

DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE CISALHAMENTO MÍNIMA PARA ARRASTE DE PARTÍCULAS EM UM LEITO SEDIMENTADO

Bruno Venturini Loureiro

Laboratório de Fenômenos de Transporte
UCL – Faculdade do Centro Leste
Av. Lourival Nunes, 181, Jardim Limoeiro, Serra – ES, 29164-050
brunovl@ucl.br

Renato do Nascimento Siqueira

Laboratório de Fenômenos de Transporte
UCL – Faculdade do Centro Leste
Av. Lourival Nunes, 181, Jardim Limoeiro, Serra – ES, 29164-050
renatons@ucl.br

Resumo. A perfuração de poços em estágio horizontal para produção de óleo e gás apresenta a necessidade de um processo eficiente de limpeza de poço em função da sedimentação de partículas retiradas pelo processo de perfuração que se depositam na parte inferior do espaço anular entre a coluna de perfuração e a formação. A erosão de um leito sedimentado é um fenômeno físico relevante para a indústria de petróleo e gás visto que propicia uma abertura de poço mais eficiente.

O presente trabalho tem como objetivo estimar a tensão de cisalhamento mínima necessária para iniciar o processo de erosão de um leito sedimentado. Uma montagem experimental foi desenvolvida a partir de simplificações do problema para identificar o início do processo e medir a vazão do escoamento necessário. O experimento consiste em um duto retangular com razão de lados, $\lambda=h/b$, igual a 1/3 e comprimento $L^* = L/h = 75$. O Leito sedimentado para erosão está situado no experimento para $65 < L^* < 70$. A partir do valor de vazão e das condições de contorno do problema, uma discretização do problema foi realizada para possibilitar a solução computacional do problema através do método de volumes finitos e assim determinar a tensão de cisalhamento. O presente trabalho utilizou partículas com até 3,0 mm e modelou o leito sedimentado por meio de uma parede com rugosidade equivalente..

Palavras-chave: threshold shear stress, drag particles, cuttings bed, numerical simulation.

1. Introdução

O desenvolvimento de novas tecnologias de perfuração de poços proporcionou, ao longo dos anos, o aumento de produção de óleo e gás. Esse aumento ocorreu basicamente em função da utilização de técnicas de perfuração de poços inclinados e horizontais, que permitiram um maior contato do poço com o reservatório.

Os primeiros poços perfurados para produção de óleo e gás eram apenas verticais. Com a utilização das novas tecnologias de perfuração, os poços passaram a ter novos desafios, tais como a remoção eficiente de material sólido (cascalho) que se acumula na parte inferior do poço devido ao efeito gravitacional (sedimentação).

Embora o fluido de perfuração tenha hoje várias funções, uma das principais é ainda o carreamento dos cascalhos retirados pelo processo de perfuração (Caenn & Chillingar, 1996). O processo de retirada desse material sólido de dentro do poço tem grande importância para a indústria de perfuração, pois um procedimento de retirada de cascalhos ineficiente interfere na velocidade de perfuração do poço, aumentando o tempo e o custo para sua abertura. Assim, a indústria de perfuração busca a otimização da retirada de cascalhos do poço através de uma melhor capacidade de carreamento do fluido de perfuração utilizado visando à descoberta de óleo e gás mais rapidamente.

Para melhor entender a capacidade de carreamento do fluido de perfuração, deve-se compreender o escoamento sólido-líquido existente na região anular entre a parede do poço e a coluna de perfuração. Tal escoamento depende de algumas variáveis tais como: o fluido de perfuração utilizado, o tipo de material sólido carregado e sua geometria, a geometria do poço, a rotação da coluna, a vazão axial imposta e também a concentração de cascalhos. Desta forma, pode-se observar que a remoção de cascalhos de dentro do poço é um problema bifásico complexo.

Ao considerar que o processo de erosão de um leito de partículas sedimentadas ocorre em função do arraste promovido pelo escoamento no espaço anular sobre o leito, para o diâmetro das partículas em estudo, a tensão de cisalhamento sobre o leito torna-se uma importante variável para o processo de limpeza de poço. Nos modelos mecanicistas de remoção de partículas depositadas em leito sedimentado, tais como Silva e Martins (2002), demonstra-se a importância da tensão de cisalhamento no processo de limpeza do poço.

A tensão cisalhante mínima capaz de carrear os cascalhos sedimentados alimenta os modelos numéricos de previsão de limpeza de poços utilizados em sondas de perfuração, mas a determinação de um valor limite de tensão de

cisalhamento é difícil em uma montagem experimental com geometria anular. Assim, um modelo simplificado do problema físico foi proposto para estimar a tensão de cisalhamento mínima necessária para iniciar o processo de erosão.

O cascalho é modelado por um leito de areia calibrada e o experimento é realizado em um duto com seção retangular com um comprimento de 6 m.

2. Modelo teórico

O problema investigado consiste em determinar a tensão de cisalhamento sobre o leito de partículas que está situado em um determinado trecho do experimento. Para isso é necessário obter o campo de velocidade a partir das condições de contorno impostas pelo problema físico real. As equações de governo do problema são as equações de conservação de massa, quantidade de movimento linear e a equação de transporte de tensão de Reynolds. Para esse trabalho foi feita a hipótese de parede lisa na região de cascalho, visto que as partículas não estavam aparentes ao escoamento.

Os parâmetros adimensionais relevantes para o problema físico são: o número de Reynolds, a razão de aspecto da seção transversal e o comprimento adimensional do duto retangular. Os parâmetros mencionados são propostos nas equações a seguir.

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (1)$$

$$\lambda^* = \frac{h}{b} \quad (2)$$

$$L^* = \frac{x}{h} \quad (3)$$

Onde Re é o número de Reynolds, ρ é a massa específica do fluido, V é a velocidade média do escoamento, μ é a viscosidade do fluido, D_h é o diâmetro hidráulico, calculado por $2(b+h)$, sendo b a largura do duto e h a altura. A variável λ é a razão de aspecto da seção transversal e L^* é o comprimento adimensional do duto retangular.

O cálculo da tensão de cisalhamento sobre o leito sedimentado foi realizado através da equação de tensão de Reynolds para a direção x - y , Eq. (4), uma vez que os outros componentes de tensão apresentam pouca influência sobre o arraste das partículas presentes no leito sedimentado e podem ser considerados desprezíveis.

$$\tau_{yx} = -\rho \overline{u'v'} \quad (4)$$

As condições de contorno foram estabelecidas de modo que houvesse compatibilidade entre o fenômeno físico e a modelagem numérica. Assim, as condições de contorno podem ser resumidas a partir das seguintes hipóteses: (i) a lei de não deslizamento é aplicada às paredes do duto retangular; (ii) a entrada apresenta perfil uniforme de velocidade; (iii) A saída apresenta um escoamento completamente desenvolvido.

3. Método

Para estudar a erosão de um leito sedimentado em um poço horizontal, com geometria anular, uma montagem experimental complexa precisaria ser montada para representar fielmente o escoamento existente e identificar o processo de erosão. Uma alternativa simplificada para o problema foi proposta para facilitar a montagem experimental e a obtenção das variáveis relevantes ao fenômeno físico. A alternativa apresentada nessa metodologia é uma melhoria da montagem proposta por Niño et al. (2003) que identificou a tensão de cisalhamento necessária para carreamento de partículas de até 0,5 mm.

Ao considerar que a força de arraste sobre as partículas sedimentadas é a única força relevante para as dimensões das partículas consideradas, e que a mesma poderá suspendê-las do leito sedimentado, um escoamento mais controlado que o escoamento em um espaço anular com rotação do cilindro interno se faz necessário. Esse escoamento mais simplificado será produzido em um duto retangular com comprimento suficiente para desenvolvimento do escoamento.

A seguir são citados alguns detalhes da montagem experimental e do método numérico utilizado para identificar a tensão de cisalhamento média necessária para iniciar o processo de erosão do leito.

3.1. Montagem experimental

Como o objetivo principal é obter a tensão de cisalhamento necessária para iniciar o processo de erosão do leito sedimentado, pode-se utilizar um duto no formato retangular e em circuito fechado, para simplificar o problema, de acordo com o desenho esquemático da montagem experimental da Fig. 1. Essa figura ilustra os principais equipamentos utilizados na montagem experimental.

Deseja-se promover nesse duto (A), construído em acrílico, um escoamento induzido por gradiente de pressão através de duas bombas centrífugas (B), em paralelo, de alta vazão da ABS PUMPS. O duto de acrílico possui uma seção transversal com 240,0 mm de largura e 80,0 de altura propiciando uma razão de dimensões igual a $\lambda = 1/3$. O comprimento do duto é de 6,0 m propiciando um comprimento adimensional igual a $L^* = 75$, sendo que a construção foi realizada a partir da montagem de três seções de 2,0 m. A montante do duto de acrílico foi montada uma câmara plena para reduzir a turbulência do escoamento. A Câmara foi construída também em acrílico e possui um defletor, montado simetricamente na câmara e a uma distância de 70 mm da entrada da mesma, para impedir o direcionamento do jato que procede da tubulação de recalque para dentro da tubulação retangular em estudo. A câmara a montante apresenta as dimensões internas iguais a 375 mm para comprimento, largura e altura.

Uma caixa de cascalho foi montada sob o duto retangular a partir de 4,8 m da entrada do duto retangular. A caixa apresenta a mesma largura do duto retangular, um comprimento de 480 mm e uma profundidade de 40 mm. Assim, a caixa de cascalho está montada em $60 < x^* < 66$. Na caixa de cascalho é possível colocar as partículas para formação do leito sedimentado através da escotilha construída acima da caixa.

A preparação do leito sedimentado sob o duto retangular foi feita de tal modo que o leito apresentasse a forma mais plana possível de modo que ondulações e variações da altura de leito não ocorressem. As partículas foram dispostas na caixa de cascalho tal que a rugosidade do leito estivesse para dentro do leito, isto é, as partículas não estavam aparentes ao escoamento. Essa situação é mais crítica que um caso em que a disposição das partículas possibilite uma rugosidade para dentro do escoamento tornando as partículas aparentes ao escoamento.

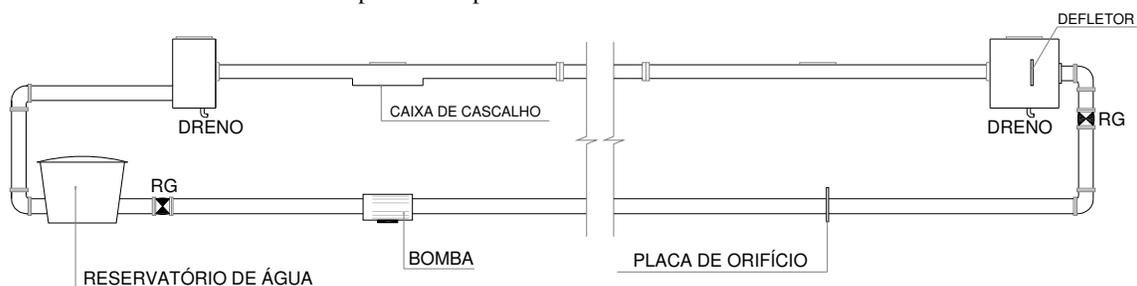


Figura 1. Desenho esquemático da montagem experimental.

A vazão do experimento foi imposta pelas duas bombas centrífugas controladas através de dois inversores de frequência CFW09-0024T2223PSZ-WEG (C). A vazão estabelecida no experimento foi obtida através de uma placa de orifício (D). As medições das pressões diferenciais na placa de orifício foram realizadas através de um manômetro em U. A identificação da erosão do leito de partículas colocado no duto foi dada através da aquisição de imagens por meio de uma câmera CCD analógica, monocromática e do tipo “progressive scan” (G). A câmera CCD foi acoplada a uma placa de aquisição de imagens National Instruments PCI-1409, instalada em um computador de alta performance (H) e governada pelo software LABVIEW. A Fig. 2 ilustra parte da montagem experimental do laboratório possibilitando uma visão geral do experimento realizado.



Figura 2. Montagem experimental real. (a) Vista parcial seção de teste; (b) Vista da região de entrada e medidor de vazão.

O fluido utilizado no desenvolvimento do projeto foi newtoniano para simplificar o problema. A Fig. 3 mostra o leito sedimentado produzido na caixa de cascalho que foi montada sob o duto retangular. Água de torneira foi utilizada com fluido newtoniano. Em uma segunda etapa do projeto serão utilizados fluidos não newtonianos com características reológicas similares às lamas de perfuração comumente utilizadas nos processos de perfuração.

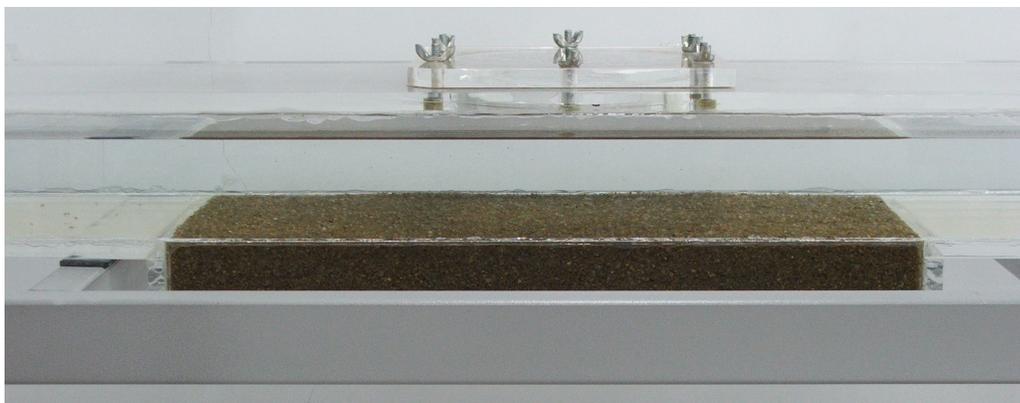


Figura 3. Leito de partículas sedimentado.

O leito de partículas sedimentadas foi produzido por partículas de areia com granulometria controlada. Os testes foram realizados para duas granulometrias diferentes. O Experimento I foi realizado para uma granulometria controlada tal que $D_{50} = 3,2 \pm 0,8$ mm e circularidade $C = 0,88 \pm 0,19$. O Experimento II foi realizado para uma granulometria tal que $D_{50} = 2,2 \pm 0,4$ mm e circularidade $C = 0,93 \pm 0,05$. A variável D_{50} representa o diâmetro médio da amostra estudada enquanto que a circularidade C representa numericamente a forma das partículas, isto é: $C = 1$ indica que as partículas são esféricas e $C = 0$ indica que as partículas são planificadas.

3.2 Procedimento experimental

A determinação da tensão de cisalhamento foi realizada de forma híbrida, pois parte do problema foi obtido experimentalmente e numericamente. A montagem experimental possibilitou a identificação da vazão mínima necessária para iniciar o processo de erosão. Com a vazão conhecida, o escoamento no duto retangular foi simulado numericamente de modo que uma estimativa da tensão de cisalhamento sobre o leito sedimento foi obtida.

A vazão mínima necessária para iniciar o processo de erosão foi obtida a partir do incremento de frequência nas bombas centrífugas através de uma função de degrau. A cada novo patamar de rotação das bombas, a vazão era calculada a partir da pressão diferencial propiciada pela perda de carga localizada na placa de orifício construída conforme a norma ISO 5167. Uma inspeção visual era realizada a cada patamar de vazão para verificar se o processo de erosão do leito iniciava. O critério de identificação da vazão mínima para iniciar o processo foi o arraste continuado de partículas para fora do leito sedimentado. A simples retirada de uma partícula ou outra para fora do leito de forma intermitente não foi considerado como início do processo, visto que tais partículas poderiam estar dispostas sobre o leito de forma diferenciada da média e desse modo poderia ter mais facilidade de remoção.

3.3. Simulação numérica

A partir da identificação da vazão mínima necessária para a erosão das primeiras partículas de forma continuada, pôde-se simular numericamente o escoamento existente no duto retangular e estimar a tensão de cisalhamento na parede rugosa inferior, onde se encontra o leito de partículas sedimentadas.

A simulação numérica do escoamento foi realizada através do pacote comercial FLUENT 6.2 e rodada em máquina dedicada. Inicialmente, as simulações foram realizadas para uma geometria bidimensional e tridimensional. A simulação bidimensional foi realizada para ajudar no projeto de localização do leito sedimentado da montagem experimental e utilizou uma malha com 50×1500 nós nas direções x e y , respectivamente. Na direção- y a malha foi construída de forma não uniforme com refinamento nas proximidades das paredes. O expoente utilizado para geração da malha não uniforme foi igual a 1,05. As simulações para geometria 3-D foram necessárias uma vez que a razão de aspecto da seção transversal do duto favoreceu o aparecimento de escoamento secundário. Os resultados para diferentes malhas foram obtidos e comparados para verificar a melhor forma de obter a solução do problema com o menor custo computacional. A geometria tridimensional foi construída com uma malha de $9,6 \times 10^5$ células, distribuídas da seguinte forma: direção x : 600 nós; direção y : 32 nós; e direção z : 50 nós. A utilização dessa malha foi definida a partir do limite de memória computacional existente nas máquinas do laboratório para execução do programa. A malha utilizada para discretização do problema foi estruturada e não uniforme na direção- y . O refinamento da malha se deu nas proximidades das paredes utilizando expoente igual a 1,05. O modelo turbulento utilizado, Reynolds Stress, que será mencionado a seguir, demanda memória computacional bastante superior a outros modelos mais simples como, por exemplo, o $k-\epsilon$.

As equações de conservação para o escoamento proposto foram resolvidas através do método numérico de volumes finitos, conforme Patankar (1980). As condições de não deslizamento foram ajustadas às paredes da geometria do duto.

Na entrada do duto, a condição de contorno foi de perfil uniforme de velocidade. Na saída, a condição de contorno ajustada foi de escoamento completamente desenvolvido.

O escoamento no duto retangular, para as vazões obtidas, foi sempre turbulento. O modelo Reynolds Stress de turbulência foi utilizado na solução computacional em função da anisotropia promovida. O acoplamento pressão-velocidade foi realizado através do método SIMPLE e a discretização das equações de quantidade de movimento e de turbulência foram realizadas através do método First Order Upwind.

4. Resultados e discussão

4.1. Vazão mínima

A primeira informação importante para determinação da tensão de cisalhamento mínima para iniciar o processo de erosão do leito sedimentado presente sob o duto retangular foi a vazão imposta na montagem experimental que propiciasse tal fato. Conforme já mencionado anteriormente, o critério para determinação da vazão mínima necessária para iniciar o processo de erosão foi o arraste contínuo de partículas. O leito sedimentado foi preparado de tal modo que a rugosidade do leito fosse interna dispondo assim as partículas de modo não aparente ao escoamento. Com base nesse critério, as vazões calculadas a partir das medições de perda de carga localizada na placa de orifício, ΔP_o , para cada granulometria de partículas, são apresentadas na Tab. 1, assim como o número de Reynolds.

Tabela 1. Vazões mínimas para início do processo de erosão de leito.

Experimento	D_{50} , mm	ΔP_o , kPa	Vazão, Ls^{-1}	Re
I	$3,2 \pm 0,8$	22,23	12,03	4×10^3
II	$2,2 \pm 0,4$	12,35	8,99	3×10^3

A partir da Tab. 1 pode-se perceber que a vazão necessária para o Experimento I, que possui partículas com $D_{50(I)} = 1,47 \times D_{50(II)}$, é cerca de 34% maior que a vazão imposta no Experimento II. Como já foi mencionado anteriormente, a tensão de cisalhamento é a única variável responsável pelo arraste de partículas. Assim, quanto maior o diâmetro das partículas presentes no leito, maior será a vazão e conseqüentemente maior será a tensão de cisalhamento necessária para iniciar o processo de erosão.

4.2. Escoamento no duto

Ao resolver o problema físico de forma simplificada, através de uma geometria bidimensional, constatou-se que o perfil de velocidade tornava-se completamente desenvolvido para $x^* = 45$ ao considerar um número de Reynolds igual a 2100, conforme pode ser observado na Fig. 4 que apresenta a derivada da velocidade longitudinal em relação à coordenada x . Dessa forma, a localização da caixa de cascalhos entre $60 < x^* < 66$ permite, preliminarmente, que o escoamento esteja completamente desenvolvido ao encontrar o leito sedimentado no regime turbulento. A transição de escoamento laminar para turbulento num duto retangular com $\lambda = 1/3$ ocorre aproximadamente em $Re_c = 2360$, embora para $\lambda = 0$, $Re_c = 3100$, conforme Rohsenow et al (1998).

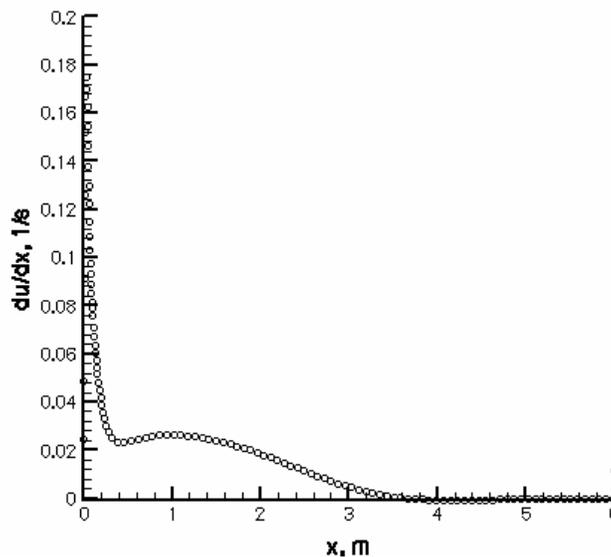


Figura 4. Variação de velocidade axial, du/dx , para o centro do duto retangular ao longo da coordenada longitudinal. $Re = 2,1 \times 10^3$.

Ao resolver o problema físico através de uma geometria tridimensional, não há garantia do desenvolvimento do perfil de velocidade para o comprimento estabelecido no experimento em função da anisotropia da turbulência. Dessa forma, uma análise do desenvolvimento do escoamento tridimensional foi feita em três pontos para validar a condição de contorno de saída definida preliminarmente como escoamento completamente desenvolvido. O número de Reynolds utilizado para essa análise foi igual à $Re = 4 \times 10^5$, conforme os dados estabelecidos pelo Experimento I.

Os pontos escolhidos para fazer a verificação do desenvolvimento do perfil de velocidade para a geometria 3-D foram: (a) $\mathbf{A}(y,z) = (0.04,0.12)$; (b) $\mathbf{B}(y,z) = (0.02,0.025)$; e $\mathbf{C}(y,z)=(0,04,0.025)$. Esses pontos são ilustrados na Fig. 5. A justificativa para escolha desses pontos é que essas posições são características para o campo de velocidade do experimento turbulento. Na Fig. 5, a linha tracejada representa a simetria do duto e a linha cheia representa as paredes do duto.

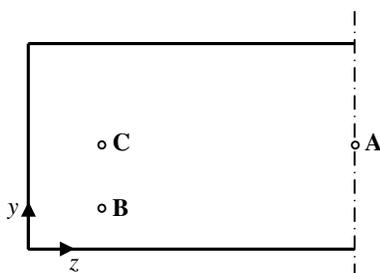


Figura 5. Posição dos pontos **A**, **B**, **C** na seção transversal do duto retangular.

A Fig. 6 ilustra a derivada de velocidade longitudinal, du/dx , em função da coordenada longitudinal x . Pode-se observar que o perfil de velocidade não se desenvolve para o comprimento total do experimento para os pontos **B** e **C**, visto que os mesmos se encontram próximos à parede do duto retangular e dentro do escoamento secundário estabelecido pelo escoamento turbulento. Dessa forma, a hipótese de escoamento completamente desenvolvido como condição de contorno na saída não é verdadeira, mas é uma boa aproximação para o escoamento imposto visto que a saída não é conhecida.

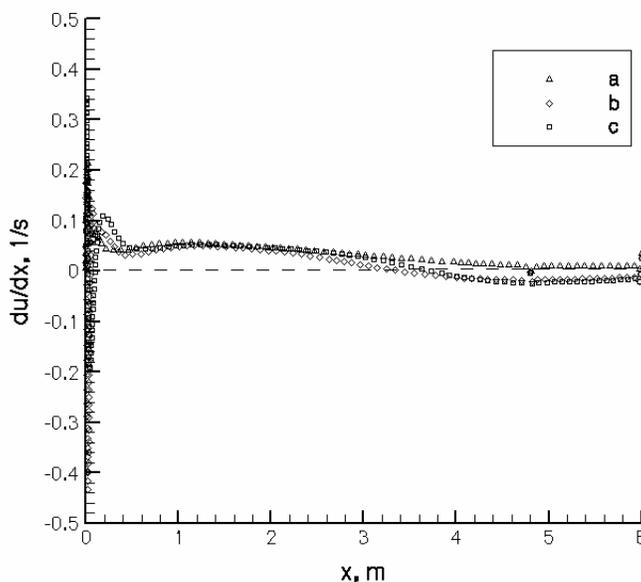


Figura 6. Perfil variação de velocidade axial, du/dx , para os pontos **A**, **B** e **C** ao longo da coordenada longitudinal. $Re = 4 \times 10^5$.

A influência do escoamento turbulento sobre a estrutura do escoamento no duto retangular é apresentada na Fig. 6. A estrutura de escoamento apresentada na figura é diferente da estrutura obtida para a mesma geometria com escoamento laminar. Tal fato é justificado pela anisotropia da turbulência, conforme já mencionado anteriormente, que propicia a formação de escoamento secundário, como pode ser verificado na Fig.7. Essa alteração no escoamento é ilustrada também em Maeda et al. (2005) através de resultados experimentais para $\lambda = 1/2$.

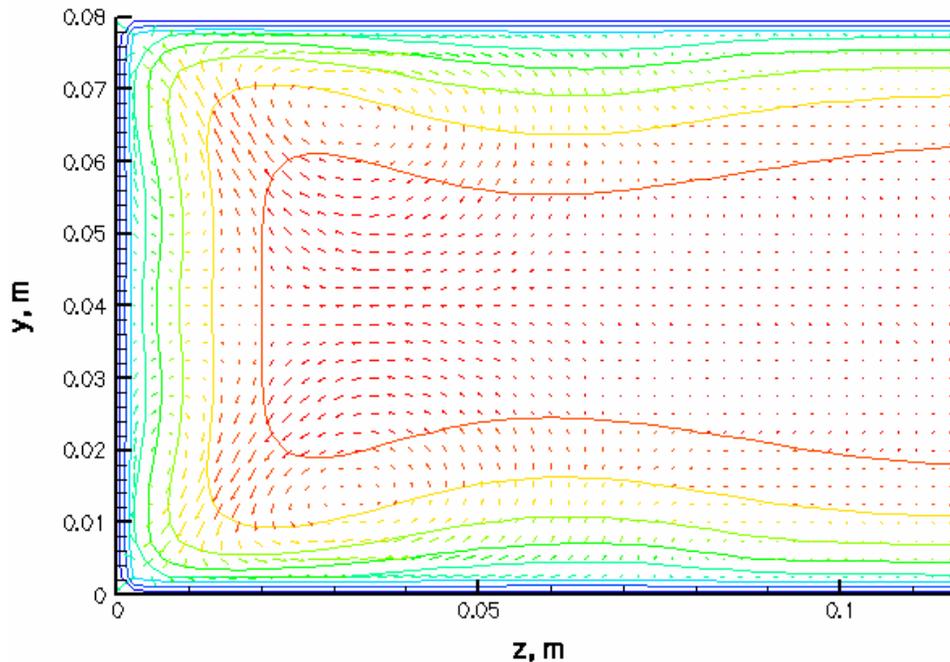


Figura 7. Campo de velocidade, v_y e v_z , da seção transversal em $x^* = 60$. O contorno representa as linhas de isovelocidade axial. $Re = 4 \times 10^5$.

4.3. Tensão de cisalhamento

A presença de escoamento secundário no campo de velocidade acarreta uma variação da tensão de cisalhamento sobre a parede inferior do duto retangular ao longo da coordenada z . Essa variação da tensão de cisalhamento pode ser observada na Fig. 8 para os resultados dos dois experimentos executados.

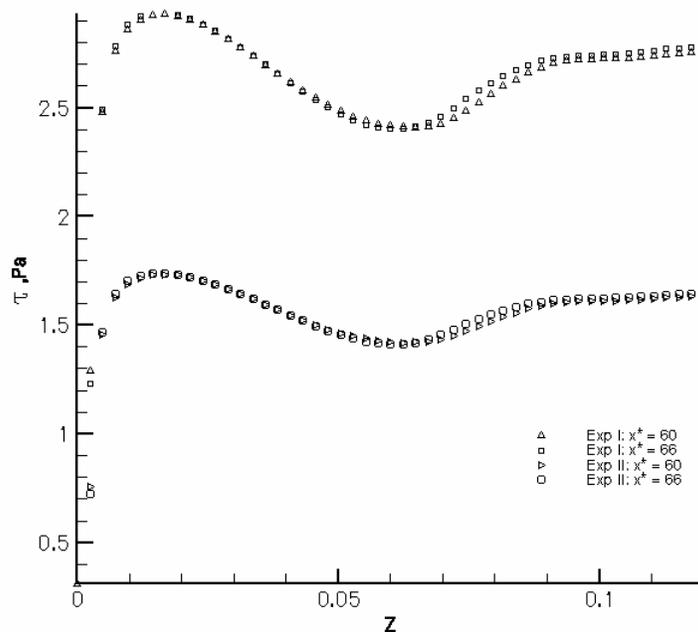


Figura 8. Tensão de cisalhamento ao longo da coordenada z para duas coordenadas longitudinais.

A variação de tensão de cisalhamento é mais intensa nas proximidades da parede do que na região de simetria, conforme pode ser observado na Fig. 8, em função da presença do escoamento secundário. O sentido de rotação do vórtice presente no escoamento atua sobre o campo de velocidade de forma que a tensão de cisalhamento provocada pelo escoamento é superior a média na região em que o vórtice é incidente sobre a parede e inferior a média na região

em que o vórtice sai da parede. Como também pode ser observado na Fig. 8, quanto maior o número de Reynolds do escoamento, maior será a variação de tensão. Esse fenômeno pode ser justificado em função do aumento de rotação do vórtice.

A tensão de cisalhamento obtida para cada experimento é dependente do diâmetro médio das partículas sedimentadas no leito presente no duto retangular. Assim, o Experimento I, configurado com um leito de partículas de dimensão superior ao Experimento II, necessitou de uma tensão de cisalhamento maior que a observada no experimento II, conforme pode ser observado na Fig. 8.

Durante a realização dos experimentos, observou-se que a erosão do leito ocorreu preferencialmente na região central do duto retangular e não na região onde se obteve uma maior intensidade de tensão de cisalhamento. Dessa forma, a estimativa de tensão de cisalhamento necessária para iniciar o processo de erosão do leito sedimentado foi calculada como a média da tensão da região central do duto para as coordenadas $x^* = 60$ e $x^* = 66$. A Tab. 2 apresenta os valores de tensão de cisalhamento para cada experimento realizado e o desvio padrão associado aos resultados numéricos da região central que foram utilizados para o cálculo da tensão de cisalhamento.

Tabela 2. Vazões mínimas para início do processo de erosão de leito.

Experimento	D_{50} , mm	Vazão, Ls^{-1}	τ , Pa
I	$3,2 \pm 0,8$	12,03	$2,75 \pm 0,01$
II	$2,2 \pm 0,4$	8,99	$1,63 \pm 0,01$

5. Conclusão

A técnica utilizada para obter a tensão de cisalhamento mínima que inicia o processo de erosão do leito sedimentado mostrou ser satisfatória. A tensão de cisalhamento obtida nesse trabalho pode ser aplicada ao problema de erosão de um leito sedimentado em um poço horizontal, para as mesmas granulometrias estudadas, partindo da hipótese de que a força de cisalhamento sobre as partículas é a única responsável pelo carreamento das mesmas.

A partir dos resultados obtidos, pode-se afirmar que a tensão de cisalhamento mínima para iniciar o processo de erosão do leito é mais elevada quanto maior for o diâmetro das partículas presentes no leito. Tal afirmação é prevista nos modelos mecanicistas de análise de carreamento de partículas, conforme Silva & Martins (2002).

O escoamento imposto por gradiente de pressão no duto retangular não se apresentou completamente desenvolvido na saída do duto em função das dimensões escolhidas para a geometria, embora tal hipótese seja razoável para solução do problema, uma vez que o centro do duto apresentou du/dx muito próximo de zero.

Alguns ajustes na montagem experimental e na solução computacional precisam ser realizados para melhorar a qualidade dos resultados. Quanto à montagem experimental, um medidor de pitot será utilizado para medir a velocidade nas proximidades da parede e obter, indiretamente, a tensão de cisalhamento sobre a parede de tal modo que possibilite a comparação dos resultados numéricos com os resultados experimentais. Outro ponto importante será a instalação de um manômetro diferencial de pressão digital com saída analógica que possibilitará a medição de vazão de forma mais exata. Quanto à solução numérica, um estudo mais apurado da influência da malha sobre a solução deverá ser realizado e os resultados comparados com os obtidos experimentalmente.

6. Agradecimento

Os autores desse trabalho agradecem a FAPES pelo apoio científico através do processo número 30899702/2005, a PETROBRAS S.A. e a ABS Pumps do Brasil.

7. Referências

- Caenn, R. & Chilingar, G.V., 1996, "Drilling Fluids: State of the art". Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 14, pp. 221-230.
- Maeda, N., Hirota, M. & Fujita, H., 2005, "Turbulent flow in a rectangular duct with a smooth-to-rough step change in surface roughness", Energy, 30, pp. 129-148.
- Niño, Y., Lopez, F. & Garcia, M., 2003, "Threshold for particle entrainment into suspension", Sedimentology, vol. 50, pp. 247-263.
- Patankar, S.V., 1980, "Numerical Heat transfer and fluid flow", Hemisphere Publishing, US, 197p.
- Rohsenow, W.M., Hartnett, J.P. & Cho, Y.I., 1998, "Handbook of Heat Transfer", McGraw Hill, 3rd Ed.
- Silva, R.A. & Martins, A.L., 2002, "Ressuspensão de partículas não esféricas em dutos anulares horizontais", Anais do XXX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (ENEMP), São Carlos, Brasil.

DETERMINATION OF THRESHOLD SHEAR STRESS TO DRAG PARTICLES IN CUTTINGS BED

Bruno Venturini Loureiro
Laboratório de Fenômenos de Transporte
UCL – Faculdade do Centro Leste
Av. Lourival Nunes, 181, Jardim Limoeiro, Serra – ES, 29164-050
brunovl@ucl.br

Renato Nascimento Siqueira
Laboratório de Fenômenos de Transporte
UCL – Faculdade do Centro Leste
Av. Lourival Nunes, 181, Jardim Limoeiro, Serra – ES, 29164-050
renatons@ucl.br

Abstract.

Drilling of horizontal wells for oil and gas production needs an efficient cleaning process due to settling of particles removed during the drilling process, which settles on the inferior part of the annular space between the drilling column and the walls of the well. The erosion of the bed is an important physical phenomenon to petroleum and gas industry since it can improve the opening of the wells.

This work aims to estimate the threshold shear stress necessary to start the erosion process in a sediment bed. An experimental apparatus was built from simplifications of the problem in order to measure the flow rate and identify the beginning of the process. The experiment consists of a rectangular duct with aspect ratio ($\lambda = h/b$) of 1/3 and non-dimensional length ($L^* = L/h$) of 75. The sediment bed to be eroded was placed at $60 < x^* < 66$. Using the flow rate and the boundary conditions, a discretization of the problem was carried out to permit a computational solution using the finite volume method and hence, determine the shear stress. This work used particles with up to 3.0 mm and modeled the flow considering a bed with equivalent roughness.

Keywords: threshold shear stress, drag particles, cuttings bed, numerical simulation.