

## FATOR DE FORMAÇÃO DE ROCHAS RESERVATÓRIO DE PETRÓLEO

### **Celso P. Fernandes**

Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas  
Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina  
Campus Universitário Trindade 88040 900 Florianópolis SC  
[celso@lmpt.ufsc.br](mailto:celso@lmpt.ufsc.br)

### **Luís O. Emerich dos Santos**

Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas  
Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina  
Campus Universitário Trindade 88040 900 Florianópolis SC  
[emerich@lmpt.ufsc.br](mailto:emerich@lmpt.ufsc.br)

### **Paulo C. Philippi**

Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas  
Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina  
Campus Universitário Trindade 88040 900 Florianópolis SC  
[philippi@lmpt.ufsc.br](mailto:philippi@lmpt.ufsc.br)

### **Carlos R. O. Rodrigues**

PETROBRAS/CENPES/PDEP/Tecnologia de Rochas  
Cidade Universitária Quadra 7 Ilha do Fundão  
21949 900 Rio de Janeiro RJ  
[rodrigues@cenpes.petrobras.com.br](mailto:rodrigues@cenpes.petrobras.com.br)

### **Henrique C. de Gaspari**

Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas  
Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina  
Campus Universitário Trindade 88040 900 Florianópolis SC  
[gaspari@lmpt.ufsc.br](mailto:gaspari@lmpt.ufsc.br)

**Resumo.** As propriedades petrofísicas de rochas, são, usualmente, obtidas em laboratório através de experimentos padrões, em geral de alto custo e demorados, em amostras de testemunhos retirados do reservatório. Por outro lado, o avanço de técnicas de análise de imagens digitais, aplicadas em seções planas de rochas, vem se mostrando uma metodologia rápida e de baixo custo para a predição destas propriedades, a partir unicamente do conhecimento da microestrutura da rocha. O presente artigo apresenta um método para a estimativa de propriedades petrofísicas utilizando a análise de imagens. A partir de imagens coloridas obtidas em um microscópio óptico em seções planas polidas, torna-se possível caracterizar a geometria da microestrutura porosa da rocha e gerar um modelo tridimensional (3-D) desta microestrutura preservando determinados parâmetros geométricos. Assumindo-se homogeneidade e isotropia estatísticas, modelos 3-D são gerados a partir de imagens 2-D, conservando as informações de porosidade e de correlação espacial da fase poro. No presente artigo, para a criação do modelo 3-D, utiliza-se um método de gaussiana truncada baseado na transformada de Fourier e o método das esferas sobrepostas. No modelo 3-D são realizadas simulações computacionais para a determinação do fator de formação. O método numérico usado para determinar a condutividade elétrica efetiva de rochas saturadas é baseado na técnica de "random walks". Os resultados são apresentados em termos do fator de formação, que é a razão entre a condutividade do fluido que satura a fase poro e a condutividade efetiva da rocha. O método é aplicado para calcular o fator de formação de rochas reservatório de petróleo de campos brasileiros. Uma análise é feita, comparando-se os resultados simulados com os obtidos em laboratório.

**Palavras chave:** rocha reservatório de petróleo, fator de formação, análise de imagens, random walk

## 1. Introdução

A determinação de propriedades macroscópicas de transporte de materiais porosos, a partir do conhecimento de sua microestrutura, constitui um problema de grande interesse científico e tecnológico. Muitos são os materiais porosos e as aplicações relacionadas a este problema e no presente artigo trata-se da determinação da condutividade elétrica de rochas reservatório de petróleo. A geometria da microestrutura de uma rocha é bastante complexa, seja no tocante às formas irregulares dos poros seja na organização espacial. Um material poroso pode ser encarado como um caso particular dos materiais multifásicos onde estão presentes pelo menos duas fases, o espaço poroso (permeável ou condutivo) e a fase sólida (impermeável ou isolante). Além da porosidade, as propriedades de transporte são influenciadas pela distribuição de tamanho de poros e pela organização espacial.

Em problemas envolvendo a recuperação de petróleo, a permeabilidade intrínseca é uma propriedade macroscópica fundamental. Outra propriedade de grande interesse na indústria do petróleo é a condutividade elétrica de rochas saturadas com o fluido de formação, sendo utilizada em estudos para a estimativa do volume de hidrocarbonetos presente no reservatório. A determinação experimental de tais propriedades é economicamente dispendiosa, além de se constituírem experimentos demorados. Justifica-se assim a importância de modelos matemáticos para a estimativa das propriedades, no caso deste trabalho a partir das informações de imagens 2-D das rochas.

Na indústria do petróleo é bastante utilizada a Lei de Archie, uma equação empírica relacionando a condutividade efetiva  $\sigma$  da rocha com a sua porosidade  $\phi$  :

$$\sigma = a\sigma_0\phi^m, \quad (1)$$

onde  $\sigma_0$  é a condutividade do fluido que satura a rocha e “a” e “m” são dois parâmetros empíricos, funções da litologia da rocha. Usualmente, o parâmetro a é tomado como unitário e m em torno de 2. Contudo, a literatura reporta vários resultados experimentais com considerável variabilidade destes parâmetros.

Considere-se agora um modelo 3-D representativo da microestrutura porosa, onde estão espacialmente definidas as regiões de poros e sólidos, estando o espaço poroso saturado com um fluido de condutividade  $\sigma_0$ . O transporte de corrente elétrica no meio saturado em regime estacionário é governado pela equação de Laplace com condições de contorno apropriadas. A condutividade efetiva  $\sigma$  pode ser determinada através do emprego de um método numérico como por exemplo o de diferenças finitas. Contudo, têm-se as dificuldades associadas com o tempo e memória computacional requeridos ao se trabalhar com sistemas de estruturas porosas grandes, de modo a serem estatisticamente representativas. Desta forma procuram-se soluções alternativas para o problema, que embora aproximadas permitam uma utilização prática.

No presente artigo, na determinação da condutividade elétrica de materiais com dois componentes, sendo um deles isolante elétrico, utiliza-se a técnica de *random walk* (Schwartz & Banavar, 1989; Sahimi & Stauffer, 1991; De Gennes, 1976; Ioannidis et al, 1995). A condutividade elétrica é determinada em microestruturas 3-D, reconstruídas com o método de gaussiana truncada, Liang et al (1998). Neste método procura-se gerar um modelo 3-D da microestrutura que conserve as estatísticas de primeira e de segunda ordem medidas em imagens de seções planas da rocha: a porosidade e a função de correlação a dois pontos.

O método de *random walk* foi aplicado em microestruturas 3-D reconstruídas utilizando-se como dados de entrada correlações do tipo exponencial (com alcance de correlação variável) e para várias porosidades, visando a uma comparação com os resultados obtidos por Ioannidis et al (1995).

Também foi realizado um estudo preliminar, onde se aplicou o método para microestruturas de rochas reservatório, comparando-se os resultados simulados com dados experimentais.

## 2. Colocação do Problema

Considere-se um material poroso cuja matriz sólida seja um isolante elétrico e que esteja totalmente saturado com um fluido que possui uma dada condutividade elétrica. Nestas condições, o transporte de corrente elétrica em regime estacionário é governado pela equação de Laplace:

$$\nabla^2\Psi = 0, \quad (2)$$

onde  $\psi$  é o potencial eletrostático local. Adotam-se condições de contorno apropriadas nas fronteiras externas do material e a condição de fluxo nulo na interface poro-sólido:

$$\mathbf{n} \cdot \nabla\Psi = 0, \quad (3)$$

onde  $\mathbf{n}$  é o vetor normal à interface poro-sólido.

A densidade de corrente macroscópica  $\langle \dot{\mathbf{j}} \rangle$  é relacionada com o gradiente macroscópico do potencial eletrostático da seguinte forma:

$$\langle \dot{\mathbf{j}} \rangle = -\sigma \langle \nabla \Psi \rangle \quad (4)$$

Em vez de se resolver numericamente o problema acima, determinando-se o campo eletrostático, adota-se um método que determina apenas a condutividade efetiva  $\sigma$ . Este procedimento é baseado na relação de Nernst-Einstein conectando a condutividade  $\sigma$  com o coeficiente de difusão  $D$  (Schwartz & Banavar, 1989):

$$\sigma \propto D\phi \quad (5)$$

Por outro lado, o problema físico da difusão pode ser simulado, mesmo em grandes sistemas, por métodos de *random walk*. Nesta aproximação tem-se como resultado tão somente o valor da condutividade efetiva  $\sigma$ , não se obtendo o detalhamento do campo eletrostático.

### 3. O Método de Random Walk

O método de *random walk* é bastante usual para a determinação da condutividade elétrica de materiais compostos, incluindo os materiais porosos. Em um sistema em que apenas uma fase tem condutividade não-nula o algoritmo associado ao método é bastante simples. A partir de várias posições aleatórias na fase condutiva, partículas sem massa (*random walkers*) são postas a executar um caminho randômico: executam passos de determinado comprimento, em direções randômicas, requerendo um determinado passo de tempo. A distância (ao quadrado) de cada partícula em relação à posição original é computada em função dos passos de tempo. Se a direção randômica conduz à fase isolante, o movimento da partícula não é permitido. Segundo Sahimi (1994), a idéia de *random walk* para a determinação de propriedades de transporte de meios desordenados surgiu em um artigo de Haji-Sheikh & Sparrow (1966) que estudaram a condução de calor em um material composto. O método ganhou popularidade a partir do artigo de De Gennes (1976) que fez uma analogia entre o movimento do random walker em um meio desordenado e o movimento de uma formiga em um labirinto.

Seguindo-se Ioannidis et al (1995), implementou-se o algoritmo denominado "*Blind Ant*" para uma representação discreta de materiais com duas fases. A partir de uma posição inicial selecionada randomicamente, em nosso caso um voxel na microestrutura 3-D reconstruída com coordenadas  $(i_0, j_0, k_0)$ , a partícula pode se mover randomicamente para um dos voxels vizinhos com igual probabilidade. Adotou-se uma 26-vizinhança, quer dizer: foram considerados como vizinhos os 26 voxels com contorno comum com o voxel de referência (face, aresta ou vértice). O tempo  $t_p$  gasto em cada passo é diretamente proporcional ao quadrado da distância  $\delta_p$  referente a um passo da partícula, e inversamente proporcional à condutividade  $\sigma_0$  da fase condutiva. Desta forma escrevemos:

$$t_p = \frac{\delta_p^2}{\sigma_0} \quad (6)$$

Em uma 26-vizinhança, a distância que a partícula caminha em um único passo pode ser  $\delta$ ,  $\delta\sqrt{2}$ , ou  $\delta\sqrt{3}$ , onde  $\delta$  é a distância unitária (tamanho do voxel). Assim, tomando  $\sigma_0 = 1$ , cada passo pode adicionar 1, 2 ou 3 ao tempo total  $t$  de caminhada da partícula.

Com a partícula executando o caminho randômico, a cada tempo mede-se a distância euclidiana (ao quadrado) da sua posição atual  $(i, j, k)$  em relação a sua posição de partida  $(i_0, j_0, k_0)$ :

$$R^2 = (i - i_0)^2 + (j - j_0)^2 + (k - k_0)^2 \quad (7)$$

As partículas são postas a caminhar por um tempo bastante longo e a simulação repetida para um grande número de partículas ( $\sim 1000$ ). Para evitar o término prematuro da caminhada randômica são impostas condições periódicas de contorno às partículas que são projetadas das faces de contorno do sistema.

Para tempos suficientemente grandes, a distância média ao quadrado  $\langle R^2 \rangle$ , tomada em relação a todas as partículas, será uma função linear do tempo de caminhada:

$$\langle R^2 \rangle = \left( \frac{\sigma}{\phi_{\text{conec}}} \right) t \quad (8)$$

onde  $\sigma$  é a condutividade efetiva do sistema e  $\phi_{\text{conec}}$  é a fração de voxels acessíveis às partículas considerando-se a 26-vizinhança. Esta fração é a chamada porosidade aberta do material, ou seja, está associada aos poros passíveis de serem invadidos por um fluido.

#### 4. Resultados

Com o intuito de análise dos resultados fornecidos pelo algoritmo de *random walk* implementado, foram feitos testes em sistemas 3-D reconstruídos com o método da gaussiana truncada, Liang et al (1998), comparando-se com os resultados obtidos por Ioannidis et al (1995). Consideraram-se sistemas porosos com a fase sólida isolante e a fase poro com condutividade  $\sigma_0$ . Para tanto, os sistemas 3-D foram gerados considerando-se um modelo de correlação exponencial dado por:

$$R_{\text{exp}}(u) = e^{-\left(\frac{u}{\lambda}\right)} \quad (9)$$

onde  $u$  são os deslocamentos espaciais e  $\lambda$  o parâmetro associado ao comprimento de correlação. Os sistemas 3-D foram gerados com tamanho linear  $N$  de 200 ou 300 voxels, variando-se a porosidade  $\phi$  e o parâmetro  $\lambda$ . Na Tab. (1) são apresentados os resultados comparativos sendo a condutividade colocada na forma normalizada  $F = \frac{\sigma_0}{\sigma}$ , onde  $\sigma$  é a condutividade efetiva do sistema 3-D. Na Fig. (1) mostra-se a evolução da  $\langle R^2 \rangle$  com o tempo para quatro simulações onde se manteve constante o comprimento de correlação  $\lambda$  variando-se a porosidade  $\phi$ .

Tabela 2: Comparação do fator de formação de microestruturas 3-D modeladas com gaussiana truncada.

(\*) resultados obtidos no presente trabalho

(\*\*) resultados obtidos por Ioannidis et al (1995)

$\lambda$	$\phi$	N (*)	N (**)	$\phi_{\text{conec}}$ (*)	$\phi_{\text{conec}}$ (**)	F (*)	F (**)
4	0,15	200	200	0,135	0,134	140,00	131,9
4	0,20	200	200	0,191	0,193	51,51	48,6
4	0,25	200	200	0,243	0,246	25,56	23,4
4	0,30	200	200	0,296	0,297	15,84	12,3
8	0,15	300	200	0,145	0,102	83,78	101,5
8	0,20	300	200	0,199	0,185	40,19	44,8
16	0,20	300	200	0,191	0,186	41,04	38,4
16	0,30	300	200	0,299	0,284	14,92	14,1

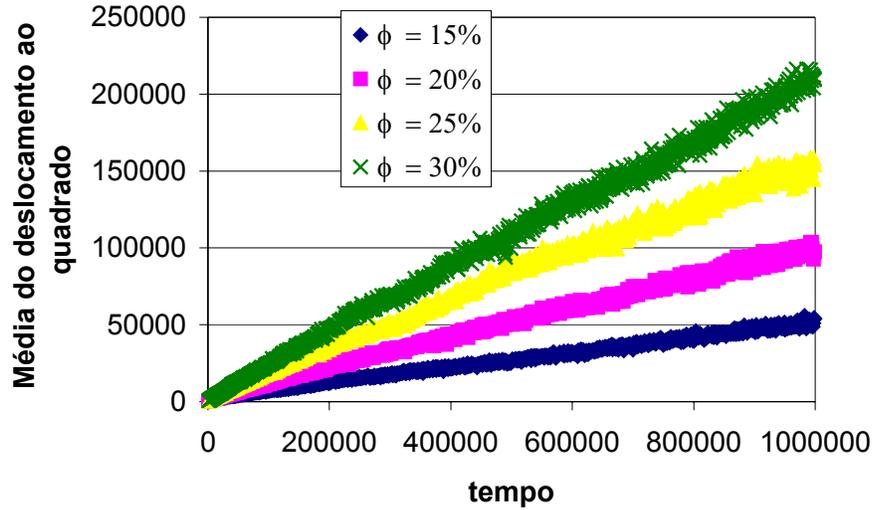


Figura (1) A evolução no tempo da média da distância ao quadrado na simulação *Random Walk*.

O fator de formação também foi calculado em microestruturas 3-D de três rochas reservatório reconstruídas com o emprego do método da gaussiana Truncada. Na Fig. (2) mostra-se um exemplo de uma imagem da seção plana de uma rocha. Para a obtenção desta imagem, o espaço poroso de uma amostra da rocha foi impregnado a vácuo com uma resina com um corante azul, tendo-se confeccionado uma lâmina delgada para observação no microscópio ótico. Para a mesma lâmina delgada de uma rocha, tomaram-se várias imagens coloridas sendo realizado um processamento de binarização de forma a definir as regiões de poros e de sólidos, determinando-se então a porosidade e a função de autocorrelação como médias das várias imagens consideradas.

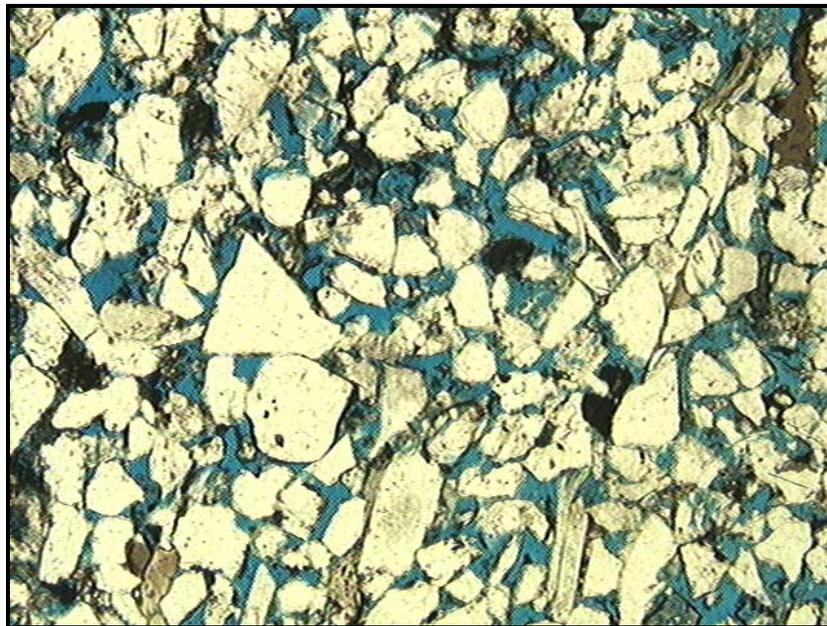


Figura (2) Imagem de uma seção plana de rocha reservatório.

As amostras de rochas utilizadas são tais que a porosidade medida nas imagens é inferior à porosidade experimental. Isto ocorre pois o método de medição experimental (com gás ou mercúrio) acessa poros pequenos que não são visíveis nas imagens utilizadas. Esta micro-porosidade não é importante para a determinação da permeabilidade intrínseca, que é comandada essencialmente por um escoamento principal em caminhos de poros de menor resistência hidráulica, Santos et al (2002). Contudo, a condutividade elétrica é dependente dos detalhes finos da microestrutura, sendo então, primariamente, dependente da porosidade.

Numa tentativa de se contornar este problema manteve-se a curva de autocorrelação original (média das imagens), modificando-se o valor de porosidade para o valor obtido em laboratório.

Na Tab. (2) são apresentados os resultados obtidos em comparação com os resultados experimentais. Todas as reconstruções foram feitas em sistemas de 300x300x300 voxels.

Tabela 2. Fator de formação: comparação entre os resultados simulados e os experimentais para rochas reservatório

Amostra	F experimental	F simulado
p26.7F14.6	14.6	18.23
p23.8F13.3	13.3	26.41
P27.5F13.5	13.5	17.53

## 5. Conclusões

O método de *random walk* se apresentou robusto para a simulação de problemas difusivos, permitindo a determinação da condutividade com baixo custo computacional. Além disso, é um algoritmo que pode ser implementado de forma completamente paralela, dada a independência dos *random walkers*.

Os resultados de condutividade obtidos com o algoritmo implementado neste trabalho concordaram razoavelmente bem com os de Ioannidis et al (1995). A aplicação em estruturas 3-D reconstruídas a partir das informações medidas nas imagens de rochas reservatório é preliminar. De fato, o método foi confrontado para apenas três rochas e ademais fez-se a correção da porosidade das imagens pela experimental, mantendo-se a mesma autocorrelação. Isto é bastante significativo, uma vez que, diferentemente da permeabilidade intrínseca, a condutividade elétrica depende fortemente do detalhes finos da estrutura porosa.

## 6. Agradecimentos

Celso P. Fernandes agradece o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo (ANP) da qual é Pesquisador Visitante junto ao Programa de Formação de Recursos Humanos em Engenharia Mecânica com ênfase em Petróleo e Gás da Universidade Federal de Santa Catarina.

## 7. Referências

- De Gennes, P.G., 1976, La percolation: un concept unificateur, La Recherche, n.72.
- Ioannidis, M.A. & Chatzis, I., 1993, Network modeling of pore structure and transport properties of porous media. Chem. Eng. Sci. 48, 951-972.
- Ioannidis, M.A.; Kwiecien M.; & Chatzis, I., 1995, Computer Generation and Application of 3-D Model Porous Media: From Pore-Level Geostatistics to the Estimation of Formation Factor. SPE paper 30201, 185-194.
- Liang, Z.R., Fernandes, C.P., Magnani, F.S. & Philippi, P.C., 1998, A reconstruction technique for 3-D porous media using image analysis and Fourier transforms. Journal of Petroleum Science and Engineering, 21/3-4, 273-283.
- Sahimi, M., 1994, Applications of Percolation Theory, Taylor & Francis, London.
- Sahimi, M.; Stauffer, D., 1991, Efficient Simulation of Flow and Transport in Porous Media, Chemical Engineering Science, v.46, n.9, 2225-2233.
- Santos, L.O.E, Philippi, P.C., Damiani, M.C., Fernandes C.P., 2002, Using three-dimensional reconstructed microstructures for predicting intrinsic permeability of reservoir-rocks based on a boolean lattice gas method. Journal of Petroleum Science and Engineering. In Press.
- Schwartz, L.M.; Banavar, J., 1989, Transport Properties of Disordered Continuum Systems, Physical Review B, v.39, n.16.

## FORMATION FACTOR OF PETROLEUM RESERVOIR ROCKS

### **Celso P. Fernandes**

Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas  
Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina  
Campus Universitário Trindade 88040 900 Florianópolis SC  
[celso@lmpt.ufsc.br](mailto:celso@lmpt.ufsc.br)

### **Luís O. Emerich dos Santos**

Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas  
Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina  
Campus Universitário Trindade 88040 900 Florianópolis SC  
[emerich@lmpt.ufsc.br](mailto:emerich@lmpt.ufsc.br)

### **Paulo C. Philippi**

Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas  
Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina  
Campus Universitário Trindade 88040 900 Florianópolis SC  
[philippi@lmpt.ufsc.br](mailto:philippi@lmpt.ufsc.br)

### **Carlos R. O. Rodrigues**

PETROBRAS/CENPES/PDEP/Tecnologia de Rochas  
Cidade Universitária Quadra 7 Ilha do Fundão  
21949 900 Rio de Janeiro RJ  
[rodrigues@cenpes.petrobras.com.br](mailto:rodrigues@cenpes.petrobras.com.br)

### **Henrique C. de Gaspari**

Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas  
Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina  
Campus Universitário Trindade 88040 900 Florianópolis SC  
[gaspari@lmpt.ufsc.br](mailto:gaspari@lmpt.ufsc.br)

**Resumo.** As propriedades petrofísicas de rochas, são, usualmente, obtidas em laboratório através de experimentos padrões, em geral de alto custo e demorados, em amostras de testemunhos retirados do reservatório. Por outro lado, o avanço de técnicas de análise de imagens digitais, aplicadas em seções planas de rochas, vem se mostrando uma metodologia rápida e de baixo custo para a predição destas propriedades, a partir unicamente do conhecimento da microestrutura da rocha. O presente artigo apresenta um método para a estimativa de propriedades petrofísicas utilizando a análise de imagens. A partir de imagens coloridas obtidas em um microscópio óptico em seções planas polidas, torna-se possível caracterizar a geometria da microestrutura porosa da rocha e gerar um modelo tridimensional (3-D) desta microestrutura preservando determinados parâmetros geométricos. Assumindo-se homogeneidade e isotropia estatísticas, modelos 3-D são gerados a partir de imagens 2-D, conservando as informações de porosidade e de correlação espacial da fase poro. No presente artigo, para a criação do modelo 3-D, utiliza-se um método de gaussiana truncada baseado na transformada de Fourier e o método das esferas sobrepostas. No modelo 3-D são realizadas simulações computacionais para a determinação do fator de formação. O método numérico usado para determinar a condutividade elétrica efetiva de rochas saturadas é baseado na técnica de "random walks". Os resultados são apresentados em termos do fator de formação, que é a razão entre a condutividade do fluido que satura a fase poro e a condutividade efetiva da rocha. O método é aplicado para calcular o fator de formação de rochas reservatório de petróleo de campos brasileiros. Uma análise é feita, comparando-se os resultados simulados com os obtidos em laboratório.

**Key-words:** petroleum reservoir rocks, formation factor, random walk