



Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2023) v. 10, n. 1, pp. 13–22  
<https://doi.org/10.21712/lajer.2023.v10.n1.p13-22>

## Perda de carga promovida por influxo radial em poços horizontais de produção de petróleo

### *Influence of radial inflow on pressure drop in horizontal oil wells*

Heitor Lopes de Souza Ribeiro<sup>1</sup>, Julian David Hunt<sup>2</sup>, Oldrich Joel Romero<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup> Engenheiro de Petróleo, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

<sup>2</sup> Pesquisador, *International Institute of Applied Systems Analysis* – IIASA, Laxenburg, Austria

<sup>3</sup> Professor do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

\*Autor para correspondência, E-mail: [oldrich.romero@ufes.br](mailto:oldrich.romero@ufes.br)

Received: 15 April 2023 | Accepted: 31 Mai 2023 | Published online: 10 June 2023

**Resumo:** Neste trabalho se investiga a interferência do influxo radial no perfil de pressão e na velocidade axial na linha de centro de poços horizontais de produção de petróleo, procurando o entendimento da dinâmica de acoplamento poço-reservatório na indústria petrolífera. O fluido é monofásico e incompressível, escoia em regime turbulento em uma tubulação horizontal com 3 m de comprimento e 10 cm de diâmetro. Fluido adentra radialmente através de diversos furos de diâmetro de 1 cm presentes na parede da tubulação. A modelagem numérica é realizada utilizando o *software* Ansys Fluent 15.0, com pós-processamento e coleta de dados através do CFD-Post. Os resultados mostram que, a presença do influxo radial resulta em um aumento no diferencial de pressão ao longo da tubulação, devido à restrição ao fluxo axial através do aparecimento de uma barreira hidrodinâmica promovida pelo influxo radial. Nota-se também que quanto maior a intensidade do fluxo radial, maior será o aumento da velocidade axial máxima de fluxo.

Palavras-chave: perfil de fluxo, furação diversiva, reservatórios de petróleo, simulação numérica, Fluent.

**Abstract:** *The present work investigates the influence of radial inflows on pressure profiles and maximum axial flow velocity in the center line of horizontal oil production wells. It aims to help in understanding the dynamics of well-reservoir coupling in the context of the oil industry. The flow is characterized as monophasic, incompressible and turbulent, flowing internally to a horizontal pipe 3 m long and 10 cm in diameter. The fluid enters the duct radially through several holes of 1 cm diameter present in the pipe wall. Numerical modeling is performed using ANSYS FLUENT 15.0 software, with post-processing and data collection through CFD-Post. The results show that the presence of the radial influx results in an increase in the pressure differential along the pipe, due to the restriction to the axial flow through the appearance of a hydrodynamic barrier promoted by the radial influx. It is also noted that the higher the radial flow intensity, the greater the maximum axial flow velocity.*

**Keywords:** *pressure profile, perforated tube, oil reservoir, numerical simulation, Fluent.*

## 1 Introdução

Com o aumento da demanda mundial de petróleo se faz necessário o desenvolvimento e otimização de tecnologias que visam promover o aumento da produtividade de hidrocarbonetos com custos controlados (Rigatto e Romero, 2018; Guidi e Romero, 2018; Araujo e Romero, 2019; Romero e Lima, 2019; Martins et al., 2020; Santos et al., 2020). Neste contexto, poços horizontais, que apresentam altos índices de produção quando comparados a poços verticais em reservatórios delgados, são uma alternativa interessante (Joshi, 1991; Ozkan et al., 1993)

De acordo com Rosa et al. (2006), poços horizontais podem produzir com menores diferenciais de pressão devido a sua maior produtividade e área aberta ao fluxo, o que minimiza ou ao menos retarda o aparecimento de cones de água ou gás no poço. Porém, se invadidos por cone de água, estes encontram-se

irrecuperavelmente perdidos. Logo, o uso de poços horizontais de produção deve visar o retardo da produção de água no campo e não grandes vazões de produção.

Sansoni Jr. (2015) destaca que a ampliação do trecho horizontal de um poço produtor intensifica as perdas de carga em seu interior, resultando no aumento do diferencial de pressão próximo à curvatura do poço (*heel*), se comparado com sua extremidade (*toe*). O agravamento das perdas de carga ao longo do poço gera acúmulo de fluido perto do “calcanhar” do poço junto a uma diminuição do fluxo na extremidade do mesmo. Tal comportamento promove um escoamento com perfil de distribuição de vazão e pressão heterogêneo no trecho horizontal aberto ao fluxo, contribuindo assim para a antecipação do *breakthrough* e, conseqüentemente, reduzindo sua vida produtiva.

Entre os fatores que favorecem o aumento da perda de carga, considerando o acoplamento poço-reservatório, destacam-se o atrito entre o fluido e a parede da tubulação (*liner*) e a presença dos furos ao longo da tubulação, os quais propiciam a entrada do fluido proveniente do reservatório para o interior do *liner*.

O pequeno diâmetro dos furos restringe a passagem do fluido no sentido reservatório-*liner*. Tal restrição resulta em um aumento significativo da velocidade radial, intensifica as perdas por atrito e reduz a pressão de entrada do fluido para o interior do tubo. Segundo Schulkes e Utvik (1997) o aumento da velocidade do influxo radial promove uma obstrução considerável ao escoamento axial, intensificando a queda de pressão no escoamento axial.

Ouyan et al. (1998) relatam que escoamento em trechos horizontais não é uniforme, principalmente quando se tem interferências geradas por influxos radiais no escoamento axial.

Visando uma uniformização de fluxo para produção de hidrocarbonetos em poços horizontais, surge a tecnologia de Furação Diversiva. A técnica consiste em variar a densidade de furos no *liner* ao longo da seção exposta ao reservatório, aumentando a densidade de furos nas porções próximas a região do *toe* e diminuindo-a à medida que se aproxima do *heel* (Figura 1). O *heel* é o trecho que conecta a parte horizontal com a vertical do poço produtor. O trecho vertical não é mostrado na figura.

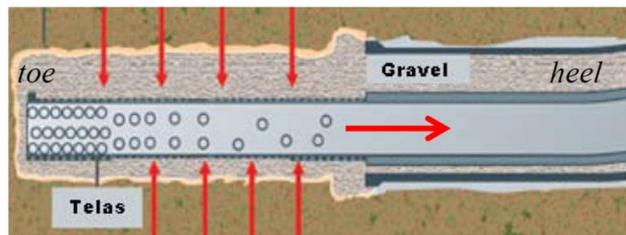


Figura 1. Acoplamento poço-reservatório ao longo de um trecho horizontal do poço produtor, destacando o *liner* com a furação diversiva. O *toe* se encontra no lado esquerdo e o *heel* no lado direito. O fluxo axial ocorre no sentido *toe - heel*. O influxo radial também é mostrado. Fonte: adaptado de Fernandes e Silva (2006).

Nas regiões próximas ao *toe* concentra a maior quantidade de furos, acarretando aumento no diferencial de pressão nessa região, enquanto na região do *heel*, o acréscimo no diferencial de pressão entre o poço e o reservatório seria menor. O resultado é uma tendência de uniformização das perdas de carga totais e do perfil de pressão e vazão no interior da coluna de produção, visando o retardo da formação de cones de água ou de gás.

A furação diversiva é também aplicada em poços horizontais injetores (Mantegazini e Romero, 2019; Mantegazini e Romero, 2021).

Devido à complexidade que envolve escoamentos com influxos radiais, o uso de ferramentas de modelagem numérica 3D, como a dinâmica de fluidos computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*), auxiliam na melhor compreensão deste fenômeno e a baixo custo.

Logo, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a interferência do influxo radial no escoamento axial de uma tubulação horizontal na porção de acoplamento poço-reservatório de um poço produtor horizontal por meio do uso de modelagem numérica 3D.

## 2 Metodologia

### 2.1 Especificação do problema

A geometria simplificada utilizada é uma tubulação horizontal, também denominada *liner*, com 3 m de comprimento ( $L$ ), 10 cm de diâmetro interno ( $D$ ) e dezesseis furos de diâmetro ( $d$ ) de 1 cm dispostos em quatro planos com quatro furos por plano, totalizando dezesseis furos, conforme Figura 2. As dimensões

(diâmetro e furos) são baseadas em dados da empresa Tecvix (Tecvix, 2019), que produz e comercializa tubos de colunas de produção. Segundo a empresa, os tubos perfurados possuem diâmetro interno variando de 2,375" (6,032 cm) a 7" (17,78 cm), e furos de diâmetro entre 0,375" (0,952 cm) e 0,75" (1,905 cm).

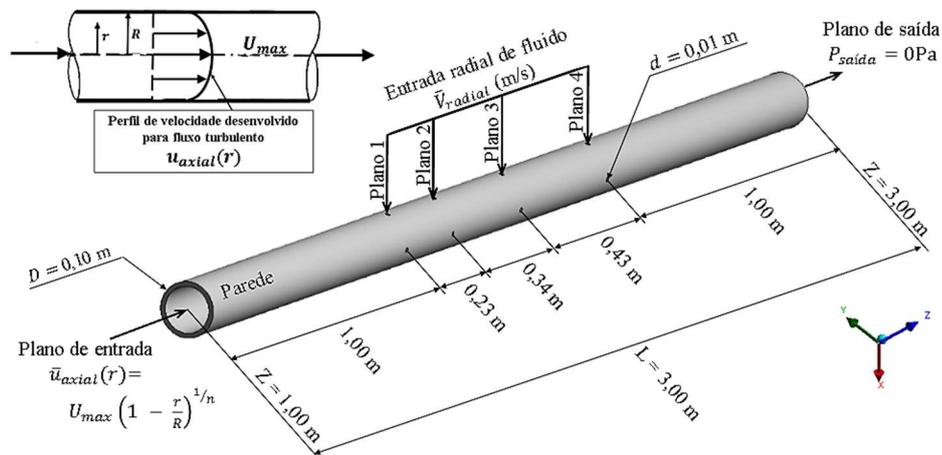


Figura 2. Representação esquemática do problema estudado formado por uma tubulação com fluido entrando pelo lado esquerdo e saindo pelo lado direito. Também, fluido ingressa radialmente por furos dispostos ao longo da superfície da tubulação. Fonte: adaptado de Ribeiro e Romero (2019).

Para fins de simplificação do problema, o óleo produzido possui propriedades similares às da água a uma temperatura de 25 °C, é considerado homogêneo e incompressível com viscosidade de 0,001003 kg/(m s) e densidade de 998,2 kg/m<sup>3</sup>.

São estudados dois cenários. O primeiro, representado pelo Caso 1, sem a presença de influxo radial, e o segundo, abrangendo os Casos 2, 3, 4 e 5, com a presença de influxo radial, os quais foram atribuídos valores distintos de velocidade média de fluxo radial, conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1. Velocidade média de escoamento axial e radial, razão de velocidades, número de Reynolds e quantidade de furos.

Caso	$\bar{U}_{axial}$ , m/s	$\bar{V}_{radial}$ , m/s	$R_v$	$R_e$	Número de furos por plano	Total de furos
1	4,0	0,0	0,0		0	0
2	4,0	1,2	0,3		4	16
3	4,0	4,0	1,0	398.257	4	16
4	4,0	6,0	1,5		4	16
5	4,0	8,0	2,0		4	16

Por cada furo ingressa fluido ao interior do *liner* a uma velocidade média  $\bar{V}_{radial}$ . A alimentação de fluido é também pelo plano de entrada do *liner*, neste caso axialmente a uma velocidade média  $\bar{U}_{axial}$ . A razão  $R_v$  entre estas velocidades é definido por

$$R_v = \frac{\bar{V}_{radial}}{\bar{U}_{axial}} \quad (1)$$

Outro parâmetro de interesse é o número de Reynolds  $R_e$ , o qual descreve o balanço entre as forças inerciais ( $\rho \bar{U}_{axial} D$ ) e viscosas ( $\mu$ )

$$R_e = \frac{\rho \bar{U}_{axial} D}{\mu} \quad (2)$$

O escoamento é turbulento uma vez que o número de Reynolds é  $R_e > 2300$  (Tabela 1).

Os valores de velocidade média axial foram aproximados de dados do Boletim Técnico de Produção de Petróleo e Gás de janeiro de 2019 da Agência nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP) referente ao poço 7-LUC-90HP-AM, da bacia Solimões no estado do Amazonas. Tal poço apresentou produção de 446 bbl/d em janeiro de 2019. Neste estudo a vazão de entrada referente ao valor de velocidade média axial adotado é de 432,5 bbl/d, logo, é justificável a aproximação dos valores de velocidade média axial.

## 2.2 Formulação matemática

O problema de interesse é governado pela equação da continuidade para um fluido com massa específica  $\rho$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0, \quad (3)$$

e pela equação da conservação de *momentum* para um referencial inercial e não acelerado

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla \cdot p + \nabla \cdot \underline{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{F}, \quad (4)$$

onde  $p$  representa a pressão termodinâmica local;  $\underline{\tau}$  o tensor de tensão;  $\rho \vec{g}$  as forças de corpo gravitacionais e  $\vec{F}$  as forças de corpo externas, que podem ser definidas de acordo com o problema (Ansys, 2013). O tensor de tensão  $\underline{\tau}$  é relacionado as forças viscosas mediante

$$\underline{\tau} = \mu_{meff} [\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T], \quad (5)$$

onde  $\nabla \vec{u}$  é o gradiente de velocidade e  $\mu_{meff}$  é a viscosidade efetiva do fluido descrita através de

$$\mu_{meff} = \mu_f + \mu_t, \quad (6)$$

$\mu_f$  é a viscosidade do fluido e  $\mu_t$  a viscosidade devido a turbulência obtida da relação

$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon}, \quad (7)$$

sendo  $C_\mu$  igual a 0,09. Os valores de  $k$  e de  $\varepsilon$  são determinados através da modelagem da turbulência detalhada na subseção seguinte.

### 2.2.1 Modelagem da turbulência

O comportamento turbulento do escoamento é governado pelo modelo  $k - \varepsilon$  padrão (Ansys, 2013). Neste modelo são resolvidas duas equações de transporte, uma para a energia cinética turbulenta  $k$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} k) = \nabla \cdot \left[ \left( \frac{\mu_{meff}}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon, \quad (8)$$

e outra para a dissipação da energia cinética turbulenta por unidade de massa  $\varepsilon$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \frac{\mu_{meff}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (P_k + C_{\varepsilon 3} P_b) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (9)$$

As Equações (8) e (9) dependem de valores de viscosidade efetiva  $\mu_{meff}$  (Equação 6) e dos coeficientes  $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ ;  $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ ;  $\sigma_k = 1,0$  e  $\sigma_\varepsilon = 1,3$  (Araújo, 2012).

### 2.2.2 Condições de contorno

Para resolver o conjunto de equações apresentado, condições de contorno são especificadas utilizando a notação da Figura 2, e são:

- (a) Entrada – é imposto perfil de velocidade axial desenvolvido  $u_{axial}(r)$  com velocidade média axial ( $\bar{U}_{axial}$ ) fixado em 4,0 m/s (Tabela 1). O perfil de velocidade é regido pela Lei de Potência para escoamento turbulento em tubos descrita por

$$u_{axial}(r) = U_{max} \left( 1 - \frac{r}{R} \right)^{1/n}, \quad (10)$$

que depende da posição do raio  $r$ , da velocidade máxima  $U_{max}$ , do raio máximo  $R$  do duto e do expoente  $n$ , que varia em função do número de Reynolds  $Re$  através da Equação (11) (Fox et al., 2011)

$$n = 1,7 + 1,8 \log Re, \quad (11)$$

adicionalmente, na entrada são definidos a energia cinética turbulenta  $k = 0,75$  e a taxa de dissipação turbulenta  $\varepsilon = 0,75$  (Ansys, 2013);

- (b) Saída – pressão no plano de saída da tubulação é fixada no valor da pressão manométrica atmosférica,  $P_{saida} = 0 Pa$ ;
- (c) Parede – parede estacionária, sem deslizamento e impenetrável, com o tratamento de proximidade na parede *Enhanced Wall Treatment*, visando uma melhor resolução do desenvolvimento da camada limite do escoamento próximo a parede do tubo;
- (d) Entrada pelos furos – velocidade de fluxo radial de fluido com os valores 0,0; 1,2; 4,0; 6,0 e 8,0 m/s para os casos 1, 2, 3, 4 e 5 respectivamente.

### 2.3 Abordagem numérica

O *software* Ansys Fluent 15.0 é utilizado para resolver as equações que governam o fenômeno de interesse com base no campo de pressão, de maneira que este é obtido resolvendo-se uma equação de correção de pressão manipulando as equações de continuidade e *momentum* (Ansys, 2013).

O campo de velocidade, por sua vez, é fornecido através da resolução da equação de correção de pressão devido à restrição de conservação de massa. Como a equação de correção de pressão é derivada das equações de continuidade e de *momentum*, a correção do campo de velocidade pela pressão atende a continuidade.

As propriedades do fluido, envolvidas nas equações, são independentes do tempo, logo o *solver* obtém a solução em regime de estado estacionário.

O processo de solução é iterativo entre as equações de correção de pressão e a equação de conservação da massa ocorrendo de forma repetitiva até a obtenção da convergência.

A geometria é obtida no *Design Modeler* presente no *Workbench* e a discretização através da ferramenta *Mesh*. A quantidade de elementos é determinada através de um teste de independência de malhas exposto na próxima subseção.

O perfil de velocidade turbulento, Equações (10) e (11), é implementado no *software* mediante a opção UDF – *User-Defined Function* (Figura 3) para reduzir o esforço computacional. Foi utilizado a ferramenta *Setup* do *Workbench*, que compila o código para sua posterior interpretação pelo *software*.

```
#include"udf.h"
DEFINE_PROFILE(velocity, thread, position)
{
    /* Essa UDF aplica um perfil de velocidade turbulento 3D em um boundary do fluent */
    /*******/
    /* the centroid of the boundary face (x0,y0,z0) */
    real x0 = 0.0;
    real y0 = 0.0;
    real z0 = 0.0;
    real Max_Radius = 0.05; /* raio maximo da tubulacao em m */
    real Max_Velocity = 4.40; /* velocidade media do escoamento em m/s */
    real n = 8.379;
    /*******/
    real x[ND_ND]; /* this will hold the position vector of the face/element centroid */
    real r; /* distance from the centre of the pipe */
    real Velocity_Profile; /* Velocity to be written to boundary */
    face_t f; /* f the hooked boundary face in fluent */
    /* This starts the main loop. As each element on the face is looped over its centroid is determined and the distance
    from this to the centre of the parabola. The velocity required is calculated based on this distance and applied. */
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_CENTROID(x, f, thread); /* the coordinates of the current face/element centroid accessed by F_CENTROID */
        r = pow(pow((x[0] - x0), 2) + pow((x[1] - y0), 2) + pow((x[2] - z0), 2), 0.5);
        /* Write Profile in x */
        Velocity_Profile = Max_Velocity * 1.042 * (pow((1-(r/Max_Radius)),(1/n)));
        /* Write velocity boundary condition */
        F_PROFILE(f, thread, position) = Velocity_Profile; /* Apply velocity profile to selected boundary */
    }
    end_f_loop(f, thread)
    /*******/
}
```

Figura 3. Detalhe do código utilizado na UDF para adequar o perfil de velocidade axial na entrada do tubo.

### 2.3.1 Teste de independência de malha

Foram realizados testes com quatro malhas alterando os níveis de refinamento, isto é, o tamanho e número de elementos (Tabela 2).

Tabela 2. Informações das malhas testadas e seus respectivos tempos de simulação.

Malha	Número de elementos	Tempo de simulação, min
1	460.473	27,46
2	712.463	54,00
3	1.071.821	104,46
4	1.336.646	141,98

As malhas foram refinadas utilizando a ferramenta *Mesh* variando os parâmetros: *relevance*, *relevance center*, *smoothing*, *transition*, *use advanced size fun*, *span angle center*, *proximity min size*, *min size*, *max face size*, *max size*. O refinamento próximo a parede do tubo ocorreu alterando-se os parâmetros *transition ratio*, *maximum layers* e *growth rate* do item *inflation*, da ferramenta *Mesh*.

A maior discrepância ocorreu entre a Malha 1 e as Malhas 2, 3 e 4. Comparando-se as malhas 2 e 4 foi observado uma diferença de 2%. Assim, considerando o menor tempo de simulação, optou-se pela Malha 2 com 712.463 elementos (Figura 4) para este trabalho.

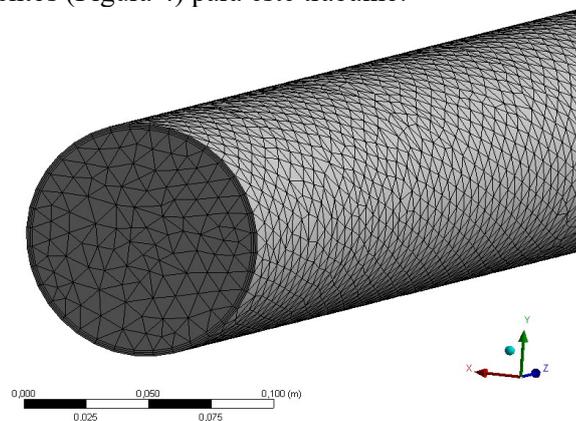


Figura 4. Domínio discretizado utilizado neste estudo.

## 3 Resultados e comentários

O pós-processamento dos resultados foi através do *CFD-Post*. A velocidade axial máxima e a pressão foram coletadas ao longo da linha de centro no duto em 300 pontos equidistantes.

Na Figura 5 é apresentado o comportamento da velocidade axial máxima para os cinco casos considerados detalhados na Tabela 1. No Caso 1 sem furos ( $R_v = 0,0$ ) utilizado como base de comparação, o perfil de velocidade se apresenta com uma pequena flutuação ao longo do comprimento do tubo. Tal comportamento é relacionado a variação do campo de velocidade do escoamento, uma vez que este é turbulento.

Nos Casos 2 ( $R_v = 0,3$ ), 3 ( $R_v = 1,0$ ), 4 ( $R_v = 1,5$ ) e 5 ( $R_v = 2,0$ ) com influxo radial, a variação da velocidade axial máxima é mais intensa nas proximidades dos planos de furos, devido aos acréscimos de velocidades no escoamento axial, resultante da entrada de massa nos furos.

A vazão pós-furo ( $q_{pf}$ ) é a soma entre a vazão antes do furo ( $q_{af}$ ) e a vazão no furo ( $q_f$ ). Logo, considerando um elemento diferencial que contém um plano de furos, a velocidade média pós-furos ( $\bar{U}_{axial\_pf}$ ) será maior que a velocidade média antes dos furos ( $\bar{U}_{axial}$ ) na proporção do termo  $4V_{radial}(d/D)^2$ , considerando todos os furos com diâmetro  $d$ . Assim, o aumento da velocidade observada na figura é matematicamente descrita por  $\bar{U}_{axial\_pf} = \bar{U}_{axial} + 4\bar{V}_{radial}(d/D)^2$ , que em termos da razão de velocidade  $R_v$  resulta em

$$\bar{U}_{axial\_pf} = \bar{U}_{axial} \left[ 1 + 4R_v \left( \frac{d}{D} \right)^2 \right]. \quad (12)$$

Da equação proposta, o acréscimo de massa proveniente dos furos (que represente o óleo sendo produzido) é proporcional ao termo  $4R_v \left(\frac{d}{D}\right)^2$ . Entretanto como os diâmetros do furo  $d$  e do *liner*  $D$  são constantes, o parâmetro que influencia na velocidade média do escoamento  $\bar{U}_{axial_{pf}}$ , é a razão de velocidade  $R_v$ .

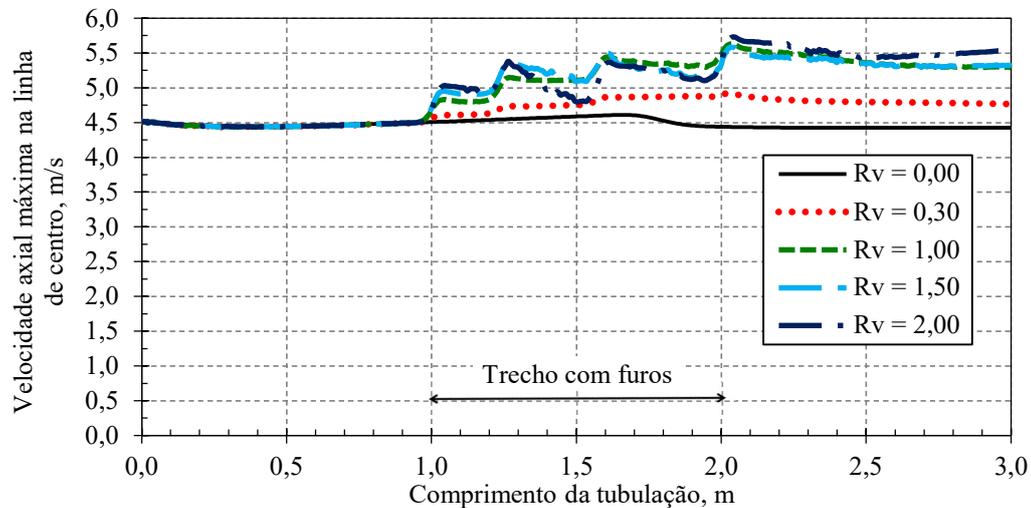


Figura 5. Velocidade axial ao longo da linha de centro da tubulação variando  $R_v$ .

Nos casos estudados tem-se um incremento em  $R_v$ , o qual origina o aumento da velocidade média após os furos, isso acarreta em maiores as perdas de carga por atrito, corroborando os resultados de Vale (2010). Este comportamento fica evidente na variação da pressão apresentada na Figura 6.

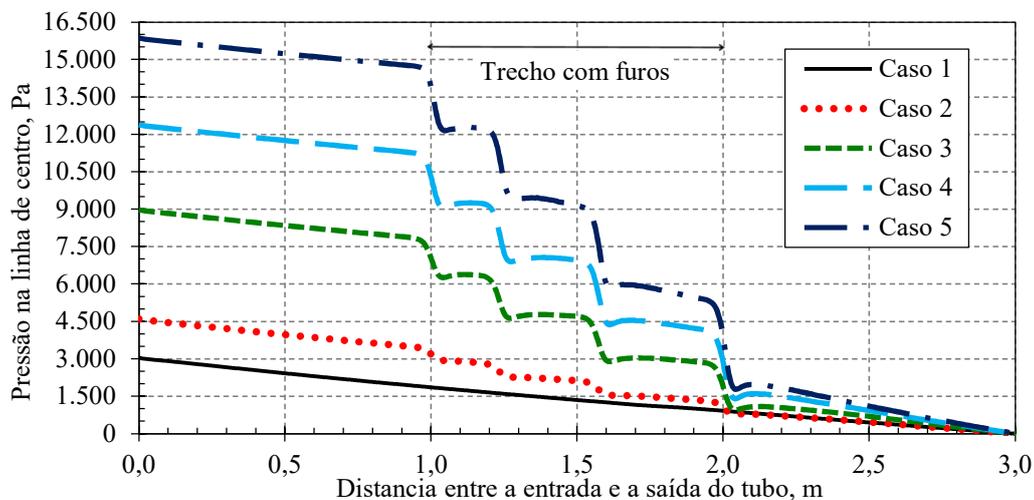


Figura 6. Pressão ao longo da linha de centro da tubulação variando  $R_v$ .

Para o Caso 1, sem furos, a queda de pressão é resultado unicamente do atrito entre o fluido e a parede da tubulação. Já para os Casos 2, 3, 4, e 5, que possuem influxo radial, além de as perdas por atrito, estes também sofrem queda de pressão pontuais nas regiões em que se localizam os planos de furos. Esta queda de pressão é relacionada a formação de uma barreira hidrodinâmica provenientes da entrada radial de fluido através dos furos, promovendo uma obstrução de parte da área aberta ao fluxo axial da tubulação e acarretando em uma interferência significativa no escoamento axial. A pressão é fixa na saída por exigência da condição de contorno neste plano, conforme discutido na subseção §2.2.2.

Segundo Schulkes e Utvik (1997), o jato cruzado resultante do influxo radial pode ser considerado como um “obstáculo sólido” que aumenta de tamanho à medida que o valor de  $R_v$  cresce, promovendo assim quedas de pressão nas regiões onde se localizam as entradas radiais de fluido. A comparação qualitativa dos resultados numéricos obtidos neste trabalho com os experimentos de Schulkes e Utvik (1997) é apresentado nas Figuras 7 e 8.

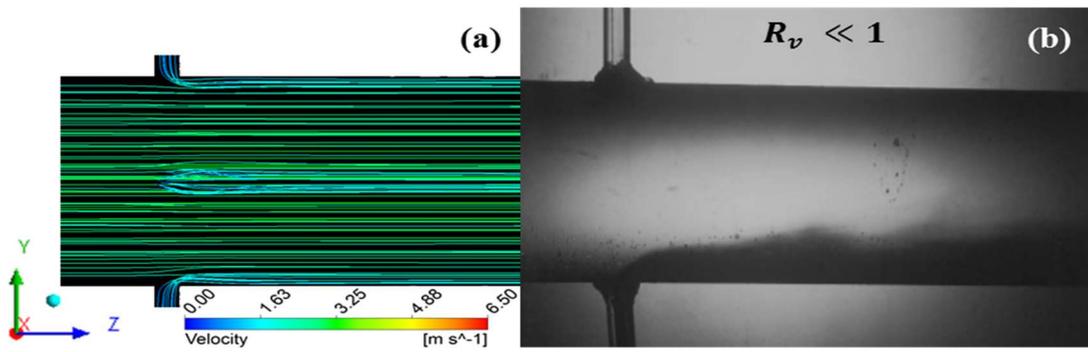


Figura 7. (a) Linhas de corrente no trecho com furos para  $R_v = 0,3$  neste trabalho; (b) Experimentos de Schulkes e Utvik (1997) para  $R_v \ll 1$ .

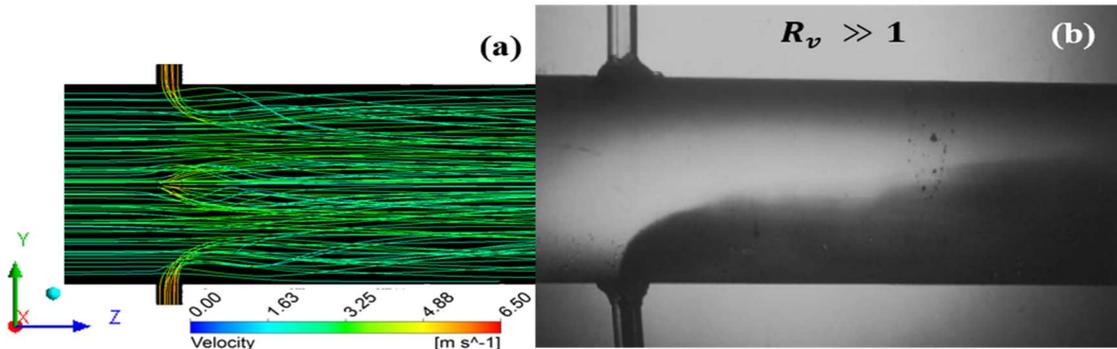


Figura 8. (a) Linhas de corrente no trecho com furos para  $R_v = 2,0$  neste trabalho; (b) Experimentos de Schulkes e Utvik (1997) para  $R_v \gg 1$ .

De acordo com Schulkes e Utvik (1997), para  $R_v \gg 1$ , o jato cruzado proveniente do influxo radial sofre deflexão em regiões mais afastadas da parede do tubo se comparado com casos em que  $R_v \ll 1$ . Já em cenários com  $R_v \ll 1$ , os autores relatam que jato cruzado se curva completamente nas regiões próximas à parede do tubo no instante em que sai do furo para o interior da tubulação.

Comparando-se as Figuras 7a e 8a, percebe-se que quanto maior a velocidade de influxo radial, isto é, altos  $R_v$ , maior é a penetração do jato de fluido no interior do duto, o qual implica em aumento da barreira hidrodinâmica, que como visto, aumenta a perda de carga. Em adição, a comparação com os experimentos de Schulkes e Utvik (1997) mostram uma adequada coerência qualitativa.

Na Figura 9 é representado o campo de velocidade para os casos 2 e 5, coletadas em um plano axial-vertical entre os eixos de coordenadas YZ através da ferramenta *CFD-Post*.

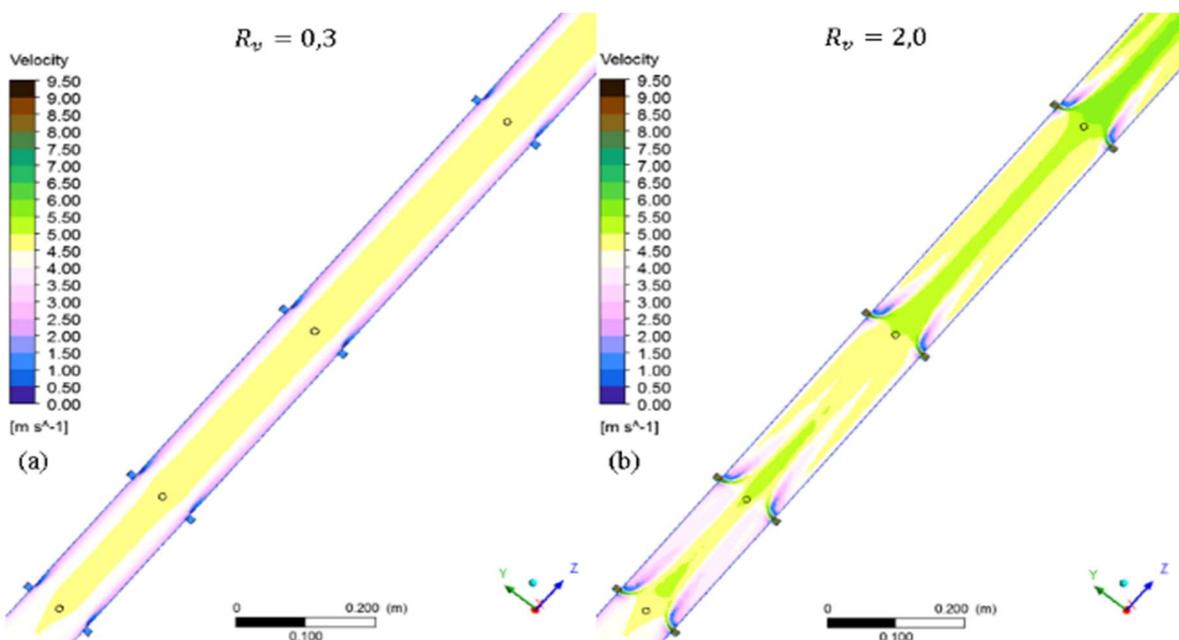


Figura 9. Contornos de velocidade para o Caso 2 e 5 com influxo radial.

Nesta figura percebe-se que a perturbação gerada pelo influxo radial na velocidade axial é mais intensa para maiores valores de  $R_v$ . A presença do influxo radial gera uma zona de baixa velocidade ou eventual recirculação do fluido logo após o jato cruzado, sendo mais intensa quanto maior for o valor de  $R_v$ . Este comportamento é coerente com o relato de Schulkes e Utvik (1997).

## 4 Conclusões

Constatou-se que a presença do influxo radial (representado por  $R_v$ ) gera uma interferência nos perfis de pressão e de velocidade do fluxo axial, de maneira que, quanto maior for a magnitude do influxo radial, maior será a intensidade da interferência.

No perfil de pressão, a presença de influxo radial promove aumento da perda de carga proporcionais às variações dos valores de  $R_v$ , devido a obstrução de parte da área aberta ao fluxo nas localidades em que se encontram os planos de furos.

Já nos perfis de velocidade axial, o aumento de  $R_v$  acarreta em acréscimos de velocidade de fluxo axial nas regiões onde se tem entrada mássica pelos furos, resultando em um aumento de vazão. Porém quanto maior os valores de  $R_v$ , maior será a desaceleração do fluxo axial resultante do aumento nas perdas por atrito.

Constatou-se também que, quanto mais intenso o influxo radial, mais distante da parede da tubulação o jato cruzado proveniente dos furos se curva, acentuando assim a perturbação promovida no fluxo axial.

Os resultados apresentados são coerentes com os encontrados na literatura que trata do assunto. Desta forma, percebe-se que o uso adequado de ferramentas de modelagem e simulação de fluidodinâmica computacional apresentam resultados viáveis no estudo de fenômenos envolvem o escoamento de fluidos em poços horizontais de produção de petróleo.

## Agradecimentos

Professor Oldrich Joel Romero agradece o apoio financeiro da Fapes – Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo, concedida mediante Termo de Outorga 356/2022, Edital Fapes N° 06/2021 Bolsa Pesquisador Capixaba.

## Referências bibliográficas

Ansys (2013) Ansys Fluent Theory Guide.

Araújo, FN (2012) ‘Modelagem da turbulência aplicada ao escoamento sobre uma placa plana inclinada’. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

Araujo, SSL e Romero, OJ (2019) ‘A CFD study of steam injection tubing heat losses’, *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, v. 27, n. 4. <<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052019000400600>>.

Boletim Técnico de Produção de Petróleo e Gás. [Sem título] (2019). Disponível em: <[http://www.anp.gov.br/images/publicacoes/boletins-anp/Boletim\\_Mensal-Producao\\_Petroleo\\_Gas\\_Natural/boletim-janeiro-2019.pdf](http://www.anp.gov.br/images/publicacoes/boletins-anp/Boletim_Mensal-Producao_Petroleo_Gas_Natural/boletim-janeiro-2019.pdf)>. Acesso em: 05 de jun. de 2019.

Fox, RW, Pritchard, PJ e McDonald, AT (2010) ‘Introdução à mecânica dos fluidos’, Rio de Janeiro, LTC.

Guidi, MC e Romero, OJ (2018) ‘Numerical Simulation of Surfactant Flooding in Petroleum Reservoirs’, *IEEE Latin America Transactions*, v. 16, n. 6. <<http://dx.doi.org/10.1109/TLA.2018.8444389>>.

Joshi, SD (1991) ‘Horizontal well technology’, Oklahoma, Pennwell.

Landman, MJ e Goldthorpe, WH (1991) ‘Optimization of perforation distribution for horizontal wells’ (Paper 23005), *SPE Asia-Pacific Conference*, Perth.

Mantegazini, IS e Romero, OJ (2019) ‘Análise do escoamento em poços horizontais injetores completados com a técnica de furação diversiva’, *Research, Society and Development*, v. 8, n. 9. <<http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v8i9.1327>>.

Mantegazini, IS e Romero, OJ (2021) ‘Influência da vazão de injeção sobre a uniformização do perfil de fluxo em poços horizontais’, *Latin American Journal of Energy Research – Lajer*, v. 8, n. 2, pp. 1–13. <<https://doi.org/10.21712/lajer.2021.v8.n2.p1-13>>.

- Martins, JR, Ribeiro, DC, Pereira, FAR, Ribeiro, MP e Romero, OJ (2020) ‘Heat dissipation of the Electrical Submersible Pump (ESP) installed in a subsea skid’, *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles*, v. 75, n. 13. <<https://doi.org/10.2516/ogst/2020009>>.
- Ouyang, LB, Arbabi, S e Aziz, KA (1998) ‘Single-phase wellbore-flow model for horizontal, vertical, and slanted wells’. *SPE Journal*, v. 3, 11f.
- Ozkan, E, Sarica, C e Haci, M (1993) ‘Influence of pressure drop along the wellbore on horizontal-well productivity’ (Paper 57687), *SPE Production Operations Symposium*, Oklahoma.
- Ribeiro, HLS e Romero, OJ (2019) ‘Estudo da furação diversiva em poços horizontais produtores de petróleo’, *Research, Society and Development*, v. 8, n. 10. <<http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v8i10.1362>>.
- Rigatto, SF e Romero, OJ (2018) ‘Deslocamento de óleo por água em um microcanal com cavidade de quinás arredondadas’, *Holos*, v. 34, n. 8. <<http://dx.doi.org/10.15628/holos.2018.5234>>.
- Romero, OJ e Lima, TP (2019) ‘Fundamentos dos testes de pressão em reservatórios de gás: determinação do absolute open flow a partir do teste isócrono’, *Holos*, v. 35, n. 2. <<http://dx.doi.org/10.15628/holos.2019.5265>>.
- Rosa, AJ, Carvalho, RS, Xavier e AJD (2006) *Engenharia de reservatório de petróleo*. Editora Interciência.
- Sanson Jr, U (2015) ‘Simulação do escoamento em poços horizontais com completação não convencional’. 202 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.
- Santos, LA (2014) ‘Investigação das perdas de carga na técnica de furação diversiva para poços horizontais’, Monografia de Graduação em Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Espírito Santo.
- Santos, LA, Ribeiro, DC e Romero, OJ (2020) ‘Heavy oil transportation through steam heating: an analytical and numerical approach’, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 195, 107932. <<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107932>>.
- Schulkes, MS e Utvik, OH (1997) ‘Pressure drop in a perforated pipe with radial inflow: single-phase flow’. *SPE Journal*, Dezembro, v. 3, 7f.
- Tecvix (2019) Tecvix International Products, ‘Filtros para controle de areia: Tubos perfurados’. Disponível em: <<http://www.tecvix.com.br/produtos-single.php?produto=filtrosAreia>>. Acesso em: 05 de jun. de 2019.
- Vale, BT (2010) ‘Análise da variação de pressão no escoamento unidimensional no interior de poços horizontais’. Monografia de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.