posterior e anterior do local onde estaria postado. A reconstrução de uma imagem com apenas uma projeção resultaria em uma mancha. Desta forma, o algoritmo necessita de informações de projeções do objeto analisado realizadas em vários ângulos. O termo "filtrado" designa a ação do algoritmo em "limpar" a imagem de resquícios das n projeções realizadas no objeto.

Figura 2

Esquema da reconstrução de imagens a partir de projeções (figura modificada disponível em: <www.walmorgodoi.com> e <www.impactscan.org>, acesso em: agosto/2011).

Figure 2

Image reconstruction scheme (<www.walmorgodoi.com> and <www.impactscan.org>, access: august/2011).



Devido ao arranjo matricial dos detectores na CCD, as imagens são convencionalmente geradas linha a linha, ou seja, cada linha resulta em uma imagem bidimensional do objeto. Portanto, no caso do uso de câmera com 1.000x1.000 pixels, podem ser geradas até 1.000 seções 2D. As seções 2D geradas, ou imagens bidimensionais, são semelhantes às imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) ou metalografia óptica, guardadas as devidas proporções em relação à capacidade de resolução das diferentes técnicas. Como a microtomografia de raios X tem a propriedade de gerar uma série de imagens seccionais das amostras, a quantificação de propriedades e parâmetros físicos ganha muito em representatividade. Na figura 3, podem ser observadas algumas projeções do meio poroso presente na figura 1, juntamente com algumas seções 2D reconstruídas.

Para a análise no domínio tridimensional, a imagem 3D é reconstruída através da renderização, que consiste em empilhar todas as seções 2D reconstruídas para a obtenção do volume, como pode ser observado na figura 4. Maiores detalhamentos sobre a técnica podem ser encontrados em Landis e Keane, 2010.

aplicação da microtomografia a rochas-reservatório

Com o intuito de mostrar a aplicabilidade da técnica de microtomografia de raios X a rochas-reservatório, foram adquiridas imagens de amostras de arenitos, bem como de uma amostra de carbonato. Os resultados apresentados a seguir são oriundos de medidas realizadas em um equipamento comercial instalado no Centro de Pesquisas da Petrobras (Cenpes) em 2007, sendo o primeiro instalado no Brasil. Trata-se de um sistema microtomográfico SkyScan 1172, o qual possui um tubo de raios X de feixe cônico (20-100kV, 0-250mA, potência máxima de 10W), câmera CCD de 10 Mpixel, atingindo resoluções espaciais da ordem de 1µm.

Foram adquiridas imagens de três amostras de arenito: da Formação Furnas (Estado do Paraná), da Formação Tumblagooda (Austrália) e da Formação Botucatu e também de uma amostra de Travertino adquirida no comércio da Cidade do Rio de Janeiro. Estas amostras foram denominadas, respectivamente, de PG8, Tg, MP e Trv. Na tabela 1, apresentam-se os parâmetros utilizados na aquisição das imagens das

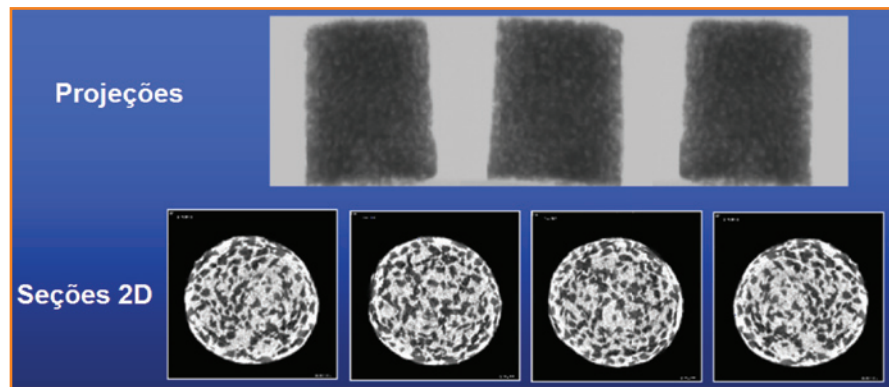


Figura 3
Projeções e seções 2D reconstruídas de um meio poroso (Moreira, 2006).

amostras e o tipo de análise realizada e apresentada no presente artigo. As imagens microtomográficas de seções 2D, essencialmente as imagens 3D, permitem a quantificação de parâmetros associados à geometria e à conectividade do sistema poroso das rochas. Ainda, nas imagens 3D, os fenômenos físicos podem ser modelados matematicamente na escala dos poros, permitindo a determinação computacional de propriedades petrofísicas. No que se segue, apresentam-se imagens e observações qualitativas para as amostras MP e Trv. Para as amostras PG8 e Tg apresentam-se os resultados da quantificação do perfil de porosidades (valor da porosidade para cada seção 2D), bem como da distribuição de tamanho de poros medida na imagem 3D.

Figure 3
2D reconstructed image and projections from a porous media (Moreira, 2006).

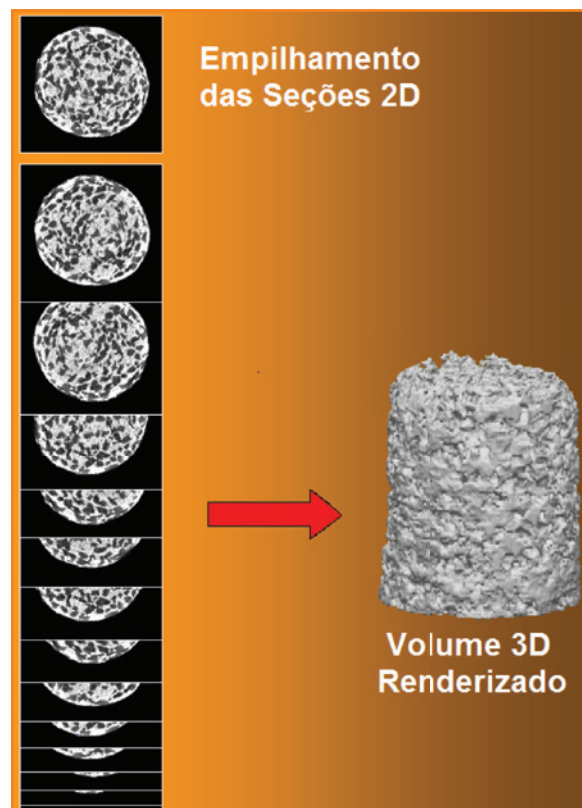


Figura 4
Ilustração do processo de renderização.

Figure 4
Renderization process.

Amostra	Tensão (kV)	Rotação total	Passo angular	Resolução (μm)	Exposição (m/s)	n° de frames	Tempo total (h)	Análise
MP	90	180°	0,25°	3,4	5.900	2	4	Qualitativa
Trv	100	360°	0,5	7,0	4.000	3	2,5	Qualitativa
PG8	80	180°	0,25°	5,0	1.180	5	1,5	Quantitativa
Tg	50	180°	0,5°	2,9	4.425	5	2,3	Quantitativa

Tabela 1

Principais parâmetros utilizados no microtomógrafo para a aquisição das imagens das amostras MP, Trv, PG8 e Tg.

Table 1

The main parameters used to acquire the microtomographic images of the MP, Trv, PG8 and Tg samples.

Figura 5

Uma seção 2D da amostra de arenito MP.

Figure 5

2D section of the MP sandstone sample.

resultados qualitativos

Como dito anteriormente, a técnica de tomografia de raios X é baseada no mapeamento dos coeficientes locais de atenuação linear, os quais são posteriormente associados a uma escala de níveis de cinza. Assim, pode ser identificada em uma imagem tomográfica a variação da densidade e do número atômico na fase material (sólida), a qual está relacionada à variação da composição mineralógica da rocha. Ainda que não seja o objetivo do presente trabalho, a tomografia de raios X, com adequações específicas, é hoje utilizada para a determinação da composição mineralógica de rochas (Long *et al.*, 2009, Boone *et al.*, 2011).

Na figura 5, apresenta-se uma seção 2D da amostra de arenito MP obtida com $3,45\mu\text{m}$ de resolução. Nesta imagem pode ser observada a ocorrência de

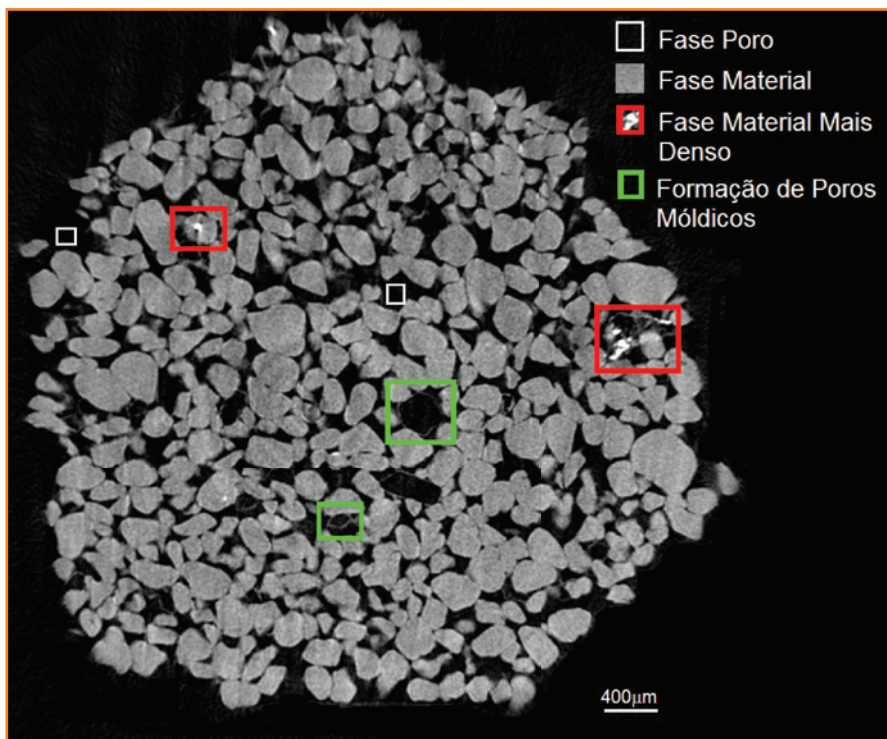
poros móldicos, bem como a ocorrência de incrustações mais densas na fase material. Na figura 6, apresenta-se a amostra de arenito MP utilizada, com aproximadamente 1cm de altura por 0,5cm de diâmetro, juntamente com a imagem binária 3D obtida, com aproximadamente $0,7 \times 0,7 \times 0,6\text{mm}$.

Para a mesma amostra, pode-se observar na figura 7 uma renderização com aproximadamente 150 seções, onde as regiões mais densas do material são identificadas.

Em geral, as rochas carbonáticas apresentam um sistema poroso bastante heterogêneo, com escalas distintas de tamanho de poro e uma complexa rede de conectividades entre os poros. Na figura 8, apresenta-se uma seção 2D da amostra de Travertino, com $7\mu\text{m}$ de resolução espacial, onde pode-se perceber claramente no sistema poroso os poros maiores (vugos), bem como regiões compostas do que se supõe serem formadas por poros menores (microporosidades), não bem definidas nessa escala de observação. Como pode ser observado na imagem da figura 8, a resolução espacial ($7\mu\text{m}$) não é suficiente para identificar claramente a microporosidade, assim, estas regiões se apresentam com uma tonalidade de cinza intermediária entre as apresentadas pelas fases poro e material.

Na figura 9, apresenta-se a amostra de Travertino utilizada juntamente com a imagem 3D reconstruída. A amostra possui lado de 2cm por 1,5cm de altura, enquanto a imagem 3D tem lado de 1cm por 0,8cm de altura.

Na figura 10, apresenta-se a imagem 3D da mesma amostra, segmentada em fase material, poros maiores (vugos) e regiões de microporosidade. Esta imagem foi obtida a partir do histograma de níveis de cinza da imagem original da seguinte forma: níveis de cinza escuros (até um limite escolhido) foram considerados vugos; níveis de cinza claros (até um limite escolhido) foram considerados sólidos e os níveis de cinza



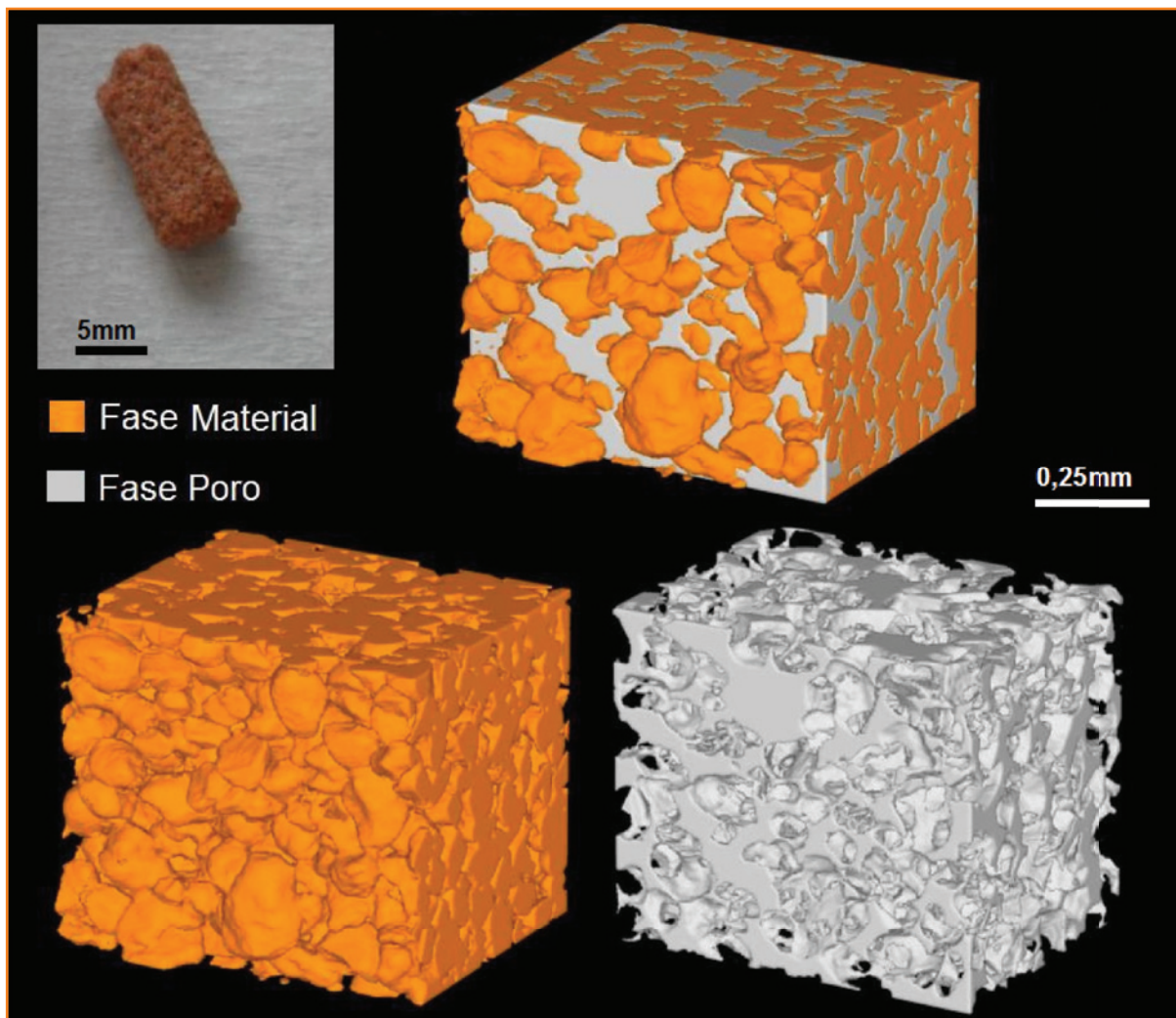


Figura 6
Amostra MP juntamente com sua imagem 3D, evidenciando as fases poro e material.

Figure 6
MP sample with its 3D image, showing the material and pore phases in evidence.

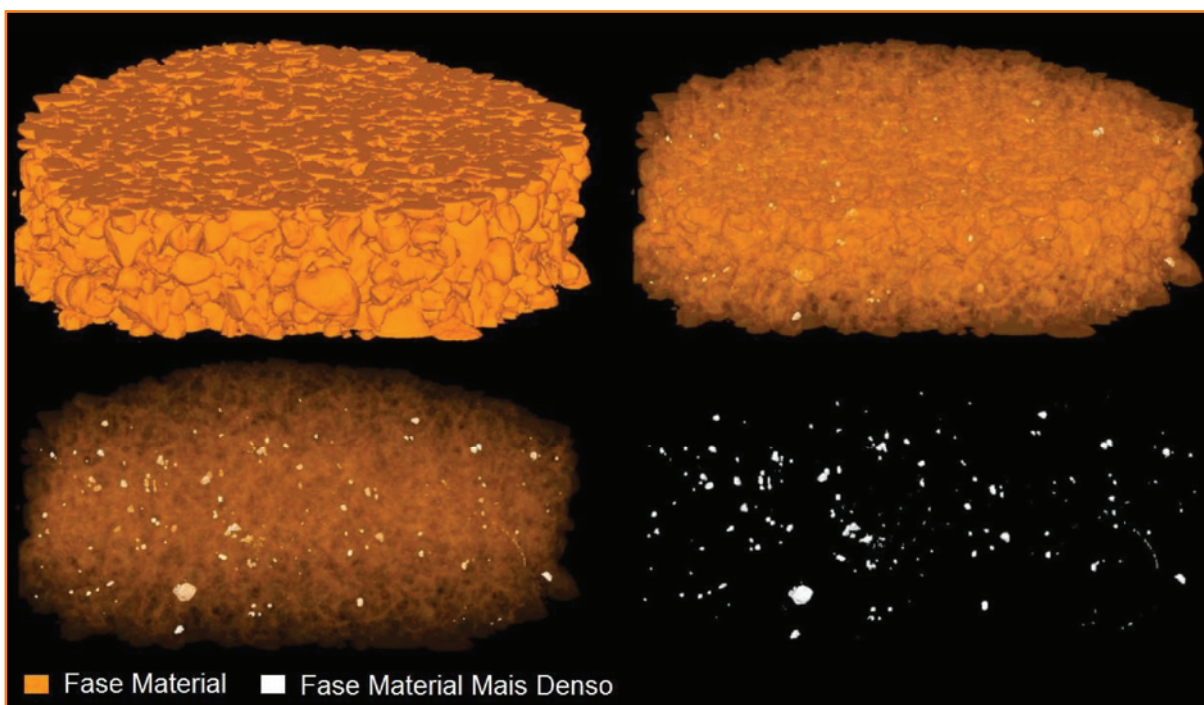


Figura 7
Imagem 3D da amostra MP com 150 seções.

Figure 7
3D image of MP sample with 150 sections.

Figura 8
Uma seção 2D da amostra Travertino.

Figure 8
2D section of the Travertino sample.

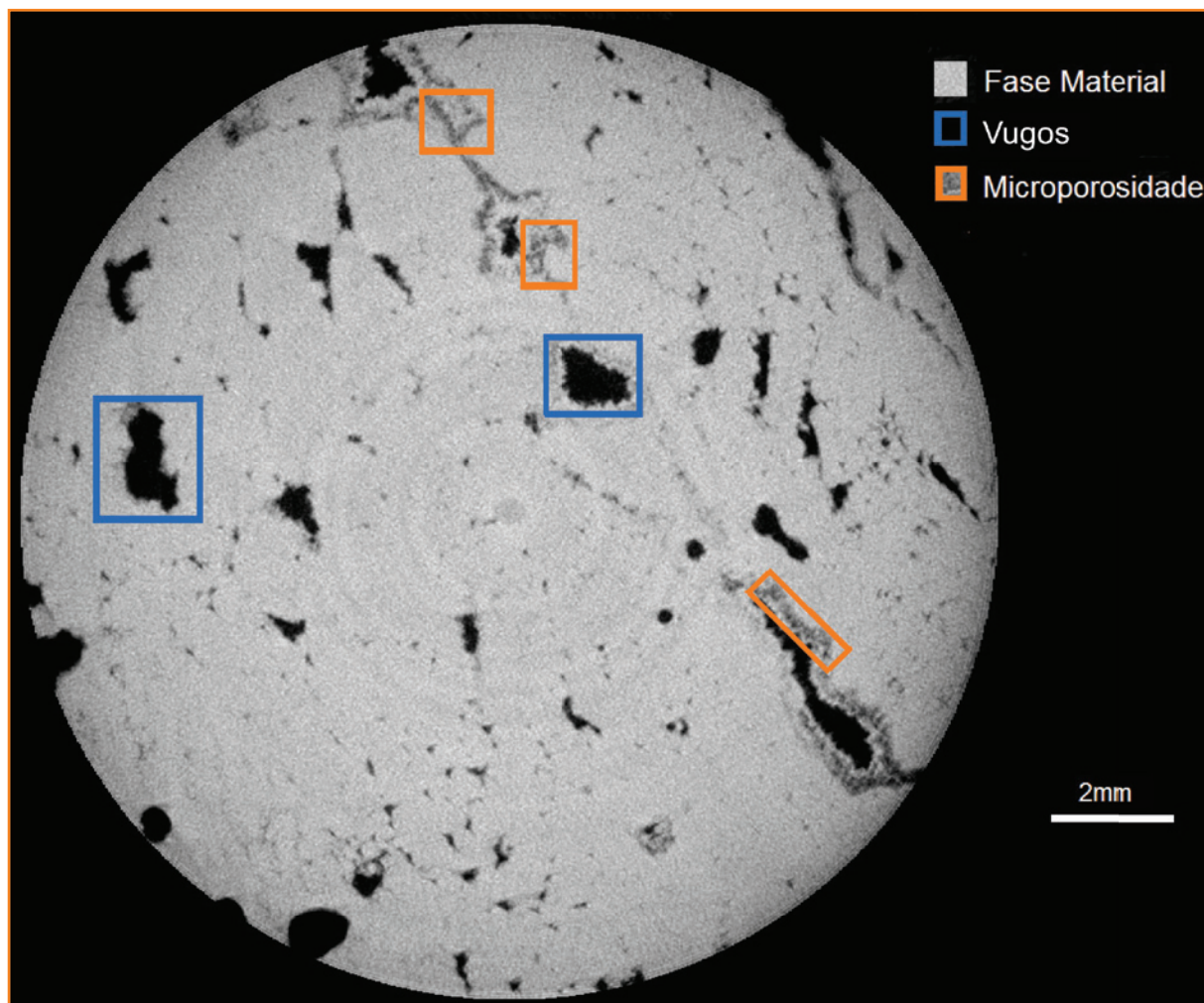
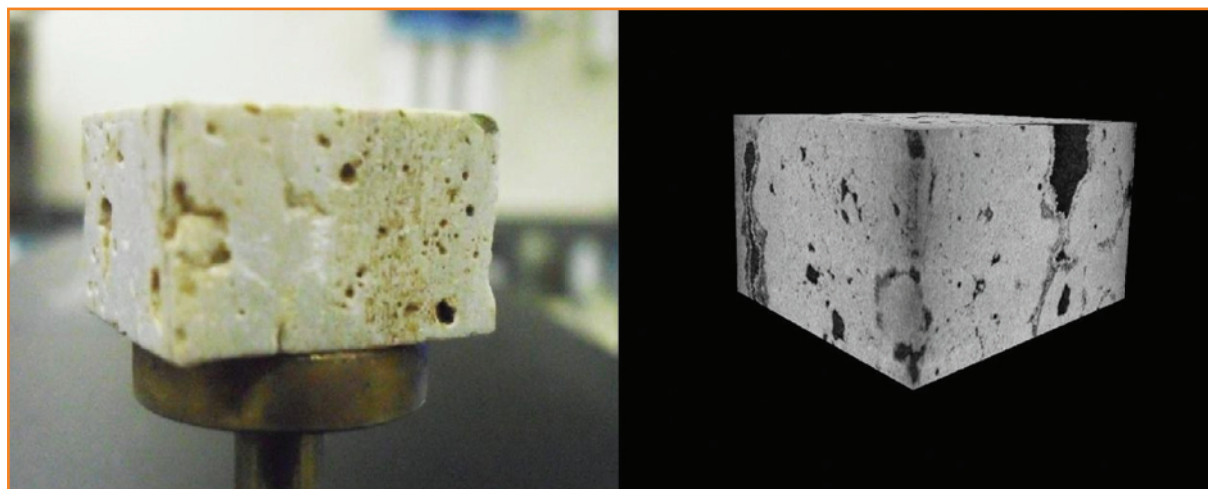


Figura 9
Amostra Trv (2 x 2 x 1,5cm) e sua imagem 3D (1 x 1 x 0,8cm).

Figure 9
Trv sample (2 x 2 x 1.5cm) and its 3D image (1 x 1 x 0.8cm).



intermediários foram considerados como formadores das regiões microporosas.

Observando-se as imagens da figura 10, pode-se notar que os vugos são rodeados pela região microporosa, sugerindo que a conexão entre os grandes poros é dada através dos poros de menor tamanho.

resultados quantitativos

Foram adquiridas imagens das amostras dos arenitos PG8 e Tg visando-se a caracterização dos perfis de porosidade e das distribuições de tamanho de poros. Para tanto, as imagens originais em

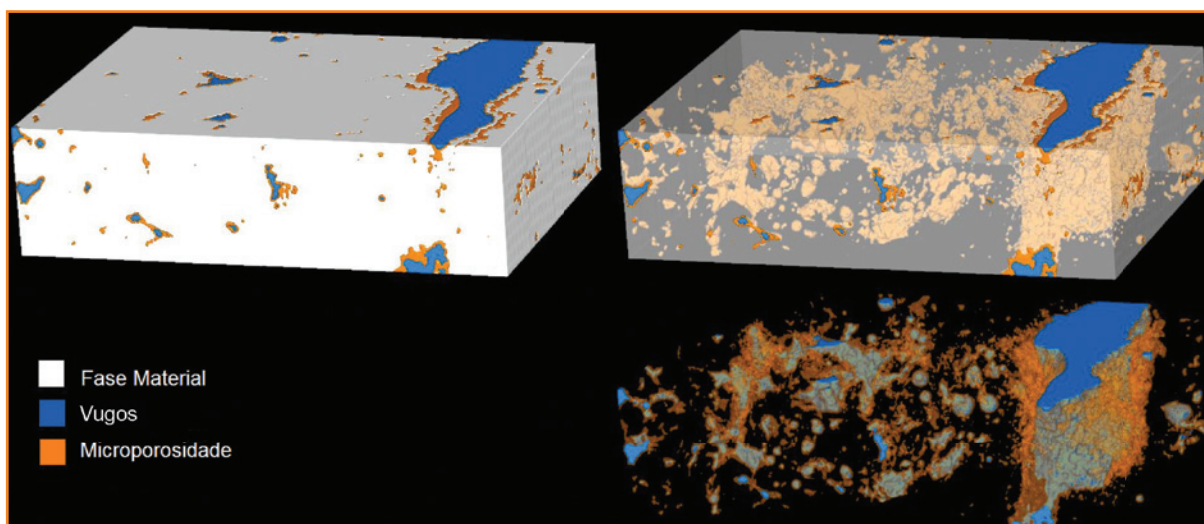


Figura 10
Imagem 3D segmentada da amostra Trv (2,3 x 8,4 x 0,95mm).

Figure 10
3D image of Trv sample (2.3 x 8.4 x 0.95mm).

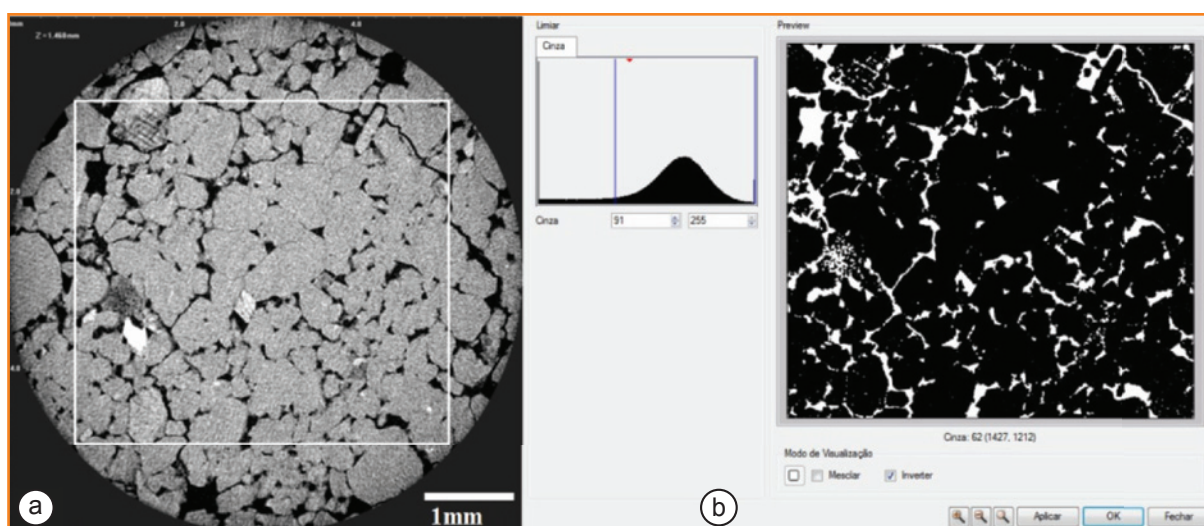


Figura 11
Processo de binarização para as imagens da amostra Tumblagooda: (a) seção 2D e (b) ROI da mesma seção binarizada (poros em branco).

Figure 11
Image binarization process of the TG sample: (a) reconstructed section and (b) ROI of the same section (pore phase in white).

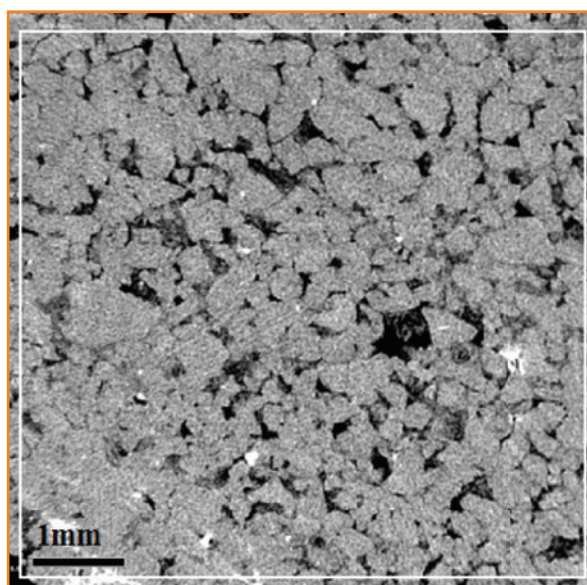


Figura 12 – Seção 2D com ROI da amostra PG8.

Figure 12 – 2D section, with ROI, of PG8 sample.

níveis de cinza foram binarizadas, definindo-se as regiões de poros e sólidos. A segmentação binária foi realizada no *software* Imago construído pela parceria Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas da Universidade Federal de Santa Catarina (LMTP/UFSC), Enginerring Simulation and Scientific Software (ESSS) e Centro de Pesquisa Petrobras (Cenpes). A binarização, assistida pelo usuário, foi realizada a partir do histograma de níveis de cinza, determinando-se o limiar que melhor separa as fases poro e sólido. Nas imagens mostradas na figura 11, pode-se visualizar o processo de binarização para a amostra Tg. Na figura 11a, apresenta-se uma seção 2D em escala de cinza com a região de interesse (ROI) selecionada pelo retângulo branco; na figura 11b, mostra-se o histograma de níveis de cinza juntamente com a imagem binária. Na figura 12, apresenta-se uma seção 2D em escala de cinza com a região de interesse selecionada da amostra PG8.

Figura 13
Perfil de porosidade da amostra PG8.

Figure 13
Porosity profile of the PG8 sample.

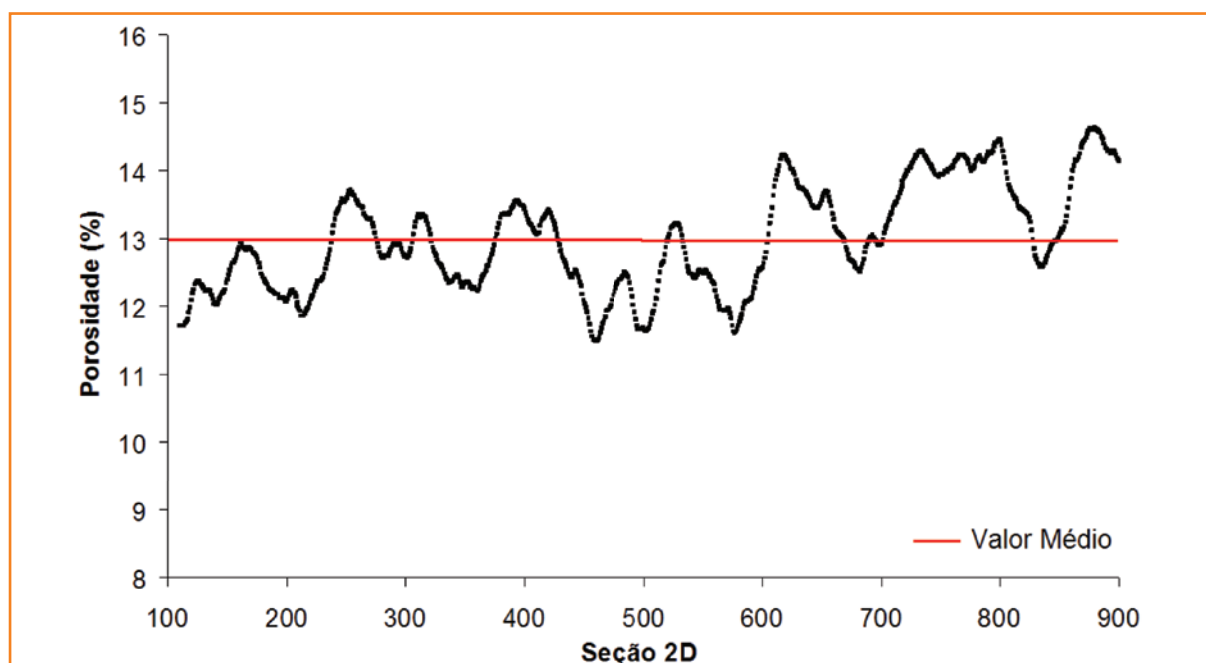
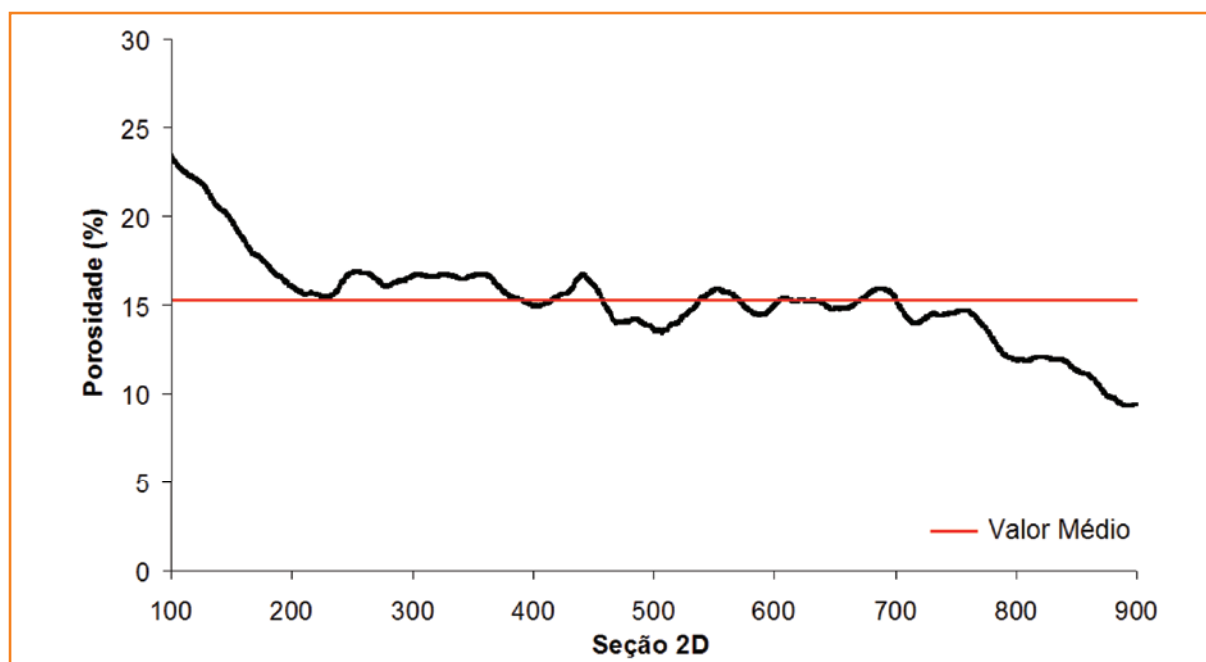


Figura 14
Perfil de porosidade da amostra Tg.

Figure 14
Porosity profile of the Tg sample.



Com as fases de interesse definidas nas imagens binárias, a caracterização dos parâmetros estruturais foi então realizada. Utilizando o *software* Imago, foram determinados os perfis de porosidade e as distribuições de tamanho de poros das duas amostras. O método utilizado para o cálculo das distribuições de poros foi o de abertura morfológica com a métrica de chanfro d_{3-4-5} (Fernandes, 2002). Vários outros parâmetros associados à geometria e à conectividade do sistema poroso podem ser determinados, de acordo com o interesse do trabalho.

As porosidades encontradas para as amostras PG8 e Tg foram respectivamente de $13,0 \pm 0,2\%$ e $15,3 \pm 0,5\%$ (95% de confiança, estatística de Student), (Fernandes, 2009). Os perfis de porosidade (porosidade para cada seção 2D) das amostras PG8 e Tg são apresentados nas figuras 13 e 14, respectivamente.

Nas figuras 15 e 16, apresentam-se as distribuições de tamanho de poros obtidas das imagens 3D (tamanho de $1.500 \times 1.500 \times 1.500 \mu\text{m}$) para as amostras PG8 e Tg, respectivamente. Estas distribuições são apresentadas em termos da fração percentual de volume de

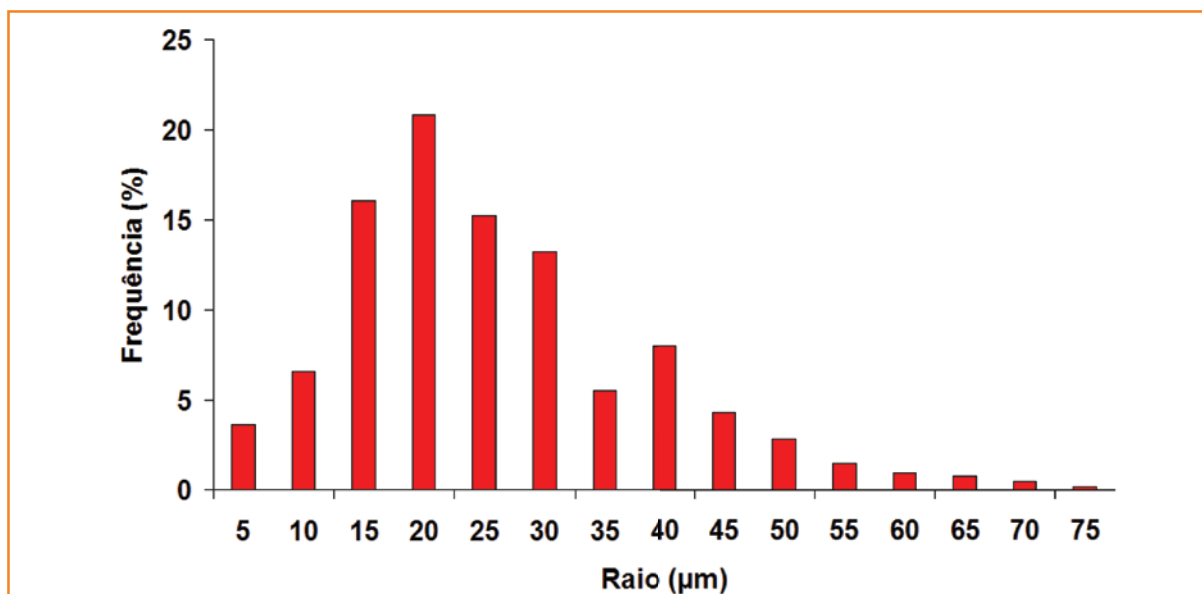


Figura 15
Distribuição de tamanho de poros da amostra PG8.

Figure 15
3D pore size distribution of the PG8 sample.

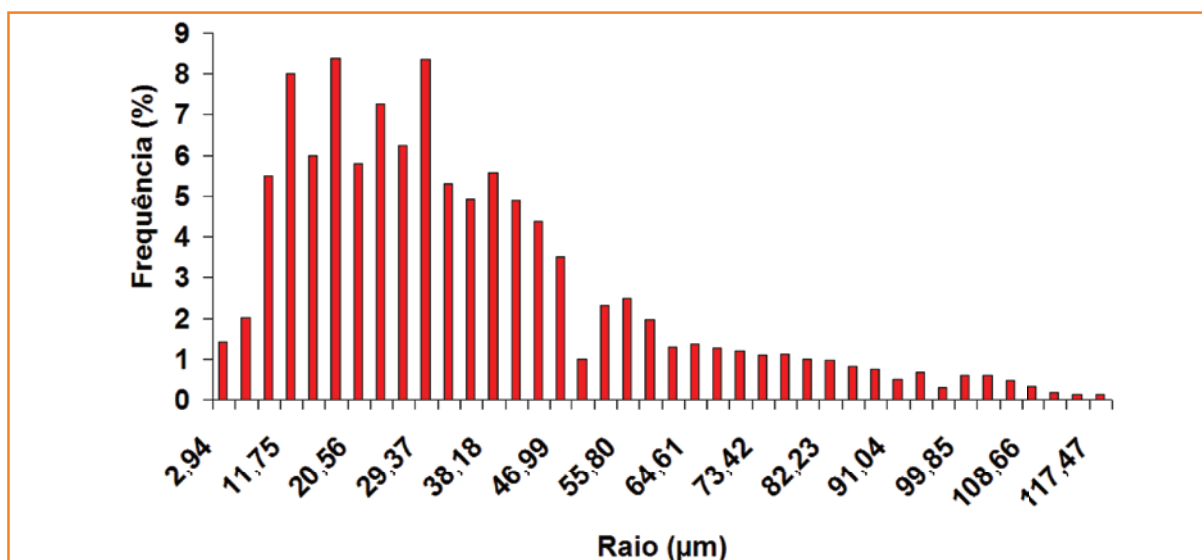


Figura 16
Distribuição de tamanho de poros da amostra Tg.

Figure 16
3D pore size distribution of the Tg sample.

cada classe de poros, isto é, a razão entre o volume de poros da classe e o volume total de poros.

aplicação da tomografia de raios X a sistemas porosos multiescalares

No presente artigo, foram apresentadas análises de amostras de arenitos, sem a presença significativa de argilas no sistema poroso, bem como de uma única escala espacial de observação para um Travertino. Nos

arenitos analisados, admitiu-se que todo o espectro da sua distribuição de tamanhos de poros possa ser descrito por uma única escala espacial.

Considerem-se agora sistemas porosos mais complexos, que exigem duas ou mais escalas espaciais de observação para a sua descrição. Como exemplos, citam-se arenitos com a presença significativa de argila no sistema poroso e a grande maioria das rochas carbonáticas, cujos processos de sedimentação e diagênese produzem uma complexa estrutura heterogênea formada de múltiplas porosidades. Em muitos carbonatos, podemos separar e classificar estas porosidades como intragranular, intergranular e os vugos e fissuras. Em tais estruturas multiescalares, além da conectividade espacial intrínseca a cada escala, há a conectividade entre as escalas. Esta

complexidade estrutural exerce forte influência nas propriedades de transporte de fluidos, como contribuir para o aumento significativo da porosidade. Contudo, sua influência sobre a permeabilidade dependerá do seu grau de conectividade com as escalas espaciais de menor tamanho de poro.

Para sua completa descrição, estruturas multiesca- lares requerem o imageamento tomográfico das várias escalas espaciais, cada uma com seu comprimento característico. Assim, partindo-se de uma amostra cujo volume seja representativo da rocha, faz-se o imageamento tomográfico de todo o volume em uma resolução espacial relativamente baixa, da ordem de dezenas de micrômetros. A análise das imagens (2D e 3D) resultantes permite uma avaliação acerca da representatividade do volume considerado, bem como a seleção das regiões para a retirada de subvolumes (através de seccionamento físico) a serem usados em uma segunda escala de imageamento aplicada em subvolumes da amostra inicial, com resolução espacial mais alta que a anterior. Este procedimento de seleção e corte físico de subvolumes, bem como de adequação de resoluções espaciais, é repetido até que, em princípio, se descreva todo o espectro de tamanhos de poros da rocha. Naturalmente, pode não ser possível a aquisição tomográfica de todo o espectro poroso, uma vez que existe a limitação de resolução espacial máxima do equipamento utilizado. Deve ainda ser observado que, uma dada escala espacial e um dado comprimento característico podem não ser homogêneos em todo o volume da amostra. Dessa forma, há a necessidade da análise de vários subvolumes seccionados de diferentes regiões da amostra.

Para resoluções submicrométricas utilizam-se os chamados nanotomógrafos que, atualmente, são comercialmente disponíveis, alcançando resoluções espaciais da ordem de dezenas de nanômetros.

conclusões

Neste artigo, mostrou-se a aplicabilidade da microtomografia de raios X na descrição do sistema poroso de rochas-reservatório como uma técnica complementar à análise de imagens em lâminas delgadas. Para as amostras selecionadas de arenitos, consideradas homogêneas, foram determinados apenas os perfis de porosidade e as distribuições de tamanho de poros. Certamente, a análise aqui realizada pode

ser estendida determinando-se vários outros parâmetros de importância para a descrição quantitativa da morfologia e da conectividade do sistema poroso.

Em adição à caracterização do sistema poroso, as imagens tomográficas 3D constituem-se em dados de entrada para a simulação de fenômenos físicos na escala dos poros, podendo-se determinar propriedades petrofísicas das rochas.

Por outro lado, a caracterização de sistemas porosos heterogêneos com múltiplas porosidades envolve o imageamento das várias escalas de porosidade, exigindo a análise de subvolumes físicos a partir de um volume original para a sua completa descrição.

referências bibliográficas

ADLER, P. M.; JACQUIN, C. G.; QUIBLIER, J. A. Flow in simulated porous media. **International Journal of Multiphase Flow**, Amsterdam, v. 16, n. 4, p. 691-712, July/Aug. 1990.

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 A**, Amsterdam, v. 580, n. 1, p. 629-632, Sept. 2007.

BAKKE, S.; OREN, P. E. 3-D pore-scale modeling of sandstone and flow simulations in pore networks. **Society of Petroleum Engineers Journal**, Dallas, v.2, n. 2, p. 136-149, June 1997.

BOONE, M.; DEWANCKELE, J.; BOONE, M.; CNUUDE, V.; SILVERSMIT, G.; VAN RANST, E.; JACOBS, P.; VINCZE, L.; VAN HOOREBEKE, L. Three-dimensional phase separation and identification in granite. **Geosphere**, Singapore, v. 7, n. 1, p. 79-86, Feb. 2011.

CARVALHO, A. C. P. História da tomografia computadorizada, **Revista Imagem**, São Paulo, v. 29, n. 2, p. 61-66, abr. 2007.

COLES M. E.; HAZLETT R. D.; SPANNE P.; SOLL W. E.; MUEGGE E. L.; JONES K. W. Pore level imaging of fluid transport using synchrotron X-Ray Microtomography. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Amsterdam, v. 19, n. 1-2, p. 55-63, Jan. 1998.

DAIAN, J. F.; FERNANDES, C. P.; PHILIPPI, P. C.; CUNHA NETO, J. A. B. 3D reconstitution of porous media from image processing data using a multiscale percolation system. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Amsterdam, v. 42, n. 1, p. 15-28, Mar. 2004.

FELDKAMP, L. A.; DAVIS, L. C.; KRESS, J. W. Practical cone beam algorithm. **Journal of the Optical Society of America A**, Washington, v. 1, n. 6, p. 612-619, June 1984.

FERNANDES, C. P.; MAGNANI, F. S.; PHILIPPI, P. C.; DAIAN, J. F. Multiscale geometrical reconstruction of porous structures. **Physical Review E**, New York, v. 54, n. 2, p. 1734-1741, Aug. 1996.

FERNANDES, C. P. **Engenharia de microestruturas: análise quantitativa de imagens e simulação de processos físicos**. 2002. 119 f. Monografia (Concurso de Professor Adjunto) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

FERNANDES, J. S. **Caracterização Microestrutural do Espaço Poroso de Rochas Reservatório da Bacia do Rio Tibagi por Microtomografia de Raios X**. 2009. 208 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2009.

IOANNIDIS, M. A.; KWIECIEN, M.; CHATZIS, I. Computer generation and application of 3D model porous media: from pore-level geostatistics to the estimation of formation factor. In: PETROLEUM COMPUTER CONFERENCE, 1995, Houston. **Proceedings...** Richardson: SPE, 1995.

KNACKSTEDT, M.; ARNS, C.; GHOUS, A.; SAKELLARIOU, A.; SENDEN, T.; SHEPPARD, A.; SOK, R.; AVERDUNK, H.; PINCZEWSKI, W. V.; PADHY, G. S.; IOANNIDIS, M. A. 3D imaging and flow characterization of the pore space of carbonate core samples. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF THE SOCIETY OF CORE ANALYSTS, 2006, Dublin. **Proceedings...** Canada: SCA, 2006.

LANDIS, E. N.; KEANE, D. T. X-Ray Microtomography. **Materials and Characterization**, Amsterdam, v. 61, n. 12, p. 1305-1316, Dec. 2010.

LIANG, Z. R.; FERNANDES, C. P.; MAGNANI, F. S.; PHILIPPI, P. C. A reconstruction technique of 3D porous media by using image analysis and using fourier transform,

Journal of Petroleum Science and Engineering, Amsterdam, v. 21, n. 3-4, p. 273-283, 1998.

LONG, H.; SWENNEN, R.; FOUBERT, A.; DIERICK M.; JACOBS, P. 3D quantification of mineral components and porosity distribution in Westphalian C sandstone by microfocus X-ray computed tomography. **Sedimentary Geology**, Amsterdam, v. 220, n. 1-2, p. 116-125, Sept. 2009.

MOREIRA, A. C. **Caracterização da microestrutura de materiais porosos por microtomografia de raio X e transmissão de raios gama**. 2006. 110 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2006.

OKABE, H.; BLUNT, M. J. Prediction of permeability for porous media reconstructed using multiple-point statistics. **Physical Review E**, New York, v. 70, n. 6, Dec. 2004.

QUIBLIER, J. A. A new three-dimensional modeling technique for studying porous media. **Journal Colloid Interface Science**, Orlando, v. 98, n. 1, p. 84-102, Mar. 1984.

SANTOS, L. O. E.; PHILIPPI, P. C.; DAMIANI, M. C.; FERNANDES, C. P. Using threedimensional reconstructed microstructures for predicting intrinsic permeability of reservoir-rocks based on a boolean lattice gas method. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Amsterdam, v. 35, n. 1-2, p.109-104, July 2002.

TESEI, L.; CASSELER, F.; DREOSSI, D.; MANCINI, L.; TROMBA, G.; ZANINI, F. Contrast-enhanced X-ray microtomography of the bone structure adjacent to oral implants. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, Amsterdam, v. 548, n. 1-2, p. 257-263, Aug. 2005.

webgrafia

KAK, A.; SLANEY, M. **Principles of computerized tomographic imaging**. New York: IEEE Press, Eletronic copy (c) 1999. Disponível em: <https://engineering.purdue.edu/~malcolm/pct/CTI_intro.pdf>. Acesso em: 2012.

expanded abstract

Many works about porous media, including reservoir rocks, adopt image analysis as structural characterization techniques. However, the most of these techniques are limited to the two-dimensional space, like Scanning Electron Microscope (SEM) and Optical Microscopy (OM). With 2D image analysis, besides the understanding of 3D space, also the estimative of parameters like pore interconnectivity and pore morphology are very limited.

In order to do the characterization of porous space by means of image analysis with high spatial resolution, the X-ray computed microtomography (microCT) is the most important technique currently used for this purpose. In fact, although OM and SEM measurements are very useful to provide two-dimensional images, microCT technique is important because can provide directly the acquisition of three-dimensional images of porous media.

The X-ray microtomography was derived from the computed tomography used in medical diagnostic called Computed Axial Tomography – CAT. In 1972, the English engineering Godfrey Newbold Hounsfield, with the South Africans James Abraham Edward Ambrose (neuroradiologist doctor) and Allan McLeod Cormack (physicist and mathematician), announced a new method to image human body. This new method was the computed tomography. In 1979, the Nobel Prize in medicine was awarded to Hounsfield and Cormack by the CAT development.

X-ray microtomography is an image capture method based on the reconstruction of samples images. Basically, the sample is illuminated by an X-ray beam and has his projections made in a CCD camera. The images are reconstructed by a algorithm by means of the projections data.

The technique consists in the evaluation of the X-ray attenuation along the sample. Each density portion that constitutes the sample has a property called “linear attenuation coefficient”. The projection is a scanning of these coefficients. Many projections are carried out, in several angle positions by the rotation of the sample. For each linear attenuation coefficient (or density) is generated a gray level in the reconstructed image (the microtomography images are formed by gray levels).

The principle of the densities scanning is explained by the Beers law. This law is an equation that establishes the relationship between the physical properties of the sample (like linear attenuation coefficient, density and

thickness) and the radiation beam characteristics (energy and activity of the radioactive source). Linear attenuation coefficient, an intrinsic property of materials, is the parameter that defines the radiation absorption by the materials. Each pixel with a gray level in the projection corresponds to a fraction of the irradiated sample with a linear attenuation coefficient. The image reconstruction is accomplished with an algorithm, the most used is the “Filtered Backprojection” (Feldkamp algorithm). The algorithm uses the information contained in the projections (gray levels) to reconstruct 2D images of the sample. These 2D images, or slices, are stacked in order to renderize the sample 3D image. The two-dimensional images obtained by the microCT are similar to those acquired by SEM or OM. The main difference between these image capture techniques is the image spatial resolution, while most of microtomography systems can generate just about $1\mu\text{m}$ image resolution, SEM or OM can reach even thousands times better than this.

Besides the discussion about X-ray microtomography technique, this paper also shows structural characterization of rock samples employing microCT technique. In this work qualitative and quantitative analysis of four reservoir rocks were accomplish, one carbonate and three sandstones lithologies. In the qualitative analysis 3D and 2D images of both samples categories are shown. Sandstone images with spatial resolution of $2.9\mu\text{m}$, $3.45\mu\text{m}$ and $5\mu\text{m}$ were enough to distinguish dense inclusions inside material phase and also to observe the homogeneity of porous phase distribution. Carbonate specimen was measured with $7\mu\text{m}$ to visualize vugs and to detect regions composed by micropores.

The aim of this work is to show the application of the microCT technique in reservoir rock samples with distincts pore structures, carbonate and sandstones.

In general, carbonate rocks have a complex and heterogeneous structure formed by multiple porosities, showing a pore size distribution very broad. To analyze carbonate structures in a general scope, measurements involving several scale sizes are necessary, i.e., images with spatial resolutions from micrometers, few of micrometer until sub-micrometer order. The microCT equipments only capture images with resolution about $1\mu\text{m}$, so, not enough to analyze entirely carbonate rocks. For some carbonates, the X-ray nano-tomography system must be used. The applicability, limitations and advantages of the microCT technique for reservoir rocks analysis are also discussed.

autores



Celso Peres Fernandes
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
Departamento de Engenharia Mecânica
Laboratório de Meios Porosos e Propriedades
Termofísicas (LMPT)

celso@lmpt.ufsc.br

Celso Peres Fernandes, Doutor em Engenharia, é professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Suas linhas de pesquisa envolvem a caracterização da morfologia e conectividade de sistemas porosos, bem como a simulação numérica (em escala de poro) de fenômenos físicos de equilíbrio e de transporte de fluidos. Desde 1995, a aplicação destas linhas está voltada para sistemas porosos de rochas-reservatório.



Iara Frangiotti Mantovani
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
Departamento de Engenharia Mecânica
Laboratório de Meios Porosos e Propriedades
Termofísicas (LMPT)

iara@lmpt.ufsc.br

Iara Frangiotti Mantovani, Mestre, é doutoranda do Programa de Pós Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Graduada em Física, tem como foco principal de sua pesquisa a caracterização de rochas-reservatório de petróleo, através do processamento e análise de imagens nos domínios bidimensional e tridimensional provenientes da microscopia óptica e microtomografia de raios X.



Anderson Camargo Moreira
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
Departamento de Engenharia Mecânica
Laboratório de Meios Porosos e Propriedades
Termofísicas (LMPT)

anderson@lmpt.ufsc.br

Anderson Camargo Moreira, Mestre, é aluno de doutorado do Programa de Pós-graduação em Ciências e Engenharia de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Formado em Física, atua em linhas de pesquisas ligadas à caracterização estrutural de meios porosos através de metodologias nucleares não destrutivas. Também atua como pesquisador em projetos vinculados à Petrobras, juntamente com a Universidade Estadual de Londrina/UEL e UFSC desde 2006.



Carlos Roberto Appoloni
Universidade Estadual de Londrina (UEL)
Centro de Ciências Exatas (CCE)
Departamento de Física
Laboratório de Física Nuclear Aplicada (LFNA)

appoloni@uel.br

Carlos Roberto Appoloni, Doutor, é docente e orientador dos cursos de graduação e pós-graduação em Física da Universidade Estadual de Londrina (UEL). É coordenador do Laboratório de Física Nuclear Aplicada (LFNA) da UEL desde 1977. Atua em diversos segmentos de pesquisa concernentes à área de física nuclear aplicada, incluindo a caracterização microestrutural de meios porosos. É pesquisador nível 1 do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e membro do Comitê de Assessoramento de Engenharia e Ciências Nucleares deste órgão. Desde 1999 participa como pesquisador colaborador em projetos vinculados à Petrobras e desde 2009, através de redes temáticas.



Jaquiel Salvi Fernandes
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia Catarinense (IFC)

jaquiel.fernandes@ifsc-videira.edu.br

Jaquiel Salvi Fernandes, Doutor, é docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Catarinense (IFC), Videira. Formado em Física, atua com pesquisas na área da física nuclear aplicada, desde a leitura espectrométrica gama *in situ* até a aplicação de imagens microtomográficas na caracterização microestrutural de rochas-reservatório.



Viviane Sampaio Santiago dos Santos
Centro de Pesquisas da Petrobras (Cenpes)
P&D em Geociências
Gerência de Sedimentologia e Estratigrafia

vsss@petrobras.com.br

Viviane Sampaio Santiago dos Santos geóloga da petrobras atuando na área de Sedimentologia e Estratigrafia do Centro de Pesquisas da Petrobras (Cenpes) desde 1999. Trabalhou na Unidade Operacional da Bacia de Campos no acompanhamento de poços e no Laboratório de Rochas. É consultora técnica da empresa e, atualmente, gestora da Rede de Estudos em Sedimentologia e Estratigrafia.



Marcos Klotz de Souza
Centro de Pesquisas da Petrobras (Cenpes)
P&D em Geociências
Gerência de Sedimentologia e Estratigrafia

mklotz@petrobras.com.br

Marcos Klotz de Souza, Mestre, é geólogo do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (Cenpes) da Petrobras. É consultor da empresa e coordenador técnico do Projeto Integrado de Tecnologia de “Shale” do Programa de Fronteiras Exploratórias. Sua área de atuação compreende as atividades relacionadas à sedimentologia e à estratigrafia de rochas-reservatório e também de rochas-reservatório não convencionais.