

EFEITO DE ORIENTAÇÃO DA MALHA EM SIMULAÇÃO DE RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO

Fernando Vidal Cruz

Universidade Federal do Ceará. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção - Bloco 714. Campos do Pici – CEP.: 60.455-860 – Caixa Postal: 12.144 – Fortaleza – Ceará. frndvycz@yahoo.com.br

Josegil Jorge Pereira de Araújo

Universidade Federal do Ceará. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção - Bloco 714. Campos do Pici – CEP.: 60.455-860 – Caixa Postal: 12.144 – Fortaleza – Ceará. josegilaraujo@yahoo.com.br

Francisco Marcondes

Universidade Federal do Ceará. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção - Bloco 714. Campos do Pici – CEP.: 60.455-860 – Caixa Postal: 12.144 – Fortaleza – Ceará. marconde@dem.ufc.br

Resumo. *Um assunto primordial em processos de recuperação de petróleo é a captura da frente do traçador. Se funções de interpolação de primeira ordem do tipo UDS (Upstream Difference Scheme) são usadas, torna-se necessário o emprego de malhas extremamente finas para a correta captura da frente, já que o emprego de malha grosseira introduz uma grande quantidade de difusão numérica, comprometendo, assim, a qualidade da solução. A difusão numérica causa duas importantes manifestações: 1) as frentes são amortecidas e ocupam um grande número de volumes, resultando em enormes erros nas previsões importantes do reservatório e 2) distorção da forma da frente, causando o famoso efeito de orientação, tornando os dados obtidos muito dependentes da malha empregada. Ambos fenômenos são, de um modo ou de outro, relacionados com a magnitude da difusão numérica. Uma possível solução para esse problema é o emprego de esquemas de ordem superior ou igual para os dois, por exemplo, o CDS – Central Difference Scheme, sem introduzir difusão numérica. Entretanto, como estes esquemas não são limitados, podem gerar oscilações numéricas na solução, quando o número de Peclet da malha é maior que dois. Uma das metas desse trabalho é o estudo do comportamento da frente do traçador usando as funções de interpolação UDS e CDS-deferido.*

Palavras-chave: reservatórios de petróleo, transporte de traçador, função de interpolação, Método dos Volumes Finitos

1. INTRODUÇÃO

O transporte de um traçador na corrente de fluido é utilizado na área de reservatórios de petróleo para identificar possíveis falhas geológicas, limites do reservatório, etc. O processo geralmente consiste na injeção de um fluido inerte (traçador) e o monitoramento do tempo para o traçador alcançar os poços de produção.

Este problema pode ser modelado como o transporte convectivo-difusivo do traçador ao longo do meio poroso. Do ponto de vista numérico, a grande dificuldade da solução deste problema ocorre quando o número de Peclet da malha é elevado. Neste caso, se funções de primeira ordem forem

empregadas para a aproximação dos fluxos convectivos do traçador a solução numérica obtida apresenta um elevado índice de difusão numérica, Maliska (1995). Por outro lado, funções de alta ordem do tipo CDS ou QUICK (Leonard (1979)) causam oscilações numéricas, caso o Peclet de malha seja maior do que 2, Marcondes et al. (1999). Uma solução para este problema pode ser o emprego de funções de alta ordem limitadas do tipo TVD (Total Variation Diminishing), Rubin e Blunt (1991), Pinto (1991) e Mota e Maliska (1994), dentre outros. O grande problema do emprego de funções do tipo TVD é o cálculo dos limitadores de fluxo. De acordo com Ferziger e Peic (1996) as oscilações numéricas são reduzidas mais rapidamente do que a difusão numérica com o refino da malha. De acordo com estes autores, um esquema que mantém a dominância diagonal da matriz dos coeficientes e ao mesmo tempo reduz a dispersão é o esquema de alta ordem deferido. Neste esquema, a parcela de alta ordem é mantida no termo fonte e somente a parcela de primeira ordem é mantida na matriz dos coeficientes. O fato da parcela de ordem elevada ser mantida no termo fonte não garante a eliminação das oscilações numéricas. Existe um peso variando de 0 a 1, que pode ser testado a fim de que soluções sem oscilações numéricas sejam obtidas. Evidentemente, isto é equivalente ao limitador de fluxo típico dos esquemas TVD, só que fixo, para todo o domínio de cálculo. Grande parte dos trabalhos anteriormente citados empregam malhas cartesianas para a obtenção das equações aproximadas e, evidentemente, o emprego de funções de primeira ordem originam mais difusão numérica pelo fato do escoamento não estar alinhado com a malha.

Uma outra opção que reduz significativamente a difusão numérica é o emprego de malhas que estejam alinhadas com o escoamento. Neste sentido, podemos citar os trabalhos de Sharpe e Anderson (1991) e Maliska et al. (1994) que empregam coordenadas generalizadas. Outra rota possível, e também com o objetivo do emprego de uma malha mais alinhada com o escoamento, é o emprego de malhas não-estruturadas, Maliska e Maliska Jr. (1994), Heinemann and Brand (1988), Palagi (1992), Marcondes et al. (1995), Baliga e Patankar (1983), Fung et al. (1991), dentre outros. Os dois últimos trabalhos constroem os volumes de controle unindo o centróide de cada elemento triangular com a mediana de cada lado do triângulo por uma reta. Os outros trabalhos empregam um tipo especial de malha não-estruturada denominada de malhas de Voronoi. Evidentemente, que mesmo nestes tipos de malha ainda é possível o emprego de um esquema de alta ordem deferido. Destaca-se que o objetivo é aliar funções de alta ordem que reduzam a difusão numérica, com o emprego de malhas que se alinhem o mais próximo possível do escoamento.

O presente trabalho investiga o emprego do esquema deferido utilizando como esquema de alta ordem o esquema CDS. As equações de conservação da massa escrita em termos da pressão da fase água e a de transporte do traçador serão resolvidas pelo método dos volumes finitos. Serão empregadas apenas malhas cartesianas para a discretização do domínio de cálculo. As soluções em termos de perfil de concentração serão confrontadas com aquelas obtidas com o emprego do esquema UDS, CDS-deferido e soluções disponíveis na literatura.

2. MODELO MATEMÁTICO

O problema em estudo envolve a determinação do campo de pressão e em seguida o campo de concentração do traçador é obtido. A equação de conservação da massa, para o caso monofásico, considerando a compressibilidade da água pequena e constante, a densidade da água e a permeabilidade absoluta do meio constantes, é dada por

$$\frac{\phi \mu c_t}{k} \frac{\partial P}{\partial t} = \nabla \cdot (\nabla P) + \frac{\mu}{k} \bar{q} \quad (1)$$

onde, c_t é a compressibilidade total, \bar{q} é a vazão volumétrica por unidade de volume do reservatório, μ é a viscosidade da fase água, ϕ e k , denotam respectivamente a porosidade e a permeabilidade absoluta do meio poroso. A Eq. (1) é resolvida com as seguintes condições de contorno e inicial.

$$\left. \frac{\partial P}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial P}{\partial x} \right|_{x=L_x} = \left. \frac{\partial P}{\partial x} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial P}{\partial x} \right|_{L_y=0} = 0 \quad (2)$$

$$P(x, y, t = 0) = P_o \quad (3)$$

onde, L_x e L_y denotam os comprimentos do reservatório nas direções x e y , respectivamente. Após a obtenção do campo de pressões, o campo de velocidades é obtido via lei de Darcy

$$\vec{V} = -\frac{k}{\mu} \nabla P \quad (4)$$

Salienta-se que o termo transiente na Eq. (1) foi mantido apenas para avançar a solução no tempo e obter o campo de pressões em regime permanente. A equação transiente de transporte do traçador é dada por Lake (1989)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi C) + \frac{\partial}{\partial x}(u C) + \frac{\partial}{\partial y}(v C) = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \bar{q} C \quad (5)$$

onde, C é a concentração do traçador, D_{xx} , D_{xy} , D_{yx} e D_{yy} são as componentes do tensor dispersão. No presente trabalho foram empregados dois modelos para o tensor dispersão. No caso mais simples, denotado aqui de modelo 1, as componentes do tensor são dadas por

$$D_{xx} = \frac{\alpha |u|}{\phi} \quad D_{xy} = D_{yx} = 0; \quad D_{yy} = \frac{\alpha |v|}{\phi} \quad (6)$$

onde, α é a dispersividade do traçador. O segundo modelo considera o tensor dispersão completo, Lake (1989)

$$D_{xx} = \frac{(\alpha_l - \alpha_t)}{\phi \sqrt{u^2 + v^2}} u^2 + \alpha_t \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{\phi}; \quad D_{xy} = D_{yx} = \frac{(\alpha_l - \alpha_t)}{\phi \sqrt{u^2 + v^2}} |u v|; \quad D_{yy} = \frac{(\alpha_l - \alpha_t)}{\phi \sqrt{u^2 + v^2}} v^2 + \alpha_t \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{\phi} \quad (7)$$

A Equação (5) é resolvida com as seguintes condições de contorno e inicial

$$\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=L_x} = \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{L_y=0} = 0 \quad (8)$$

$$C(x, y, t = 0) = 0 \quad (9)$$

Tem-se ainda que no poço de injeção $C = C_{\text{injeção}}$.

3. TRATAMENTO NUMÉRICO

Integrando-se a Eq. (1) no volume de controle da Fig. (1) e no tempo e empregando o teorema da divergência, obtém-se

$$\int (P^{n+1} - P^n) dx dy = \int_s^n \left. \frac{\partial P}{\partial x} \right|_e dy - \int_s^n \left. \frac{\partial P}{\partial x} \right|_w dy + \int_w^n \left. \frac{\partial P}{\partial y} \right|_n dx - \int_w^n \left. \frac{\partial P}{\partial y} \right|_s dx + \frac{\mu}{k} q \quad (10)$$

onde, q representa a vazão volumétrica e n denota o instante de tempo.

Avaliando as derivadas presentes na Eq. (9), via CDS, obtém-se a seguinte equação para o avanço da pressão

$$A_p P_p = A_e P_e + A_w P_w + A_n P_n + A_s P_s + B_p \quad (11)$$

Os coeficientes na Eq. (11) podem ser facilmente determinados, Maliska (1995).

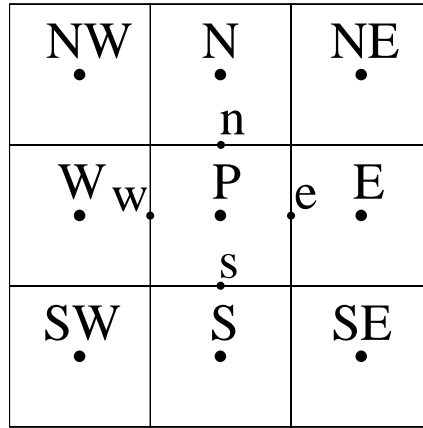


Figura 1. Volume de controle

Resolvida a Eq. (11) para a pressão, pode-se obter o campo de velocidades empregando a lei de Darcy. Deve ser observado que as velocidades são obtidas nas interfaces do volume de controle. Integrando-se a Eq. (5) no volume de controle da Fig. (1) e no tempo, obtém-se

$$\begin{aligned} & \phi \left(\frac{C_p - C_p^o}{\Delta t} \right) \Delta x \Delta y + (uC|_e - uC|_w) \Delta y + (vC|_n - vC|_s) \Delta x = \\ & \phi \left(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_e - D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_w \right) \Delta y + \phi \left(D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_e - D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_w \right) \Delta y + \\ & \phi \left(D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_n - D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_s \right) \Delta x + \phi \left(D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_n - D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_s \right) \Delta x + \frac{q}{h} C_p \end{aligned} \quad (12)$$

onde, h denota a espessura do reservatório. Todos os fluxos difusivos serão aproximados pelo esquema CDS. Para avaliar a concentração do traçador nas interfaces do volume de controle P será empregado os esquemas UDS e deferido. No esquema UDS a concentração na interface leste, por exemplo, é dada por

$$\begin{aligned} C_e &= C_p \quad \text{se } u_e > 0 \\ C_e &= C_E \quad \text{se } u_e < 0 \end{aligned} \quad (13)$$

O esquema deferido é uma mistura de um esquema de primeira ordem, na maioria dos casos UDS, e um esquema de alta ordem. No presente trabalho, é empregado como esquema de alta ordem o esquema CDS. Tomando, novamente, a interface leste do volume de controle P , pode-se escrever

$$C_e = C_e^{UDS} + \phi(C_e^{CDS} - C_e^{UDS})^o \quad (14)$$

ϕ é o coeficiente de relaxação, podendo variar de 0 a 1, e $(C^{CDS} - C^{UDS})^o$ representa os esquemas CDS e UDS no nível de tempo anterior. Assumindo espaçamento constante ao longo de x e $u > 0$, pode-se escrever,

$$C_e = C_p + \phi \left[\left(\frac{C_e^o + C_p^o}{2} \right) - C_p^o \right] \quad (15)$$

Deve ser destacado que a estrutura da matriz dos coeficientes é idêntica para os esquemas UDS e CDS-deferido, uma vez que, apenas a parcela de primeira ordem é incluída na matriz dos coeficientes. O termo de segunda-ordem é avaliado com valores do instante de tempo anterior e portanto é adicionado ao lado direito do sistema linear. Este processo facilita a solução do sistema linear visto que o sistema linear é diagonalmente dominante.

Substituindo-se as Eqs. (14) ou (15) na Eq. (12), realizando o mesmo procedimento para as outras interfaces do volume P , assumindo que as velocidades em cada interface são positivas, obtém-se a seguinte equação para o avanço de C no tempo

$$A_p C_p = A_e C_e + A_w C_w + A_n C_n + A_s C_s + A_{ne} C_{ne} + A_{nw} C_{nw} + A_{se} C_{se} + A_{sw} C_{sw} + B_c \quad (16)$$

onde A_p , A_e são dados por,

$$A_p = \frac{\phi \Delta x \Delta y}{\Delta t} + u_e \Delta y + v_n \Delta x + \frac{\phi D_{xx_e} \Delta y}{\Delta x} + \frac{\phi D_{xx_w} \Delta y}{\Delta x} + \frac{\phi D_{yy_n} \Delta x}{\Delta y} + \frac{\phi D_{yy_s} \Delta x}{\Delta y} \quad (17)$$

$$A_e = \frac{\phi D_{xx_e} \Delta y}{\Delta x} + \frac{\phi D_{yy_n} \Delta x}{4} - \frac{\phi D_{yy_s} \Delta x}{4} \quad (18)$$

B_c , no lado direito da Eq. (16), para o CDS-deferido, é dado por

$$B_c = \frac{\phi \Delta x \Delta y}{\Delta t} C_p^o - u_e \Delta y \phi \frac{C_e^o - C_p^o}{2} + u_w \Delta y \phi \frac{C_p^o - C_w^o}{2} - v_n \Delta x \phi \frac{C_n^o - C_p^o}{2} + v_s \Delta x \phi \frac{C_p^o - C_s^o}{2} \quad (19)$$

e para o UDS

$$B_c = \frac{\phi \Delta x \Delta y}{\Delta t} C_p^o \quad (20)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados do reservatório para o caso 1, tensor dispersão simplificado, são apresentados na Tab. (1).

A Fig. (2) apresenta os perfis de concentração ao longo da linha injetor-produtor para 0,5 VPI considerando a injeção contínua do traçador no poço de injeção. Desta figura pode-se perceber que o esquema CDS-deferido com $\phi = 0,9$ não produziu oscilações, apesar do Peclet de malha ($Pe_\Delta = \Delta x / \alpha$) ser igual a 2,23. Pode-se observar ainda que o CDS-deferido com a malha 30x30 é praticamente independente da malha, uma vez que, esta solução é quase coincidente com aquela obtida com o CDS-deferido com as malhas 60x60 e 100x100. O esquema UDS, apresenta uma

solução próxima daquela obtida com o CDS-deferido com malha 60x60 somente para a malha 100x100.

Tabela 1. Dados de reservatório – Caso 1

| | |
|--|---------------------------|
| Pressão inicial, P_o (KPa) | 1378,8 |
| Comprimento, L_x (m) | 300 |
| Largura, L_y (m) | 300 |
| Vazão injetada, q_{inj} (m ³ /d) | 500 |
| Pressão de fundo de poço, P_{wf} (Kpa) | 689,4 |
| Permeabilidade, k (μ m ² (200 mD)) | 0,1974 |
| Espessura, h (m) | 1 |
| Porosidade, ϕ (1 cp) | 0,2 |
| Viscosidade da água, μ (mPa s (1 cp)) | 1 |
| Compressibilidade total, c_T (KPa ⁻¹) | 0,145 x 10 ⁻²⁰ |
| Raio do poço, r_w (m) | 0,122 |
| Volume Poroso Injetado, VPI | 0,5 |
| Dispersividade, α (m) | 4,243 |

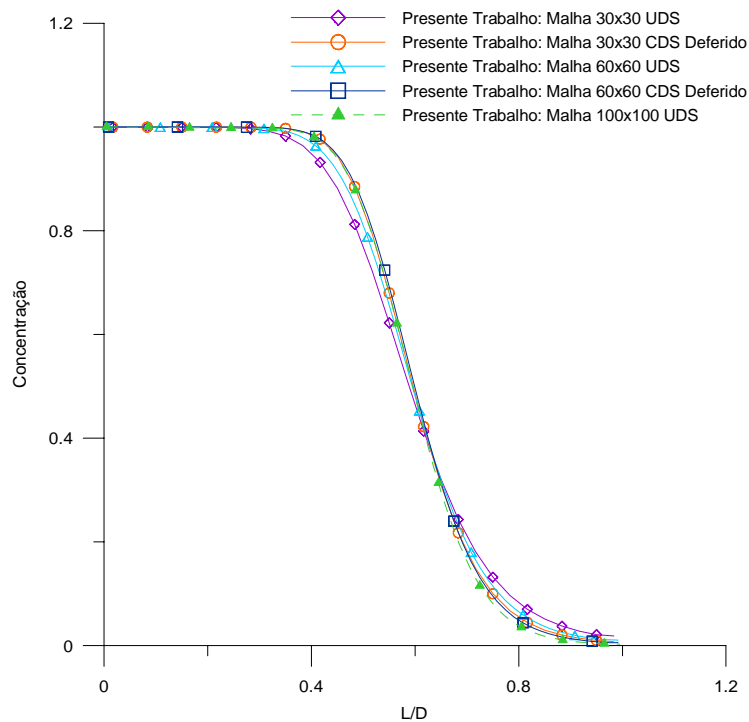


Figura 2. Concentração ao longo da linha injetor-produtor para 0.5 VPI – Injeção contínua – caso 1

Com o intuito de demonstrar o efeito da função de interpolação no perfil de concentração, apresenta-se na Fig. (3) o perfil de concentração no poço de produção, considerando-se agora a injeção do traçador somente para 0,4 VPI. Os dados empregados na simulação foram os mesmos da Tab.(1), excetuando o valor da dispersividade que neste caso foi de 7,5 m. Estão presentes também na Fig. (3) os dados experimentais obtidos para este caso por Santos et al. (1992) e os resultados numéricos obtidos por Maliska Jr. e Maliska (1994) empregando malhas de Voronoi. Da Fig. (3) pode-se perceber, novamente o efeito da difusão numérica adicionada a solução pelo esquema UDS, causando portanto, o achatamento do pico máximo de concentração do traçador. Novamente o esquema CDS-deferido produziu soluções excelentes mesmo com a utilização de malhas bastante grosseiras.

Com o intuito de se resolver um caso mais complexo, apresenta-se na Tab. (2), os dados do reservatório considerando o tensor completo obtidos de Pinto (1991). Neste caso, para que fosse possível comparar os resultados numéricos com uma solução analítica disponível Pinto (1991) desprezou a dispersividade transversal.

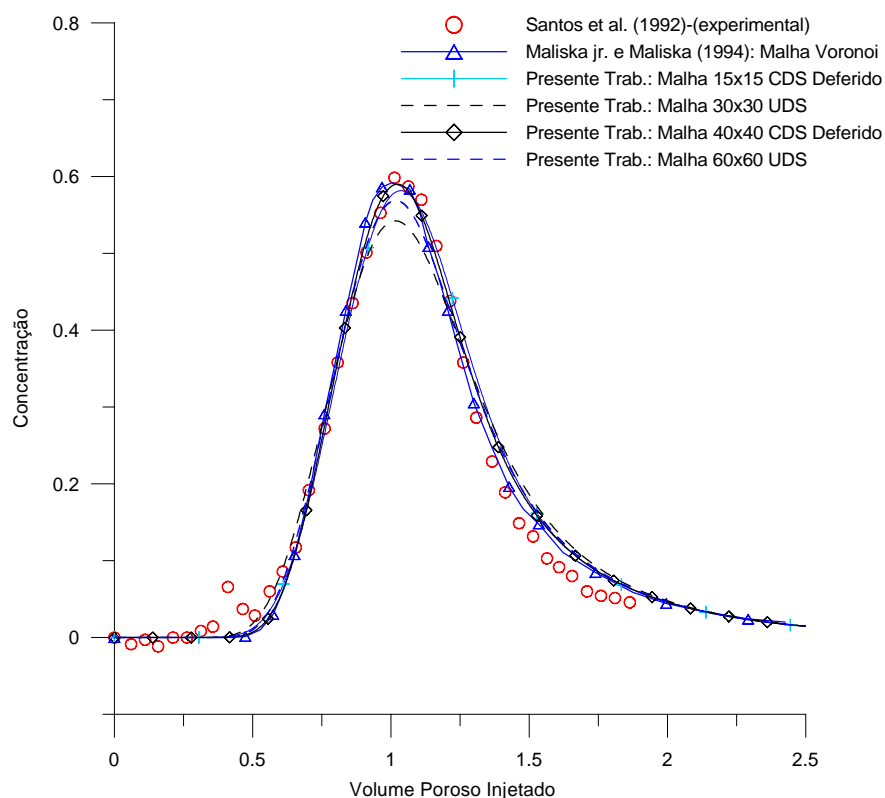


Figura 3. Concentração no poço de produção em 0,4 VPI – Caso 1

A Fig. (4) apresenta os perfis de concentração no poço de produção para a injeção de um pulso de traçador correspondente a 0,02 VPI. Novamente percebe-se que o esquema CDS-deferido produziu solução bastante próxima da solução analítica com malhas razoavelmente grosseiras. Enquanto que o UDS apresentou o achatamento do perfil, mesmo com malhas bastante refinadas. Salienta-se que as soluções obtidas por Pinto empregando esquema TVD com malhas cartesianas são bastante próximas daquelas mostradas na Fig. (4).

Tabela 2. Dados de reservatório – Caso 2

| | |
|--|-------------------------|
| Pressão inicial, P_o (KPa) | 1378.8 |
| Comprimento, L_x (m) | 50.29 |
| Largura, L_y (m) | 50.29 |
| Vazão injetada, q_{inj} (m ³ /d) | 10.62 |
| Pressão de fundo de poço, P_{wf} (Kpa) | 689,4 |
| Permeabilidade, k (μ m ² (200 mD)) | 0,1974 |
| Espessura, h (m) | 1,524 |
| Porosidade, ϕ (1 cp) | 0,25 |
| Viscosidade da água, μ (mPa s (1 cp)) | 1 |
| Compressibilidade total, c_T (KPa ⁻¹) | $0,145 \times 10^{-20}$ |
| Raio do poço, r_w (m) | 0,122 |
| Dispersividades, α_l / α_t (m) | 0,201 / 0,000 |

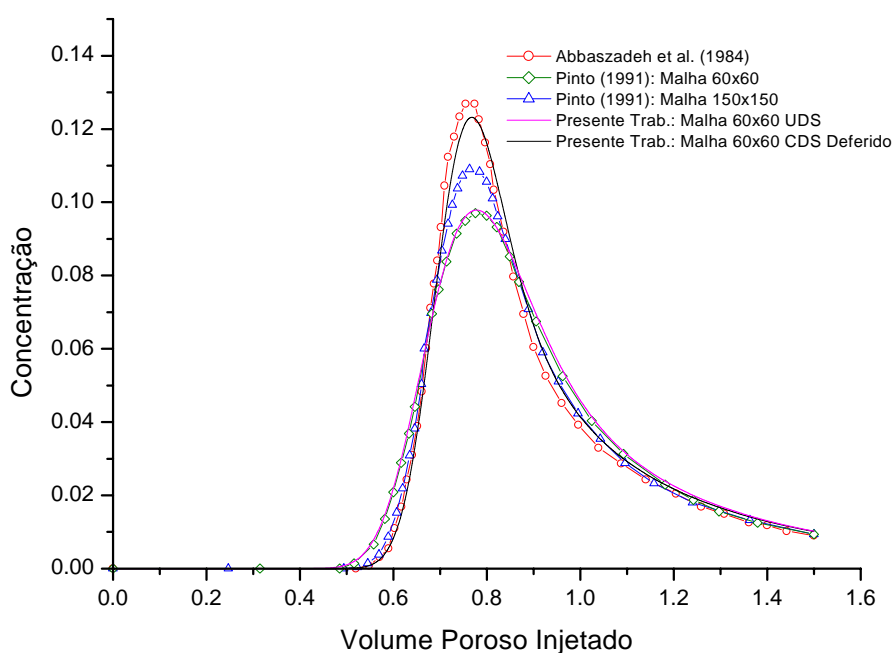


Figura 4. Concentração no poço de produção em 0,02 VPI – Caso 2

5. CONCLUSÃO

No presente trabalho realizou-se um estudo das funções de interpolações CDS-deferido e UDS em processos de injeção de traçadores em reservatórios de petróleo. As equações governantes foram discretizadas via métodos dos volumes finitos e foram empregadas malhas cartesianas para discretização do domínio. Os resultados demonstraram que o esquema CDS-Deferido reduziu a difusão numérica para os problemas de injeção contínua do traçador em um meio poroso homogêneo, bem como nos problemas injeção de um pulso considerando o meio poroso homogêneo

ou heterogêneo. Os resultados demonstram que para 0,25 VPI para o caso da injeção contínua do traçador o esquema CDS-deferido, com o coeficiente de relaxação de 0,9, não produziu oscilações, apesar do Peclet da malha ser superior a 2,0. O CDS-deferido com uma malha 30x30 apresentou resultados praticamente independentes da malha. O esquema UDS mesmo empregando uma malha 100x100 ainda apresentou diferenças consideráveis no perfil de concentração. Para o problema do pulso em um meio poroso homogêneo, o esquema CDS-deferido mesmo com uma malha 15x15 produziu um perfil de concentração bastante próximo dos resultados experimentais disponíveis. O esquema UDS por sua vez apresentou resultados inferiores aos anteriormente citados com uma malha 60x60. Comportamento similar foi obtido para o problema do pulso considerando o meio poroso heterogêneo. De uma forma geral, os resultados obtidos no presente trabalho demonstram que o esquema CDS-deferido reduz a difusão numérica e as oscilações numéricas típicas dos esquemas de alta ordem não limitados, para número de Peclet maior que 2. Portanto, esse esquema apresenta-se como uma solução viável para a solução de escoamentos mais complexos e com difusão pequena, um exemplo típico é o caso do escoamento bifásico em reservatórios de petróleo com pressão capilar reduzida.

6. REFERÊNCIAS

- Baliga, B. R. and Patankar, S. V., 1983, "A Control-Volume Finite Element Method for Two-Dimensional Fluid Flow and Heat Transfer", *Numer. Heat Transfer*, 6, pp. 245-261.
- Ferziger, J. H. e Peic, M., 1996, "Computational Methods for Fluid Dynamics", Springer, pp. 76-77.
- Fung, L. S. K., Hiebert, A. D. and Nghiem, L., 1991, "Reservoir Simulation with a Control-Volume Finite-Element Method", artigo SPE 21224, Eleventh SPE Symposium on Reservoir Simulation, Anaheim.
- Heinemann, Z. E. e Brand, C. W., 1988, "Gridding Construction for Reservoir Simulation", First International Forum on Reservoir Simulation, Alpach, Australia.
- Lake, L. W., 1989, "*Enhanced Oil Recovery*", Prentice-Hall Inc., New Yprk, USA.
- Leonard, B. P., 1979, "A stable and accurate convection modelling procedure based on quadratic upstream interpolation", pp. 59-98.
- Maliska, C. R. e Maliska Jr., C. R., 1994, "A Finite Volume Method Using Voronoi Grids for the Solution of Miscible Displacement in Porous Media", V Encontro Nacional de Ciências Térmicas, São Paulo, pp. 355-358.
- Maliska, C. R., 1995, "Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional", Livros Técnicos e Científicos Editora S. A. - LTC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Maliska, C. R., Cunha, A. R., Livramento M. A. e Silva, A. F. C., 1994, "Tridimensional Petroleum Reservoir Simulation Using Generalized Curvilinear Grids", V ENCIT, São Paulo, pp. 363-366.
- Marcondes, F., Rodrigues, L. S. e Leite, A. P., 1999, "Comparação de Diversas Funções de Interpolação na Solução de Problemas de Convecção-Difusa, IV CIDIM, Santiago, Chile.
- Marcondes, F., Zambaldi, M. C. e Malisca, C. R., 1995, "Comparação de Métodos Estacionários em Malhas Não Estruturadas na Solução de Problemas de Petróleo, COBEM-CIDIM/95, Belo Horizonte, Brasil.
- Marcondes, F., Zambaldi, M. C. e Malisca, C. R., 1999, "Comparação de Diversas Funções de Interpolação na Solução de Problemas de Convecção-Difusão", CIDIM-99, Santiago, Chile.
- Mota, M. A. A. e Maliska, C. R., 1994, "Simulação Numérica de Reservatórios de Petróleo Utilizando Coordenadas Generalizadas e Interpolação TVD", V ENCIT, São Paulo, SP, pp. 325-328.
- Palagi, C., 1992, "Generation and Application of Voronoi Grid to Model Flow in Heterogeneous Reservoirs", PhD dissertation, Stanford University, Stanford.
- Pinto, A. C. C., 1991, "Esquema de Alta Resolução Para Controle de Dispersão Numérica em Simulação de Reservatório", Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP.
- Rubin, B. and Blunt, M. J., 1991, "High-Order Implicit Flux Limiting Schemes for Black-Oil Simulation", artigo SPE 21222, Eleventh SPE Symposium on Reservoir Simulation, Anaheim, pp. 219-229.
- Santos, R. L. A., Pedrosa Jr., O. A. e Corrêa, A. C. F., 1992, "Na Efficient Finite-Volume Approach for Modelling Miscible Displacement", II Latin-American Petroleum Engineering Conference, Caracas, Venezuela.

Sharpe, H. N. e Anderson, D. A., 1991, "Orthogonal Curvilinear Grid Generation with Present Internal Boundaries for Reservoir Simulation", pp. 323-339.

GRID ORIENTATION EFFECT IN PETROLEUM RESERVOIR SIMULATION

Fernando Vidal Cruz

Universidade Federal do Ceará. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção - Bloco 714. Campos do Pici – CEP.: 60.455-860 – Caixa Postal: 12.144 – Fortaleza – Ceará. frndvlcz@yahoo.com.br

Josegil Jorge Pereira de Araújo

Universidade Federal do Ceará. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção - Bloco 714. Campos do Pici – CEP.: 60.455-860 – Caixa Postal: 12.144 – Fortaleza – Ceará. josegilaraujo@yahoo.com.br

Francisco Marcondes

Universidade Federal do Ceará. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção - Bloco 714. Campos do Pici – CEP.: 60.455-860 – Caixa Postal: 12.144 – Fortaleza – Ceará. marconde@dem.ufc.br

Abstract. *An important issue in petroleum reservoir simulation is the correct determination of the tracer concentration front. If first order interpolation functions such as UDS (Upstream Difference function) are employed it will be necessary to use meshes with a large number of points due to the large amount of numerical diffusion introduced to the numerical solution. The numerical diffusion causes two important effects to the numerical solution. First, the concentration front is smeared out predicting large errors in several important characteristics of the reservoir. Also, the numerical results are strongly dependent on the size of the employed mesh. Both effects are related to the magnitude of numerical diffusion. One possible option to reduce the numerical diffusion is the use of high order interpolation functions such as CDS (Central difference scheme). Despite of eliminating the numerical diffusion this interpolation function can produce numerical wiggles when the mesh Peclet number is larger than 2 since they are not limited. One possible choice is the use of a high order scheme in a deferred way. The goal of the present work is to investigate the numerical behavior of tracer concentration front using the UDS and CDS-deferred schemes.*

Keywords: *Petroleum reservoir, Tracer transport, Interpolation function, Finite-Volume method.*