

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA INCRUSTAÇÃO POR SULFATO DE BÁRIO EM REPRESENTAÇÕES TRIDIMENSIONAIS DA ROCHA RESERVATÓRIO: EFEITOS SOBRE A PERMEABILIDADE

Schaewer T.R. - tschaewer@lenep.uenf.br

Bueno A.D. - bueno@lenep.uenf.br

Bedrikovetsky P. - pavel@lenep.uenf.br

Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo - LENEP (<http://www.lenep.uenf.br>)

Resumo. A incrustação de rochas reservatório por sulfato de bário é um problema recorrente na Bacia de Campos, onde a forma mais comum de recuperação secundária é a injeção de água do mar (corresponde a 85% do óleo produzido). A deposição de sulfato de bário ocorre quando a água injetada, rica em sulfato, entra em contato com a água de formação, rica em bário, causando o acúmulo do precipitado sólido ao longo da coluna de produção, em equipamentos do poço e no interior da formação. O problema é agravado pelas propriedades físico-químicas da sulfato de bário, um sal de difícil remoção e baixa solubilidade, e pelo dano provocado à zona próxima ao poço produtor, onde a mistura entre as águas incompatíveis é mais intensa. Desenvolve-se neste trabalho modelos e algoritmos para simular a incrustação de sulfatos em representações tridimensionais de rochas reservatório obtidas a partir de imagens de rochas reservatório brasileiras (imagens fornecidas pelo CENPES). São desenvolvidos três modelos de incrustação: ao redor do poro (pore-lining), preenchendo o poro (pore-filling) e dendrítica. A estabilidade dos algoritmos e alguns resultados são apresentados. A principal vantagem do uso da abordagem proposta é a possibilidade da utilização de amostras de calha (obtidas por uma fração do custo de um testemunho) amostras laterais e testemunhos danificados, assim como a realização de simulações computacionais reproduzíveis em lugar de ensaios laboratoriais destrutivos.

Palavras chave: incrustação, análise de imagens, reconstrução tridimensional, porosidade, dano de formação.

1 Introdução - Escopo do Problema

A incrustação de sulfatos no interior de rochas reservatório de petróleo é fonte de grandes prejuízos econômicos, pois causa a redução da permeabilidade, a queda da injetividade e o conseqüente aumento do custo de extração do petróleo. Este problema é recorrente na Bacia de Campos, onde a forma mais comum de recuperação secundária é a injeção de água do mar (corresponde a 85% do óleo produzido).

A incrustação por sulfato de bário em reservatórios ocorre devido à mistura de águas quimicamente incompatíveis (Fig. 1.c). A reação ocorre quando a água de formação, rica em bário, entra em contato com a água do mar injetada, rica em sulfatos, causando a formação de sulfato de bário a partir da reação entre os íons aquosos ocorre de acordo com a seguinte equação:



O problema é agravado pelas propriedades físico-químicas do sulfato de bário, um sal de difícil remoção e baixa solubilidade, o que dificulta o controle da incrustação. Outro fator agravante é que a mistura entre as águas incompatíveis é mais intensa na área próxima ao poço produtor, causando uma drástica redução do índice de produtividade.

Uma das soluções atualmente utilizadas para reduzir o problema é o uso de inibidores, mas a mesma apresenta problemas operacionais e custo elevado, sendo importante o desenvolvimento de estudos, teóricos e aplicados, relacionados à caracterização da incrustação e seu efeito sobre a permeabilidade de rochas reservatório. Observe que o mesmo tipo de problema ocorre com outros tipos de sulfatos, como o de estrôncio.

A metodologia utilizada neste trabalho para solucionar o problema da caracterização dos efeitos da incrustação baseia-se no uso de técnicas de análise de imagens, sendo, portanto, uma abordagem computacional. A grande vantagem dos métodos de determinação de propriedades de rochas a partir da análise de imagens reside na

possibilidade de poder determinar estas propriedades petrofísicas a partir de amostras de calha. Métodos laboratoriais necessitam de amostras maiores, isto é, testemunhos do reservatório, que são obtidos com procedimentos extremamente caros, enquanto as amostras de calha podem ser obtidas durante o processo de perfuração do poço sem custo adicional. Além disso, métodos de reconstrução tridimensional permitem gerar representações tridimensionais do meio poroso que reproduzem a microgeometria e a conectividade da rocha original, aumentando a precisão do método ao não depender de fórmulas empíricas que levam em consideração apenas alguns poucos parâmetros (porosidade, distribuição de tamanho de poros) obtidos a partir de análises da imagem da rocha no plano bidimensional, Bueno *et al.*, 2002; Cerepi *et al.*, 2001; James, 1995; Coskum e Wardlaw, 1996; Lock *et al.*, 2002. O estudo de rochas reservatório com uso de análise de imagens passa pelas seguintes etapas: Primeiramente, lâminas delgadas das amostras de rochas são fotografadas com o auxílio de um microscópio, realiza-se então a binarização das imagens, seguida da etapa de caracterização, onde informações estatísticas do meio poroso original são extraídas a partir das imagens binarizadas. As informações estatísticas, que incluem a porosidade, a curva de autocorrelação e a distribuição de tamanho de poros, são então utilizadas como parâmetros de entrada para algoritmos de reconstrução tridimensional que reproduzem a organização topológica e morfológica da rocha original. O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de modelos e algoritmos para simulação da incrustação de sulfato de bário em representações tridimensionais da rocha reservatório, estendendo a metodologia de análise de imagens.

2 Revisão Bibliográfica

Sorbie e Mackay, 2000, modelaram os mecanismos de mistura das águas de injeção e de formação. O principal mecanismo de deslocamento da água de formação pela água de injeção é o deslocamento frontal linear, onde um banco de água de injeção desloca um banco de água de formação com uma zona relativamente pequena entre os dois bancos onde ocorre a mistura das águas e deposição de sulfato de bário.

Nancollas e Liu, 1975, descreveram os eventos do processo de deposição de sulfato de bário; segundo os autores a reação é geralmente controlada pelo transporte de íons incrustantes até a superfície de um cristal ou outro substrato, exceto quando a supersaturação é suficientemente grande para gerar cristais dendríticos, sendo então controlada pela difusão. Segundo o estudo, a taxa da reação é proporcional ao quadrado da supersaturação e independe da dinâmica de fluxo para baixas velocidades.

Wat *et al.*, 1992, realizaram experimentos injetando águas de formação e marinha sintéticas em *sandpacks* de sílica, com e sem a presença de inibidores. Os autores concluem que o processo de precipitação parece ser dominado pela nucleação heterogênea.

Todd e Yuan, 1992, realizaram experimentos de incrustação de sulfato de bário em altas temperaturas (70°C) para diversas salmouras com diferentes graus de supersaturação de sulfato de bário. Apesar de poucos experimentos de incrustação terem sido realizados, existe uma tendência para que soluções com maior supersaturação apresentem maior queda de permeabilidade em função da redução da porosidade, provavelmente devido as diferenças morfológicas entre os cristais.

Apesar de uma bibliografia específica sobre simulação de incrustação de sais em meios porosos não estar disponível, trabalhos recentes descreveram modelos de crescimento de microestruturas em representações tridimensionais com o objetivo de simular processos diagenéticos, como cimentação de quartzo e a precipitação de argilas autigênicas sobre a superfície dos poros. Keehm, 2003, propõe diversos mecanismos de preenchimento de poros relacionados à diagênese. As velocidades de fluxo são obtidas através do método de Lattice-Boltzmann e quatro classes de algoritmos são definidos, (1) deposição ao redor dos grãos, (2) em zonas de alta velocidade de fluxo, (3) em zonas de baixa velocidade de fluxo e (4) aleatório.

Kameda, 2004, formaliza métodos para realizar a alteração numérica da geometria dos poros de representações tridimensionais e investiga os seus efeitos na redução da permeabilidade. O autor utiliza operações morfológicas sobre representações tridimensionais obtidas através de microtomografia de raios-x para modelar diversos processos diagenéticos. Objetivando simplificar o problema de criar algoritmos complexos para estruturas tridimensionais o autor introduz um procedimento para obter representações tridimensionais a partir da alteração de imagens bidimensionais da rocha, seguida de uma operação de reconstrução tridimensional.

Oren e Bakke, 2002, modelam a cimentação de quartzo e a precipitação de argilas autigênicas, que são divididas em três categorias: *pore-lining* (ao redor do poro), *pore-filling* (preenchendo o poro) e *pore-bridging* (formando pontes entre as paredes da matriz rochosa). Argilas que se depositam ao redor do poro como a clorita são modeladas através da deposição aleatória de partículas (voxels) sobre as superfícies da fase sólida. Argilas que preenchem os poros são modeladas com o uso de um algoritmo que favorece a deposição de partículas sobre partículas já depositadas. A deposição de argilas do tipo *pore-bridging* se dá através da geração de linhas de voxels conectando as paredes dos poros, que devem ter o diâmetro menor do que um valor de corte pré-estabelecido.

3 Algoritmos de Incrustação Desenvolvidos

Os algoritmos aqui descritos se baseiam na hipótese de que a deposição dos cristais de sulfato de bário no meio poroso apresenta uma morfologia semelhante à deposição de argilas, podendo ser classificada como *pore-lining*, *pore-filling* ou dendrítica.

3.1 Hipóteses simplificadoras

Apresenta-se a seguir um conjunto de hipóteses simplificadoras necessárias para o desenvolvimento dos modelos.

- Como a escala em que a simulação é realizada é bastante pequena, da ordem de 1 mm, considera-se que as propriedades da solução (pressão, temperatura, concentrações) não variam dentro do volume estudado e conseqüentemente a mistura da solução dentro do volume estudado (reator) é perfeita.
- A dinâmica do fluxo não influencia o processo de precipitação Nancollas e Liu, 1975; Todd e Yuan, 1992. Apesar da velocidade do fluxo exercer alguma influencia sobre a morfologia dos cristais Todd e Yuan, 1992; Bernard-Michel *et al.*, 2002, acelerar a mistura das águas de formação e de injeção em escalas macroscópicas Sorbie e Mackay, 2000, e o coeficiente da taxa da reação k_a em meios porosos Bedrikovetsky *et al.*, 2003, estes fenômenos não serão modelados no presente estudo.
- Como a dinâmica do fluxo é desconsiderada, a força de arraste não impede o bloqueio dos poros por material incrustante.
- Apenas o processo de nucleação primária heterogênea é considerado Wat *et al.*, 1992; Todd e Yuan, 1992, toda precipitação ocorre sobre a superfície da rocha ou sobre cristais preexistentes.
- Cristais não quebram ou migram através do sistema, causando o bloqueio de gargantas de poros Todd e Yuan, 1992; Wat *et al.*, 1992. Allaga *et al.*, 1992, apontam a migração e captura de partículas por exclusão por tamanho e a formação de pontes nas gargantas dos poros como o principal mecanismo causador da queda de permeabilidade. Siqueira *et al.*, 2003, descrevem um modelo computacional de simulação e determinação da queda da permeabilidade devido à captura de partículas em suspensão. Mas como não existe consenso sobre a importância deste mecanismo no dano de formação causado pelo sulfato de bário, optou-se por evitar a elaboração de modelos complexos para simulação de fluxo e captura de partículas.
- Cristais não tem preferência para se alocar em sítios específicos, como poros pequenos ou grandes ou cavidades Todd e Yuan, 1992. Sabe-se que a nucleação heterogênea tende a ocorrer em sítios que reduzam a energia necessária para a formação da superfície do cristal, como falhas e dobras. No entanto, este fenômeno ocorre em uma escala nanométrica, enquanto o presente estudo foi realizado em uma escala micrométrica.
- Devido à grande diversidade de tamanho dos cristais de sulfato de bário, que podem medir entre 0,5 μm e 50 μm Todd e Yuan, 1992; Bernard-Michel *et al.*, 2002, e ao fato de que a escala dos volumes estudados (relação voxel/micron) ser variável, não existe uma relação unitária entre voxels incrustados na simulação e cristais individuais de sulfato de bário.
- Como a escala do estudo é muito grande para representar as diferentes morfologias dos cristais individuais Nancollas e Liu, 1975; Todd e Yuan, 1992; Bernard-Michel *et al.*, 2002, os cristais serão representados por cubos (voxels) na simulação.
- A microporosidade não contribui significativamente para a permeabilidade, podendo ser desprezada para o cálculo da mesma. A microporosidade associada à fase incrustante ϕ_{BaSO_4} é modelada através de voxels porosos contidos na fase incrustante. Apesar de possuírem um diâmetro relativamente grande (geralmente equivalente ao comprimento do voxel α_v) estes voxels quase sempre se encontram desconectados do restante do volume poroso e não contribuem para o fluxo.

3.2 Algoritmo de incrustação *pore-lining*

A morfologia mais comum encontrada para os cristais de sulfato de bário são estruturas tabulares ortorrômbicas (veja a Fig. 4.a) com pequena superfície específica (cerca de 0,66 m^{-1}). Como este tipo de cristal não está associado a fenômenos de aglomeração e não apresenta crescimento em direções preferenciais (dendritos), se assumirmos que os cristais não possuem sítios preferenciais de nucleação, podemos associar esta ocorrência de sulfato de bário com a deposição de argilas que podem se depositar ao redor do poro (*pore-lining*), formando uma camada que envolve os grãos de maneira quase uniforme.

O algoritmo de incrustação *pore-filling* procura modelar o crescimento de incrustação de sulfato de bário em uma camada tangencial aos grãos da rocha, acarretando no estreitamento dos poros e conseqüente redução de

permeabilidade. A quantidade de volume incrustado é controlada pelo parâmetro σ_r que é definido como o volume do sulfato de bário precipitado V_{BaSO_4} dividido pelo volume poroso inicial V_{P_0} .

$$\sigma_r = \frac{V_{\text{BaSO}_4}}{V_{P_0}} = \frac{V_{\text{BaSO}_4}}{V_{P_+} V_{\text{BaSO}_4}} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{V_{\text{BaSO}_4}}{V_{\text{Total}}} \quad (3)$$

A simulação é realizada escolhendo voxéis porosos ao acaso que serão incrustados somente caso satisfaçam a restrição definida pela Eq. 4 até que a porosidade seja reduzida a $1 - \sigma_r$ de seu valor inicial.

Seja V_{s_i} o número de voxéis incrustados na 6-vizinhança do voxel i , e V_{r_i} o número de voxéis que representam a matriz rochosa na 6-vizinhança do voxel i , o voxel poroso i selecionado randomicamente será incrustado apenas se

$$V_{s_i} + V_{r_i} > 1 \quad (4)$$

Caso a desigualdade acima fosse $V_{s_i} + V_{r_i} > 0$, teríamos como resultado a geração de uma alta microporosidade que tornaria a imagem completamente desconectada mesmo para valores pequenos de σ_r . A Fig. 1(b) revela a presença de microporosidade, em torno de 10% do volume incrustado, gerada no interior da fase incrustante durante a simulação executada com a restrição da Eq. 4. Não temos dados para a microporosidade real apresentada por este tipo de incrustação devido à ausência de estudos que apresentem imagens de lâminas delgadas adequadas para a realização de medidas estereológicas.

A Fig. 2 mostra o resultado de operações de incrustação do tipo *pore-lining* para a rocha Berea 500 (veja Bueno *et al.*, 2002). Observe que a medida que σ_r aumenta, a espessura da camada incrustante que envolve a superfície da rocha também aumenta mais ou menos uniformemente. Para $\sigma_r = 0.5$ (Fig. 2.d) boa parte dos poros pequenos (gargantas) se encontra completamente bloqueada, neste ponto o espaço poroso da representação tridimensional ainda percola, mas a permeabilidade é de apenas 5% do valor inicial calculado para a rocha sem incrustação.

É importante ressaltar que não existe uma relação unitária entre o número de voxéis incrustados e o número de cristais, tanto para o modelo de incrustação *pore-lining* como para os outros modelos. Isto se deve ao fato de que as representações tridimensionais podem apresentar escalas diferentes e que os cristais de sulfato de bário também ocorrem na natureza em diferentes tamanhos (veja as Fig. 4.a, 4.b e 6.a). Portanto, um voxel incrustado pode representar parte de um cristal ou até mesmo um conjunto de cristais.

3.3 Algoritmo de incrustação *pore-filling*

No caso de incrustação do tipo *pore-filling* os cristais tendem a apresentar crescimento localizado devido ao processo de aglomeração, Falope *et al.*, 2001; Marchisio *et al.*, 2002; Wat *et al.*, 1992. Outro tipo de estrutura é o cristal conhecido como “rosa do deserto” (veja a Fig. 4.b) que é composto de diversos cristais tabulares, possivelmente unidos pela nucleação secundária e subsequente crescimento de cristais menores sobre cristais maiores. Uma inspeção visual da Fig.4.b revela a existência de microporosidade entre os cristais formadores da “rosa do deserto”, que provavelmente também ocorre no caso de cristais aglomerados. Tanto o fenômeno da aglomeração quanto a formação de cristais do tipo “rosa do deserto” são dependentes do grau de supersaturação de sulfato de bário, ocorrendo com o aumento da mesma. A presença de cátions com o mesmo número de valência do bário, como o cálcio e o magnésio e o aumento da razão de água de formação sobre água de injeção também contribuem para a formação de aglomerados Hennessy e Graham, 2002.

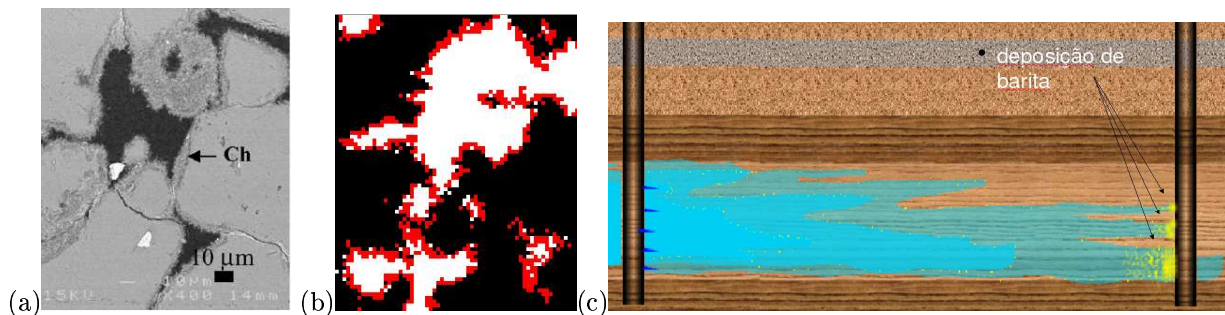


Figura 1: Modelo de incrustação *pore-lining*. (a) imagem obtida com um MEV, mostrando um arenito com deposição de clorita do tipo *pore-lining*. Fonte: Cerepi *et al.*, 2002; (b) seção transversal de uma representação tridimensional da rocha Berea 500 incrustada com o algoritmo de incrustação *pore-lining* com $\sigma_r = 0.4$. Note a presença de voxéis porosos (brancos) entre os voxéis incrustados (vermelhos) sobre o substrato da rocha (voxéis pretos). A escala das figuras a e b é aproximadamente igual. (c) Esboço do reservatório.

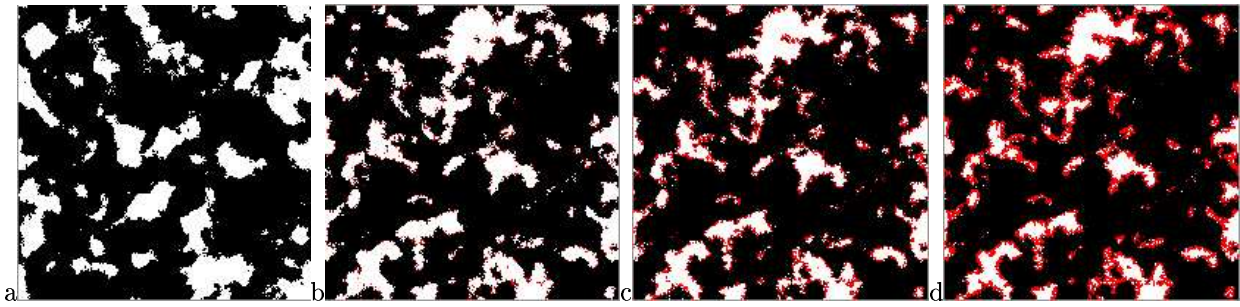


Figura 2: Seções transversais da representação reconstruída da rocha Berea 500 e o resultado do algoritmo de incrustação *pore-lining*. (a) representação original; (b) apresentando 10% do volume poroso incrustado; (c) 30% do volume poroso incrustado; (d) 50% do volume poroso incrustado.

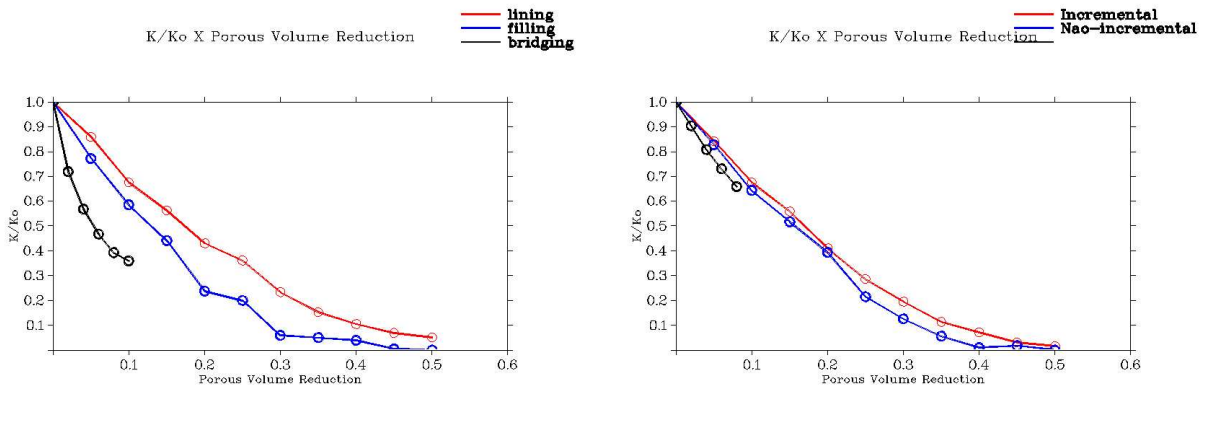


Figura 3: Resultados para a queda de permeabilidade em função de σ_r para diferentes algoritmos de incrustação. (a) Berea 500, (b) P320_K642.

O algoritmo de incrustação do tipo *pore-filling* foi projetado para simular o crescimento localizado de cristais e a formação de microporosidade no interior da fase incrustante. As regras de incrustação são bastante simples e podem ser controladas por três parâmetros: i) Redução do volume poroso σ_r [m^3/m^3]: determina a fração do volume poroso que será incrustada durante o passo da simulação. ii) Fração de volume aglomerado F_{VA} : define a fração dos voxels incrustados obedecendo a restrição da Eq. 5, quanto maior o valor do parâmetro maior o tamanho dos aglomerados. iii) Microporosidade ϕ_{BaSO_4} [m^3/m^3]: porosidade interna à fase incrustante.

O processo de incrustação é realizado através de uma simulação de Monte Carlo onde voxels porosos são escolhidos randomicamente, tendo uma chance F_{VA} de serem incrustados apenas se:

$$(V_{s_i} + V_{r_i} > 1) \wedge (V_{s_i} > 0) \tag{5}$$

e uma chance $1-F_{VA}$ de serem incrustados apenas caso satisfaçam a Eq. 4. Como F_{VA} deve ser um valor próximo de 1 estes voxels agem como sementes na simulação de incrustação. O primeiro termo da Eq. 5 impede a formação

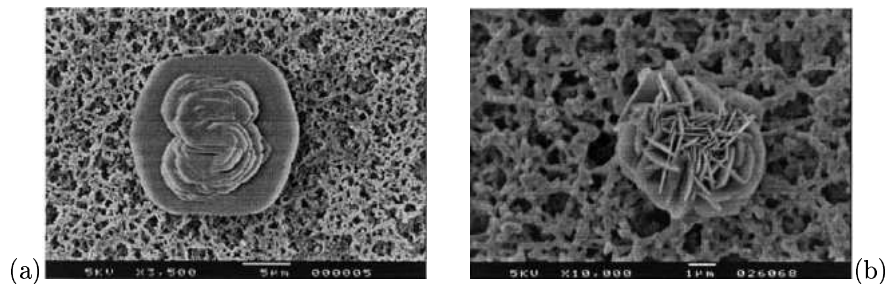


Figura 4: Cristais de sulfato de bário apresentando morfologia (a) tabular e (b) “rosa do deserto”. Fonte :Bernard-Michel *et al.*, 2002

descontrolada de microporosidade, enquanto o segundo termo garante que os voxels serão incrustados somente se existirem vizinhos já incrustados na sua 6-vizinhança.

O parâmetro ϕ_{BaSO_4} tem grande impacto na redução da permeabilidade, uma vez que a maior parte da microporosidade gerada é desconexa para representações tridimensionais com 6-vizinhança, logo a perda efetiva de porosidade conectada $\Delta\phi_{c6}$ é dada por

$$\Delta\phi_{c6} \cong \phi(\sigma_r(1 + \phi_{BaSO_4})) \quad (6)$$

onde $\sigma_r\phi_{BaSO_4}$ é o volume poroso ocupado pela microporosidade. A perda de porosidade é dada pela equação:

$$\Delta\phi = \phi\sigma_r \quad (7)$$

A Eq. 6 indica que a porosidade da fase incrustante potencializa o dano causado pela incrustação. Na realidade a microporosidade gerada pela incrustação de sulfato no meio poroso em rochas reservatório não é desconectada, no entanto a microporosidade geralmente influencia muito pouco a permeabilidade e a sua contribuição é desprezada no modelo proposto, conforme descrito na seção 3.1.

Os cristais que satisfazem à Eq. 4 incrustados no início da simulação darão origem a aglomerados maiores, portanto teremos uma distribuição variada de tamanhos de aglomerados na representação tridimensional incrustada. Os aglomerados formados diminuem o tamanho dos poros e podem chegar a bloqueá-los totalmente, especialmente quando σ_r é grande e F_{VA} é próximo de 1, ocasionando a formação de grandes aglomerados.

Após a incrustação de um volume proporcional a $\Delta\phi_{c6}$ (Eq. 6), a microporosidade é modelada pela transformação de um volume incrustado em excesso proporcional a ϕ_{BaSO_4} em volume poroso, através da seleção randômica de voxels incrustados.

A Fig. 5 mostra o resultado de operações de incrustação do tipo *pore-filling* para a rocha Berea 500. Observe que a medida que σ_r aumenta, o tamanho dos aglomerados também aumenta, enquanto o seu número permanece aproximadamente igual. Para $\sigma_r = 0.3$ alguns poros pequenos já se encontram completamente bloqueados e os poros maiores apresentam boa parte do seu volume ocupada por aglomerados. Para $\sigma_r = 0.5$ boa parte dos poros se encontra completamente bloqueada, neste ponto o espaço poroso da representação tridimensional encontra-se completamente desconectado e a permeabilidade é nula.

3.4 Algoritmo de incrustação dendrítica

Durante o processo de crescimento, as faces do cristal se encontram envolvidas por solução com concentrações baixas de reagentes, devido à proximidade da superfície do cristal em crescimento. Isto favorece o crescimento de partes do cristal que se aproximem de zonas com maior concentração de reagentes, ocasionando a formação de cristais alongados e a formação de dendritos (veja a Fig. 6).

Cristais de sulfato de bário com morfologia dendrítica tendem a se formar para concentrações altas de $BaSO_4$ (maiores do que 2.10^{-3} mol/L Nancollas e Liu, 1975). Estes cristais apresentam grande superfície específica (aproximadamente $1,33 \text{ m}^{-1}$) e dimensões entre 15 e 50 μm , e sua morfologia é semelhante a uma estrela de quatro pontas, podendo apresentar variações na morfologia e no tamanho dependendo da razão molar dos reagentes e da presença de cátions como cálcio, magnésio e inibidores. A incorporação de impurezas na rede cristalina e o aumento da proporção de água injetada em relação à água de formação também estimulam a formação de dendritos Hennessy e Graham, 2002. A incrustação por dendritos resulta na fragmentação do espaço poroso e no aumento da tortuosidade, causando uma rápida diminuição da permeabilidade.

O algoritmo de incrustação do tipo dendrítico foi projetado para simular o crescimento de cristais dendríticos e a conseqüente fragmentação dos poros. As regras de incrustação são relativamente simples e podem ser controladas

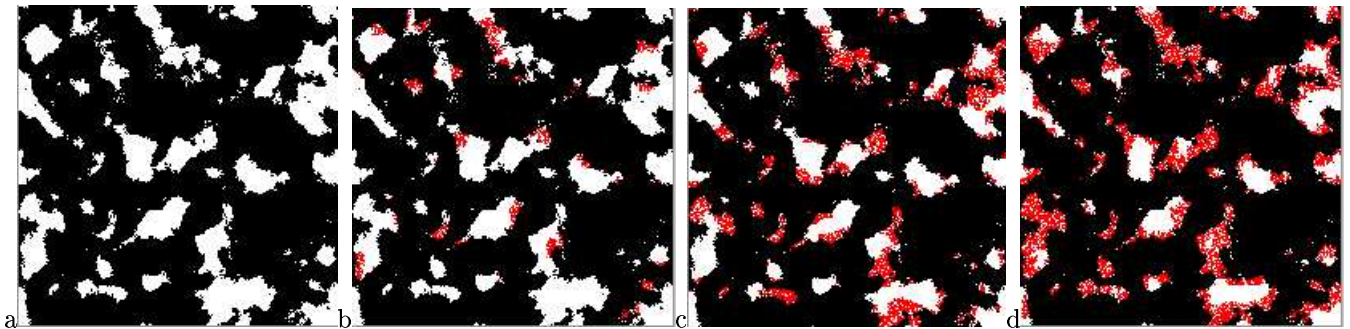


Figura 5: Seções transversais da representação reconstruída da rocha Berea 500 e o resultado do algoritmo de incrustação *pore-filling* com $F_{VA} = 0.99$ e $\phi_{BaSO_4} = 0.3$. (a) representação original; (b) apresentando 10% do volume poroso incrustado; (c) 30% do volume poroso incrustado; (d) 50% do volume poroso incrustado.

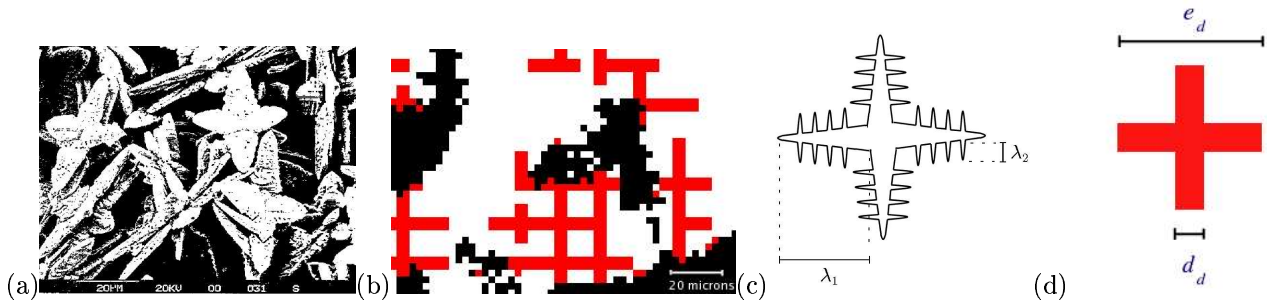


Figura 6: Modelo de incrustação dendrítica. (a) microfotografia binarizada de incrustação dendrítica, extraída de Todd e Yuan, 1992; (b) zoom de seção transversal de uma representação tridimensional incrustada pelo algoritmo dendrítico. Note que a escala da microfotografia e da representação tridimensional são equivalentes. (c) esquema de um cristal dendrítico (d) modelo discretizado de um cristal dendrítico, os braços ortogonais ao plano da figura (direção z) não são mostrados.

por quatro parâmetros: i) Redução do volume poroso σ_r [m^3/m^3]: determina a fração do volume poroso que será incrustada durante o passo da simulação. ii) Fração de volume dendrítico F_{VD} : define a fração dos voxels incrustados obedecendo a restrição da Eq. 5, quanto maior o valor do parâmetro maior o tamanho dos aglomerados. iii) Diâmetro dos braços dendríticos primários d_d [voxels]: o diâmetro deve ser discretizado de microns para voxels, para evitar erros causados pelo arredondamento o diâmetro não deve ser muito menor do que o tamanho do voxel α_v (veja as Fig. 6.c e 6.d). iv) Tamanho dos dendritos e_d [voxels]: define o tamanho dos dendritos.

O processo de incrustação é realizado através de uma simulação de Monte Carlo onde voxels porosos são escolhidos aleatoriamente e têm uma chance F_{VD} de serem incrustados caso satisfaçam a Eq. 11 e uma chance $1-F_{VD}$ de serem incrustados caso não satisfaçam a Eq. 4 (fazendo as vezes de sementes no processo de incrustação).

Sejam x , y e z as coordenadas discretas de um voxel selecionado ao acaso na representação tridimensional e $\vartheta(a, b)$ definida como uma função que retorna o resto da divisão entre dois inteiros, este voxel poroso poderá sofrer uma incrustação dendrítica se o resultado da Eq. booleana 11 for verdadeiro. Seja

$$A \leftrightarrow (\vartheta(x/d_d, e_d) = 0) \wedge (\vartheta(y/d_d, e_d) = 0) \quad (8)$$

$$B \leftrightarrow (\vartheta(x/d_d, e_d) = 0) \wedge (\vartheta(z/d_d, e_d) = 0) \quad (9)$$

$$C \leftrightarrow (\vartheta(y/d_d, e_d) = 0) \wedge (\vartheta(z/d_d, e_d) = 0) \quad (10)$$

tem-se que

$$(A \vee B \vee C) \wedge (V_{s_i} > 0) \quad (11)$$

O primeiro termo da Eq. 11 distribui os voxels incrustados sobre uma rede cúbica regular, como mostra a seção transversal da Fig. 7.c, enquanto o segundo termo garante que os voxels serão incrustados somente se existirem vizinhos já incrustados na sua 6-vizinhança.

Como, nas microfotografias analisadas (veja a Fig. 6.a), o comprimento dos braços principais λ_1 é muito maior do que o comprimento dos braços secundários λ_2 , o volume contendo microporosidade causada pelos braços secundários é relativamente pequeno, possuindo uma permeabilidade também pequena devido ao curto intervalo entre braços secundários adjacentes. Isto justifica o uso da hipótese simplificadora de que o espaço poroso entre os braços secundários tem uma contribuição desprezível à permeabilidade e será considerado impermeável (veja as Fig. 6.a e 6.b). Portanto, a escolha do parâmetro d_d deve ser baseada no diâmetro do braço principal d_1 e no comprimento do braço secundário λ_2 de forma que

$$d_d \simeq \frac{d_1 + 2\lambda_2}{\alpha_v} \quad (12)$$

enquanto o parâmetro e_d é definido pela relação

$$e_d \simeq \frac{2\lambda_1}{\alpha_v} \quad (13)$$

A discretização de e_d e principalmente d_d , deve ser feita com cuidado para que não ocorra uma distorção excessiva na geração dos dendritos. Como as imagens analisadas apresentavam dendritos com braços de aproximadamente $5\mu m$ de diâmetro, a aplicação do algoritmo fica restrita a representações com α_v menores do que $6\mu m$. O gráfico da Fig. 3(a) mostra uma rápida queda da permeabilidade para um pequeno volume de incrustação dendrítica,

enquanto que na Fig. 3(b) o dano à permeabilidade não é tão acentuado. A diferença entre as duas curvas se deve em parte ao fato de que a representação tridimensional da Fig. 3(a) tem $\alpha_v = 5,12 \mu m$, enquanto a representação da Fig. 3(b) tem $\alpha_v = 9,09 \mu m$. O resultado é que para $d_d = 1$ a incrustação correspondente a 3(b) acaba sendo gerada com dendritos muito grossos, de maneira que um volume menor da representação é atingido pelos dendritos para um mesmo valor de σ_r .

A Fig. 6.a mostra uma microfotografia de um poro incrustado por diversos dendritos apresentando uma morfologia cruciforme. O modelo de incrustação dendrítica procura reproduzir este tipo de estrutura, como pode ser visto na Fig. 6.b que apresenta a mesma escala da Fig. 6.a. A Fig. 7 apresenta seções seriais de uma representação tridimensional incrustada pelo algoritmo de incrustação dendrítica. Os dendritos de sulfato de bário podem apresentar outros tipos de morfologia, como o formato de “espigas de milho”, mas o modelo desenvolvido reproduz satisfatoriamente os efeitos causados pelos diferentes tipos de morfologia, como o aumento da superfície específica e a fragmentação do espaço poroso.

4 Resultados

As lâminas analisadas neste capítulo foram fornecidas pelo CENPES/PETROBRAS. As mesmas foram submetidas a um processo de digitalização, binarização e reconstrução tridimensional. A seguir simulou-se um processo de incrustação por sulfato de bário sobre as representações tridimensionais obtidas por Bueno, 2001; Bueno *et al.*, 2002, utilizando os modelos e algoritmos aqui apresentados.

Todas as simulações foram realizadas de forma não-incremental utilizando os mesmos parâmetros de entrada que estão listados na tabela 1, exceto quando outros parâmetros ou condições forem explicitamente definidos. As propriedades das representações tridimensionais utilizadas neste estudo são as mesmas de Bueno *et al.*, 2002; Schaefer *et al.*, 2006. O cálculo da permeabilidade é realizado utilizando o modelo do grafo de conexão serial, Bueno e Philippi, 2002.

Tabela 1: Parâmetros utilizados nas simulações.

Modelo	Dendrítico			Pore-Filling	
Parâmetro	$d_d[\text{voxels}]$	$e_d[\text{voxels}]$	F_{VD}	F_{VA}	ϕ_{BaSO_4}
Valor	$\simeq 5\mu m$	$\simeq 25\mu m$	0,8	0,99	0,3

4.1 Estabilidade dos algoritmos

Nas seções 3.2, 3.3 e 3.4 descrevemos os parâmetros de entrada para cada algoritmo. Dois outros parâmetros estão implícitos, um é a representação tridimensional a ser incrustada e o outro é a semente para a geração de números randômicos. O resultado de uma simulação é determinístico se todos os parâmetros de entrada forem iguais, no entanto a semente de geração de números randômicos, utilizada nas simulações de incrustação, não tem qualquer significado físico e pode ser qualquer número natural escolhido ao acaso, o que significa que se os resultados das simulações variarem muito para sementes diferentes a confiabilidade destes resultados se torna questionável.

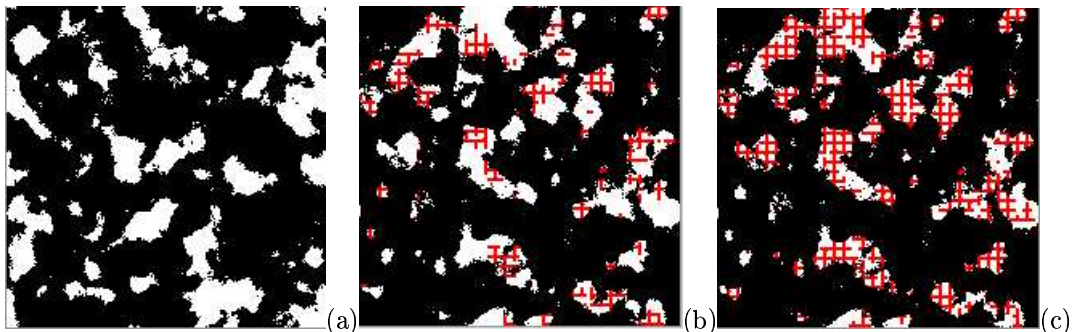


Figura 7: Seções transversais da representação reconstruída da rocha Berea 500 e o resultado do algoritmo de incrustação dendrítica com $F_{VD} = 0,9$, $d_d = 2$ voxels e $e_d = 6$ voxels. (a) representação original; (b) apresentando 10% do volume poroso incrustado; (c) apresentando 20% do volume poroso incrustado. Note que para $\sigma_r = 0.2$ os dendritos ocupam quase todo o espaço poroso.

Diversas propriedades petrofísicas podem ser calculadas a partir de uma representação tridimensional; neste estudo apenas a estabilidade da permeabilidade será determinada. Para três representações tridimensionais escolhidas ao acaso, populações de oito amostras foram geradas para cada algoritmo e conjunto parâmetros de entrada, sendo que para cada simulação a semente de números randômicos foi escolhida ao acaso. Os resultados das simulações não-incrementais (a encrustação é sempre realizada a partir da imagem original) estão listados nas tabelas 2, 3, e 4. O símbolo k_0 representa a permeabilidade da rocha sem incrustação, o símbolo $\langle k \rangle$ representa a média da permeabilidade calculada para as rochas incrustadas e o símbolo s é o desvio padrão.

Tabela 2: Resultados para conjuntos de 8 experimentos para algoritmo *pore-lining*.

Rocha	σ_r	$k_o[mD]$	$\langle k \rangle [mD]$	$s[mD]$	$2s / \langle k \rangle$	$2s / \langle k_o \rangle$
Berea 500	0,3	808,29	177,241	13,705	0,153	0,034
P320_K642	0,3	809,51	158,964	5,185	0,065	0,013
P262_K70	0,2	148,81	27,601	5,032	0,365	0,068

Tabela 3: Resultados para conjuntos de 8 experimentos para algoritmo *pore-filling* com $\phi_{BaSO_4} = 0,3$ e $F_{VA} = 0,99$.

Rocha	σ_r	$k_o[mD]$	$\langle k \rangle [mD]$	$s[mD]$	$2s / \langle k \rangle$	$2s / k_o$
Berea 500	0,1	808,29	456,687	24,162	0,106	0,06
Berea 500	0,3	808,29	62,591	18,297	0,585	0,045
P320_K642	0,1	809,51	529,557	9,885	0,037	0,024
P320_K642	0,3	809,51	103,160	11,101	0,027	0,027
P262_K70	0,1	148,81	67,131	12,55	0,374	0,169
P262_K70	0,2	148,81	19,023	10,06	1,058	0,135

Tabela 4: Resultados para conjuntos de 8 experimentos para algoritmo dendrítico com $F_{VD} = 0,9$, $d_d = 1$ e $e_d = 5$.

Rocha	σ_r	$k_o[mD]$	$\langle k \rangle [mD]$	$s[mD]$	$2s / \langle k \rangle$	$2s / k_o$
Berea 500	0,1	808,29	374,899	11,802	0,063	0,029
P320_K642	0,1	809,51	442,462	3,914	0,018	0,010
P262_K70	0,1	148,81	81,312	3,946	0,097	0,053

Para todos os experimentos as representações tridimensionais incrustadas da rocha P320_K642 apresentaram os melhores resultados, o que se deve à alta porosidade e conectividade da rocha. Os experimentos com os algoritmos *pore-lining* e dendrítico mostram uma boa estabilidade, enquanto o algoritmo *pore-filling* apresentou um desvio padrão s alto para as representações das rochas Berea 500 e P262_K70, especialmente para as representações incrustadas com menores permeabilidades. Isto se deve ao alto comprimento de correlação λ destas imagens, veja Bueno *et al.*, 2002, e à consequente baixa densidade de poros das representações, de forma que o bloqueio de uma única garganta de poro por um aglomerado de sulfato de bário pode causar uma grande variação na permeabilidade.

A conclusão é que todos os algoritmos fornecem uma estimativa estável da redução da permeabilidade inicial, o que pode ser verificado através da análise da coluna $2s / \langle k_o \rangle$. Para rochas incrustadas com baixa densidade de poros, o cálculo da permeabilidade varia muito em função da semente de geração de números randômico.

5 Conclusões

Neste trabalho modelos e algoritmos computacionais foram desenvolvidos para possibilitar a realização de simulações de incrustação por sulfato de bário em representações tridimensionais de rochas reservatório. Depois da revisão bibliográfica, três tipos diferentes de modelos de incrustação foram desenvolvidos: ao redor do poro (*pore-lining*), preenchendo o poro (*pore-filling*) e dendrítica. Os mesmos levam em consideração a influência da organização morfotológica do meio poroso, bem como a própria morfologia apresentada pelo material incrustante, sobre a redução da permeabilidade. A seguir, os diferentes modelos desenvolvidos foram avaliados. Os resultados apresentados demonstram a viabilidade de uso dos algoritmos e modelos desenvolvidos para determinação da queda de permeabilidade em função da incrustação por sulfatos (dano de formação).

Posteriormente pretende-se validar os modelos e trabalhos desenvolvidos, montando-se experimentais laboratoriais que reproduzam o fenômeno estudado em laboratório e que possibilitem a obtenção de imagens das rochas.

Nota: O artigo, Schaefer *et al.*, 2006, "Estudo das Representações Tridimensionais Encrustadas com os Algoritmos Pore-lining, Pore-filling e Dentritico" (CIT-0923), complementa este trabalho apresentando um estudo de diversas representações geradas com os modelos de incrustação aqui desenvolvidos.

6 Referências

- Allaga, D. A., Wu, G., Sharma, M. M., and Lake, L. W., 1992, Barium and Calcium Sulfate Precipitation and Migration Inside Sandpacks, "SPE", Vol. 1, No. 19765.
- Bedrikovetsky, P. G., Lopes, R. P., Rosário, F. F., Bezerra, M. C., and Lima, E. A., 2003, Oilfield Scaling - Part I: Mathematical and Laboratorial Modelling, "Society of Petroleum Engineers", Vol. 1, No. 81127.
- Bernard-Michel, B., Pons, M. N., and Vivier, H., 2002, Quantification, by Image Analysis, of Effect of Operational Conditions on Size and Shape of Precipitated Barium Sulphate, "Chemical Engineering Journal", Vol. 1, No. 87, pp. 135–147.
- 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. 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. IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas - ENCIT 2002, CIT02-0668.
- Bueno, A. D., Santos, L. O. D., Fernandes, C. P., and Philippi, P. C., 2002, Reconstrução Tridimensional da Micro-Estrutura de Rochas Reservatório a Partir de Lâminas Finas, p. 12, Caxambú - MG - Brasil. IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas - ENCIT 2002, CIT02-0671.
- Cerepi, A., Durand, C., and Brosse, E., 2002, Pore Microgeometry Analysis in Low Resistivity Sandstone Reservoirs, "Journal of Petroleum Science & Engineering", Vol. 35, pp. 205–232.
- Cerepi, A., Humbert, L., and Burlot, R., 2001, Petrophysical Properties of Porous Medium From Petrographic Image Analysis Data, "Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects", Vol. 187-188, pp. 233–256.
- Coskum, S. and Wardlaw, N., 1996, Image Analysis for Estimating Ultimate Oil Recovery Efficiency by Waterflooding for Two Sandstone Reservoirs, "Journal of Petroleum Science & Engineering", Vol. 15, No. 237250.
- Falope, G. O., Jones, A. G., and Zauner, R., 2001, On Modelling Continuous Agglomerative Crystal Precipitation Via Monte Carlo Simulation, "Chemical Engineering Science", , No. 56, pp. 2567–2574.
- Hennessy, A. J. B. and Graham, G. M., 2002, The effect of additives on the co-crystallisation of calcium with barium sulphate, Edinburgh, EH14 4AS, UK.
- James, R., 1995, Application of Petrographic Image Analysis to the Characterization of FluidFlow Pathways in a HighlyCemented Reservoir: Kane Field, Pennsylvania, U.S.A., "Journal of Petroleum Science & Engineering", Vol. 13, No. 141154.
- Kameda, A., 2004, "Permeability Evolution in Sandstone: Digital Rock Approach", Tese de doutorado, Stanford University.
- Keehm, Y., 2003, "Computational Rock Physics: Transport Properties in Porous Media and Applications", Tese de doutorado, Stanford University.
- Lock, P., Jing, X., Zimmerman, R., and Schlueter, E., 2002, Predicting the Permeability of Sandstone from Image Analysis of Pore Structure, "Journal of Applied Physics", Vol. 92, No. 10.
- Marchisio, D. L., Baresi, A. A., Garbero, M., and Baldi, G., 2002, Study of Aggregation in Barium Sulphate Precipitation, number 171. 15th International Symposium on Industrial Crystallization.
- Nancollas, G. H. and Liu, B. T., 1975, Crystal Growth and Dissolution of Barium Sulphate, "SPE", , No. 5300.
- Oren, P. E. and Bakke, S., 2002, Process Based Reconstruction of Sandstones and Prediction of Transport Properties, "Transport in Porous Media", Vol. 46, pp. 311–343.
- Schaefer, T. R., Bueno, A. D., and Bedrikovetsky, P., 2006, Estudo das Representações Tridimensionais Encrustadas com os Algoritmos Pore-lining, Pore-filling e Pore-bridging, p. 10, Curitiba - Paraná.
<http://www.lenep.uenf.br/bueno/Artigos>.
- Siqueira, A. G., BONET, E. J., and Shecaira, F. S., 2003, A 3D Network Model of Rock Permeability Impairment Due to Suspended Particles in Injection Water, "SPE", , No. 82232.
- Sorbie, K. S. and Mackay, E. J., 2000, Mixing of Injected, Connate and Aquifer brines in Waterflooding and its Relevance to Oilfield Scaling, "Journal of Petroleum Science and Engineering", , No. 27.
- Todd, A. C. and Yuan, M. D., 1992, Barium and Strontium Sulfate Solid-Solution Scale Formation at Elevated Temperatures, "SPE", , No. 19762.
- Wat, R. M. S., Sorbie, K. S., Todd, A. C., Chen, P., and Jiang, P., 1992, Crystal Growth and Dissolution of Barium Sulphate, "SPE", , No. 23814.

Modelling and Simulating Permeability Impairment Due to Scale in Tridimensional Reconstructed Reservoir Rocks

Schaewer T.R. - tschaewer@lenep.uenf.br

Bueno A.D. - bueno@lenep.uenf.br

Bedrikovetsky P. - pavel@lenep.uenf.br

Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo - LENEP (<http://www.lenep.uenf.br>)

Abstract. *Barium sulphate scaling is a chronicle problem in the Campos Basin, where the most usual secondary recovery technic is waterflooding (which corresponds to 85% of total oil volume produced). $BaSO_4$ scale deposition occurs when the injected water, rich in sulphate ions, is mixed with the formation water, rich in barium ions, resulting in solid precipitate accumulation in the wellbore, well tubings and near wellbore formation. The problem is further aggravated by the hardness and low solubility of the salt, as well as the formation damage which occurs near the production well, where the mixing between the incompatible waters is more intense. Other sulphates, such as $SrSO_4$, also cause the same problem. In this work, new models and algorithms to simulate sulphate scaling in reconstructed reservoir rocks are presented. Tridimensional reconstructed rocks are obtained from high resolution images of thin sections of rocks found in brazilian basins (contributed by CENPES). These reconstructed rocks are numerically scaled and permeability is then calculated by the serial connection graph, allowing the determination of the injectivity index impairment as a function of the total volume precipitated.*

The proposed models consider the influence of the geometric and topological organization of the porous media, as well as the morphology of the scaling phase itself. Three different scaling models were designed: pore-lining, pore-filling and dendritic. Analysis of the simulation results made it possible to assess effects over permeability reduction (formation damage). The main advantage of the proposed approach is the possibility to use small rock samples, like drill cuttings and sidewall samples, which can be obtained by a small fraction of the of a full core. Another benefit is that destructive laboratorial experiments are replaced by fully reproducible computer simulations.

Keywords. scaling, formation damage, image analysis, stochastic 3D reconstruction, permeability.