

EFEITOS DA PRESENÇA DE SAL NA ADSORÇÃO DE POLÍMEROS EM PROCESSOS QUÍMICOS DE RECUPERAÇÃO AVANÇADA DE PETRÓLEO

Pollyanna Medeiros Fonte Boa

Universidade Estadual do Norte Fluminense
Rod. Amaral Peixoto, km. 163 - Av. Brennand s/n
Imboassica - 27925-310
Macaé / RJ
pollyanna@lenep.uenf.br

Adolfo Puime Pires

Universidade Estadual do Norte Fluminense
Rod. Amaral Peixoto, km. 163 - Av. Brennand s/n
Imboassica - 27925-310
Macaé / RJ
puime@lenep.uenf.br

Resumo. Os métodos de recuperação avançada de petróleo podem ser classificados em químicos, miscíveis e térmicos. Os produtos químicos dissolvidos em água comumente injetados são polímeros, surfactantes e soluções micelares. O deslocamento de óleo por esses fluidos envolve complexos processos físico-químicos. A injeção de água contendo polímeros pode aumentar a razão de mobilidade e a eficiência de deslocamento de óleo. O sistema de equações diferenciais parciais hiperbólicas que governa o deslocamento de óleo por água contendo duas espécies químicas em solução é formado por três equações. Recentemente foi mostrado que esse sistema pode ser dividido em uma parte hidrodinâmica (uma equação) e uma parte termodinâmica (duas equações). A parte termodinâmica é independente da equação hidrodinâmica e depende apenas das isotermas de adsorção, não das propriedades de transporte (permeabilidades relativas e viscosidades). Neste artigo apresentamos a solução para o problema unidimensional do deslocamento de óleo por água contendo polímeros na presença de sal. Também é descrita a solução para diferentes condições inicial e de injeção para o caso de uma isoterma de adsorção do tipo Langmuir considerando os efeitos da presença de sal. Os resultados deste trabalho podem ser aplicados em campos maduros e validação de programas de simulação de reservatórios.

Palavras chave: engenharia de reservatórios, recuperação avançada de petróleo, métodos químicos de recuperação, injeção de polímeros, leis da conservação.

1. Introdução

O maior desafio da engenharia de reservatórios é a incorporação de maiores e crescentes reservas de petróleo e gás natural, seja através do desenvolvimento de novas jazidas ou do aumento do fator de recuperação de campos já em produção. Em ambos os casos, os métodos de recuperação secundária e terciária representam um papel importantíssimo para a obtenção dos resultados desejados (Pires, 2003).

A produção de petróleo através de mecanismos naturais, tais como gás em solução, capa de gás, influxo de água e drenagem gravitacional é denominada recuperação primária. A recuperação secundária refere-se a técnicas, como injeção de água ou gás, cujo propósito normalmente é manter a pressão do reservatório em algum nível desejado. Não é necessário esperar o declínio total da produção para começar a injeção de fluidos no reservatório, recomenda-se que a injeção seja iniciada bem antes que isso aconteça. Os métodos de recuperação secundária são aplicados mesmo havendo condições de produção com recuperação primária.

A recuperação avançada de petróleo, ou EOR (*Enhanced Oil Recovery*), caracteriza-se pela injeção de materiais normalmente estranhos aos presentes no reservatório. Um ponto importante é que essa definição não vincula a sua utilização a uma fase em particular na vida do reservatório. Essa definição praticamente não enquadra a injeção de água e tem por objetivo excluir os processos de manutenção de pressão (Lake, 1989). A recuperação avançada de petróleo também pode ser considerada como uma técnica que modifica características do meio, alterando as permeabilidades relativas ou viscosidades das fases e aumentando a recuperação de petróleo.

Com o declínio da descoberta de novos campos de grandes extensões, a mais provável fonte para ampliação das reservas é o desenvolvimento e aplicação de tecnologias que aumentem o fator de recuperação dos campos já descobertos. Assim, o alvo dos processos especiais de recuperação é a parcela restante de óleo nos reservatórios após a recuperação convencional. Emprega-se um método especial de recuperação para atuar nos pontos onde o processo convencional falhou, ou falharia caso fosse usado. As baixas recuperações podem ser creditadas a dois aspectos principais: alta viscosidade do óleo no reservatório e elevadas tensões interfaciais entre o fluido injetado e o óleo.

Quando a viscosidade do fluido injetado é muito menor que a do fluido a ser deslocado, o primeiro se move muito mais facilmente no meio poroso, encontrando caminhos preferenciais e se dirigindo rapidamente para os poços de produção. O óleo fica retido porque o fluido injetado não se propaga adequadamente no reservatório, permanecendo grandes volumes de rocha nos quais o deslocamento não se processou. A injeção de polímeros, por exemplo, reduz a mobilidade da fase aquosa, melhorando a eficiência do deslocamento. Seu desempenho em reservatórios de petróleo é fortemente influenciado pela presença de diferentes sais na água da formação e na água de injeção, podendo ser necessária a injeção de um banco de água que evite o contato do polímero com a água da formação.

Os surfactantes alteram a tensão interfacial entre o óleo e a água, reduzindo as forças capilares e tornando uma fração maior do óleo móvel. No caso de altas tensões interfaciais, a capacidade do fluido injetado de desalojar o óleo do reservatório para fora dos poros é bastante reduzida, deixando saturações residuais elevadas de óleo nas regiões já contactadas pelo fluido injetado. Nesse trabalho é descrita a modelagem matemática do deslocamento de óleo por água na presença de n compostos químicos. Em seguida são apresentadas as equações que modelam a injeção de água contendo um polímero na presença de sal, considerando os efeitos que o sal provoca na adsorção do polímero. Por último é apresentado um caso mostrando a solução completa deste problema.

2. Revisão Bibliográfica

Desde a década de 60 a modelagem analítica do deslocamento de óleo por água contendo produtos químicos tem sido intensivamente estudada. Um dos trabalhos pioneiros é o artigo de Fayers e Perrine, 1959 onde foi analisado o sistema hiperbólico 2x2, incluindo as condições de Rankine-Hugoniot no choque. Também foi apresentada uma solução particular para o caso de injeção contínua de polímeros. O problema de cromatografia multicomponente considerando sistema unidimensional, isotérmico, em equilíbrio local e sem efeitos difusivos foi solucionado por Rhee *et al.*, 1970. Utilizando a isoterma de adsorção de Langmuir, foi demonstrado que esse sistema termodinâmico se ajusta perfeitamente à exposição da teoria matemática de equações quasilineares.

Patton *et al.*, 1971 analisaram o sistema de equações resultantes da modelagem do problema do deslocamento de óleo por água contendo polímeros, gás carbônico e surfactantes. Esse modelo captura os efeitos da diminuição da viscosidade da água e do óleo, da diminuição da tensão interfacial e da diminuição da saturação de óleo residual devido à injeção desses produtos em reservatórios. Claridge e Bondor, 1974 apresentaram a extensão do método gráfico de Welge (Welge, 1952) para calcular o deslocamento de óleo por água ou gás injetado.

A análise teórica de troca catiônica e o fenômeno de adsorção no reservatório devido à injeção de produtos químicos foram estudados por Pope *et al.*, 1978. Nesse artigo não foram levados em consideração os efeitos de dispersão, e os fluidos são considerados imiscíveis. Em um trabalho posterior foram considerados os efeitos de dispersão (Hill e Lake, 1978; Lake e Helfferich, 1978).

A formulação do problema do deslocamento de óleo por soluções multicomponentes pode ser encontrada em Helfferich, 1981. A aplicação da teoria de fluxo fracionário para recuperação avançada de petróleo foi estudada por Pope, 1980, levando em consideração a injeção de produtos químicos. Os estudos mais detalhados do deslocamento de óleo por água contendo produtos químicos foram publicados por Entov, 1981. O transporte de sódio e cálcio no meio poroso na presença de argila e surfactante onde a troca catiônica é resultado da associação eletrostática foram estudados por Hirasaki, 1982. Entov e Kerimov, 1986 levaram em consideração o deslocamento de óleo por um produto químico quando o fluxo fracionário não é monótono ao longo do caminho da solução.

A análise unidimensional do deslocamento de fluidos presentes em reservatórios por um fluido injetado é uma das principais ferramentas teóricas para os estudos dos processos de recuperação de petróleo. Primariamente, ele se reduz às soluções de um conjunto de equações hiperbólicas que expressam as leis de conservação de massa de cada um dos componentes e levam em consideração a natureza bifásica do fluxo e a transferência de massa entre as fases (Entov e Voskov, 2000).

Recentemente foi demonstrado que em alguns sistemas de equações hiperbólicas que descrevem o fluxo de fluidos em meios porosos pode ser feita a separação do sistema geral em um sistema auxiliar e uma equação do levantamento (Pires, 2003). Enquanto o sistema original apresenta funções termodinâmicas e parâmetros de transporte (permeabilidades relativas e viscosidades) o sistema auxiliar apresenta somente propriedades termodinâmicas (isotermas de adsorção).

3. Modelagem Matemática de Métodos Químicos

Neste trabalho é considerado o deslocamento de óleo por uma solução aquosa com n componentes (polímeros, sais) dissolvidos que podem ser adsorvidos pela rocha em um reservatório unidimensional. As seguintes premissas são adotadas:

- * Permeabilidade e porosidade constantes;
- * Efeitos gravitacionais, capilares e de dispersão desconsiderados;
- * Inicialmente o reservatório está saturado com óleo e água;
- * Reservatório homogêneo e isotrópico;
- * Fases incompressíveis (óleo e água);
- * Transferência de massa não afeta a densidade da água.

A conservação da massa das fases água e óleo são dadas por:

$$\frac{\partial \rho_w s_w}{\partial t} + \frac{\partial \rho_w u_w}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_o s_o}{\partial t} + \frac{\partial \rho_o u_o}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

onde s_w é a saturação de água, ρ_w a densidade da água, u_w a velocidade da fase água, s_o é a saturação da fase óleo, ρ_o a densidade da fase óleo, u_o a velocidade da fase óleo.

Cancelando nas equações acima as densidades devido à incompressibilidade das fases chegamos a:

$$\frac{\partial s_w}{\partial t} + \frac{\partial u_w}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial s_o}{\partial t} + \frac{\partial u_o}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

A velocidade das fases será calculada através da lei de Darcy:

$$u_{\Pi} = \frac{-k k_{r\Pi}(s, \vec{c})}{\mu_{\Pi}(\vec{c})} \frac{\partial P_{\Pi}}{\partial x}, \Pi = o, w \quad (5)$$

Definindo fluxo fracionário de água como:

$$f(s_w, \vec{c}) = \frac{u_w}{u_w + u_o} = \frac{u_w}{u} \quad (6)$$

e aplicando a lei de Darcy, temos:

$$f(s_w, \vec{c}) = \frac{\frac{k_{rw}(s_w, \vec{c})}{\mu_w}}{\frac{k_{rw}(s_w, \vec{c})}{\mu_w} + \frac{k_{ro}(s)}{\mu_o}} \quad (7)$$

onde k_{rw} é a permeabilidade relativa da fase água, k_{ro} é a permeabilidade relativa da fase óleo, μ_w é a viscosidade da água e μ_o é a viscosidade do óleo.

Substituindo a Eq. (6) na Eq. (3) e na Eq. (4):

$$\phi \frac{\partial s_w}{\partial t} + \frac{\partial f u}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

$$\phi \frac{\partial s_o}{\partial t} + \frac{\partial (1-f) u}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

Somando a Eq. (8) e Eq. (9):

$$\phi \frac{\partial (s_o + s_w)}{\partial t} + \frac{\partial u (1-f+f)}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, u = u(t) \quad (11)$$

Definindo $s_w = s$ e substituindo na Eq. (8):

$$\phi \frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

Definindo as variáveis adimensionais:

$$X = \frac{x}{L} \quad (13)$$

$$T = \frac{ut}{\phi L} \quad (14)$$

sendo ϕ a porosidade e L o tamanho do reservatório, chega-se à seguinte equação:

$$\frac{\partial s}{\partial T} + \frac{\partial f}{\partial X} = 0 \quad (15)$$

A Eq. (15) descreve o deslocamento unidimensional de óleo por água e foi resolvido primeiramente por Buckley e Leverett (Buckley e Leverett, 1942).

A partir da conservação da massa dos produtos químicos é possível obter:

$$\frac{\partial (c_i s + a_i(\vec{c}))}{\partial T} + \frac{\partial c_i f(s, \vec{c})}{\partial X} = 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (16)$$

onde a_i é a adsorção e c_i é a concentração do componente i em solução.

Em condições de equilíbrio termodinâmico, as concentrações dos componentes adsorvidos e dissolvidos são governadas por isotermas de adsorção com as seguintes propriedades:

$$\vec{a} = \vec{a}(\vec{c}), \vec{a} = (a_1, a_2, \dots, a_n), \vec{c} = (c_1, c_2, \dots, c_n) \quad (17)$$

As funções $a_i = a_i(\vec{c})$ obedecem às seguintes condições:

$$a_i(c_1, \dots, c_{i-1}, 0, c_{i+1}, \dots, c_n) = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial a_i(\vec{c})}{\partial c_i} > 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial a_i(\vec{c})}{\partial c_j} < 0 \quad (20)$$

Portanto, o sistema de equações governantes inclui leis de conservação para o volume da fase aquosa e para a massa de cada componente. As incógnitas desse sistema de $n + 1$ equações são s e \vec{c} .

$$\frac{\partial s}{\partial T} + \frac{\partial f(s, \vec{c})}{\partial X} = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial (c_i s + a_i(\vec{c}))}{\partial T} + \frac{\partial c_i f(s, \vec{c})}{\partial X} = 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (22)$$

Através da introdução da seguinte função potencial associada à conservação do volume de água,

$$d\varphi = f dT - s dX \quad (23)$$

é possível transformar o sistema composto pela Eq. (21) e Eq. (22) em:

$$f \frac{\partial s}{\partial \varphi} - s \frac{\partial f}{\partial \varphi} + \frac{\partial f}{\partial X} = 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial \vec{a}(\vec{c})}{\partial \varphi} + \frac{\partial \vec{c}}{\partial X} = 0 \quad (25)$$

É importante ressaltar que o sistema formado pela Eq. (25) contém somente funções termodinâmicas, ao contrário do sistema original formado pela Eq. (21) e Eq. (22), que contém funções termodinâmicas e propriedades de transporte. As transições de fase que ocorrem durante o deslocamento de óleo são descritas através da solução do sistema auxiliar, ou seja, elas são independentes das permeabilidades relativas e viscosidades. A mudança de variáveis independentes $(X, T) \rightarrow (X, \varphi)$ divide o sistema Eq. (21) e Eq. (22) em uma equação do levantamento Eq. (24) e um sistema auxiliar Eq. (25).

4. Injeção de Água com um Polímero na Presença de um Sal

Este método de recuperação avançada (*EOR*) consiste na adição de polímeros à água que será injetada no reservatório com a finalidade de diminuir sua mobilidade. O resultado é o aumento da viscosidade da fase aquosa, resultando assim em uma diminuição da mobilidade à água. Este fenômeno aumenta a recuperação de óleo, uma vez que aumenta a quantidade de hidrocarbonetos varridos durante a passagem da água com polímero pelo reservatório (Lake, 1989).

As três equações a seguir descrevem a conservação do volume de água, conservação da massa do polímero e conservação do sal (que não adsorve), respectivamente:

$$\frac{\partial s}{\partial T} + \frac{\partial f(s, c)}{\partial X} = 0 \quad (26)$$

$$\frac{\partial (cs + a(c, \gamma))}{\partial T} + \frac{\partial cf(s, c)}{\partial X} = 0 \quad (27)$$

$$\frac{\partial (\gamma s)}{\partial T} + \frac{\partial \gamma f(s, c)}{\partial X} = 0 \quad (28)$$

onde c é a concentração do polímero em solução, γ é a concentração de sal, a é a adsorção, s é a saturação de água e f é a função fluxo fracionário de água.

A injeção contínua de água contendo polímeros é modelada através do seguinte problema de valor inicial e de contorno:

$$\begin{cases} T = 0, X > 0 & s = s^I, \bar{c} = \bar{c}^I \\ X = 0, T > 0 & f = f^J, \bar{c} = \bar{c}^J \end{cases} \quad (29)$$

e corresponde ao seguinte problema para o sistema auxiliar.

$$\begin{cases} T = 0, X > 0 & \varphi = -s^I X & s = s^I, \bar{c} = \bar{c}^I \\ X = 0, T > 0 & \varphi = f^J T & f = f^J, \bar{c} = \bar{c}^J \end{cases} \quad (30)$$

onde I e J indicam as condições inicial e de injeção, respectivamente.

Introduzindo o potencial $d\varphi = f dT - s dX$ no sistema Eq. (26), Eq. (27) e Eq. (28) chegamos ao seguinte conjunto de equações:

$$\frac{\partial a(c, \gamma)}{\partial \varphi} + \frac{\partial c}{\partial X} = 0 \quad (31)$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial X} = 0 \quad (32)$$

É importante ressaltar que o sal não adsorve mas altera a curva de adsorção do polímero.

O sistema formado pela Eq. (31) e Eq. (32) é chamado de sistema auxiliar ao sistema Eq. (26), Eq. (27) e Eq. (28).

As velocidades das ondas de choque do sistema auxiliar estão ligadas às velocidades das ondas do sistema geral através de:

$$D = \frac{f}{s + \frac{1}{\lambda}} \quad (33)$$

Por exemplo, os autovalores do sistema geral e auxiliar estão relacionados pela seguinte equação:

$$\Lambda(s, c) = \frac{f}{s + \frac{1}{\lambda(c)}} \quad (34)$$

5. Solução do Problema

É considerado o caso em que a concentração inicial de polímero c^I é menor que a concentração de injeção c^J e a concentração inicial de sal γ^I é menor que a concentração de injeção γ^J .

$$c^I < c^J, \gamma^I < \gamma^J \quad (35)$$

Será utilizada a seguinte isoterma de adsorção (Johan *et al.*, 2004):

$$a(c, \gamma) = \frac{\alpha c}{1 + \beta c} \quad (36)$$

onde $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \gamma$ ($\alpha_1 = 200, \alpha_2 = 200, \beta = 1000$) e c é a concentração do polímero em solução. A partir desta isoterma de adsorção as invariantes de Riemann são:

$$R_1 = \gamma = \text{constante} \quad (37)$$

$$R_2 = \ln \frac{c(\alpha_1 + \alpha_2 \gamma)}{1 + \beta c} = \text{constante} \quad (38)$$

onde R_1 e R_2 são a primeira e segunda invariante de Riemann.

Aplicando as condições inicial e de injeção para este caso temos o caminho da solução apresentado na Fig. 1, onde parte-se de uma concentração inicial I passando por uma concentração intermediária representada pelo ponto A até chegar a uma concentração de injeção J .

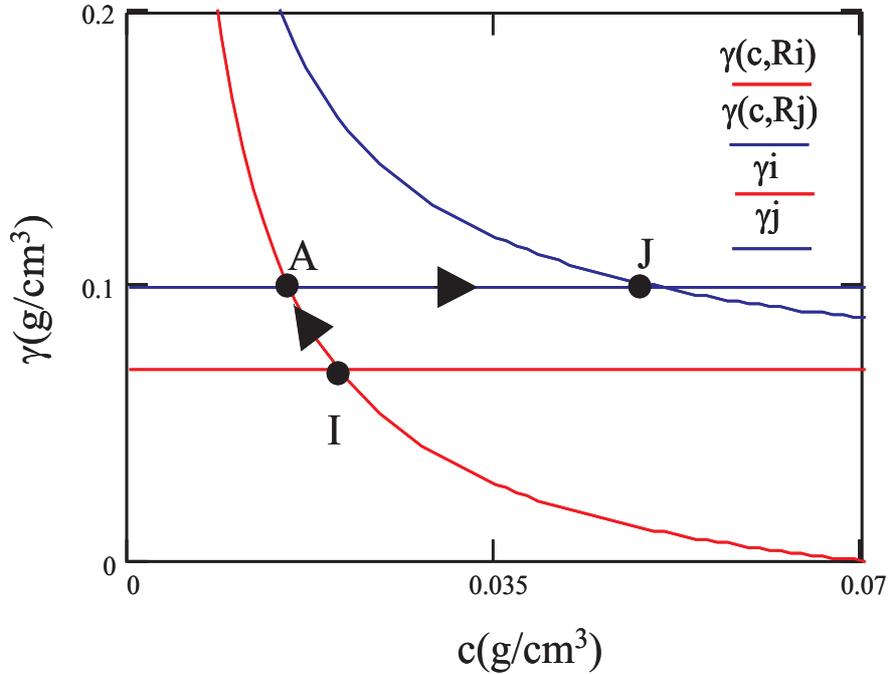


Figura 1: Diagrama de fases.

Neste caso acontecem dois choques, um de concentração e outro de salinidade, representados na Fig. 2. Na Fig. 3 é apresentado o caminho da solução em $a \times c$, onde:

$$a(c^I, \gamma^I) = 0,204 \quad (39)$$

$$a(c^A, \gamma^J) = 0,204 \quad (40)$$

$$a(c^J, \gamma^J) = 0,216 \quad (41)$$

A solução geral do sistema auxiliar é dada por:

$$\Gamma(\eta = \frac{\varphi}{X}) = \begin{cases} \gamma^I = 0,07 & -s^I \leq \eta < V_1 = 0 \\ \gamma^J = 0,1 & V_1 < \eta \leq V_2 = 0,317 \end{cases} \quad (42)$$

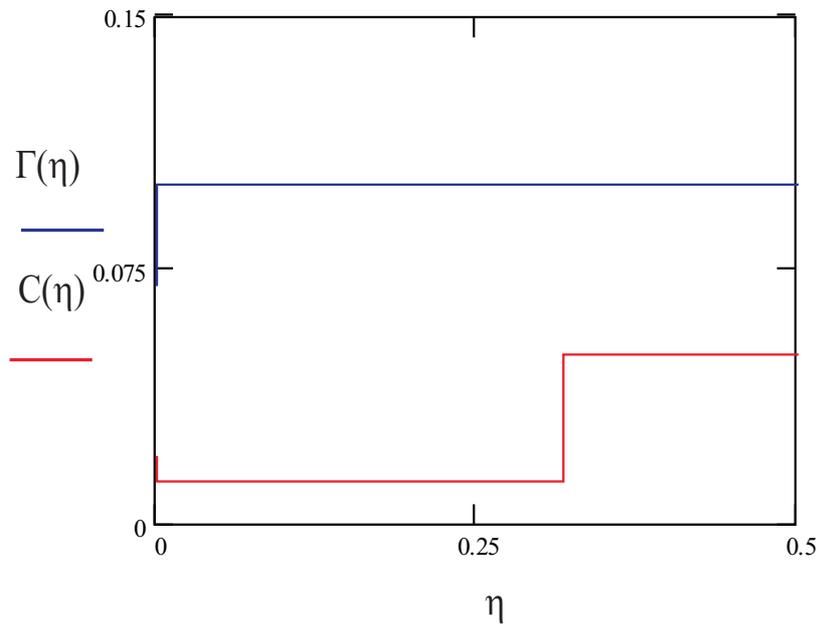


Figura 2: Solução do problema auxiliar.

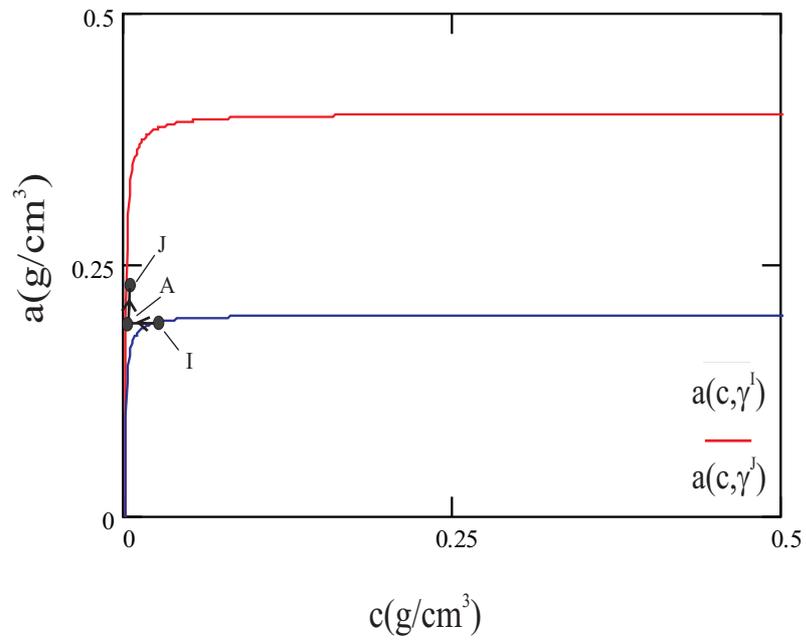


Figura 3: Caminho da solução em $a \times c$.

$$C(\eta = \frac{\varphi}{X}) = \begin{cases} c^I = 0,02 & -s^I \leq \eta < V_1 = 0 \\ c^{(A)} = 0,013 & V_1 < \eta \leq V_2 = 0,317 \\ c^J = 0,05 & V_2 < \eta \end{cases} \quad (43)$$

As velocidades dos choques são calculadas como $V_1 = \frac{a(c^{(A)}, \gamma^J) - a(c^I, \gamma^I)}{c^{(A)} - c^I}$ e $V_2 = \frac{a(c^{(A)}, \gamma^J) - a(c^J, \gamma^I)}{c^{(A)} - c^J}$ e $c^{(A)}$ é a concentração no ponto intermediário, determinada através da igualdade da segunda invariante de Riemann nos pontos I e A onde a concentração de sal é a mesma de injeção $\gamma^A = \gamma^J$:

$$c^{(A)} = \frac{c^I(\alpha_1 + \alpha_2 \gamma^I)}{(\alpha_1 + \alpha_2 \gamma^J) + \beta * c^I * \alpha_2(\gamma^J - \gamma^I)} \quad (44)$$

O caminho da solução $C(\eta)$ do problema auxiliar corresponde à união entre os pontos c^I e c^J da isoterma de adsorção passando pelo ponto $c^{(A)}$.

Para a solução do problema geral, é necessário gerar as curvas de fluxo fracionário para cada combinação de concentração de polímero e de sal. Foi adotado o modelo de Corey para permeabilidade relativa ao óleo e à água:

$$k_{ro}(s) = k_{rowi} * \left[\frac{(1 - s_{or} - s)}{(1 - s_{wi} - s_{or})} \right]^m \quad (45)$$

$$k_{rw}(s) = k_{rwor} * \left[\frac{(s - s_{wi})}{(1 - s_{wi} - s_{or})} \right]^n \quad (46)$$

A dependência da viscosidade com a concentração de polímero é linear:

$$\mu_w(c) = (1 + 100 * c) \quad (47)$$

As constantes adotadas são apresentadas na Tab. 1:

Tabela 1: Constantes utilizadas no problema.

s_{or}	0,1
s_{wi}	0,1
μ_w	1
μ_o	10
k_{rowi}	0,7
k_{rwor}	0,2
m	1,5
n	3

O caminho da solução do sistema geral é:

$$J - 1 \rightarrow 2a \rightarrow 2b \rightarrow 3a - 3b \rightarrow I \quad (48)$$

No caminho da solução, a sequência de ondas de Riemann é representada pelo símbolo " \rightarrow " indicando choque e " $-$ " que indica uma onda de rarefação.

O levantamento da solução está apresentado na Fig. 4 com uma ampliação apresentada na Fig. 5 e consiste de 4 choques, sendo dois choques de concentração denominados c -choque em $1 \rightarrow 2a$ e $2b \rightarrow 3a$ e dois choques de saturação denominados s -choques em $2a \rightarrow 2b$ e $3b \rightarrow I$, e de duas s -rarefações $J - 1$ e $3a - 3b$.

Os dois tipos de c -choque e a s -rarefação são representados respectivamente por:

$$c - choque = \frac{f}{s + \frac{df}{dc}} \quad (49)$$

$$c - choque = \frac{f}{s} \quad (50)$$

$$s - onda = \frac{\partial f}{\partial s} \quad (51)$$

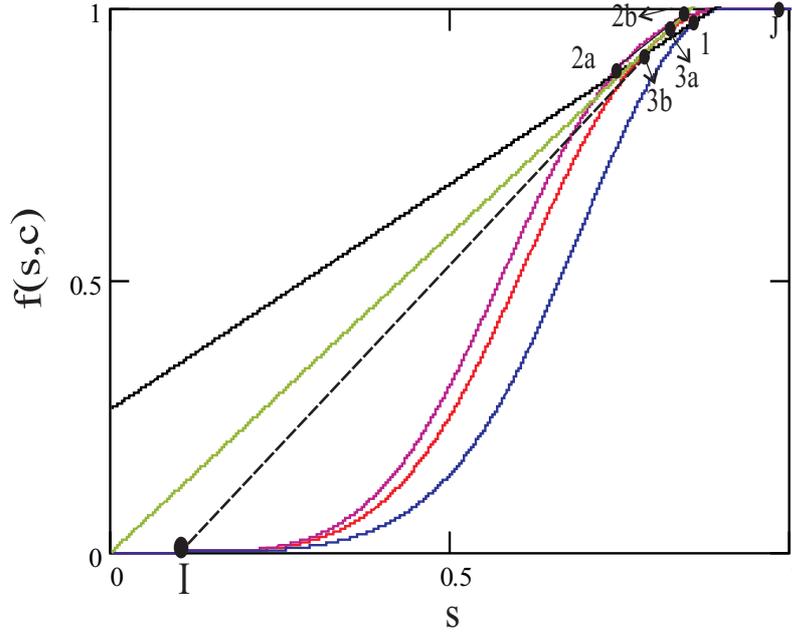


Figura 4: Caminho da solução.

O ponto inicial da c -transição é encontrado através da igualdade das velocidades da c -onda e da s -característica. Na solução do sistema geral a c -transição começa com um c -choque que está ligado ao choque do sistema auxiliar por:

$$D = \frac{f(s, c)}{s + \frac{1}{\Gamma}}$$

A solução do sistema geral é auto similar e é dada por (52):

$$S(\xi = \frac{X}{T}) = \begin{cases} s_j(\xi) & (D_1 = 0) < \xi \leq D_{2a} = 0,828 \\ s^{(2a)} = 0,734 & D_{2a} < \xi \leq D_{2b} = 1,059 \\ s^{(2b)} = 0,836 & D_{2b} < \xi \leq D_{3a} = 1,169 \\ s_{3r}(\xi) & D_{3a} < \xi \leq D_{3b} = 1,338 \\ s^{(wi)} = 0,1 & \xi > D_{3b} \end{cases} \quad (52)$$

$$C(\xi = \frac{X}{T}) = \begin{cases} c^J = 0,05 & \xi < D_{2a} = 0,828 \\ c^{(A)} = 0,013 & D_{2a} < \xi \leq D_{3a} = 1,169 \\ c^I = 0,02 & \xi > D_{3a} \end{cases} \quad (53)$$

$$\gamma(\xi = \frac{X}{T}) = \begin{cases} \gamma^J = 0,1 & \xi < D_{3a} = 1,169 \\ \gamma^I = 0,07 & \xi > D_{3a} \end{cases} \quad (54)$$

onde $D_{2a} = \frac{f(s^{(2a)}, c^J)}{s^{(2a)} + V_2}$, $D_{2b} = \frac{f(s^{(2b)}, c^{(A)}) - f(s^{(2a)}, c^{(A)})}{s^{(2b)} - s^{(2a)}}$, $D_{3a} = \frac{f(s^{(3a)}, c^I)}{s^{(3a)}}$, $D_{3b} = \frac{f(s^{(3b)}, c^I)}{s^{(3b)} - s^{wi}}$. As rarefações são calculadas a partir de $\xi = \frac{\partial f(s, c^J)}{\partial s}$ e $\xi = \frac{\partial f(s, c^I)}{\partial s}$.

A solução formada pela Eq. (52), Eq. (53) e Eq. (54) descritas anteriormente estão apresentadas na Fig. 6.

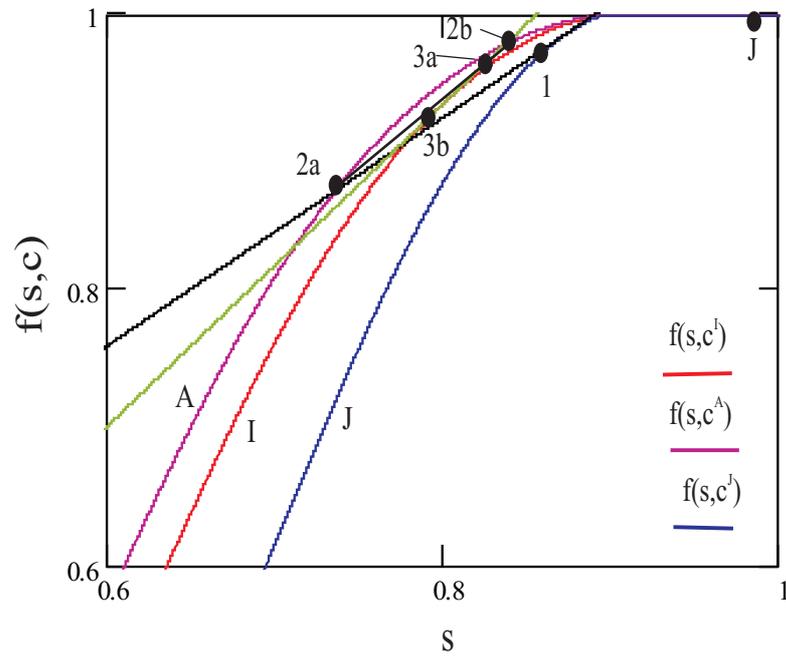


Figura 5: Ampliação do caminho da solução.

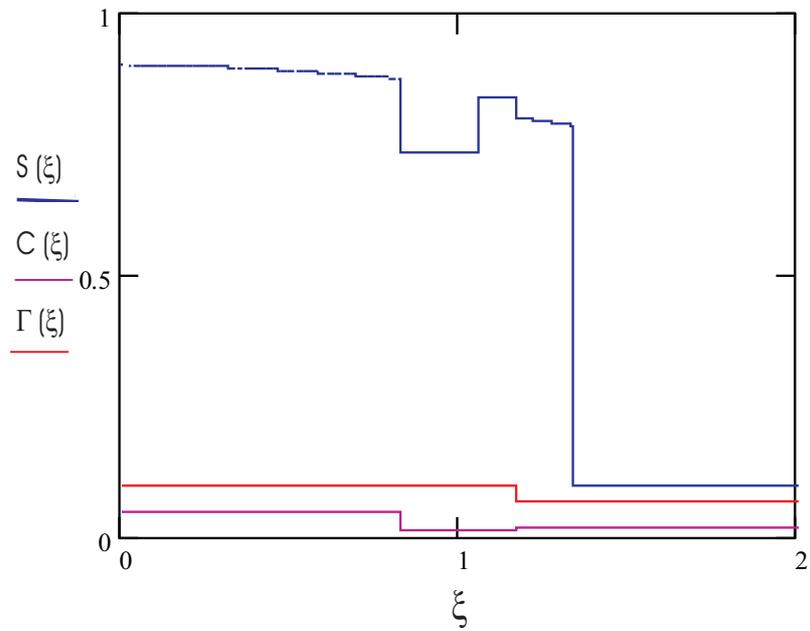


Figura 6: Perfis de saturação e concentração de sal e polímero.

6. Conclusões

A partir da separação dos sistemas geral e auxiliar tornou-se possível a solução de sistemas contendo mais de um produto químico dissolvido. O procedimento de solução do sistema geral consiste em:

- Solução do sistema auxiliar;
- Levantamento da solução.

O sistema auxiliar contém somente propriedades termodinâmicas, enquanto o sistema geral contém propriedades hidrodinâmicas (permeabilidades relativas e viscosidades) e propriedades termodinâmicas. Portanto as transições de fases que ocorrem durante o deslocamento são determinadas pelo sistema auxiliar, sendo independentes das propriedades hidrodinâmicas dos fluidos e rocha. A partir dessa separação do sistema foi resolvido o caso específico de injeção de água com polímero na presença de sal.

7. Referências

- Buckley, S. E. and Leverett, M. C., 1942, Mechanisms of Fluid Displacement in Sands, “Transactions AIME”, Vol. 146, pp. 107–116.
- Claridge, E. L. and Bondor, P. L., 1974, A Graphical Method for Calculating Linear Displacement with Mass Transfer and Continuously Changing Mobilities, “Soc. Petr. Eng. J.”, Vol. 14, pp. 609–618.
- Entov, V. M., 1981, Physico-Chemical Hydrodynamics of Processes in Porous Media (Mathematical Models of Enhanced Oil Recovery), “Uspekhi Mekhaniki”, Vol. 4, No. 3, pp. 41–79, In Russian.
- Entov, V. M. and Kerimov, Z. A., 1986, Displacement of Oil by an Active Solution with a Nonmonotonic Effect on the Flow Distribution Function, “Fluid Dynamics”, Vol. 1, pp. 64–70.
- Entov, V. M. and Voskov, D. V., 2000, On Oil Displacement by Gas Injection. Seventh Euro. Conf. on The Mathematics of Oil Recovery.
- Fayers, F. J. and Perrine, R. L., 1959, Mathematical Description of Detergent Flooding in Oil Reservoirs, “Transactions AIME”, Vol. 216, pp. 277–283.
- Helfferich, F., 1981, Theory of Multicomponent Multiphase Displacement in Porous Media, “Soc. Petr. Eng. J.”, Vol. 21, pp. 51–62.
- Hill, H. J. and Lake, L. W., 1978, Cation Exchange in Chemical Flooding. Part 3. Experimental, “Soc. Petr. Eng. J.”, Vol. 18, pp. 445–456.
- Hirasaki, G. J., 1982, Ion Exchange with Clays in the Presence of Surfactants, “Soc. Petr. Eng. J.”, Vol. 22, pp. 181–192.
- Johan, A., Han, C., Delshad, M., and Pope, G. A., 2004, A New Generation Chemical Flooding Simulator, Tulsa. Fourteenth Symposium on Improved Oil Recovery.
- Lake, L. W., 1989, “Enhanced Oil Recovery”, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, 550 p.
- Lake, L. W. and Helfferich, F., 1978, Cation Exchange in Chemical Flooding. Part 2. The Effect of Dispersion, Cation Exchange and Polymer-Surfactant Adsorption on Chemical Flood Environment, “Soc. Petr. Eng. J.”, Vol. 18, pp. 435–444.
- Patton, J. T., Coats, K. H., and Colegrove, G. T., 1971, Prediction of Polymer Flood Performance, “Soc. Petr. Eng. J.”, Vol. 11, No. 1, pp. 72–84.
- Pires, A. P., 2003, “Independência entre Termodinâmica e Hidrodinâmica em Processos de Recuperação Avançada de Petróleo”, PhD thesis, Universidade Estadual do Norte Fluminense.
- Pope, G. A., 1980, The Application of Fractional Flow Theory to Enhanced Oil Recovery, “Soc. Petr. Eng. J.”, Vol. 20, pp. 191–205.
- Pope, G. A., Lake, L. W., and Helfferich, F., 1978, Cation Exchange in Chemical Flooding. Part 1. Basic Theory without Dispersion, “Soc. Petr. Eng. J.”, Vol. 18, pp. 418–434.
- Rhee, H. K., Aris, R., and Amundson, N. R., 1970, On the Theory of Multicomponent Chromatography, “Phil. Trans. Royal Soc., Ser. A”, Vol. 267, pp. 419–455.
- Welge, H. J., 1952, A Simplified Method for Computing Oil Recovery by Gas or Water Drive, “Transactions AIME”, Vol. 195, pp. 91–98.

SALT EFFECTS ON POLYMER ADSORPTION IN CHEMICAL FLOODING OF OIL RESERVOIRS

Pollyanna Medeiros Fonte Boa

Universidade Estadual do Norte Fluminense

Rod. Amaral Peixoto, km. 163 - Av. Brennand s/n

Imboassica - 27925-310
Macaé / RJ
pollyanna@lenep.uenf.br

Adolfo Puime Pires

Universidade Estadual do Norte Fluminense
Rod. Amaral Peixoto, km. 163 - Av. Brennand s/n
Imboassica - 27925-310
Macaé / RJ
puime@lenep.uenf.br

Abstract. *Enhanced Oil Recovery (EOR) methods may be classified into the following kinds: chemical, miscible and thermal methods. The most commonly injected chemical fluids are polymers, surfactants, micellar solutions, etc. Displacement of oil by these fluids involves complex physico-chemical processes of interphase mass transfer, phase transitions and transport properties changes. Polymers can improve the mobility ratio and thus increase the displacement efficiency of oil in a reservoir. The system of hyperbolic partial differential equations that governs the oil displacement by water in the presence of two chemical species is composed by three equations. Recently it was shown that this system can be splitted into a hydrodynamic part (one equation) and a thermodynamic part (two equations). The thermodynamic part is independent of the hydrodynamic equation and depends on parameters of the adsorption isotherms, not on transport properties (relative permeabilities and viscosities). In this paper we present the solution for the problem of 1D oil displacement by water containing polymers in the presence of salts in porous media. Solutions for different initial and injection conditions with adsorption isotherms of Langmuir type considering salt concentration are presented. The results of this work may be applied in mature fields and in reservoir simulation software validation..*

Keywords *reservoir engineering, enhanced oil recovery, chemical flooding, polymer injection, conservation laws.*