



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

OTIMIZAÇÃO DA GEOMETRIA DA TUBULAÇÃO DE INJEÇÃO DE ESFERAS OCAS NO PROCESSO DE DUPLO GRADIENTE DE PERFURAÇÃO

José Carlos Henrique Adelino Silva¹; Endyara de Moraes Cabral²; José Jefferson S. Nascimento³

¹ Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica –
adelino.engpetro@hotmail.com

² Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica
-endyara.engpetro@gmail.com

³ Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais –
jeffpesquisador@gmail.com

RESUMO

Um dos graves problemas na perfuração em águas profundas é a proximidade das curvas de pressão de poros e de fratura, o que torna a operação cara e muitas vezes inviável do aspecto técnico e econômico. Quanto maiores forem as lâminas d'água, mais próximas estarão essas curvas. Uma das formas de solucionar esse problema é minimizando a pressão hidrostática que o fluido de perfuração exerce na cabeça do poço. Isso poderia ser obtido injetando, na base do *riser*, esferas de baixa densidade, o que reduziria a densidade média do fluido de perfuração compreendido entre o leito do oceano e o nível do mar. Nessas condições a perfuração é denominada de perfuração com duplo gradiente (DGD = *Dual Gradient Drilling*). Neste trabalho, foram desenvolvidos estudos em fluidodinâmica computacional utilizando o CFX-15.0 para duas geometrias de injeção tangencial de esferas ocas no *riser*: uma com raio de concordância e a outra com inclinação de 60° com relação a horizontal. Os resultados obtidos forneceram informações importantes para evitar a quebra das esferas, danos estruturais na tubulação e aumentar a eficiência da tecnologia.

Palavras-Chave: Duplo Gradiente de Perfuração, Esferas Ocas, *Riser*, CFD, Perfuração.

1. INTRODUÇÃO

Devido à crescente demanda energética, houve a necessidade de expandir a perfuração em águas cada vez mais profundas e, para isso, se faz necessário desenvolver novas tecnologias que garantam a viabilidade técnico-econômica das operações de perfuração, visto que é nessa etapa que ocorrem os maiores investimentos e, por isso, um estudo minucioso é fundamental para

minimizar os riscos e garantir que as melhores técnicas sejam aplicadas.

O sistema de perfuração convencional em águas profundas encara diversos desafios que torna a operação difícil e até mesmo inviável economicamente. Dentre esses desafios, destaca-se a proximidade das curvas de pressão de poros e de fratura, que aumenta com a lâmina d'água [Rocha et al., 2009]. Isso significa dizer que à medida que a lâmina d'água aumenta, a janela operacional,

www.conepetro.com
.br

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

formada pela pressão de poros e gradiente de fratura, tende a reduzir cada vez mais. Por isso, em águas profundas, a estreita janela operacional dificulta a manutenção da estabilidade do poço [Rocha *et al.*, 2009]. O fluido empregado para tal é, em geral, denso e de alta viscosidade, já que dentre suas finalidades, está a de elevar os cascalhos até a superfície e, devido a esse fato, há uma excessiva pressão hidrostática exercida pelo fluido de perfuração na base do *riser*.

Uma das formas de solucionar esse problema é através da utilização de um duplo gradiente de perfuração (DGD = *Dual Gradient Drilling*), em contraste com o gradiente único utilizado na perfuração convencional [Smith *et al.*, 1999]. Essa técnica consiste em controlar a pressão de fundo de poço pela manipulação de dois gradientes de pressão: um localizado entre o nível do mar até o leito do oceano e entre o leito do oceano até o fundo do poço. Uma das principais vantagens dessa técnica é a redução do número de fases do poço e a viabilidade de se perfurar onde a perfuração convencional é impraticável.

Uma forma de se aplicar a tecnologia DGD é o emprego de gases, como o nitrogênio. Maurer *et al.* [1995] desenvolveram um método alternativo de DGD, utilizando esferas ocas de vidro. Naquele trabalho, os autores mostraram as

vantagens técnicas e econômicas em relação à utilização de gases, como a variações de gradientes de pressão devido a incompressibilidade do gás. Vera [2002] também apresentou dados relativos ao potencial uso de esferas ocas no sistema de DGD, como a efetiva redução na densidade do fluido de perfuração devido à adição de esferas ocas, bem como a estabilidade da mistura. Carneiro *et al.* [2005] analisaram a influência do ângulo de injeção e seus resultados mostraram que uma angulação de 60° em relação a horizontal reduz bastante o risco de quebra na região de injeção, bem como o tempo de residência delas no *riser*. Silva *et al* [2015] verificaram a influência da concentração volumétrica de esferas no fluido de perfuração e as modificações na reologia do fluido, desgaste das esferas e recirculação no tubo de injeção. Entretanto, a análise da geometria do tubo de injeção das esferas e a busca por novas alternativas são de grande interesse para a viabilidade da tecnologia. Para resistir as altas pressões na base do *riser*, as esferas são feitas de material compósito [Carneiro *et al.*, 2006] e a redução da pressão na zona de injeção é de grande importância para reduzir os riscos de quebra das esferas, que são de alto custo. A homogeneidade da distribuição das esferas no fluido de perfuração ao longo do *riser*, a recirculação associada a cada tipo de tubo de injeção e as

www.conepetro.com.br

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br

mudanças na reologia do fluido de perfuração causadas por essas diferentes injeções, não foram amplamente discutidas.

O objetivo deste trabalho é propor uma alternativa de geometria de tubulação de injeção de esferas (com raio de concordância) para aperfeiçoar a eficiência técnica da tecnologia de DGD e que possui os menores riscos de quebra das esferas, que reduz o risco de operação, que há uma homogeneização mais rápida e mais eficiente das esferas ao longo do *riser* e a redução eficaz da densidade média do fluido de perfuração.

2. DGD ATRAVÉS DA INJEÇÃO DE ESFERAS DE BAIXA DENSIDADE NA BASE DO RISER

O método de perfuração com duplo gradiente consiste na utilização de dois fluidos de diferentes densidades, um

compreendido entre o leito marinho e a superfície do mar e o outro do fundo do mar até o fundo do poço. Este sistema propõe que esferas de baixa densidade sejam bombeadas até o fundo do mar e injetadas na base *riser* com o objetivo de reduzir a densidade do fluido de perfuração para valor próximo ao da água, diminuindo assim, a pressão exercida pelo peso da coluna de fluido na cabeça do poço. A Figura 1 mostra um esquema que representa o sistema de DGD através da injeção de esferas na base do *riser*, onde após a injeção, as mesmas entram em contato com o fluido proveniente do fundo do poço. Em seguida, a suspensão segue até a superfície pelo espaço anular entre o *riser* e a coluna de perfuração, para serem separados e injetados novamente. A perfuração com duplo gradiente é uma tecnologia emergente que possibilita a perfuração em águas ultra profundas e no futuro poderá ditar a maneira pela qual os poços de petróleo serão perfurados.

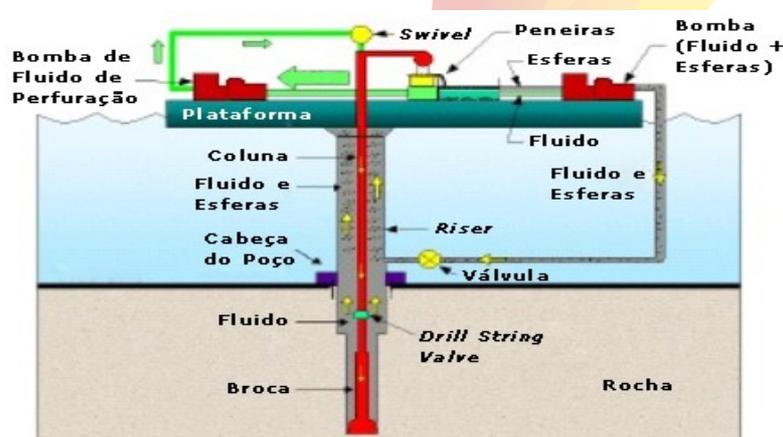


Figura 1. Operação de injeção de esferas de baixa densidade no processo de DGD (adaptado de Maurer, 2003)

Além de reduzir a pressão hidrostática na base do *riser*, o duplo gradiente de perfuração amplia a janela operacional fazendo com que haja uma redução do número de fases na perfuração, o que, conseqüentemente, reduzirá o número de camadas de revestimento necessárias na perfuração de um poço.

3. FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL E MODELAGEM UTILIZADA

De acordo com Fontes (2005), Fluidodinâmica Computacional (CFD) é o termo dado ao grupo de técnicas matemáticas, numéricas e computacionais usadas para obter, visualizar e interpretar soluções computacionais para as equações de conservação de grandezas físicas de interesse de um dado escoamento. Os principais códigos de CFD utilizam o Método dos Volumes Finitos para resolver as equações no domínio do fluido.

Neste trabalho, optou-se por uma simulação multifásica com abordagem euleriana-euleriana para simular o escoamento dentro de um *riser* que possui uma coluna de perfuração com rotação constante e uma

injeção tangencial. O caso estudado é bifásico constituído por uma fase contínua (fluido de perfuração) e uma fase dispersa composta pelas esferas de baixa densidade. A modelagem da turbulência foi feita utilizando o modelo de duas equações RNG k- ϵ para a fase contínua e o *dispersed phase zero equation* para a fase dispersa. Esses modelos apresentam bons resultados quando se tem altos gradientes nas regiões próximas à parede e curvaturas de linhas de corrente e regiões de estagnação (Carneiro, 2006), parecendo adequado para o caso que foi analisado.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

As dimensões geométricas, bem como as condições de operação e características das esferas ocas utilizada são baseadas no trabalho de Carneiro (2006), que tem como referência o modelo do *riser* existente no LADEQ-Laboratórios do Departamento de Engenharia Química da Escola de Química/UFRJ, no qual são mantidas constantes as relações entre as dimensões lineares (escala 1:2). As condições de operação, dimensões de ambas as geometrias e características do fluido de perfuração e das esferas ocas estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1: Condições de operação, dimensões do riser simulado e velocidades do fluido e rotação da coluna.

Tubo	Diâmetro nominal (cm)	Velocidade
Riser	15,60	0,6 m/s
Coluna de perfuração	6,3	4,5 rad/s
Linha de Injeção	5,1	3,0 m/s

Tabela 2 – Características das esferas ocas

	Esferas ocas
Densidade (g cm ⁻³)	0,53
Diâmetros (mm)	1,4

O fluido empregado no estudo tem uma viscosidade de 128 cp. À simulação tem como referência uma solução polimérica de CMC (Carboxi-Metil-Celulose) para simular o comportamento de um fluido de perfuração. Como se trata de um fluido não newtoniano, a lei de potência é empregada (Equação 1) para o cálculo da viscosidade aparente (Carneiro, 2006).

$$\tau = 0,0235\gamma^{0,97} \quad [1]$$

onde τ é a tensão de cisalhamento e γ é a taxa de cisalhamento

Os estudos em fluidodinâmica computacional são conduzidos pelo pacote comercial CFX 15.0, da ANSYS. São utilizados dois tipos de geometria de injeção de esferas: uma com um ângulo de 60° com a horizontal e outra com raio de concordância, como pode ser observado nas Figuras 2(a) e 2(b), respectivamente. A geometria formando 60° com a horizontal é utilizada porque, dentre os casos estudados por Carneiro (2006), mostrou um menor desgaste das esferas e um menor tempo de residência delas no riser em relação à injeção horizontal e inclinações de 30° e 45°. Agora, propomos como alternativa para a injeção das esferas no riser, a injeção com raio de concordância. Pode-se perceber também, pela Figura 2(c) e 2(d), que a região de alimentação é a que possui mais elementos, isso por conta do grau de complexidade para o escoamento nessa região e, conseqüentemente, pela precisão dos dados que são esperados obter na simulação em si. As malhas possuem aproximadamente 140.000 nós e 600.000 elementos.



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

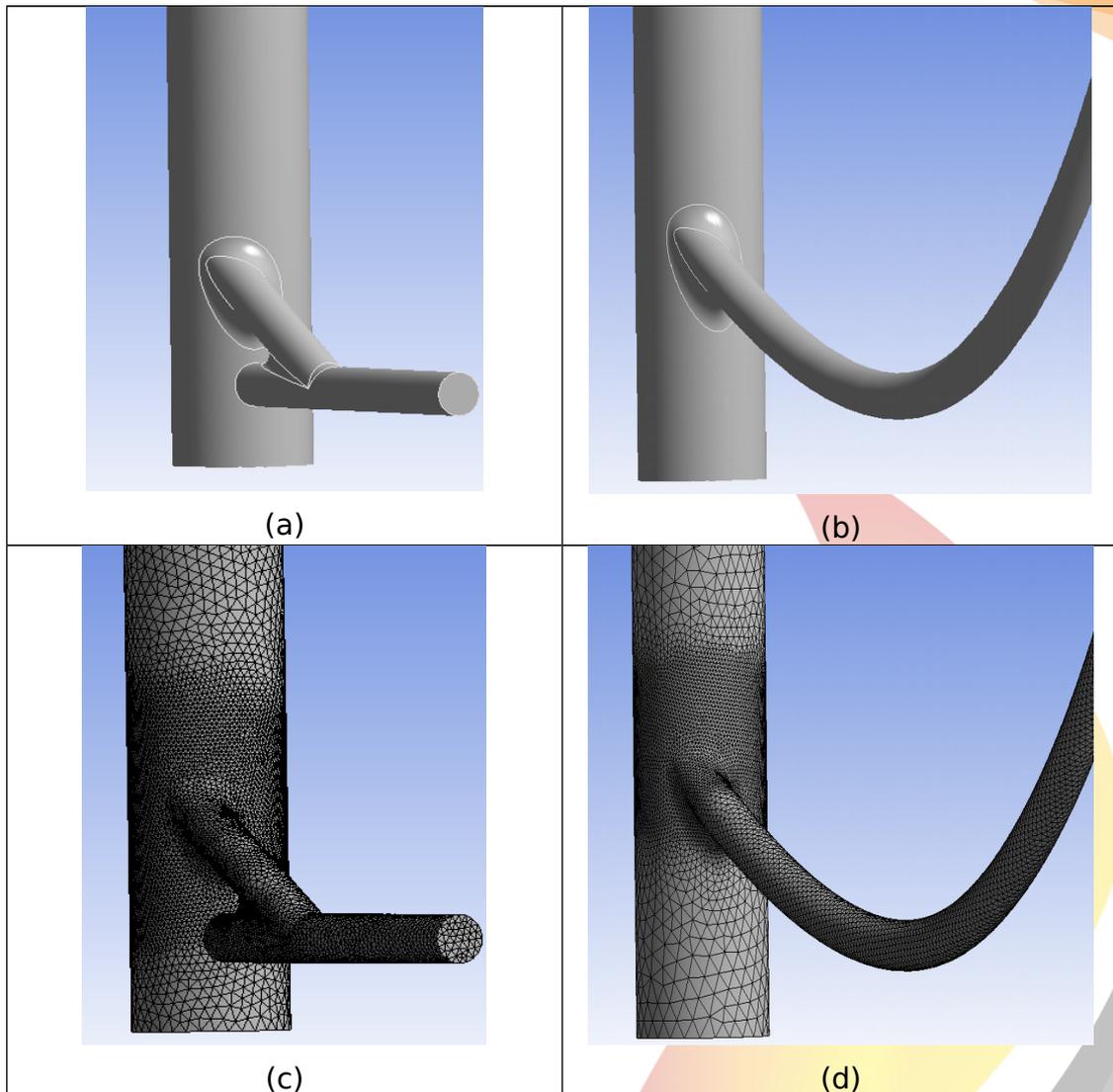


Figura 2. Geometria com ângulo de 60° com a horizontal (a); Geometria com raio de concordância (b); Malha gerada com refinamento ao redor da região de injeção com ângulo de 60° com a horizontal (c) e com raio de concordância (d)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com a fluidodinâmica computacional são apresentados nas figuras que se seguem. A Figura 3 mostra o perfil de pressão na região

de alimentação do riser. O perfil infere o grau de desgaste das esferas associado ao tipo de geometria de injeção, pelo qual podem ser comparados, pois estão numa mesma faixa de pressão.

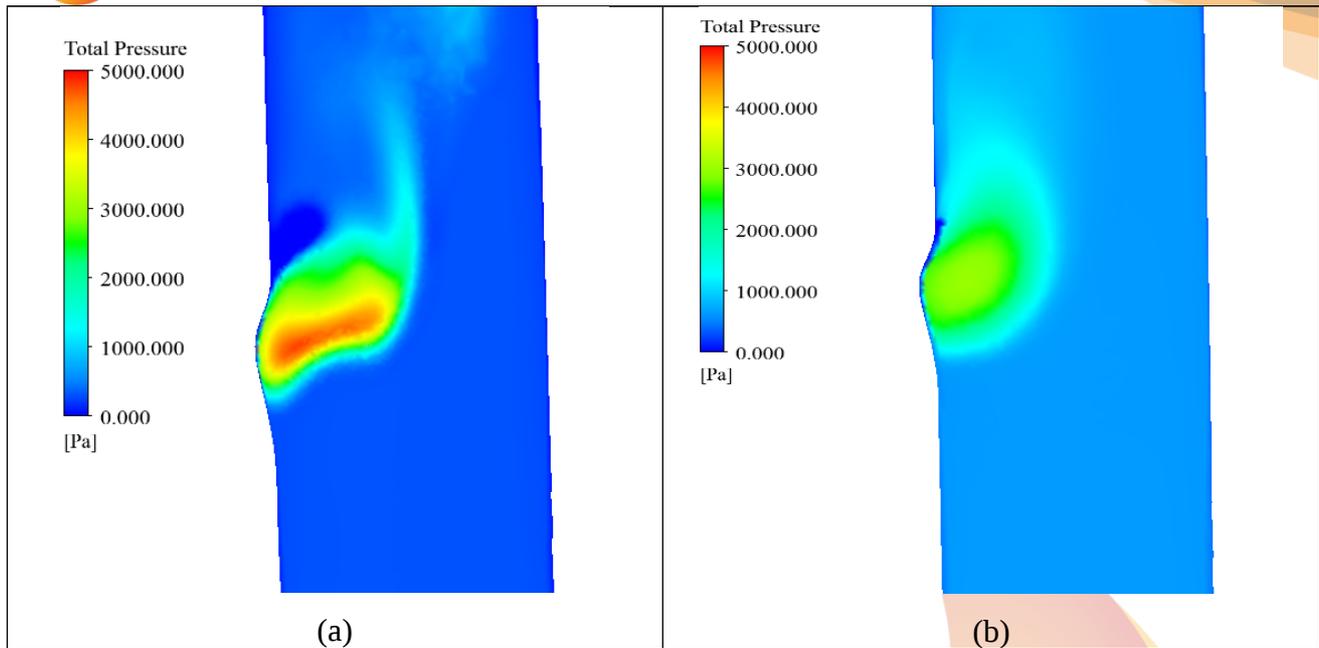


Figura 3. Perfil de pressão total injetando-se esferas com as injeções: inclinado a 60° com a horizontal (a); com raio de concordância (b)

O perfil de pressão revela que a injeção com ângulo de inclinação de 60° possui uma região de maior impacto das esferas com a parede do *riser* se comparado com a injeção por raio de concordância. A pressão média nessa região na injeção com ângulo de inclinação está em torno de 4000 Pa, enquanto que na de raio de concordância se aproxima de 2500 Pa, o que mostra uma redução média de aproximadamente 40%. Esse fato é um importante parâmetro de risco a se avaliar, pois se as esferas sofrerem desgaste elas poderão fraturar e perderão a capacidade de reduzir a densidade média do fluido de perfuração. Então, podemos afirmar que a geometria de injeção que apresentou menor

desgaste para as esferas foi a de raio de concordância, entretanto outros fatores devem ser analisados para tornar a operação de DGD aplicável.

Na Figura 4 estão representadas as linhas de corrente para ambas as geometrias analisadas. Como é possível notar pelas imagens, na injeção com inclinação de 60° há uma recirculação dentro do tubo de injeção das esferas. Esse fenômeno está associado à queda de pressão que ocorre dentro do tubo de injeção durante a injeção das esferas. A recirculação pode causar sérios danos estruturais, o que comprometerá a tubulação e consequentemente a operação.



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

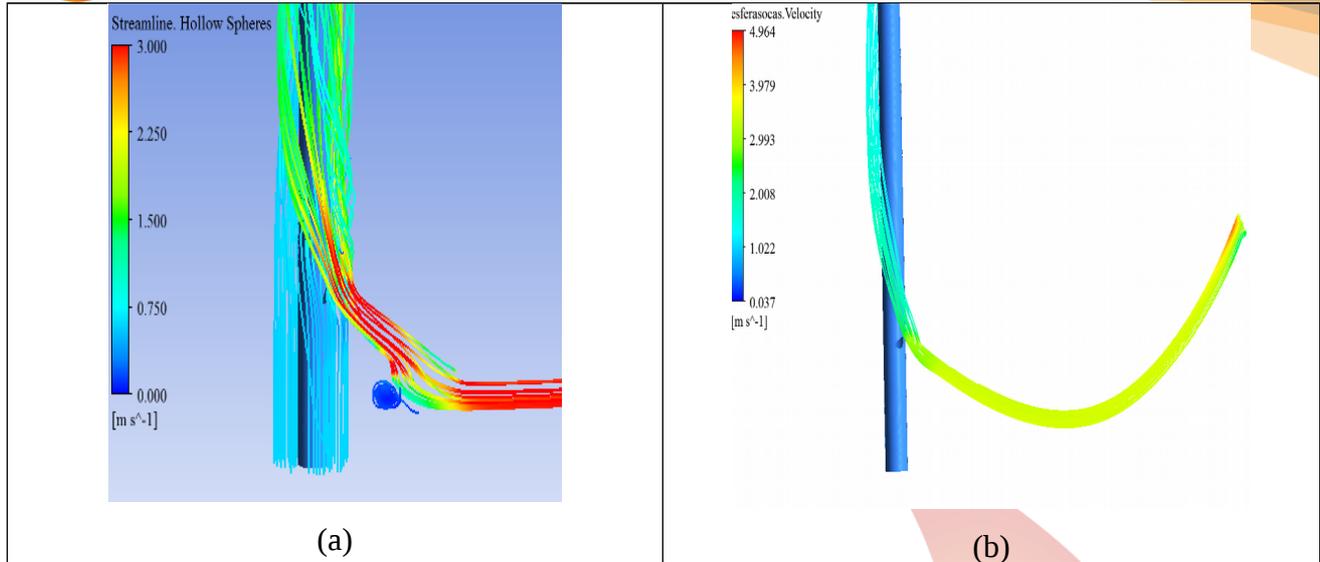


Figura 4. Linhas de corrente do fluido ao se injetar esferas com injeção com inclinação de 60° (a); injeção com raio de concordância (b)

Na Figura 5, é representada a fração volumétrica das esferas com a sua ascensão dentro do *riser*. É importante ressaltar que para a injeção das esferas ocas reduzir efetivamente a densidade média do fluido de perfuração se faz necessário uma distribuição espacial homogênea e imediata das esferas no

interior do *riser*. Outra ressalva importante é que as esferas se concentram inicialmente ao redor da coluna de perfuração. Esse efeito é causado pelo escoamento rotacional na injeção tangencial das esferas e vai sendo minimizado à medida que as esferas sobem no interior do *riser*.

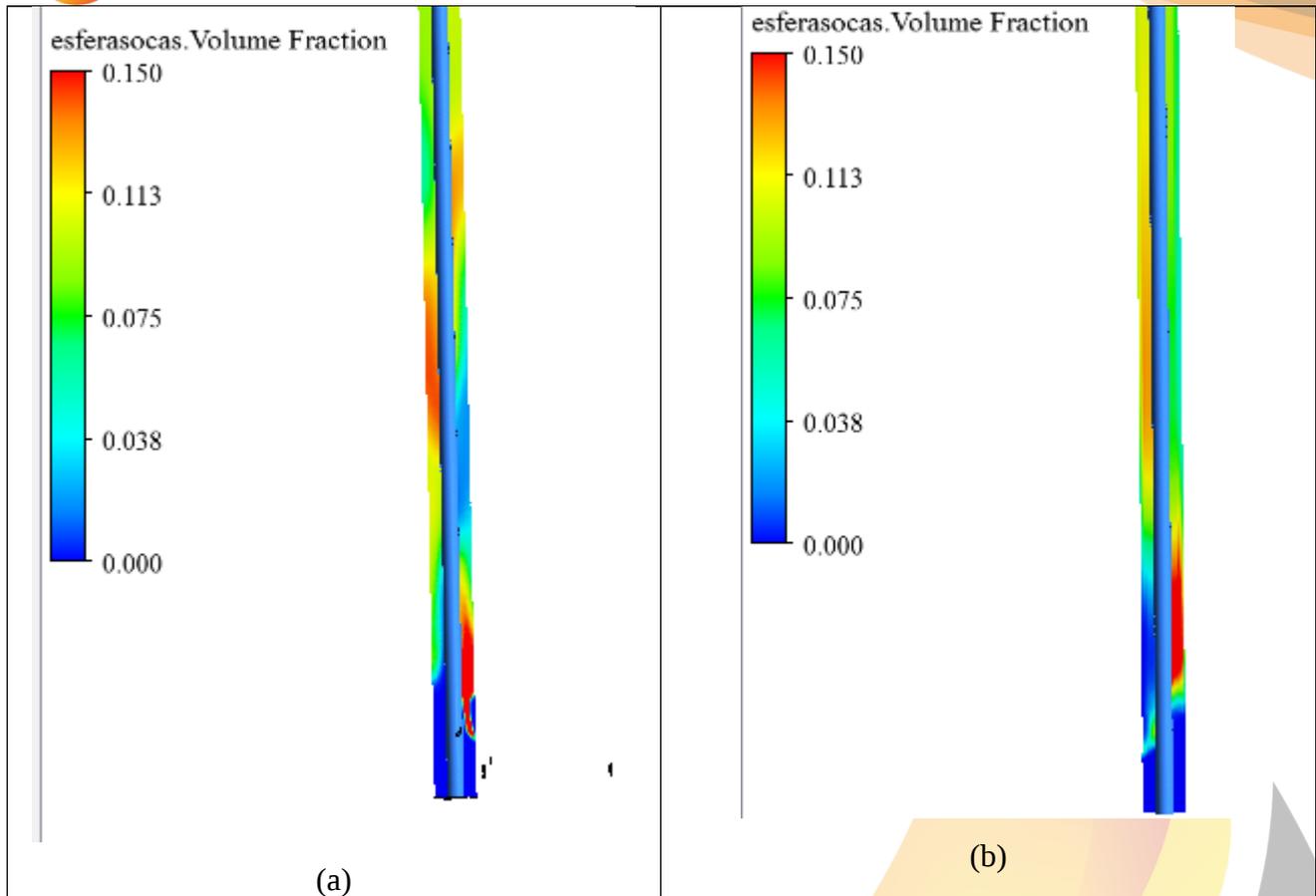


Figura 5. Fração volumétrica das esferas com injeção com inclinação de 60° (a); injeção com raio de concordância (b)

A Figura 6 evidencia a interferência das diferentes injeções na viscosidade do fluido de perfuração, onde é possível perceber a influência da taxa de cisalhamento na viscosidade do fluido, por ser de natureza não newtoniana. Na área próxima à injeção, em ambos os casos estudados, há uma redução na viscosidade dinâmica, o que ocorre em razão das taxas de cisalhamento mais altas encontradas nesta região (zonas em amarelo). Fica evidente que na injeção com inclinação

de 60° a redução da viscosidade dinâmica é maior devido às maiores taxas de cisalhamento em comparação com a injeção que possui raio de concordância. A redução excessiva de viscosidade por parte do fluido de perfuração é prejudicial, visto que esta propriedade está diretamente relacionada à limpeza do poço, pois, em geral, maiores viscosidades implicam em melhor transporte de cascalhos cortados para a superfície.

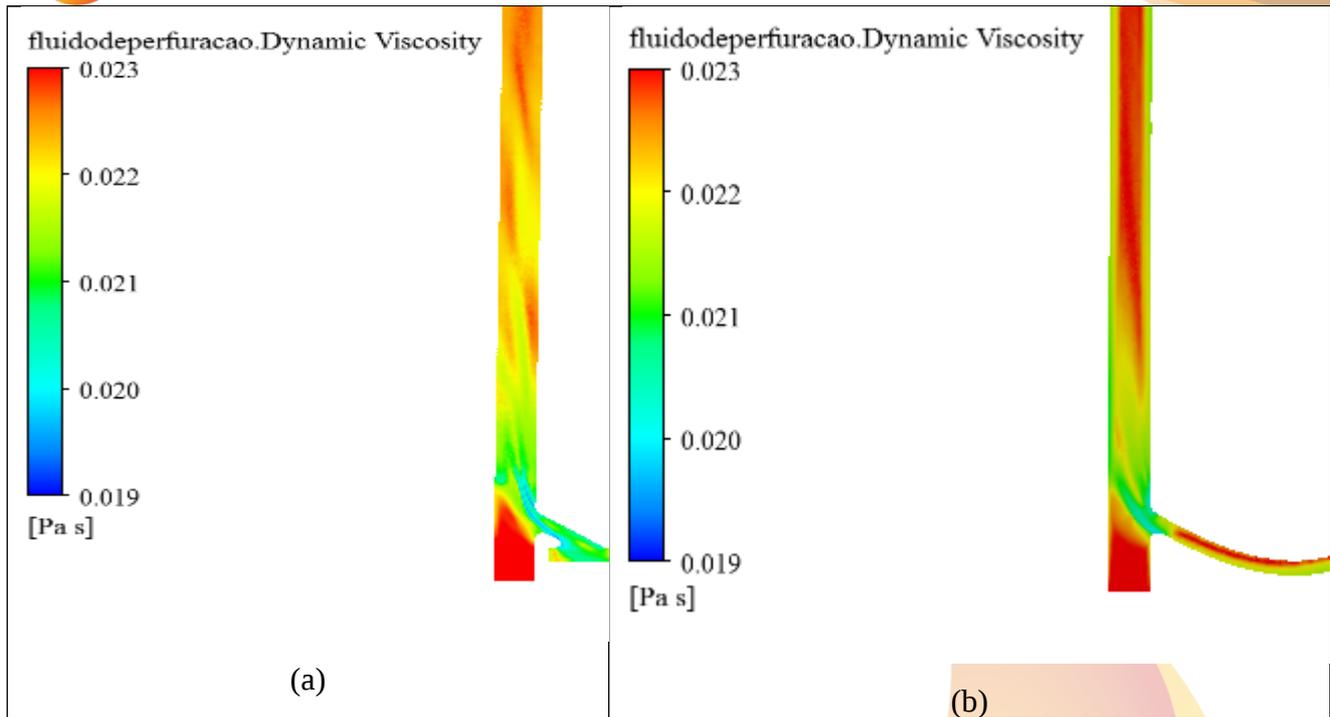


Figura 6. Viscosidade dinâmica da mistura de fluido de perfuração com as esferas com injeção com inclinação de 60° (a); injeção com raio de concordância (b)

5. CONCLUSÕES

A análise através da fluidodinâmica computacional proporciona a melhoria das condições de operação com a injeção de esferas por meio de uma tubulação em forma de arco de circunferência (raio de concordância), uma vez que os resultados mostram uma redução bastante significativa da pressão na região de injeção, o que diminui os riscos de quebra das esferas. A geometria com injeção com raio de concordância apresenta os melhores resultados de redução da densidade média do fluido de perfuração, visto que as esferas foram mais bem distribuídas ao longo do *riser* e de forma mais

imediate. Além disso, há uma menor redução na viscosidade média do fluido de perfuração e não apresenta recirculação, diminuindo os riscos de danos estruturais pela ausência de vibração causada por esse fenômeno, como apresenta a geometria com injeção com inclinação de 60°.

Portanto, pelos resultados apresentados, para garantir que a densidade média do fluido de perfuração seja reduzida e a viscosidade não seja tão afetada, sem que haja a minimização do risco de quebra das esferas e evitar danos estruturais causados pelas vibrações no sistema, a geometria de injeção com raio de concordância apresenta indícios

de ser uma tecnologia bastante viável, nestas condições.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao LABSIM (laboratório de simulação de engenharias de materiais) da UFCG e ao LABCFD (Laboratório de fluidodinâmica computacional), da escola de química da UFRJ, pela indispensável contribuição do trabalho e principalmente pela contribuição a comunidade científica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Livro:

ROCHA, L. A. S.; AZEVEDO, C. A. **Projeto de poços de Petróleo: Geopressões e Assentamentos de Colunas de Revestimento**. 2ªed. Rio de Janeiro: Interciência, 2009. 561 p.

Artigo de periódico:

FONTES, C.E., SILVA, L.F.L.R., LAGE, P.L.C., RODRIGUES, R.C., **Introdução a Fluidodinâmica Computacional**. In: Escola Piloto Virtual, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MAURER, W. C. **Joint Industry Project to develop hollow spheres dual-gradient drilling system**. In: Maurer technology, Houston, EUA, 2001.

SILVA, J. C. H. A.; NASCIMENTO, J. J. S.; MEDRONHO, R. A.. **Simulação numérica usando cfd para análise da influência da concentração de esferas de baixa densidade no processo de duplo gradiente de perfuração**. In: I Workshop Norte-Nordeste de CFD Aplicada à Engenharia e Ciências Correlatas Universidade Federal de Campina Grande, 2015. v. 1. p. 1-11.

SMITH, K. L., GAULT, A. D., WITT, D. E., WEDDLE, C. E. **Subsea Mudlift Drilling Joint Industry Project: Delivering Dual Gradient Drilling Technology to Industry**. SPE 71357. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 2001.

Tese/dissertação:

CARNEIRO, D.G.P. **A injeção de esferas de baixa densidade na base do riser no processo de perfuração com duplo gradiente: um estudo como o auxílio de fluidodinâmica computacional (CFD)**. 2006, 86p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Pós-graduação em



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

Tecnologia de Processos Químicos e
Bioquímicos. Rio de Janeiro-RJ.



[www.conepetro.com](http://www.conepetro.com.br)
.br

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br