

3 O modelo proposto por Valkó & Oligney

3.1. Definição e hipóteses do modelo

O modelo proposto por Valkó & Oligney [3] estima a evolução da fratura e a distribuição final do agente de sustentação a partir da análise da curva de pressão de fundo de uma operação de *fracpack*. É um método simples e requer um pequeno número de dados de entrada, que geralmente estão disponíveis durante e após as operações.

O método se baseia na análise do período de TSO dos tratamentos de *fracpack*. Conforme apresentado, durante o TSO o crescimento da fratura é bloqueado, mantendo a área da fratura constante, e a continuidade do bombeio permite o alargamento e empacotamento da abertura, sendo este processo acompanhado por um aumento de pressão, que é resultado da formação ser descrita pela teoria da elasticidade linear.

Valkó & Oligney [3] identificaram que, ao invés do constante aumento de pressão durante o TSO, as formações inconsolidadas de alta permeabilidade podem intercalar os períodos de aumento de pressão com períodos anômalos de redução de pressão. A interpretação proposta para este fato é que durante o alargamento e empacotamento da abertura, existem momentos em que a fratura sofre uma acomodação e volta a ganhar comprimento, resultando em anômalos declínios de pressão, sendo esta uma indicação de que um completo tip *screenout* não foi atingido. Desta forma, Valkó & Oligney [3] assumem que na operação de *fracpack* ocorre uma série de intervalos regulares de interrupção na propagação da fratura com o alargamento da abertura, evidenciados pelo aumento de pressão, intercalados por intervalos irregulares de propagação da fratura, interpretados a partir dos declínios de pressão, conforme apresentado na figura 3.1. Neste caso, o tratamento pode ser dividido em períodos seqüenciais de área da fratura constante separados por períodos de acomodação e crescimento da área da fratura.

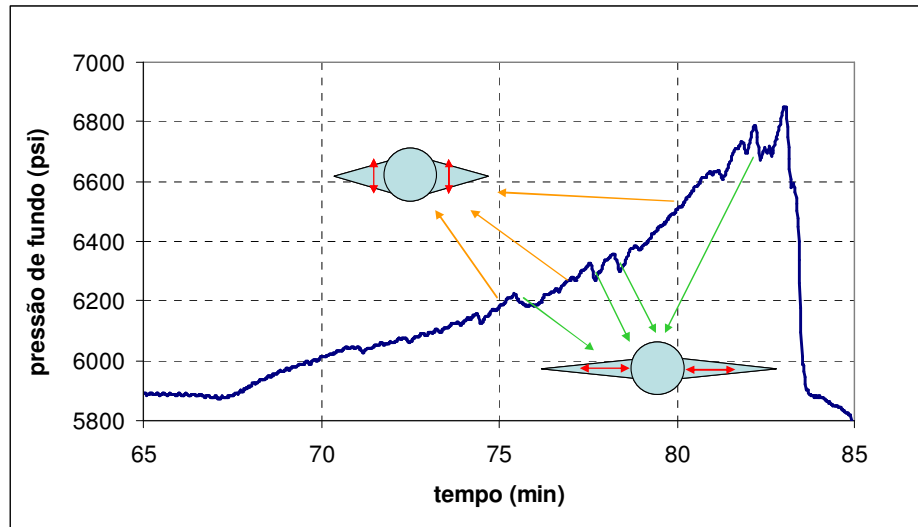


Figura 3.1 – Registro da pressão de fundo durante uma operação de *fracpack* que apresenta intervalos de crescimento e de declínio de pressão durante o TSO.

Com a interpretação proposta por Valkó & Oligney [3], a inclinação positiva da curva de pressão durante o aumento da abertura da fratura pode ser utilizada para obter raios de empacotamento da fratura para cada período de tempo. A seqüência dos raios de empacotamento estimados, combinada a informações adicionais da história de injeção do agente de sustentação, permite definir a distribuição final do agente de sustentação na fratura.

Para a definição do modelo, Valkó & Oligney [3] assumiram as seguintes hipóteses:

1. A fratura é vertical e apresenta geometria radial;
2. A filtração é descrita pelo modelo de Carter [7] em conjunto com o modelo de Nolte [15,16,17], que estabelece o crescimento da área da fratura segundo uma lei de potência;
3. O raio de empacotamento da fratura pode variar ao longo do tempo, podendo crescer ou diminuir;
4. O raio hidráulico da fratura, o qual define a área de filtração, não decresce e é definido como o raio de empacotamento máximo até aquele tempo;
5. Durante o período de aumento da abertura, a curva de pressão é definida pelo comportamento linear elástico da rocha e por um balanço de massa, desprezando efeitos de fricção;

6. O agente de sustentação injetado é distribuído uniformemente na área empacotada a cada período de aumento de abertura e restrição no crescimento da fratura.

O método é composto por várias etapas. Primeiro são selecionados os períodos de aumento de pressão da curva de pressão de fundo. Assumindo que o aumento de pressão é função do alargamento da abertura da fratura, a interpretação da inclinação desses períodos resulta no raio de empacotamento correspondente a um período no tempo. O processamento de toda a curva de pressão de fundo recria a história dos raios de empacotamento, sendo ainda necessário definir os raios nos intervalos onde ocorre declínio de pressão. Esses intervalos são estimados utilizando-se uma interpolação entre valores conhecidos, tornando completa a história dos raios de empacotamento.

Com base nesta evolução, a distribuição final do agente de sustentação, e conseqüentemente a estimativa do comprimento e da abertura da fratura, é facilmente determinada utilizando os dados de concentração do agente de sustentação bombeado ao longo do tempo.

3.2. Desenvolvimento do modelo

O TSO pode ser considerado como um período de alargamento da abertura da fratura enquanto a área da fratura permanece constante. Com esta hipótese o balanço de massa em termos de vazão pode ser escrito conforme a eq. (3.1).

$$\frac{dw}{dt} = \frac{1}{A}(q - q_L) \quad (3.1)$$

Onde, q é a vazão de injeção em uma asa e q_L é a vazão de filtração através de uma asa. A notação básica para o modelo está apresentada na figura 3.2, ressaltando que o modelo utiliza uma fratura de geometria radial.

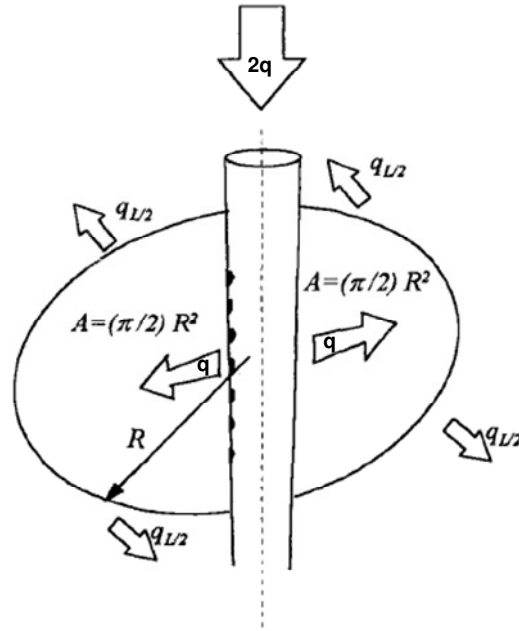


Figura 3.2 – Esquema da fratura no modelo proposto por Valkó & Oligney [3].

Com base na geometria radial, a área de uma asa da fratura pode ser definida pela eq. (3.2):

$$A = \frac{\pi R^2}{2} \quad (3.2)$$

Utilizando a relação entre a *net pressure* e a abertura da fratura dada pela eq. (2.24) e a complacência do modelo radial, definida pela eq. (2.90), a relação entre a *net pressure* e a abertura para o modelo radial pode ser expressa pela eq. (3.3), sendo E' o módulo de deformação plana, já definido pela eq. (2.22).

$$w = \frac{16R}{3\pi E'} P_{NET} \quad (3.3)$$

Substituindo as eq. (3.3) e (3.2) na eq. (3.1), o balanço de massa pode ser reescrito conforme mostrado pela eq. (3.4). Como a pressão de fechamento é constante no tempo, a derivada da *net pressure* é igual à derivada da pressão de fundo, sendo esta última representada por P_w .

$$\frac{dP_w}{dt} = \left(\frac{3\pi E'}{16R} \right) \left(\frac{2}{\pi R^2} \right) (q - q_L) \quad (3.4)$$

Esta equação mostra que com o registro da pressão de fundo e da vazão de injeção é possível determinar o raio da fratura. Para tanto, é necessária a definição da vazão de filtração. Assumindo que a fratura se propagou até um determinado tempo t , e teve seu crescimento bloqueado neste mesmo instante t ,

a vazão de filtração imediatamente após a interrupção da propagação da fratura pode ser expressa pela vazão de filtração durante o declínio de pressão. Neste intervalo de tempo Δt , a área da fratura se manterá constante enquanto a abertura da fratura é alargada. O mesmo ocorre no declínio de pressão: enquanto a área da fratura se mantém constante, é observada uma variação na abertura da fratura. A diferença neste caso é que durante o declínio de pressão, ao invés de aumentar, a abertura da fratura vai diminuindo até o seu fechamento. Essa equivalência permite que a vazão de filtração total, q_L , definida pela eq. (2.73), possa ser determinada a partir do declínio de pressão, adaptada para o instante t , já que cada bloqueio na propagação da fratura funcionará como um tempo final de bombeio, conforme mostrado pela eq. (3.5).

$$q_{L,t} = \frac{2C_L A}{\sqrt{t}} f(\Delta t_D, \alpha) \quad (3.5)$$

Conforme já apresentado, esta vazão de filtração tem por base o modelo de filtração de Carter [7] e o crescimento da área da fratura segundo a lei da potência de acordo com Nolte [15,16,17]. A função $f(\Delta t_D, \alpha)$ foi definida pela eq. (2.74) como a derivada da função $g(\Delta t_D, \alpha)$ em relação ao tempo adimensional Δt_D . A função $f(\Delta t_D, \alpha)$ também pode ser obtida analiticamente utilizando a função hipergeométrica e, para a situação de bloqueio da fratura, será considerado o tempo $\Delta t_D = 0$, conforme mostrado pela eq. (3.6):

$$f(\Delta t_D = 0, \alpha) = \left(\frac{dg(\Delta t_D, \alpha)}{d\Delta t_D} \right)_{\Delta t_D=0} = \frac{1}{\sqrt{1+\Delta t_D}} F \left[\frac{1}{2}, \alpha; 1+\alpha; (1+\Delta t_D)^{-1} \right] \quad (3.6)$$

Para a definição de α , Valkó & Oligney utilizaram a eq. (2.63) que define o expoente para o modelo radial considerando o caso de alta eficiência, isto é, eficiência próxima de 1. Para tanto, foi assumido fluido Newtoniano, sendo $n=1$. Desta forma, o valor de α foi definido utilizando a eq. (3.7):

$$\alpha_1^{Rad} = \frac{(4n+4)}{(3n+6)} = \frac{8}{9} \quad (3.7)$$

Utilizando $\alpha = 8/9$ e considerando $\Delta t_D = 0$, a função $f(\Delta t_D, \alpha)$ pode ser definida pela eq. (3.8):

$$f(\Delta t_D = 0, \alpha = 8/9) = \left(\frac{dg(\Delta t_D, \alpha)}{d\Delta t_D} \right)_{\Delta t_D=0, \alpha=8/9} = 1.91 \quad (3.8)$$

Substituindo a eq. (3.8) na eq. (3.5), a vazão de filtração utilizada por Valkó & Oligney [3] no modelo é expressa pela eq. (3.9):

$$q_{L,t} = 2AC_L \frac{1}{\sqrt{t}} 1.91 \tag{3.9}$$

Substituindo a eq. (3.9) na eq. (3.4), o balanço de massa pode ser reescrito de acordo com a eq. (3.10):

$$\frac{dp}{dt} = \left(\frac{3\pi E'}{16R} \right) \left(\frac{2}{\pi R^2} \right) \left[q - 2 \left(\frac{\pi R^2}{2} \right) C_L \frac{1}{\sqrt{t}} 1.91 \right] \tag{3.10}$$

O valor de dp/dt será definido a partir do registro da pressão de fundo ao longo do tempo nos intervalos onde ocorre aumento de pressão, isto é, onde a inclinação da curva, definida por $m(t)$, é positiva. Desta forma, a eq. (3.10) pode ser definida conforme a eq. (3.11).

$$m(t) = \left(\frac{3\pi E'}{16R} \right) \left(\frac{2}{\pi R^2} \right) \left[q - 2 \left(\frac{\pi R^2}{2} \right) C_L \frac{1}{\sqrt{t}} 1.91 \right] \tag{3.11}$$

A figura 3.3 mostra o registro de pressão de fundo utilizado por Valkó & Oligney [3] e as inclinações positivas selecionadas ao longo do tempo, que representam o alargamento da abertura da fratura.

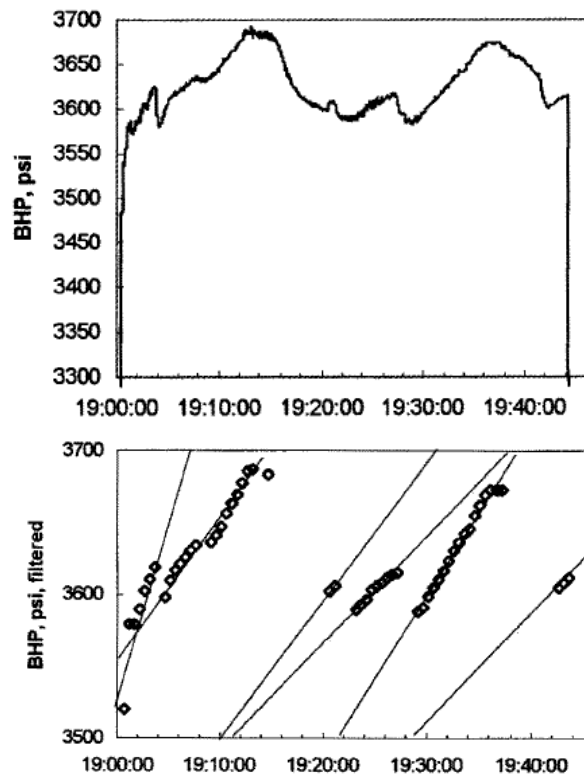


Figura 3.3 – Registro de pressão de fundo utilizado por Valkó & Oligney e as inclinações positivas selecionadas ao longo do tempo [3].

Rearranjando a eq. (3.11) é obtida uma equação do terceiro grau para a definição do raio de empacotamento da fratura, eq. (3.12). O raio calculado passa a ser representado por R_p .

$$R_p^3 + R_p^2 \left(\frac{3 \times 1.91 \pi E' C_L}{8m\sqrt{t}} \right) - \left(\frac{3E'q}{8m} \right) = 0 \quad (3.12)$$

Conhecendo-se m e a vazão de injeção, q , num determinado tempo t , a eq. (3.12) determina o valor de R_p nos períodos de incremento de pressão, representando o alargamento e empacotamento da abertura da fratura. Para a resolução da equação de terceiro grau, Valkó & Oligney [3] sugerem as eqs. (3.13), (3.14), (3.15) e (3.16):

$$R_p = -\frac{a}{3} + \frac{0.419974a^2}{c} + 0.264567c \quad (3.13)$$

$$a = \frac{3 \times 1.91 \pi E' C_L}{8m\sqrt{t}} \quad (3.14)$$

$$b = -\frac{3E'q}{8m} \quad (3.15)$$

$$c = \left(-2a^3 + \sqrt{-4a^6 + (2a^3 + 27b)^2} - 27b \right)^{1/3} \quad (3.16)$$

Para os intervalos de tempo onde ocorre decréscimo de pressão, a determinação do raio da fratura é feita através de uma interpolação logarítmica entre os raios de empacotamento conhecidos. Já para o período do bombeio antes de se iniciar o TSO, quando o agente de sustentação ainda não atingiu a fratura, Valkó & Oligney [3] utilizam a seguinte relação para a determinação do raio da fratura, eq. (3.17):

$$R(t) = \left(\frac{V_{i,t}}{V_{i,t_{TSO}}} \right)^{4/9} R_p(t_{TSO}) \quad (3.17)$$

Onde, t_{TSO} é o tempo inicial do TSO. O expoente 4/9 tem por base a relação do raio com o tempo para o modelo radial, estabelecida a partir da eq. (2.61), considerando fluido Newtoniano e a eficiência próxima de 1.

Após serem determinados os raios de empacotamento e conhecendo-se a concentração do agente de sustentação no fundo ao longo do tempo, o estabelecimento da curva de distribuição da concentração areal do agente de sustentação em função do raio da fratura segue os seguintes passos:

1. Para cada intervalo de tempo, Δt , determinar a massa de agente de sustentação entrando na fratura.

2. Assumir que esta massa é uniformemente distribuída na área definida a partir do raio da fratura estimado para aquele determinado intervalo de tempo.
3. Acumular a concentração areal calculada para cada intervalo de tempo, obtendo a curva final de distribuição da concentração areal em função do raio da fratura.

A figura 3.4 é um exemplo esquemático do passo a passo apresentado e a figura 3.5 mostra o resultado final apresentado por Valkó & Oligney [3] da distribuição da concentração areal do agente de sustentação em função do raio da fratura, sendo este o resultado principal do trabalho.

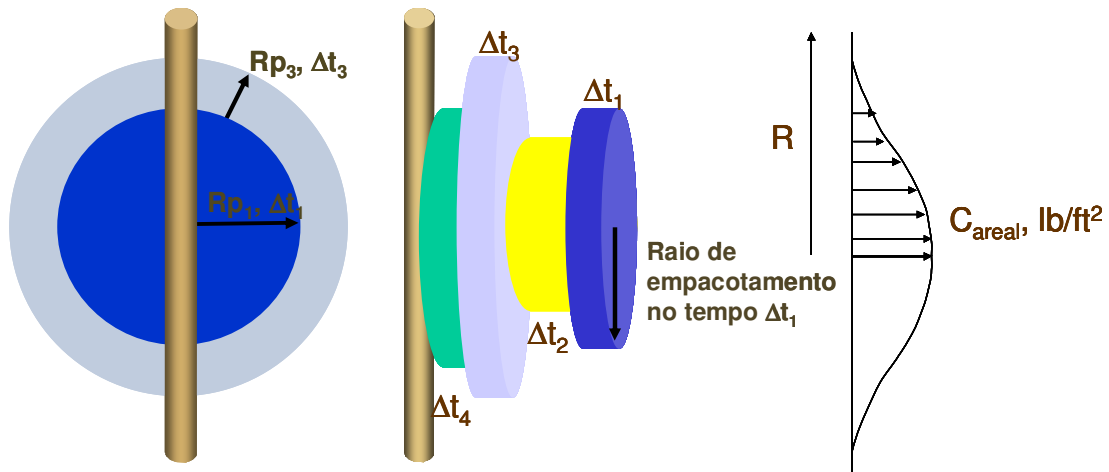


Figura 3.4 – Exemplo esquemático da estimativa da distribuição final da concentração do agente de sustentação em função do raio da fratura.

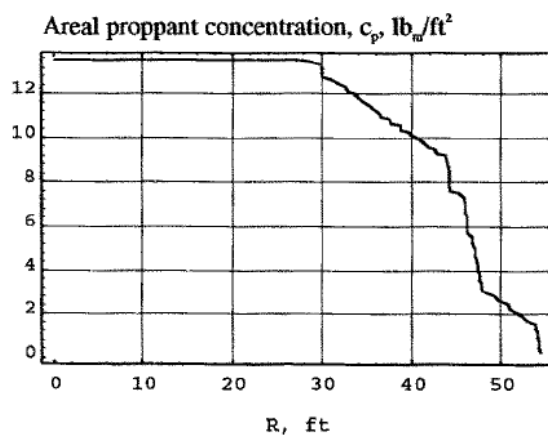


Figura 3.5 - Concentração areal final do agente de sustentação do exemplo apresentado por Valkó & Oligney [3].

Utilizando ainda considerações de balanço de massa, é possível reconstruir o cenário da operação de *fracpack* determinando o raio da fratura, a abertura da fratura e também a eficiência, todos ao longo do tempo.

O método proposto para a interpretação do comportamento de pressão das operações de *fracpack* não é baseado em um modelo específico de mecânica da fratura ou de transporte do agente de sustentação; ao invés disso, o método utiliza a curva de pressão de fundo diretamente e a processa com uma quantidade mínima de dados adicionais. Utilizando os dados registrados normalmente durante uma operação, sendo estes a vazão de injeção, a concentração no fundo do agente de sustentação e a pressão de fundo, é possível estimar o comprimento da fratura e a distribuição do agente de sustentação na fratura. Os únicos parâmetros adicionais empregados na análise são o módulo de deformação plana e o coeficiente de filtração.