# 6
# Modelagem e implementação

O trabalho proposto por esta Dissertação parte do desenvolvimento de um modelo e subsequentemente para a implantação do modelo em um software para a simulação do deslocamento do *gravel-pack*.

Portanto a seguir, primeiramente, será apresentado o modelo teórico e, posteriormente, será apresentado como este modelo foi implantado no referido software, bem como características a respeito do cálculo computacional.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510799/CA

## 6.1.
## O modelo do escoamento pelos furos dos tubos-base das telas de gravel-pack

Foi estabelecido como premissa básica que, durante a operação de deslocamento do *gravel-pack,* temos circulando, por um sistema fechado, uma mistura sólido-liquido composta pelo material do *gravel* (também chamado de propante ou agente de sustentação) e pelo fluido carreador (fluido de completação), geralmente composto por uma mistura de água industrial e sais solúveis, os quais são adicionados para o seu adensamento. Este sistema fechado é composto pela coluna de completação, ferramenta de gravel, poço aberto, anular revestimento-coluna e sistemas de superfície, tais como, bombas e tanques de armazenamento do fluido.

O escoamento do fluido terá então dois caminhos a seguir quando adentrar o espaço anular compreendido pelo poço aberto e as telas (Figura 6.1). O fluido poderá seguir pelo anular poço-tela (caminho 1) ou atravessar os furos do tubo base e escoar pelo anular de menor área, formado entre as telas e o *washpipe* (caminho 2). A maior parte do escoamento, como veremos posteriormente, tende a seguir pelo caminho

o qual irá gerar a menor perda de carga tendo, assim, a maior área aberta ao fluxo, que neste caso é o caminho 1. Uma parte significativa do escoamento irá atravessar as telas, passando pelos orifícios do tubo base, e escoará no anular restrito formado entre as telas e o *washpipe*. Este comportamento é tão mais significativo, quanto maior for a área aberta ao fluxo provida pelos orifícios do tubo base. Portanto, este comportamento tende a ser agravado à medida que caminhamos para o dedão do poço, onde o tubo base é dotado de uma furação não uniforme. À medida que caminhamos nesta direção a densidade de furos aumenta e, consequentemente, aumenta a área aberta ao fluxo. Se o desvio do escoamento do anular poço-tela para o anular tela-washpipe for muito elevado, a vazão ($Q_1$), no caminho 1, irá diminuir significativamente, fato que irá promover uma maior sedimentação das partículas sólidas do *gravel*, aumentando assim a altura da onda alfa. Este comportamento pode gerar uma onda alfa elevada o suficiente para ocasionar um embuchamento prematuro, ou seja, levar ao total plugeamento do espaço anular poço-telas.

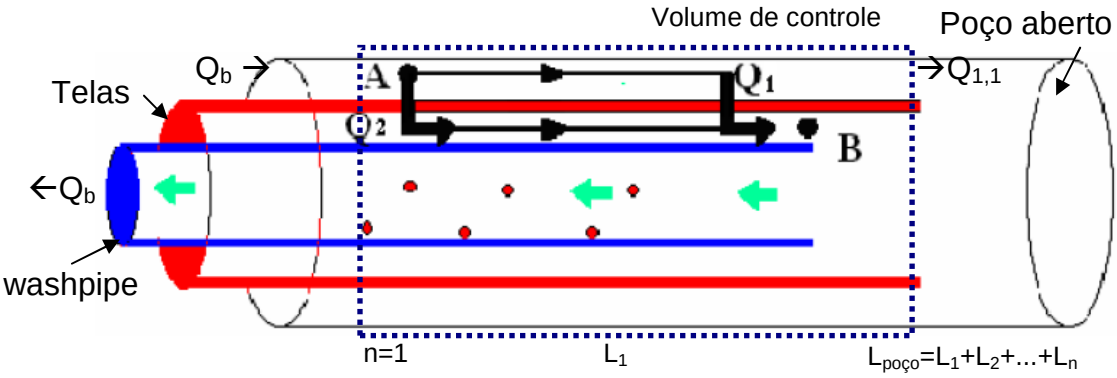


Figura 6.1 - Esquema de escoamento

Para o cálculo das perdas de carga é utilizada a eq. 6.1, onde a vazão Q é função da posição no trecho de poço horizontal (x). Já a perda de carga nos furos do tubo base é dada pela eq. 6.2.

$$\frac{dp}{dx} = \frac{2 f \rho Q^2(x)}{DA^2} \tag{6.1}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510799/CA

$$\Delta P_{furos} = \frac{0{,}5\rho_f Q_{furos}^2(x)}{C_D^2 A_{furos}^2} \tag{6.2}$$

### 6.1.1. Cálculo da distribuição de vazões ao longo do poço

De forma a modelar o escoamento, o domínio poço-telas-washpipe foi dividido em (n) volumes de controle onde cada célula corresponde ao comprimento de um tubo base. O modelo de Fernandes [45] fornece a quantidade de furos a serem perfurados em cada tubo base (Figura 6.1). A vazão de entrada no primeiro volume de controle será igual a vazão de bombeio ($Q_b$). Após a entrada irá ocorrer o que chamamos de “Divisão de vazões” ou “*Split* de vazões”, ou seja, a vazão de entrada será dividida em $Q_1$ e $Q_2$ conforme a relação de perdas de carga obtida em cada anular e nos furos do tubo base. Portanto, para determinarmos as vazões $Q_1$ e $Q_2$, foi considerado como premissas básicas:

- Escoamento unidirecional e isotérmico;
- Sistema fluido-*gravel* como sendo incompressível;
- Furos discretos;
- Sistema de solução por trechos.

A eq. 6.3 fornece o balanço de vazões enquanto que as eqs. 6.4 e 6.5 fornecem as perdas de carga nos caminhos 1 e 2.

$$Q_b = Q_1 + Q_2 \tag{6.3}$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_{poço-tela}(Q_1) + \Delta P_{furos}(Q_1) \tag{6.4}$$

$$\Delta P_2 = \Delta P_{furos}(Q_2) + \Delta P_{tela-washpipe}(Q_2) \tag{6.5}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510799/CA

onde:

$$\Delta P_{poço-tela} = \frac{32\, f \rho_f \Delta L Q_1^2}{\pi^2 (D_{poço}^2 - D_{ext.tela}^2)^2 (D_{,poço} - D_{ext.tela})} \quad (6.6)$$

$$\Delta P_{furos} = \frac{0{,}81 \rho_f Q_{(1ou2)}^2}{C_D^2 N^2 D^4} \quad (6.7)$$

$$\Delta P_{tela-washpipe} = \frac{32\, f \rho_f \Delta L Q_2^2}{\pi^2 (D_{\text{int}.tela}^2 - D_{ext.washpipe}^2)^2 (D_{\text{int}.tela} - D_{ext.washpipe})} \quad (6.8)$$

sendo:

$$C_1 = \frac{32\, f \rho_f \Delta L}{\pi^2 (D_{poço}^2 - D_{ext.tela}^2)^2 (D_{,poço} - D_{ext.tela})} \quad (6.9)$$

$$C_2 = \frac{0{,}81 \rho_f}{C_D^2 N^2 D^4} \quad (6.10)$$

$$C_3 = \frac{32\, f \rho_f \Delta L}{\pi^2 (D_{\text{int}.tela}^2 - D_{ext.washpipe}^2)^2 (D_{\text{int}.tela} - D_{ext.washpipe})} \quad (6.11)$$

Igualando $\Delta P_1$ e $\Delta P_2$ e substituindo $C_1$, $C_2$ e $C_3$, temos:

$$C_1 Q_1^2 + C_2 Q_2^2 + B_{n-1} = C_2 Q_2^2 + C_3 Q_2^2 + D_{n-1} \quad (6.12)$$

Onde, $B_{n-1}$ e $D_{n-1}$ são termos acumuladores de perda de carga e, para o primeiro volume de controle (n=1), valem: $B_0=0$ e $D_0=0$, ou seja, não há perda de carga acumulada para a primeira célula. Já para as demais células:

$$B_n = \Delta P_{poço-tela,n}(Q_{1,n}) + \Delta P_{furos,n}(Q_{1,n}) \quad (6.13)$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510799/CA

$$D_n = \Delta P_{tela-waspipe,n}(Q_{2,n}) + \Delta P_{furos,n}(Q_{2,n}) \quad (6.14)$$

Substituindo $Q_2=Q_b$-Q1 na eq. 6.12 e resolvendo o polinômio resultante, podemos determinar $Q_1$. Uma vez de posse do valor de $Q_1$, podemos substituí-lo na eq. 6.3 e, assim, determinar $Q_2$.

Portanto, teremos determinado assim, a divisão de vazões para a primeira célula do modelo. Na célula subseqüente (n=2), os termos acumuladores ($B_1$ e $D_1$) irão receber as perdas de carga acumuladas da primeira célula e assim por diante.

O modelo proposto foi então passado para a forma de algoritmo e alimentado sob a forma de código computacional. O modelo computacional foi implementado através de passos discretos, onde as equações previamente descritas são resolvidas para cada célula, separadamente, e a condição de saída (vazão de saída) da cada célula será a condição de entrada da próxima e, assim por diante até atingir o fim do poço ($L=L_{poço}$).

Nestas condições, foi possível então definir todo o vetor de vazões ($Q_1$ e $Q_2$) para todas as células, definindo assim, quanto da vazão inicial ($Q_b$), escoa por cada anular e por todo o poço. É importante ressaltar que a divisão de vazões será influenciada pela quantidade de furos do tubo-base, ou seja, a medida que o número de furos do tubo base aumenta, quando caminhamos em direção ao fim do poço, a perda de carga nos furos tende a diminuir, portanto, é de se esperar que a vazão pelo caminho do anular restrito ($Q_2$) tenda a aumentar.

## 6.2. Implementação do modelo

Primeiramente, na implementação, o comprimento do trecho horizontal do poço foi dividido em n tubos base. Foi criado um vetor que recebe a quantidade de furos do tubo base conforme a posição n do cálculo.

Como visto anteriormente, a operação de deslocamento do *gravel-pack* é dividida em três etapas, injeção, onda alfa e onda beta. O *split* de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510799/CA

vazões será implementado durante a propagação da onda alfa de modo a determinar quanto da vazão do anular poço-tela é desviado, efetivamente, para o anular restrito tela-washpipe. Este procedimento irá determinar a altura da onda alfa, verificando assim, se a vazão remanescente no anular poço-telas não será demasiadamente pequena para ocasionar uma onda alfa alta o suficiente a ponto de promover o plugueamento prematuro deste anular.

Como parte dos cálculos, é de extrema importância modelar o escoamento nos tubos com furação diversiva durante o deslocamento da onda beta, já que nesta etapa são alcançados os maiores níveis de perdas de carga, principalmente, ao fim da mesma, ou seja, junto ao calcanhar do poço. Neste ponto, pelo modelo de Fernandes [45], a densidade de furos diminui muito e, consequentemente, a passagem do fluido pelos furos do tubo base irá gerar uma sobrepressão no sistema. A onda beta deslocada irá pluguear todos os furos do tubo base que estiverem atrás dela forçando todo o volume de fluido bombeado a passar por uma quantidade de furos cada vez menor. Por isso este cálculo é importante, pois nos informará se, para a furação proposta, não estaremos fraturando a formação antes do total empacotamento do anular.

Adicionalmente, para o cálculo da divisão de vazões, é importante destacar que a eq. 6.6, durante o deslocamento da onda beta, deverá considerar uma área aberta ao fluxo diferente daquela considerada durante a etapa de deslocamento da onda alfa. Nesta fase, o anular poço-tela estará reduzido por conta do leito de *gravel* depositado durante a propagação da alfa.

A partir daí a eq. 2.20 irá considerar um terceiro termo, o qual será somado aos demais, e este termo será referente à perda de carga promovida pela passagem do escoamento pelos furos dos tubos base remanescente. A Figura 6.2 mostra uma curva típica do perfil de pressões simuladas, durante o deslocamento do *gravel-pack*, com um tubo base normal e, também mostra uma curva para um tubo base dotado de furação não uniforme, onde podemos observar o ganho extra em perda de carga devido à passagem de todo o volume bombeado por uma

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510799/CA

quantidade de furos cada vez mais reduzida, à medida que a onda beta avança. Para o caso em questão, podemos notar um ganho de cerca de 400 psi em perda de carga extra, ao fim da etapa de propagação da onda beta.

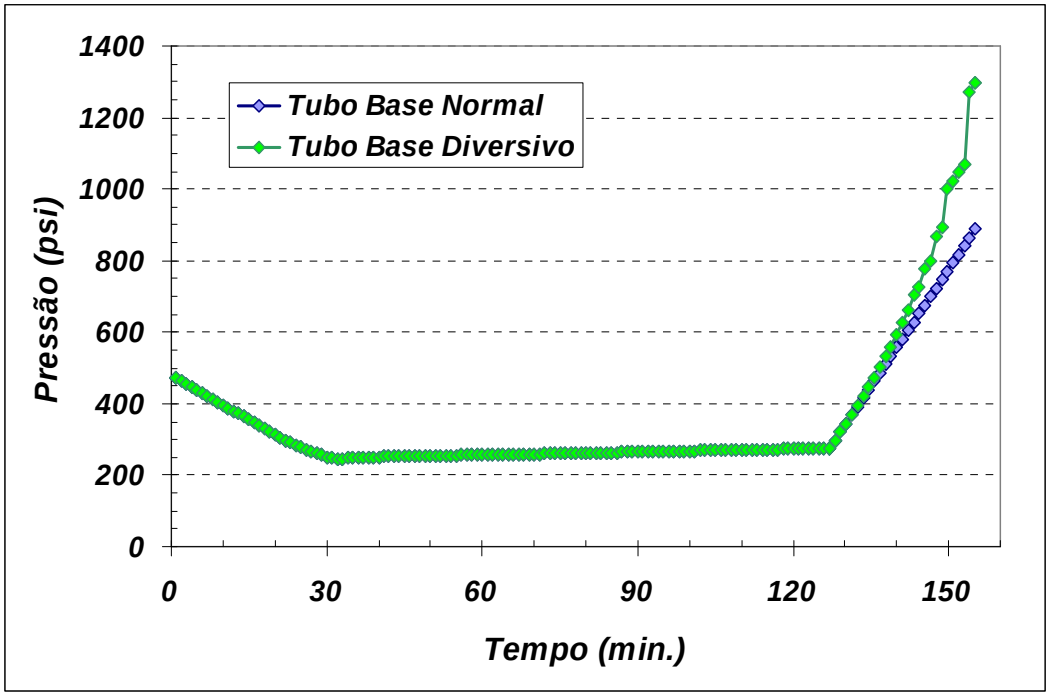


Figura 6.2 - Perfil de pressões comparativo entre um tubo base de furação regular e um com furação não uniforme

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510799/CA