

RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL DA MICROESTRUTURA DE ROCHAS-RESERVATÓRIO A PARTIR DE LÂMINAS FINAS

Bueno A.D.

(andre@lmpt.ufsc.br)

Santos L.O.E.

(emerich@lmpt.ufsc.br)

Fernandes C.P.

(celso@lmpt.ufsc.br)

Philippi P.C.

(philippi@lmpt.ufsc.br)

Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas dos Materiais - LMPT

Resumo. Um método de reconstrução é considerado adequado se preservar todos os momentos estatísticos da função de fase, medidos em um conjunto de imagens bidimensionais binarizadas. Desta forma, uma representação tridimensional é considerada adequada se suas secções, em média, possuem os mesmos momentos estatísticos que as imagens bidimensionais usadas para gerar esta representação. Neste trabalho apresentam-se resultados de reconstruções realizadas com os métodos da gaussiana truncada e das esferas sobrepostas. O método de reconstrução da gaussiana truncada é revisado, inovações no algoritmo são implementadas e seus efeitos avaliados. Verificou-se que o método é adequado para a obtenção de representações com baixo comprimento de correlação e com baixo nível de organização da estrutura porosa. O método das esferas sobrepostas é novo, sendo este o primeiro trabalho de avaliação do mesmo. O método possibilita a obtenção de representações com comprimento de correlação mais elevado do que os obtidos com gaussiana truncada e, adicionalmente, preserva a porosidade conectada. Através da análise das representações obtidas, identificam-se as vantagens e desvantagens de cada método, suas aplicações, e uma metodologia para seleção da representação tridimensional ideal. Resultados práticos são apresentados para imagens de várias rochas reservatório de petróleo nacionais.

Palavras chave: reconstrução, gaussiana truncada, esferas sobrepostas, rochas-reservatório de petróleo.

1 Introdução

Ao longo dos último anos tem-se estudado os materiais através do uso de técnicas da análise de imagens. Em Philippi et al., 1994, apresenta-se um estudo da microestrutura dos materiais porosos e a obtenção da função distribuição de tamanho de poros utilizando-se processo misto, curvas de adsorção (experimental) e caracterização com análise de imagens (numérico). Em Fernandes et al., 1996, desenvolveu-se metodologia de reconstrução de imagens tridimensionais utilizando-se modelos multi-escala. As representações obtidas são usadas em modelos de simulação de intrusão de mercúrio, Fernandes et al., 1995, e na determinação da permeabilidade intrínseca, Bueno and Philippi, 2002. Magnani et al., 2000, desenvolvem modelo para a determinação das configurações de equilíbrio em processos bifásicos na estrutura porosa reconstruída, o que inclui intrusão de mercúrio. O modelo é testado e validado (Philippi et al., 2000b; Bueno, 2001). Em Zhirong et al., 1998, apresenta-se o método de reconstrução da gaussiana truncada, um método rápido de obtenção da representação 3D e que substitue com vantagens os métodos de (Joshi, 1974; Quiblier, 1984; Adler et al., 1990; Ioannidis et al., 1995). Recentemente, Santos et al., 2002, desenvolveram o método de reconstrução das esferas sobrepostas. O método possibilita a obtenção de representações com grande dimensão (600^3) e comprimento de correlação maior que os utilizados com gaussiana truncada. Em (Damiani et al., 2000; Philippi et al., 2000a), diversos algoritmos desenvolvidos foram organizados e implementados no programa Imago, dispondo-se de ferramenta que possibilita um aumento da produtividade, no ensino, pesquisa e extensão.

Como consequência dos estudos realizados por Bueno, 2001, verificou-se a necessidade de se obter imagens 3D o mais representativas possíveis, desta forma os resultados obtidos na caracterização tridimensional e na simulação de

propriedades físicas serão mais confiáveis. O autor desenvolveu uma metodologia para a seleção da representação tridimensional ideal que é, aqui, brevemente explicada e aplicada.

Neste trabalho trata-se especificamente das representações tridimensionais obtidas com o método de reconstrução da gaussiana truncada de Zhirong et al., 1998, e com o método de reconstrução das esferas sobrepostas de Santos et al., 2002. O método de reconstrução da gaussiana truncada é revisado, inovações no algoritmo são implementadas e seus efeitos avaliados. Faz-se uma análise das limitações do método, o que inclui a avaliação das dimensões máximas das representações obtidas, o uso do método com materiais não totalmente descritos pelos dois primeiros momentos da função de fase, o uso de comprimento de correlação elevado e um estudo dos efeitos do uso da aproximação de Adler et al., 1990. Representações obtidas com o método das esferas sobrepostas também são avaliadas.

2 Revisão bibliográfica

Recentemente, tem-se intensificado o uso da abordagem microscópica com a introdução da análise de imagens de materiais (Adler et al., 1990; Kwiecien et al., 1990; Dullien, 1992; Fernandes et al., 1995; Gasperi, 1999). Estes estudos utilizam os conceitos de processamento digital de imagens vistos em (Castleman, 1979; Gonzales and Woods, 1993; Gomes and Velho, 1994; Facon, 1996; Cocquerez and Philippi, 1995; Coster and Chermant, 1989).

O método global de estudo dos materiais utilizando análise de imagens passa pela obtenção e preparação das amostras para a microscopia ótica ou eletrônica e por processo de impregnação e polimento, Yunes, 1993. A seguir digitaliza-se a imagem e realiza-se o pré-processamento. Na segmentação procura-se separar a fase porosa da fase sólida, mantendo-se os aspectos morfológicos (preservação da distribuição de tamanho dos objetos) e topológicos (conectividade entre os objetos). A seguir realiza-se a caracterização das imagens, onde os principais parâmetros determinados são a porosidade, a função conectividade e a função distribuição de tamanho de poros, exemplificados a seguir.

Seja \mathbf{x} um ponto de coordenada (x,y) , onde x,y são valores inteiros num espaço discreto bidimensional. Pode-se definir a função de fase $FF(\mathbf{x})$ e a porosidade (ε) por:

$$(a) \quad FF(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & \text{se } \mathbf{x} \text{ pertence a fase de interesse} \\ 0 & \text{se } \mathbf{x} \text{ não pertence a fase de interesse} \end{cases} \quad (b) \quad \varepsilon = \langle FF(\mathbf{x}) \rangle \quad (1)$$

onde $\langle \rangle$ representa a média estatística. O resultado de porosidade obtido pela aplicação da Eq. (1b), depende da correta segmentação da imagem (colorida/tons de cinza) e está associada aos poros que foram acessados pela resina, ou seja, aos poros conectados na escala da resina.

A função autocorrelação ($C(\mathbf{u})$) e a função autocovariância normalizada ($R(\mathbf{u})$) são definidas por,

$$(a) \quad C(\mathbf{u}) = \langle [FF(\mathbf{x})][FF(\mathbf{x} + \mathbf{u})] \rangle \quad (b) \quad R(\mathbf{u}) = \frac{\langle [FF(\mathbf{x}) - \varepsilon][FF(\mathbf{x} + \mathbf{u}) - \varepsilon] \rangle}{(\varepsilon - \varepsilon^2)} \quad (2)$$

onde \mathbf{u} é o vetor deslocamento. Observe que a função autocorrelação fornece a probabilidade de intersecção na direção \mathbf{u} de dois pontos na fase de interesse separados pela distância $|\mathbf{u}|$. A curva de autocorrelação assume um mínimo, denominado comprimento de correlação (λ), que representa a distância a partir da qual o meio não está mais correlacionado, veja Fig. (1a).

A função distribuição de tamanho de poros ($FOTP$) é determinada com a operação de abertura da morfologia matemática e é dada por

$$(a) \quad FOTP(i) = \varepsilon_{a(X, EE_{\mathbf{x}}^{i-1})} - \varepsilon_{a(X, EE_{\mathbf{x}}^i)} \quad (b) \quad \varepsilon_{a(X, EE_{\mathbf{x}}^0)} = \varepsilon \quad (3)$$

sendo $\varepsilon_{a(X, EE_{\mathbf{x}}^i)}$ a porosidade da imagem X após aplicação da operação de abertura com um elemento estruturante (EE), circular, de raio i , centrado em x .

Foi observado, para uma dada resolução r do microscópio ótico, que se a rocha-reservatório tem uma fase sólida heterogênea, isto é, um número apreciável de material fino, a porosidade do espaço de vazios recuperado pelo microscópio ótico (ε_o), é, em muitos casos, significativamente menor que a porosidade experimental (ε_g), determinada pelo método da expansão a gás. Devido à baixa pressão imposta à resina e sua alta viscosidade, a resina epoxy preenche todos os poros cujo acesso não é restrito por constrições muito pequenas, ou seja, a resina não ocupa as regiões de microporosidade. Deste modo, pode-se admitir que todos os poros preenchidos pela resina estão conectados na escala de acessibilidade da resina, que admite-se ser equivalente à do microscópio. Como o método de reconstrução fornece um meio tridimensional não totalmente conectado é importante avaliar a relação entre a porosidade conectada da representação tridimensional (ε_{c6}) e a porosidade ótica (ε_o), dada por $(\varepsilon_o - \varepsilon_{c6})/\varepsilon_o$. Esta relação é um importante critério na definição da representação ideal. A representação conectada (em $c6$) é determinada eliminando-se os poros isolados com o algoritmo de rotulagem 3D de Bueno et al., 2002, determinando a seguir sua porosidade ε_{c6} .

Reconstrução Tridimensional. Esta etapa envolve a obtenção de uma representação tridimensional do material utilizando-se os modelos multi-escala ou os modelos mono-escala. Nos modelos multi-escala (Fernandes et al., 1996; Daian, 1992), cada escala é composta por regiões da mesma ordem de grandeza e a composição das diversas escalas

permite obter um meio representativo, que preserva a informação da distribuição de tamanho de poros da imagem original. Um exemplo aplicado é encontrado em Fernandes et al., 1995, onde realiza-se a simulação da intrusão de mercúrio numa argamassa de cal e cimento. Como modelos mono-escala pode-se citar o método de reconstrução JQA, inicialmente desenvolvido por *Joshi, 1974*, para imagens bidimensionais e extendido para representações 3D por (*Quiblier, 1984; Adler et al., 1990*). O método gera um conjunto tridimensional de dados, distribuídos de acordo com uma gaussiana não correlacionada $X(\mathbf{x})$, com média zero e variância um. Depois, aplica-se um filtro linear, que leva $X(\mathbf{x}) \rightarrow Y(\mathbf{x})$, sendo $Y(\mathbf{x})$ um campo gaussiano correlacionado. O truncamento é feito com um filtro não linear que leva $Y(\mathbf{x}) \rightarrow Z(\mathbf{x})$, sendo $Z(\mathbf{x})$ correlacionada e com a porosidade desejada. Outro método mono-escala é o método da gaussiana truncada de Ioannidis et al., 1995, que substitui parcialmente a aplicação do filtro linear pelo uso da transformada de Fourier. A imagem reconstruída em 3D é obtida a partir de uma série de imagens reconstruídas em 2D, mas não correlacionadas entre si. Um filtro linear é usado para correlacionar essas imagens na direção z .

2.1 O Método de reconstrução da gaussiana truncada de Liang et al.(1998)

Este método fundamenta-se na relação entre o módulo da transformada de Fourier de um campo e a transformada de Fourier da função autocovariância normalizada do mesmo campo. Esta relação é conhecida como teorema de Wiener-Khintchine:

$$\widehat{R}_Y(\mathbf{p}) = \mathfrak{F}(R_Y(\mathbf{u})) = |\mathfrak{F}(Y)|^2 = \left| \widehat{Y} \right|^2 \quad (4)$$

A leitura da equação acima nos informa que a transformada de Fourier da função autocovariância normalizada, está relacionada com o módulo do campo Y transformado ao quadrado. Determina-se $C_z(\mathbf{u})$ usando a transformada de Fourier discreta, com a vantagem de se reduzir as oscilações na curva de autocorrelação, veja Fig. (1a). Determina-se $R_Z(u)$ com a Eq. (2b). É necessário obter $R_Y(u)$, o que é feito relacionando-se as funções autocovariâncias normalizadas dos campos Z e Y através de uma série da forma, Adler et al., 1990:

$$R_z(u) = \sum_{m=0}^{\infty} B_m^2 R_Y^m(u) \quad (5)$$

onde m é o número de pontos da série e os coeficientes B_m , $b(y)$ e H_m (polinômios de Hermite) são dados por

$$B_m = \frac{1}{\sqrt{2\pi m!}} \int_{-\infty}^{+\infty} b(y) e^{-\frac{y^2}{2}} H_m(y) dy \quad b(y) = \begin{cases} \frac{\varepsilon-1}{\sqrt{\varepsilon(1-\varepsilon)}} \{se P(y) \leq \varepsilon \\ \frac{\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon(1-\varepsilon)}} \{se P(y) > \varepsilon \end{cases} \quad H_m(y) = (-1)^m e^{\frac{y^2}{2}} \frac{d^m}{dy^m} e^{-\frac{y^2}{2}} \quad (6)$$

O cálculo da integral de B_m é realizada numericamente com o método de Simpson, no intervalo -10 a +10 e a série limitada a 35 termos. No intervalo em que $R_Y > 0.90$, utiliza-se a aproximação, Adler et al., 1990;

$$R_z = 1 - a_1(1 - R_Y)^{1/2} \quad (7)$$

onde a_1 é determinado para $R_Y = 0.9$. A determinação de $R_Y(\mathbf{u})$ é dada por $R_Y(i, j, k) = R_Y(\sqrt{i^2 + j^2 + k^2}) = R(u)$, para os valores não inteiros utiliza-se uma interpolação. Calcula-se $R_Y(u)$ a partir de $R_z(u)$ com uso da Eq. (5). O próximo passo envolve a determinação da transformada de Fourier, Eq. (4), que é realizada utilizando-se o algoritmo de Singleton, que apresenta como vantagem um processamento rápido e a não limitação da malha a potências de dois. Com a geração de ângulos de fase randômicos no intervalo entre 0 e 2π [rad] e a transformada de Fourier inversa de $\widehat{Y}(\mathbf{p})$, obtêm-se o campo $Y(\mathbf{x})$, cuja distribuição de probabilidade é dada por $P(y)$, uma distribuição normal, dado pela Eq. (8a), pois $Y(\mathbf{x})$ é normal com média zero e variância um. Finalmente, usa-se o filtro não linear (FNL), Eq (8b), que transforma o campo Y (normal, correlacionado, definido para os reais), em um campo Z (binário, com média igual a porosidade ε , e variância igual a $\varepsilon - \varepsilon^2$).

$$(a) \quad P(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-\frac{y^2}{2}} dy \quad (b) \quad Z = FNL(Y) = \begin{cases} 1 & \text{se } P(y) \leq \varepsilon \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (8)$$

Os parâmetros do método são o fator de amostragem (n), que indica a discretização adotada na descrição da função autocorrelação (interfere fortemente nos resultados obtidos). O número de pontos (np) utilizados para descrição da função autocorrelação. A semente do gerador de números aleatórios (seed). A dimensão da imagem reconstruída (N) e o número de pontos da série (NPS). A Fig. (1b) apresenta uma imagem da estrutura porosa reconstruída com o método de Zhirong et al., 1998.

2.2 O Método de reconstrução das esferas sobrepostas

Representações obtidas com o método das esferas sobrepostas (representadas por esf) também serão analisadas. O método gera as esferas maiores preservando a distribuição de tamanho de sólidos, a seguir vai acrescentando as esferas menores. Veja descrição do método em Santos et al., 2002, e uma representação 3D obtida com este método na Fig. (1c).

Microtomografia. Pode-se obter a representação tridimensional diretamente em 3D utilizando-se a microtomografia, veja (Spanne et al., ; Hazlett, 1995; Coles et al., 1998), ou a partir de seções seriais da rocha, veja (Koplik et al., 1984; Kwiecien et al., 1990).

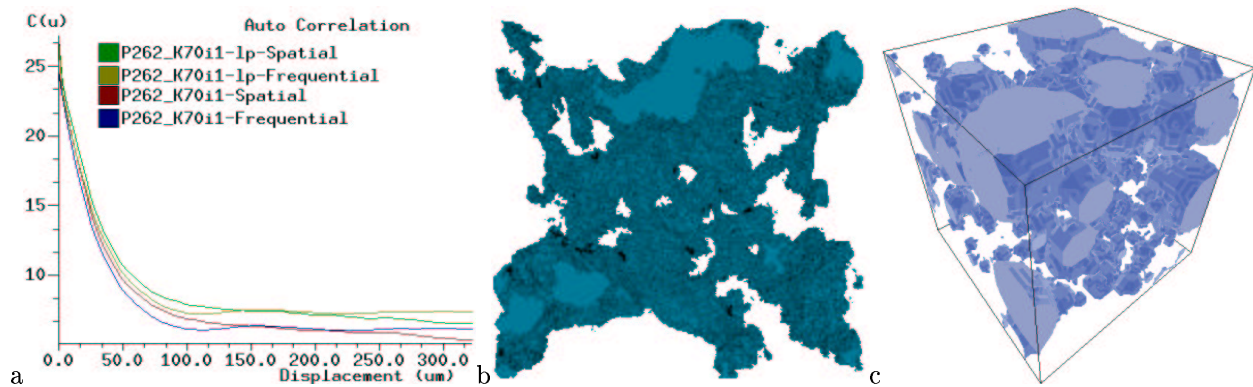


Figura 1: Em (a) função autocorrelação espacial e frequencial (FFT) para rocha reservatório P262_K70. Em (b) representação obtida com gaussiana truncada e em (c) com esferas sobrepostas.

3 Metodologia e desenvolvimento

Metodologia. Apresenta-se o método de seleção da representação tridimensional e a alteração realizada no algoritmo de reconstrução da gaussiana truncada. A seguir, descrevem-se as propriedades das rochas reservatório, informações sobre as simulações de intrusão de mercúrio e apresentam-se os resultados. Para rocha reservatório P262_K70 a análise é apresentada de forma completa, testando-se desta forma a metodologia de seleção da representação tridimensional. Para as demais rochas, apresentam-se diretamente as curvas de distribuição de tamanho de poros e os resultados de intrusão de mercúrio.

Método de seleção da representação tridimensional. A seleção da representação tridimensional é realizada através dos seguintes critérios: i) análise dos planos da representação tridimensional, ii) análise da representatividade da imagem através da visualização 3D, iii) definição do melhor fator de amplificação através da comparação das curvas de autocorrelação e distribuição de tamanho de poros, iv) definição da dimensão da representação considerando a relação das porosidades ótica e conectada. Estes critérios fornecem os instrumentos adequados para a correta seleção da melhor representação tridimensional (veja detalhes em Bueno, 2001).

3.1 Alteração no algoritmo de reconstrução da gaussiana truncada

Faz-se uma análise do efeito da eliminação da aproximação de Adler et al., 1990, dada pela Eq (7). O objetivo é comparar as representações obtidas com a aproximação de Adler et al., 1990, que serão denominadas gt1 ou gt, e representações obtidas sem uso da aproximação, denominados gt2.

Para compreender as diferenças, plota-se na Fig. (2a) a relação entre R_y e R_z para valores de $R_y > 0.9$, usando gt1, gt2 e a solução analítica, $C_z(\mathbf{u}) = \exp(-\mathbf{u}/\lambda)$, dada por Adler et al., 1990. Observa-se que gt2 diverge da solução analítica para valores de R_y acima de 0.96, ou seja, a Eq. (7) realiza uma aproximação do resultado numérico com o obtido analiticamente.

Foi feita uma verificação da relação entre R_z e R_y , para diferentes valores de porosidade. Observa-se na Fig. (2b) que as representações gt2 não conseguem acompanhar a solução analítica (dada por gt1-p50). A curva gt2-p10 está deslocada a esquerda, as curvas gt1-p5 e gt2-p5 a direita e não existe um comportamento linear associado a porosidade.

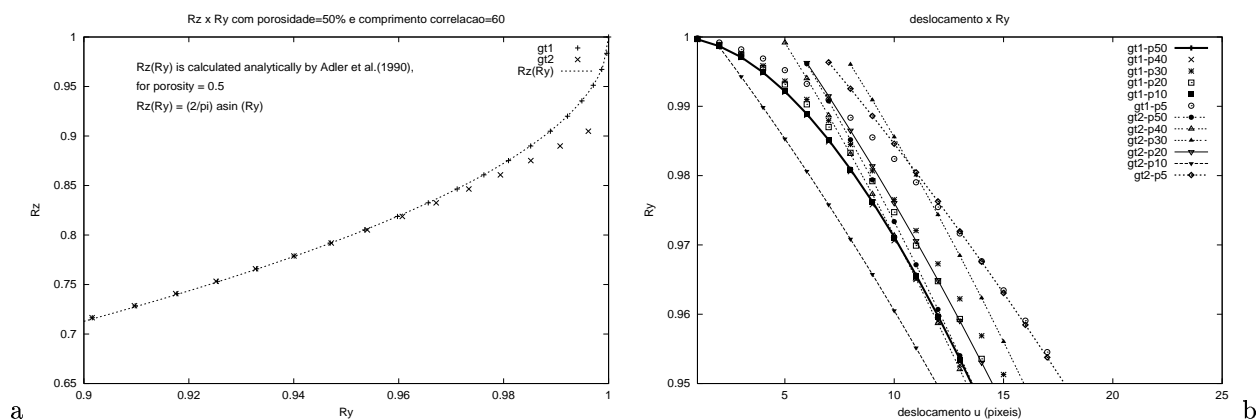


Figura 2: Em (a) a relação entre Rz e Ry determinados com gt1, gt2 e analiticamente ($Ry > 0.9$ e $\varepsilon = 50\%$). Em (b) a relação entre o deslocamento u, Ry -gt1 e Ry -gt2, para diferentes valores de porosidade.

4 Resultados

4.1 Propriedades das rochas analisadas

Apresenta-se na Tab. (1) as propriedades das rochas analisadas. A dimensão do pixel $\alpha[\mu m]$, a porosidade experimental (obtida com o método da expansão a gás (ε_g)), a porosidade ótica ε_o , [m^3/m^3], a permeabilidade experimental k[mD]. Além do número de imagens bidimensionais usadas na determinação da função autocorrelação média e distribuição de tamanho de poros média (N.Imagens). O formato utilizado para nomear as imagens reconstruídas é Modelo_de_reconstrução-nA-npB-NC. Primeiro o modelo de reconstrução utilizado (gt1,gt2,esf), a seguir o fator de amplificação (A), o número de pontos usados na descrição da curva de autocorrelação (B) e a dimensão da representação 3D (C). Em algumas imagens coloridas foi aplicado um filtro passa baixa (lp), com uma máscara 3x3, slp indica sem aplicação do filtro passa baixa. A título ilustrativo, apresenta-se na Fig (3), uma imagem bidimensional colorida (a) e binarizada (b) da rocha reservatório P262_K70.

Tabela 1: Propriedades das Rochas [CENPES-PETROBRAS].

Propriedade	P275_K316	P223_K154	P262_K70	P238_K145	P320_K642	P240_K104
$\alpha[\mu m]$	3.125	3.125	3.125	3.125	4.545	4.545
$\varepsilon_g[m^3/m^3]$	27.5/27.2	22.3/22.2	26.2/26.7	23.8/23.7	32.0	24.0
$\varepsilon_o[m^3/m^3]$	18.9	12.8	18.3	19.2	32.0	20.8
k[mD]	316/275	154/132	69.7/66.8	145/121	642	104
N.Imagens	20	20	20	20	10	10

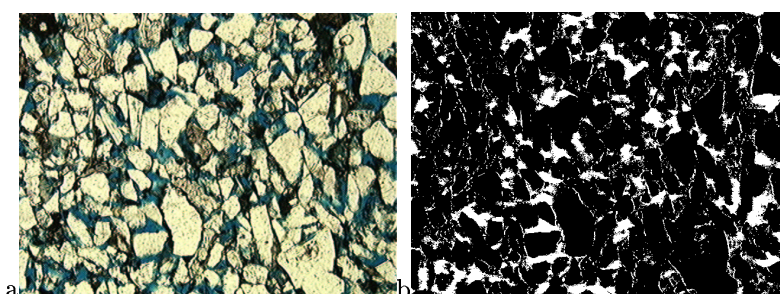


Figura 3: Imagem colorida e binarizada para rocha P262_K70.

Sobre as simulações de porosimetria a mercúrio. Os dados de porosimetria a mercúrio foram fornecidos pelo CENPES-PETROBRAS. A representação conectada é obtida com uso do algoritmo de rotulagem tridimensional descrito em Bueno et al., 2002. A determinação das curvas de intrusão de mercúrio é realizada com o programa

Imago (<http://www.lmpt.ufsc.br/Imago>), onde foi implementado o método de Magnani et al., 2000. O método foi testado e validado para diferentes rochas encontradas em território nacional em Philippi et al., 2000b; Bueno et al., 2002. Apresentam-se as curvas de pressão capilar [1 a 100000 kPa], contra a saturação de mercúrio [0-100%]. Na legenda foi adicionada a letra c ao nome das representações 3D, indicando que os valores de pressão das curvas simuladas foram corrigidas com o cosseno do ângulo de contato do mercúrio. As saturações foram corrigidas considerando-se a relação entre a porosidade experimental a gás (ε_g) e a porosidade ótica (ε_o).

Resultados para rocha reservatório P262_K70. Apresenta-se nesta seção uma análise de representações da rocha reservatório P262_K70, que foram geradas usando gt1 e gt2. A Fig. (4) ilustra representações do P262_K70, onde observa-se que o método de reconstrução tenta recuperar sempre a mesma imagem (forma geral). Comparando-se (a) com (c) e (b) com (d), verifica-se que com fator de amplificação dois os objetos são “afinados”, houve uma redução da dimensão dos objetos e uma redução do número de pixels isolados. Observe que em (b) a imagem é mais regular, ou seja, com gt2, a representação obtida tem um número menor de pixels isolados e os objetos tem boa formação. Em (c) gt1-n2 a representação apresenta um número elevado de pixels isolados. Observe que gt2-n2 (d) é extremamente regular, “meio lavada”, com contornos arredondados e praticamente sem pixels isolados.

Observe na Fig. (5a), que a função autocorrelação gt2-n1 apresenta a melhor concordância. Observa-se em (b) que gt1-n1,gt1-n2 e gt2-n1 geram um número elevado de poros pequenos, já gt2-n2 gera um número elevado de poros grandes. A aplicação do filtro passa baixa reduz o número de poros abaixo de $15 \mu m$, aumentando a fração de poros grandes.

Com o objetivo de verificar o efeito da aplicação do filtro passa baixa, na imagem bidimensional colorida, compara-se duas representações tridimensionais geradas com gt2. Na Fig. (4b) gt2-n1 é determinada com aplicação do filtro passa baixa (lp) e na Fig. (4e) gt2-n1 é determinada sem aplicação do filtro passa baixa (slp). Observe que a representação gt2-n1-slp é mais regular, tem um número menor de pixels isolados, ou seja, sobre o aspecto visual, a aplicação do filtro passa baixa para P262_K70 não é recomendada. Na Fig. (5c) apresenta-se a função distribuição de tamanho de poros para a representação gt2-n1-np60-N300-slp, observa-se uma excelente concordância entre as curvas na região acima de $15 \mu m$.

A Tab. (2) apresenta as porosidades das representações do P262_K70. Com gt1 a perda de porosidade é elevada 16.90%, com gt2 cai para 5.31% na representação slp e 5.62% na representação lp.

Seleção da representação ideal. Com gt1-lp a comparação da função distribuição de tamanho de poros indicou o uso de $n=3$. Com gt2-lp a função autocorrelação indica o uso de $n=1$, a função distribuição de tamanho de poros o uso de $n=1$ ou $n=2$; seleciona-se como ideal a representação gt2-n1-slp.

A Fig (6a) apresenta a função conectividade para representações do P262_K70, gt1-n1 é a menos conectada, gt-n2 apresenta o melhor ajuste e as representações gt-n3, gt2-n1-lp e gt2-n1-slp apresentam praticamente o mesmo ajuste, deslocando-se da curva conectividade.cor na região de 10 a $100 \mu m$. A representação gt2-n2 é excessivamente conectada, isto se explica olhando a função distribuição de tamanho de poros, gt2-n2 apresenta um excesso de poros grandes. Na Fig. (6b) observa-se que as curvas de intrusão de mercúrio simuladas. Com gt2-n1-lp e gt2-n1-slp apresentam um melhor ajuste com a curva experimental, isto se deve ao uso de um fator de amplificação mais baixo. A curva para gt2-n2 está abaixo das demais porque a representação é mais conectada e tem uma distribuição de tamanho de poros que superestima os poros grandes. Observe que o aumento do fator de amplificação provoca um deslocamento das curvas de intrusão de mercúrio para baixo.

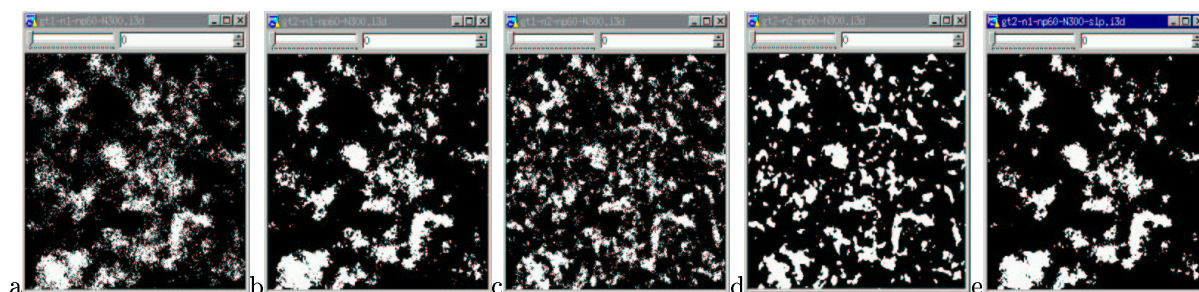


Figura 4: Representações do P262_K70 [(a) gt1-n1-lp, (b) gt2-n1-lp, (c) gt1-n2-lp, (d) gt2-n2-lp, (e) gt2-n1-slp].

Resultados para rocha reservatório P275_K316. Observa-se na Fig. (7a) que a representação tridimensional gerada com gt2-n1 e esf-n1, tem um número elevado de poros pequenos. Já gt2-n3 gera um número elevado de poros grandes. A representação gt2-n2 é a que apresenta a melhor concordância. Com gt2 foi possível usar

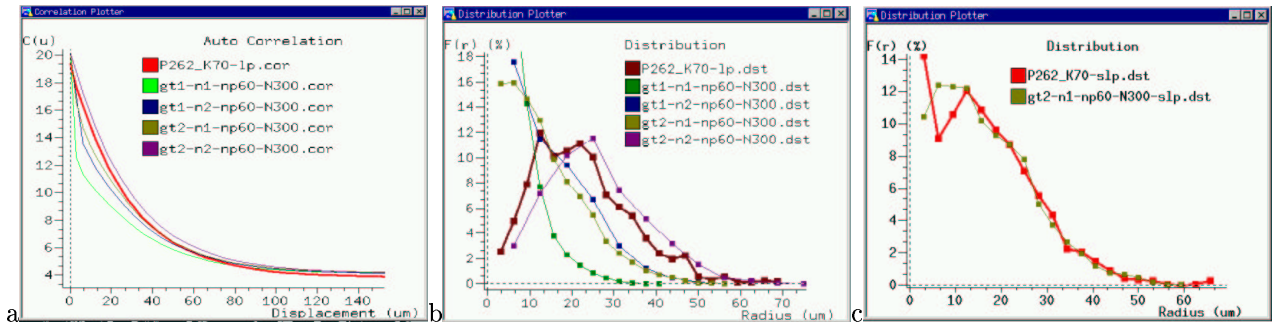


Figura 5: Função autocorrelação (a) e função distribuição de tamanho de poros para P262_K70-lp (b) e P262_K70-gt2-sl (c).

Tabela 2: Porosidade total e conectada para representações do P262_K70.

Representação	ε	ε_{c6}	$\varepsilon - \varepsilon_{c6}$	$\frac{\varepsilon - \varepsilon_{c6}}{\varepsilon} \%$
gt2 $n=1$ np=60 N=300 slp	20.13	19.06	1.07	5.31
gt2 $n=1$ np=60 N=300 lp	19.21	18.13	1.08	5.62
gt1 $n=1$ np=60 N=300 lp	20.12	16.72	3.4	16.90
gt1 $n=3$ np=60 N=300 lp	18.99	16.80	2.3	12.5

um fator de amplificação mais baixo. Na Fig. (7b) observa-se que as curvas gt2-n1 e gt2-n2 apresentam um melhor ajuste com a curva experimental devido o uso de um fator de amplificação mais baixo. Como a melhor representação é obtida com gt2-n2 este é o resultado a ser considerado.

Resultados para rocha reservatório P223_K154. Observa-se na Fig. (7c) que as representações obtidas com gt1 apresentam um excesso de poros isolados, mesmo para $n=3$, sendo descartadas. Já gt2-n1 gera um número elevado de poros pequenos. O melhor ajuste ocorre para gt2-n3.

A representação gt2-n3-np72-N300 apresentou o melhor ajuste na função distribuição de tamanho de poros, na função conectividade e na intrusão de mercúrio (veja Fig. (7d)), indicando uma coerência geral da metodologia adotada. Estes resultados mostram a qualidade do modelo de determinação das configurações de equilíbrio, isto é, de intrusão de mercúrio de Magnani et al., 2000. Com o aumento do fator de amplificação as curvas de intrusão de mercúrio atingem uma saturação maior para a mesma pressão (estão mais baixas), tanto para gt1 como para gt2. A representação com excesso de poros pequenos tem uma conectividade menor, provocando uma elevação da curva de intrusão, visto que estes poros só poderão ser invadidos para uma pressão maior. Este comportamento se repetiu para todas as rochas analisadas.

Resultados para rocha reservatório P238_K145. Na Fig. (7e) a melhor representação é obtida com gt1-n2, que apresenta uma excelente concordância a partir dos 15 μm . Em (f) observe que o melhor ajuste é obtido com esf-n1-N300, a seguir gt-n2, gt-n3, gt2-n1 e gt2-n2. O resultado a ser considerado é obtido para gt-n2, visto que gt-n2 apresentou o melhor ajuste com a função distribuição de tamanho de poros.

Resultados para rocha reservatório P320_K642. Na Tab. (3 esquerda) observa-se que as reduções nas porosidades são pequenas, indicando que a representação com dimensão 200^3 é suficiente para preservação da conectividade. Para todas as representações obtidas a função autocorrelação foi preservada. Na Fig. (8a) a melhor representação é obtida com esferas sobrepostas (esf-n1-N300). Na Fig. (8b) a representação gt2-n1 apresenta um resultado próximo do obtido com esferas sobrepostas, gt2-n2 apresenta a curva mais afastada. Isto ocorre porque gt2-n2 tem um excesso de poros grandes que são invadidos para uma pressão menor; esta representação também tem uma função conectividade acima das demais. Observe que as curvas simuladas atingem 100% de saturação. Isto ocorre porque a porosidade experimental de 32% é igual a porosidade ótica 32%. A porosidade ótica só será “igual” a porosidade a gás se a resolução utilizada para capturar as imagens for a mesma utilizada na determinação da porosidade a gás, ou seja, se for possível com a microscopia capturar todo o conjunto de poros que são acessados na determinação da porosidade com o método da expansão a gás.

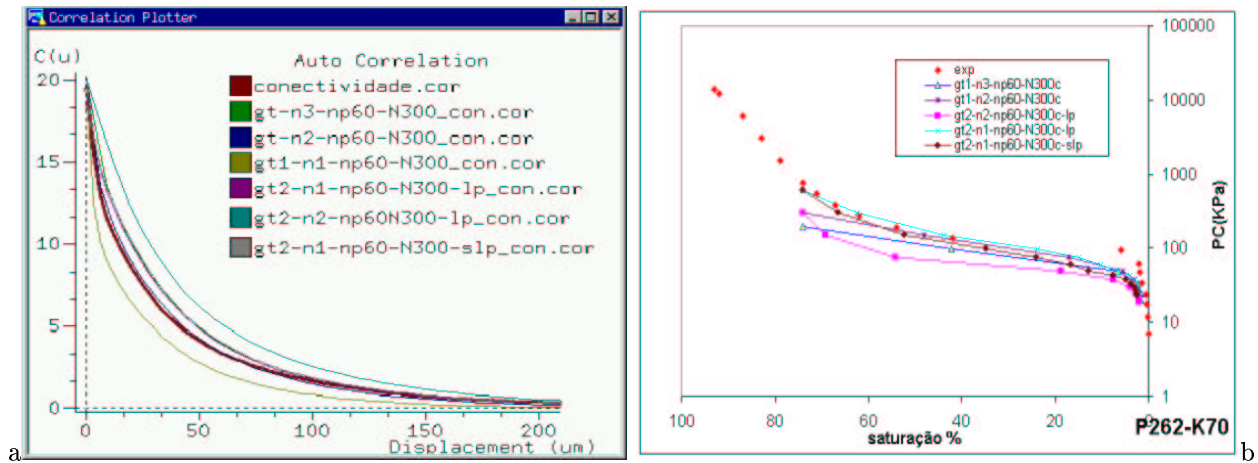


Figura 6: Em (a) função conectividade e em (b) simulações de intrusão de mercúrio para rocha P262_K70.

Resultados para rocha reservatório P240_K104. A porosidade média da imagem bidimensional é de 20.8% e a porosidade experimental de 24%. Observe na Tab. (3 direita), que com gt2 perde-se menos porosidade, mas esferas sobrepostas é a que melhor preserva a porosidade conectada.

Tabela 3: Porosidade total e conectada para representações do P320_K642 e P240_K104 .

P320_K642				P240_K104			
	ϵ_o	ϵ_{c6}	$\frac{\epsilon_o - \epsilon_{c6}}{\epsilon_o} \%$		ϵ_o	ϵ_{c6}	$\frac{\epsilon_o - \epsilon_{c6}}{\epsilon_o} \%$
gt1 n=2 np=24 N=200	29.81	28.60	4.0	gt n=1 np=40 N=300	21.49	18.71	12.93
gt2 n=1 np=24 N=200	29.67	28.28	1.31	gt n=2 np=40 N=300	21.49	17.92	16.61
gt2 n=1 np=30 N=300	29.84	29.54	0.9	gt n=3 np=40 N=300	21.49	16.33	24.01
esferas n=1 N=200	30.25	30.12	0.4	esf n=1 N=300	20.46	20.00	2.24
esferas n=1 N=300	30.28	30.18	0.3	gt2 n=1 np=40 N=300	20.77	19.86	4.38

Na Fig. (8c) observa-se que gt1-n1 gera um número elevado de poros pequenos. As representações esf-n1-N300 e esf-n1-N400 apresentam um bom ajuste na faixa acima de 10 μm . A representação gt1-n2 apresenta um excesso de poros grandes, já gt2-n1 gera um número elevado de poros grandes e baixo de poros pequenos. A melhor representação é obtida com esferas sobrepostas (esf-n1), que apresenta um bom ajuste na função conectividade e na curva de intrusão de mercúrio (veja Fig. (8d)).

4.2 Análise dos resultados

Relação Ry e Rz: O uso da aproximação de Adler et al., 1990, constitui-se em uma solução numérica adotada para que a relação entre Rz e Ry para uma porosidade de 50% seja preservada, ou seja, que corresponda a solução analítica. A análise da relação entre Rz e Ry para porosidades diferentes de 50% mostrou que não existe um comportamento linear associado a porosidade e que ajudem na definição do uso ou não da aproximação.

A análise das curvas da Fig. (2) indica que gt2 não consegue recuperar as rugosidades (para um $Ry \sim > 0.97$), com uso da aproximação, gt1, força-se o ajuste. Pelos resultados analisados, com gt1 consegue-se boas representações quando $n=2$ e $\lambda \sim < 40$.

Se associarmos a recuperação dos objetos a um grau de precisão numérica, ou seja, admitirmos que a recuperação dos objetos está relacionada com a precisão disponibilizada (o que parece válido, visto que com $N > 200$ houve a necessidade do uso de double) e que a densidade das rugosidades é muito maior que a dos objetos grandes, conclue-se que a recuperação das rugosidades, imposta com gt1 limita a qualidade dos resultados obtidos, donde conclue-se, que sobre o aspecto conceitual a aproximação não deve ser usada.

Se esta análise estiver correta e for disponibilizada memória e precisão suficiente, o método da gaussiana truncada poderá reconstruir corretamente meios totalmente descritos pelos dois primeiros momentos e com qualquer comprimento de correlação.

Entretanto, os meios de entrada não são totalmente descritos pelos dois primeiros momentos, a precisão e memória não são suficientes, os efeitos dos arredondamentos numéricos não são totalmente conhecidos; o que nos leva a conclusão final, de que o ideal é reconstruir com o método da gaussiana truncada (com e sem a aproximação), com o método das esferas sobrepostas e então usar o método de seleção da representação ideal.

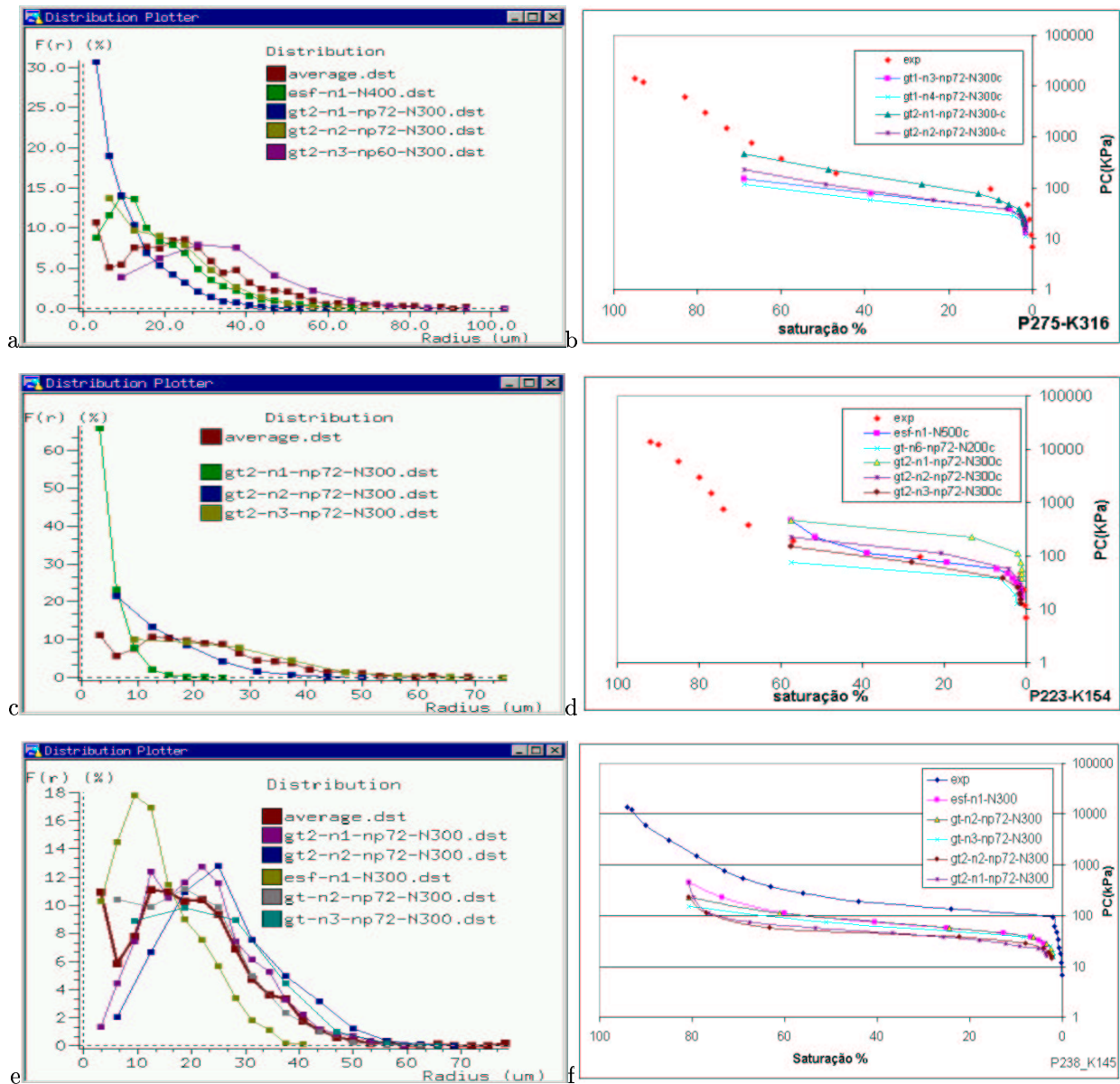


Figura 7: Função distribuição de tamanho de poros e simulações de intrusão de mercúrio para representações do P275_K316 (a/b), P223_K154(c/d), P238_K145 (e/f).

gt1,gt2: Verificou-se que o aumento do número de pontos da série que calcula os coeficientes B_m (Eq. 6), não implica em mudanças significativas na representação obtida.

Para a rocha **P262_K70** a eliminação da aproximação de Adler et al., 1990, altera de forma significativa a representação tridimensional obtida. Com gt1 a melhor representação é obtida com $n=3$ e com gt2 com $n=1$. Resultados semelhantes, isto é, redução do fator de amplificação, foram encontrados para P275_K316 (de esf-n1 para gt2-n2) e P223_K154 (de gt1-n6 para gt2-n3).

De um modo geral, as representações (P262_K70, P275_K316, P223_K154) obtidas com gt2 são menos irregulares e a representação ideal passou a ser obtida com um fator de amplificação mais baixo. As representações obtidas são visualmente melhores e a função autocorrelação apresenta um bom ajuste. Com o uso de um fator de amplificação mais baixo, obteve-se um melhor resultado para as curvas de intrusão de mercúrio, tanto para representação obtida com aplicação do filtro passa baixa (lp) como para representação obtida sem aplicação do filtro passa baixa (slp). Com gt2 a perda de porosidade conectada é menor que com gt1.

Com gt2 obteve-se boas representações para o P238_K145 e P320_K642, embora não a melhor representação, que foi obtida com gt1-n2 e esf-n1 respectivamente. Para rocha P240_K104 a gt2 eliminou os poros pequenos, sendo totalmente descartada.

Observe que a representação da rocha P320_K642 é gerada com $\lambda = 24$, P240_K104 é gerada com $\lambda = 40$, o que indica que gt1 é aconselhada para $\lambda < 40$. A rocha P238_K145, apresentou o melhor resultado com gt1-n2, para

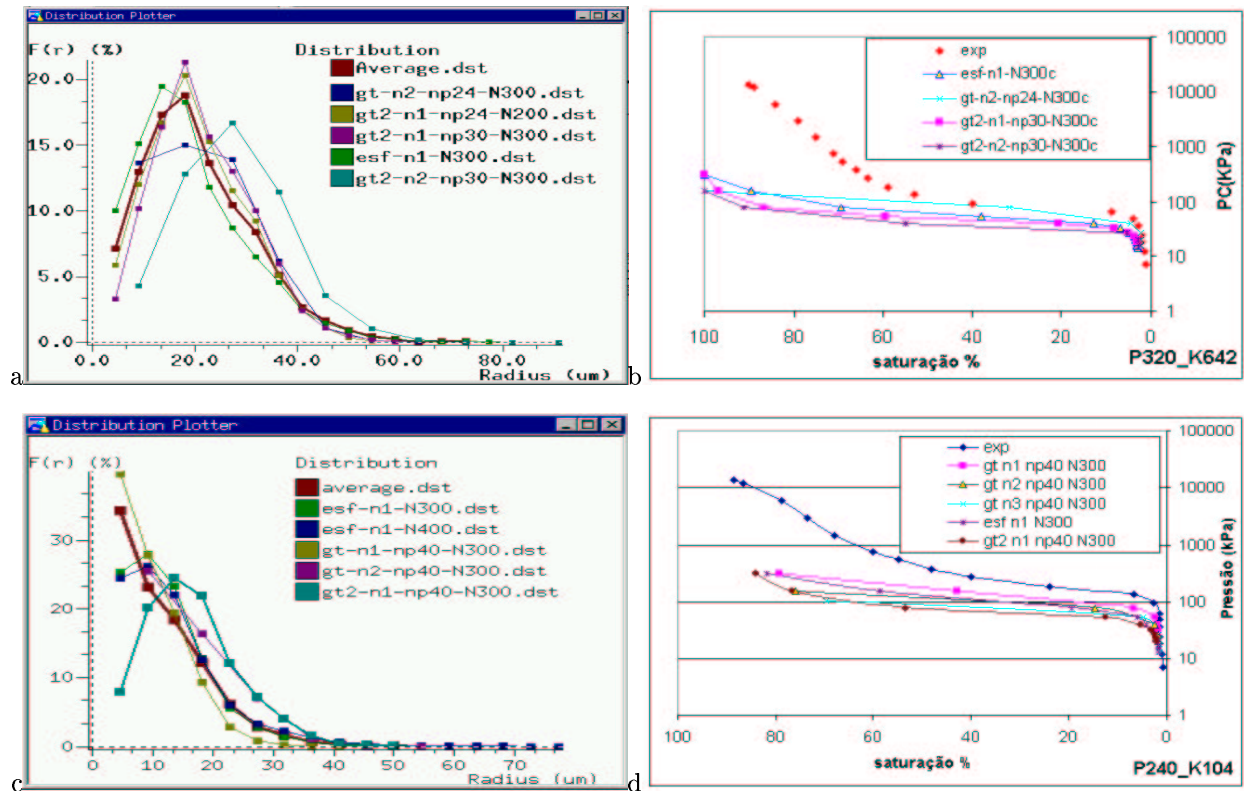


Figura 8: Em (a/c) função distribuição de tamanho de poros em (b/d) simulações de intrusão de mercúrio para representações do P320_K642 e P240_K104, respectivamente.

esta representação usou-se $\lambda = 72$, mas observando-se a sua função autocorrelação, o comprimento de correlação poderia ser definido em $\lambda \sim 45$. Deve-se ressaltar que esta rocha apresenta uma porosidade experimental de 23.8% e ótica 19.2%.

Quando λ é pequeno as perdas de porosidade conectada também o são ($\lambda = 24$ [4%], $\lambda = 40$ [12-24%], $\lambda = 60$ [12-24%]).

Estes resultados são coerentes, o uso da aproximação de Adler et al., 1990, foi definido numa época e em que os computadores tinham baixa capacidade de memória e as imagens geradas tinham dimensão $\sim < 100$.

Um comprimento de correlação grande, digamos $\lambda = 150$, exige a recuperação de 150 escalas, entendido aqui como 150 tamanhos de objetos. Enquanto a dimensão máxima que podia ser recuperada era pequena ($N < 100$), o método de reconstrução da gaussiana truncada 1 apresentava bons resultados para imagens com comprimento de correlação pequeno ($\lambda \sim 40$), o uso de precisão simples (float) na determinação da FFT era aceitável. Entretanto, para recuperar imagens com comprimento de correlação grande era necessário usar $n > 1$ (em alguns casos $n > 5$, veja Liang et al. (1998)), gerando distorções nas representações obtidas em função da alta discretização adotada.

Com o aumento da capacidade dos computadores, foi possível gerar imagens com dimensão $N \sim 300$. Neste caso constatou-se a necessidade de uso de dupla precisão (double) na determinação da FFT. Isto indica que para objetos com mais de ~ 60 escalas será necessário usar precisão dupla longa (long double em C), e que o número de escalas que poderão ser tratadas com o método da gaussiana truncada serão limitadas a algo em torno de $\lambda \sim 100$. Objetos com comprimento de correlação mais elevados deverão ser tratados considerando-se dois ou mais grupos de escalas (sistemas multi-escala), ou serem geradas com esferas sobrepostas.

Com o aumento do fator de amplificação e consequente aumento da discretização das representações obtidas, as diferenças entre gt1 e gt2 são reduzidas, pois a correção da Eq. (7) deixa de atuar.

esf: Embora o número de representações obtidas e de rochas analisadas com o método de reconstrução das esferas sobrepostas seja pequeno, os resultados obtidos são promissores. As principais vantagens do método são: i) a capacidade de gerar representações com alto comprimento de correlação e/ou baixa porosidade. ii) a capacidade de gerar representações com grande dimensão linear com baixo consumo de memória e grande velocidade (foram obtidas representações com $N=600$). iii) a preservação da conectividade da representação obtida em c_6 .

Porosidade conectada: Verificou-se que com o aumento da dimensão ocorre uma redução da perda de porosidade conectada. Para as representações analisadas verificou-se que a gaussiana truncada revisada tem uma porosidade conectada maior que gaussiana truncada e menor que esferas sobrepostas.

lpxslp: Foi observado que quando se gera a representação 3D usando $n=1$, a representação obtida tem uma função distribuição de tamanho de poros semelhante a da imagem 2D sem aplicação do filtro passa baixa. Ou seja, quando a representação é obtida com $n=1$, deve-se comparar as curvas de autocorrelação e distribuição de tamanho de poros com as equivalentes em 2D obtidas sem aplicação do filtro passa baixa. Isto se explica, porque a aplicação do filtro passa baixa elimina um conjunto importante de poros pequenos que são recuperados na reconstrução. Pode-se imaginar que o filtro passa baixa estaria eliminando uma parte da cauda da curva da gaussiana, que é automaticamente recuperada no processo de reconstrução. Isto nos leva a conclusão de que o uso do filtro passa-baixa deve ser evitado, ou utilizado somente quando realmente necessário.

Observou-se na Fig. (1a) que com aplicação do filtro passa baixa, a curva de autocorrelação sofreu um deslocamento para cima (aumento de porosidade). Como existe uma perda de porosidade associada a não acessibilidade da resina em determinadas escalas, este aumento implica em uma compensação, sendo, em alguns casos, de forma inadvertida, considerada adequada.

Intrusão Mercúrio: Os resultados obtidos para intrusão de mercúrio serão melhores quanto menor for o fator de amplificação. Com gt_2 as diferenças nas curvas de intrusão quando se muda o fator de amplificação são mais acentuadas. Observe que metade das representações analisadas, isto é, P262_K70 (de gt_1-n_3 para gt_2-n_1 , melhora substancial), P275_K316 (de $esf-n_1$ para gt_2-n_2 , melhora sutil), P223_K154 (de gt_1-n_6 para gt_2-n_3), apresentam um melhor ajuste nas curvas de intrusão de mercúrio. A outra metade, isto é P238_K145, P320_K642, P240_K104, apresentaram representações gt_2 em que ocorreu uma eliminação dos poros menores, superestimando os poros grandes (o que provoca um rebaixamento das curvas de intrusão de mercúrio).

Para representação P223_K154 o uso de gt_2 se mostrou eficiente, já para P238_K145, que tem uma porosidade e permeabilidade muito próxima da P223_K154 o uso de gt_2 se mostrou ineficiente. Isto nos leva a conclusão de que embora ocorra uma sobrecarga de trabalho, o ideal é reconstruir com gt_1 , gt_2 e esferas sobrepostas e então selecionar a melhor representação.

Número de imagens: Verificou-se necessidade de se trabalhar com um número grande de imagens e com a média das curvas de autocorrelação e distribuição de tamanho de poros para a obtenção das representações com gaussiana truncada. Entretanto, quando se usam curvas de autocorrelação frequenciais, os objetos maiores de uma imagem individual são atenuados e o comprimento de correlação é menor (veja Fig. (1a)). Assim, ao adotar-se as curvas frequenciais, reduz-se as anisotropias das imagens, reduzindo-se as deformações de forma que exigem mais precisão do método. Donde conclui-se que o uso das curvas de autocorrelação frequenciais torna as curvas mais isotrópicas e adequadas ao método de reconstrução. A obtenção de curvas médias a partir de diversas imagens tem o mesmo efeito.

5 Conclusões

Um melhor entendimento das representações tridimensionais só ocorreu quando um grande número de imagens e representações foram estudados, o que evidencia a necessidade de se trabalhar com um conjunto representativo de dados.

O método de reconstrução da gaussiana truncada reconstruirá corretamente o meio se a função autocorrelação de entrada for uma função autocorrelação de um material totalmente representado pelos dois primeiros momentos da função de fase.

Constatou-se a necessidade do uso de dupla precisão (double na linguagem C) na determinação da FFT, principalmente para $N > 200$ e que o número de escalas que podem ser geradas é limitado pela precisão e capacidade de memória da máquina. Os resultados obtidos utilizando-se as curvas médias são melhores.

A análise da relação entre R_z e R_y para diferentes valores de porosidade, não forneceu dados adicionais que levassem a um maior entendimento do método e das diferenças da gaussiana truncada, de Liang *et al.*(1998), gt_1 , e da gaussiana truncada revisada, gt_2 , (aqui apresentada), ou que servissem como critério auxiliar na definição da representação ideal.

Concluiu-se que uso do filtro passa-baixa deve ser evitado ou utilizado somente quando realmente necessário.

O método da gaussiana truncada é adequado para a geração de imagens com alto grau de desordem. Meios com comprimento de correlação alto, meios fissurados e meios com comprimento de correlação baixo mas com grande ordem, não conseguem boa representação (ex, conjunto de esferas). Nestes casos, opte por esferas sobrepostas.

Em todos os casos estudados, a gt_1 não conseguiu gerar adequadamente imagens com fator de amplificação um, ou seja, quando for usar fator de amplificação um opte por gaussiana truncada 2 ou esferas sobrepostas. Quando

for usar um fator de amplificação dois opte pela gaussiana truncada 1 quando o comprimento de correlação for pequeno ($\lambda \sim < 40$) e por gt2 com $\lambda \sim > 40$. Para $n > 2$, isto é $n=3,4,5,\dots$, opte por gaussiana truncada 2, que preserva mais a porosidade conectada e tem um número menor de pixels isolados. Lembrar sempre que $n > 2$ gera representações grosseiras do material original.

A seleção da melhor representação tridimensional através dos critérios apresentados: análise dos planos da representação tridimensional, análise da representatividade da imagem através da visualização 3D, definição do melhor fator de amplificação através da comparação das curvas de autocorrelação e distribuição de tamanho de poros e a definição da dimensão da imagem considerando a relação das porosidades ($\frac{\epsilon_n - \epsilon_{c6}}{\epsilon_o}$), fornecem os instrumentos adequados para a correta seleção da melhor representação 3D.

Agradecimentos. Ao CENPES/PETROBRAS pelo fornecimento das imagens e dos resultados de intrusão de mercúrio. Documento gerado usando software livre ($\text{L}^{\text{Y}}\text{X}$, $\text{L}^{\text{A}}\text{T}^{\text{E}}\text{X}$, gnuplot, gimp).

6 Referências

- Adler, P. M., Jacquin, C. G., and Quiblier, J. A., 1990, Flow in Simulated Porous Media, "Int. J. Multiphase Flow", Vol. 16, pp. 691–712.
- Bueno, A. D., 2001, "Estudo Geométrico das Representações Tridimensionais da Estrutura Porosa e Grafo de Conexão Serial Para a Determinação da Permeabilidade Intrínseca de Rochas-Reservatório de Petróleo", PhD thesis, UFSC.
- Bueno, A. D., Magnani, F. S., and Philippi, P. C., 2002, Método para Determinação da Permeabilidade Relativa de Rochas Reservatório de Petróleo Através da Análise de Imagens Reconstruídas, p. 12, Caxambú - MG - Brasil. CIT02-0672.
- Bueno, A. D. and Philippi, P. C., 2002, Modelo do Grafo de Conexão Serial para Determinação da Permeabilidade de Rochas Reservatório de Petróleo, p. 12, Caxambú - MG - Brasil. CIT02-0668.
- Castleman, K. R., 1979, "Digital Image Processing", series, Prentice Hall, London, 1rd edition, ISBN.
- Cocquerez, J. P. and Philippi, S., 1995, "Analyse D Images: Filtrage et Segmentation", Vol. 1, MASSON, Paris.
- Coles, M. E., Haslett, R. D., Spanne, P., Soll, W. E., Muegge, E. L., and Jones, K. W., 1998, Pore Level Imaging of Fluid Transport Using Synchrotron X-ray microtomography, "JPSE", Vol. 19, pp. p.55–63.
- Coster, M. and Chermant, J. L., 1989, "Precis D Analyse D Images", Vol. 1, PRESSSES DU CNRS, Paris.
- Daian, J. F., 1992, From Pore-Size Distribution To Moisture Transport Properties: Particular Problems For Large Pore-Size Distributions, p. 19, Montreal.
- Damiani, M. C., Fernandes, C. P., Bueno, A. D., Santos, L. O. D., da Cunha Neto, J. A. B., and Philippi, P. C., 2000, Predicting Physical Properties of Reservoir Rocks from the Microstructural Analysis of Petrographic Thin Sections, Puerto Iguazu.
- Dullien, F. A. L., 1992, "Porous Media - Fluid Transport and Pore Structure", Academic Press, San Diego, 1rd edition.
- Facon, J., 1996, "Morfologia Matemática: Teoria e Exemplos", PUC PR, Curitiba, 1rd edition, ISBN.
- Fernandes, C. P., Magnani, F. S., Philippi, P. C., and Daian, J. F., 1996, Multi-scale Geometrical Reconstitution of Porous Structures, "Physical Review E", Vol. 54, pp. 1734–1741.
- Fernandes, C. P., Philippi, P. C., Daian, J. F., and Magnani, F. S., 1995, Simulação de Processos em Estruturas Porosas Reconstituídas. Parte II: Sistemas Multiescalas, pp. 85–92, Montreal.
- Gasperi, P. M. S. D., 1999, Estimativa de Propriedades Petrofísicas Através da Reconstrução 3D do Meio Poroso a Partir da Análise de Imagens, Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Gomes, J. and Velho, L., 1994, "Computação Gráfica :Imagem", INPA-SBM, Rio de Janeiro, 1rd edition, ISBN.
- Gonzales, R. and Woods, R., 1993, "Digital Image Processing", Addison-Wesley, 1rd edition, ISBN.
- Hazlett, R. D., 1995, Simulation of Capillary-Dominated Displacements in Microtomographic Images of Reservoir Rocks, "Transport in Porous Media", Vol. 21-35.

- Ioannidis, M., Kwiecien, M., and Chatzis, I., 1995, Computer Generation and Application of a 3-D Model Porous Media: From Pore-Level Geostatistics to the Estimation of Formation Factor, Houston.
- Joshi, M. Y., 1974, "A Class of Stochastic Models for Porous Media", Ph.d. thesis, University of Kansas, Lawrence, U.S.A.
- Koplik, J., Lin, C., and Vermette, M., 1984, Conductivity and Permeability From Microgeometry, "J. Appl. Phys", Vol. 56, pp. 3127–3131.
- Kwiecien, M. J., Macdonald, I. F., and Dullien, F. A. L., 1990, Three Dimensional Reconstruction of Porous Media From Serial Section Data, "Journal of Microscopy", Vol. 159, pp. 343–349.
- Magnani, F. S., Philippi, P. C., Zhirong, L., and Fernandes, C. P., 2000, Modelling Two-Phase Equilibrium in Three-Dimensional Porous Microstructures, "Int. J. Multiphase Flow".
- Philippi, P. C., Damiani, M. C., Fernandes, C. P., Bueno, A. D., Santos, L. O. D., and Neto, J. A. B. D. C., 2000a, Characterization of Reservoir Rocks from Image Analysis On Imago Software, Rio de Janeiro.
- Philippi, P. C., Magnani, F. S., and Bueno, A. D., 2000b, Two Phase Equilibrium Distribution in Three- Dimensional Porous Microstructures, Puerto Iguazu.
- Philippi, P. C., Yunes, P. R., Fernandes, C. P., and Magnani, F. S., 1994, The Microstructure of Porous Building Materials: Study of a Cement and Lime Mortar, "Transport in Porous Media", Vol. 14, pp. 219–245.
- Quiblier, J. A., 1984, A New Three Dimensional Modelling Technique for Studying Porous Media, "Journal of Colloidal and Interface Science", Vol. 98, pp. 84–102.
- Santos, L. O. D., Philippi, P. C., Fernandes, C. P., and Gaspari, H. C. D., 2002, Reconstrução Tridimensional de Microestruturas Porosas com o Método das Esferas Sobrepostas, p. 12, Caxambú - MG - Brasil.
- Spanne, P., Thovert, J. F., Jacquin, C. J., Lindquist, W. B., Jones, K. W., and Adler, P. M., Synchrotron Computed Microtomograph of Porous Media: Topology and Transports, "Phys. Rev. Let", pp. 2001–2004.
- Yunes, P. R., 1993, Determinação da Distribuição de Poros de uma Argamassa de Cimento e Cal Usando as Isotermas de Equilíbrio e Dados de Microscopia Eletrônica, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-UFSC, Florianópolis.
- Zhirong, L., Philippi, P. C., Fernandes, C. P., and Magnani, F. S., 1998, A Reconstruction Technique For 3-D Porous Media Using Image Analysis And Fourier Transform, "Journal of Petroleum Science Engineering".

THREE-DIMENSIONAL RECONSTRUCTION OF THE MICROSTRUCTURE OF ROCK-RESERVOIR FROM FINE THIN PLATE

Bueno A.D. (andre@lmpt.ufsc.br):

Santos L.O.E. (emerich@lmpt.ufsc.br):

Fernandes C.P. (celso@lmpt.ufsc.br):

Philippi P.C. (philippi@lmpt.ufsc.br):

Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas dos Materiais - LMPT

Abstract. *A reconstruction method is considered satisfactory if it preserves all the statistical moments of the phase function measured in a set of two-dimensional binaries images. In this manner, a three-dimensional representation is considered adequate if their two-dimensional sections have, in average, the same statistical moments as the two-dimensional binaries images used to generate the three-dimensional representation. This article presents results of the use of two reconstruction methods: truncated Gaussian method and superposed spheres method. The truncated Gaussian method is reviewed, innovations are implemented and their effects are evaluated. We verified that the method is suitable to generate representations with small correlation length e weak organization of the porous space. The superposed spheres method is new and this is the first work evaluating it. The method make possible to obtain representations with greater correlation length than the truncated Gaussian method and, also, it preserves the volume of the connected porous phase. Analyzing the representations obtained by the methods we identified the advantages and disadvantages of each one and their applications. We also present a way to select the ideal representation gotten by reconstruction methods. Practical results obtained using images of Brazilian oil reservoir rocks are shown.*

Keywords. *reconstruction, truncated Gaussian, sphere superposed, reservoir-rocks.*