

## TENSÃO CRÍTICA DE CISALHAMENTO NA SUPERFÍCIE DE UM LEITO DE CASCALHOS

### **Luciana Mançor Lacerda**

Universidade Estadual Norte Fluminense, Laboratório de Engenharia de Petróleo  
Rodovia Amaral Peixoto, km 164 - Macaé, RJ, Brasil  
e-mail: [luciana@lenep.uenf.br](mailto:luciana@lenep.uenf.br)

### **Wellington Campos**

Petrobrás – Petróleo Brasileiro S.A, CENPES  
Ilha do Fundão, Quadra 7 – Cidade Universitária – Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
e-mail: [campos@cenpes.petrobras.com.br](mailto:campos@cenpes.petrobras.com.br)

### **Luiz Carvalho Braga**

CEFET Campos / UNED Macaé  
Rodovia Amaral Peixoto, km 164 - Macaé, RJ, Brasil  
e-mail: [luiz@lenep.uenf.br](mailto:luiz@lenep.uenf.br)

**Resumo.** *O transporte de cascalhos durante a perfuração de poços altamente inclinados e horizontais fica prejudicado pela formação de um leito no anular. Neste trabalho, mostra-se que a altura de equilíbrio deste leito pode ser determinado a partir da tensão cisalhante atuando na superfície do mesmo. Este fato permite a formulação de uma metodologia de cálculo da altura de equilíbrio do leito, introduzindo o conceito de tensão cisalhante crítica. Esta é a tensão cisalhante que atua na superfície do leito na iminência do movimento de uma partícula na superfície do mesmo. A aplicação da metodologia requer a determinação da tensão atuante e da tensão crítica requerida. A tensão atuante é calculada resolvendo numericamente (diferenças finitas) a equação diferencial do movimento do fluido no espaço anular, cobrindo os casos do escoamento laminar e turbulento. A tensão atuante é função da vazão e da geometria do anular na presença de leito, bem como das propriedades físicas do fluido. A tensão crítica requerida, por outro lado, é inicialmente determinada a partir de dados experimentais. Para superar a falta de uma expressão analítica para a tensão crítica, uma modelagem mecanicista, em função do diâmetro das partículas, propriedades físicas do fluido e da partícula é apresentada.*

**Palavras-chaves:** Transporte de Cascalhos, Tensão Crítica, Altura do Leito.

## **1. INTRODUÇÃO**

Na indústria do petróleo, o uso de fluidos como agentes carreadores de partículas sólidas, tanto durante as operações de cimentação, deslocando a pasta de cimento, quanto durante a perfuração, transportando o cascalho até a superfície, é de fundamental importância.

Durante a perfuração, o fluido de perfuração é bombeado através da coluna de perfuração, passa pela broca e retorna à superfície pelo espaço anular entre coluna de perfuração e o

revestimento. Neste processo, o fluido transporta o material resultante da ação da broca sobre a rocha (cascalhos), refrigera e lubrifica a broca, lubrifica a coluna, evita o influxo de fluidos das formações (mantendo a pressão do poço ligeiramente acima da pressão da formação, impedindo o colapso do poço), e transporta os cascalhos resultantes da perfuração. Vários fatores, tais como: taxa de bombeamento, densidade do fluido, velocidade de rotação da coluna de perfuração, taxa de penetração, natureza da rocha, inclinação do poço, etc., interferem no transporte dos cascalhos, podendo acarretar a formação de um leito de cascalhos no anular ( Figura 2).

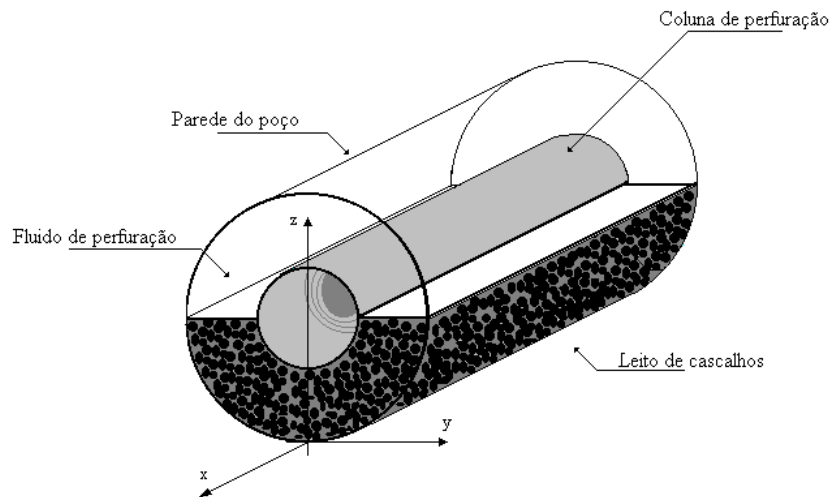


Figura 1 - Leito de cascalhos em geometria anular

A coluna de perfuração e de revestimento são caracterizadas pela excentricidade do anular (Figura 2). A situação é mais crítica em poços horizontais e de grande extensão horizontal (poços ERW ou ‘extended reach wells’). Na cimentação o escoamento de fluidos surge na deposição da pasta de cimento no espaço anular entre a formação e o revestimento do poço.

A crescente necessidade de se perfurar poços de altas inclinações e de grandes afastamentos, decorrente da descoberta de campos gigantes e da exploração em águas profundas, tem motivado estudos no sentido de otimizar a limpeza de poços, fator crítico para o sucesso das operações.

Na perfuração de poços horizontais e de longo alcance, há a tendência da formação de um leito de cascalhos na parte inferior do anular excêntrico, entre a coluna de perfuração e a parede do poço, devido à tendência destes cascalhos se sedimentarem pela ação da gravidade, reduzindo assim o diâmetro efetivo do poço e restringindo a área de fluxo.

O acúmulo de cascalhos no espaço anular é uma das causas do torque e arraste excessivo a que fica submetida a coluna de perfuração.

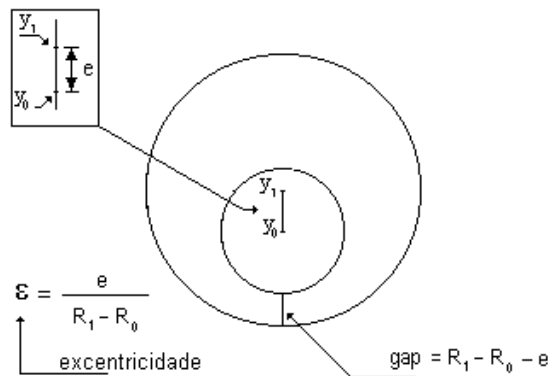


Figura 2 - Definição de excentricidade

O presente estudo aborda a modelagem do escoamento laminar e turbulento de fluidos Newtonianos e não-Newtonianos em anulares excêntricos. O comportamento reológico do fluido é representado pelo modelo “Power-Law”.

Devido aos contornos irregulares do anular excêntrico, a região onde ocorre o fluxo não pode ser descrita precisamente em um sistema de coordenadas clássico (cartesiano, polar ou cilíndrica). O uso de qualquer dessas coordenadas irá, inevitavelmente requerer interpolação entre pontos da malha de diferenças finitas para implementar as condições de contorno. Esse problema pode ser eliminado, usando coordenadas curvilíneas ajustadas ao contorno (“Boundary-fitted coordinates”).

O tensor de Reynolds ou das tensões turbulentas é modelado pela teoria do comprimento de mistura de Prandtl e pela expressão de Van Driest para o comprimento da mistura.

Este trabalho apresenta uma metodologia para a determinação da altura de equilíbrio de um leito de cascalhos, tendo como base um critério envolvendo a tensão de cisalhamento crítica atuante na superfície deste leito. Este método pode ser usado na otimização da limpeza de poços de petróleo horizontais e de longo alcance durante a perfuração dos mesmos.

A expectativa deste trabalho é mostrar a possibilidade de utilização de uma metodologia rápida que permita avaliar a altura de equilíbrio do leito de cascalhos. A tensão atuante no leito é determinada de modelos de escoamento na seção 2, enquanto a tensão crítica é determinada, ou experimentalmente, ou de modelos mecanicistas na seção 3.

## **2. MODELOS DE ESCOAMENTO**

### **2.1 Escoamento Laminar**

O modelo proposto para o escoamento permanente, completamente desenvolvido, em um anular excêntrico, na presença de um leito de cascalhos, conduz, no caso turbulento, a uma equação diferencial não-linear de segunda ordem do tipo elíptica. No caso laminar, o sistema é composto apenas por uma equação diferencial, que é linear para o caso do fluido ser Newtoniano, e não-linear, para o caso do fluido ser não-Newtoniano.

Esta equação diferencial é transformada de um domínio físico irregular para um domínio computacional, onde é possível definir uma malha regular. A finalidade de uma malha computacional adequada é representar o escoamento no anular excêntrico por meio de uma série de pontos espaçados uniformemente. As equações são discretizadas, nesta malha, pelo método de diferenças finitas. Um método de relaxação é usado para resolver iterativamente o sistema de equações discretizadas. No escoamento, os maiores gradientes de velocidade são observados nas regiões próximas aos contornos sólidos, paredes dos tubos ou superfície do leito de cascalhos, e, por isso é conveniente refinar a malha nesses locais por meio de uma deformação do sistema de coordenadas [Tannehill, 1984, pp.247].

### **2.2 – Resultados**

A figura 3 mostra um perfil de velocidade num anular com presença de um leito de cascalhos, e excentricidade igual a 0.6. Pode-se observar o ponto de máximo da velocidade localizado na região mais larga do anular, o que acarreta um prejuízo a erosão do leito de cascalhos, situado na parte inferior do anular. O valor da tensão cisalhante na superfície do leito é tanto menor quanto maior for a excentricidade.

## 2.3 Escoamento Turbulento

Na perfuração, a turbulência, é de especial importância porque aumenta a dispersão dos cascalho resultantes da perfuração do poço, resultando numa melhor limpeza do poço durante a operação de perfuração.

O tensor de Reynolds ou das tensões turbulentas é aqui modelado pela teoria do comprimento de mistura de Prandtl e pela expressão de Van Driest para o comprimento de mistura.

Os modelos desenvolvidos até agora são baseados em hipóteses empíricas, as quais tentam estabelecer uma relação entre as tensões de Reynolds e os valores médios das componentes das velocidades através de adequadas hipóteses concernentes à transferência de massa.

Prandtl ( 1920 ), desenvolveu uma expressão para a transferência de *momentum* em um fluido na qual o comprimento de mistura é análogo ao do caminho médio livre na teoria cinética dos gases. A equação de Prandtl tem tido sucesso quando aplicada ao estudo do movimento turbulento ao longo de paredes (tubos, canais, placas, camadas limites). O modelo de comprimento da mistura descreve a tensão por meio de uma simples fórmula algébrica para  $\mu_t$  como uma função do gradiente de velocidade.

A hipótese desse modelo é que a viscosidade turbulenta ( $\mu_t$ ) é isotrópica, isto é, a taxa entre tensões de Reynolds e taxa média de deformação é a mesma em todas direções.

O modelo de Van Driest é apropriado para o estabelecimento do comprimento de mistura em toda a região do escoamento, desde a superfície da parede até o núcleo turbulento pleno.

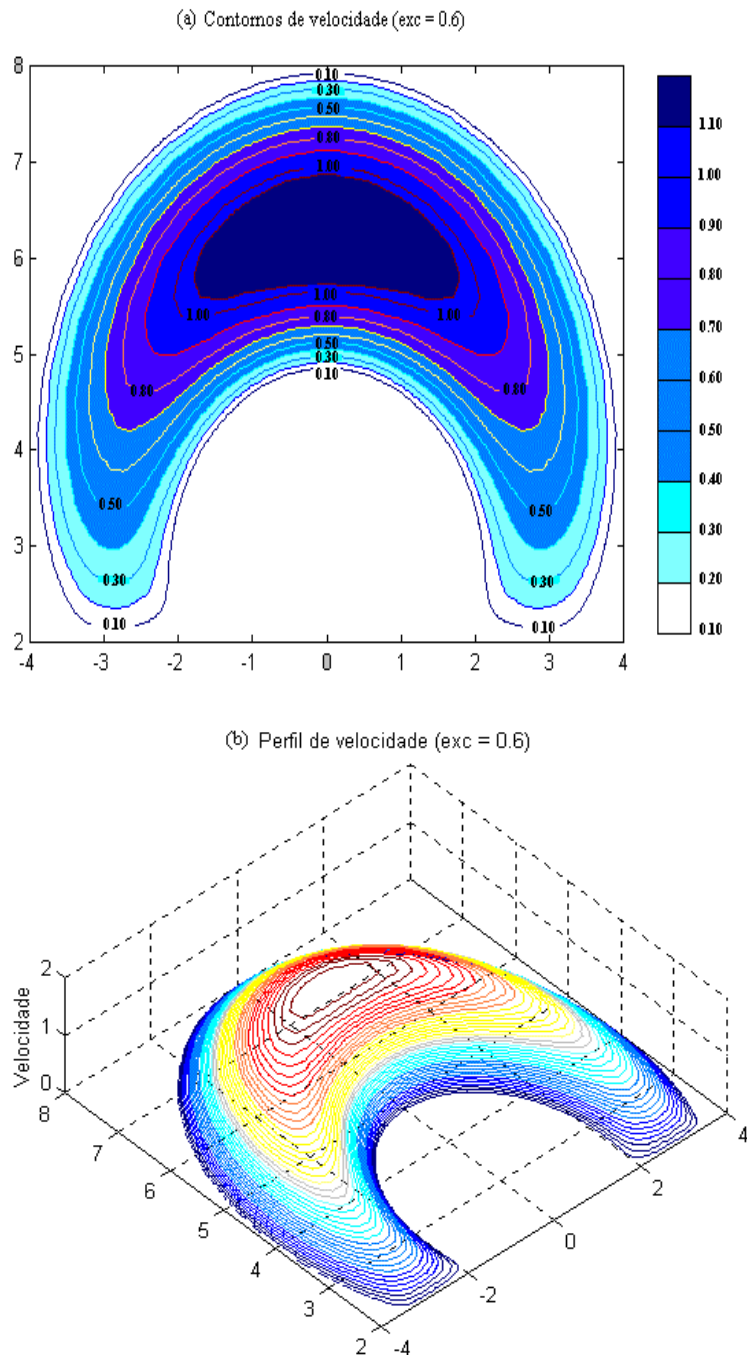


Figura 3 a) Curvas de isovalores de velocidade.  
b) Perfil de velocidade no anular excêntrico

### 3. TENSÃO CRÍTICA DE CISALHAMENTO

A tensão crítica é aqui postulada como o valor da tensão de cisalhamento na superfície do leito de cascalhos, a partir da qual ocorre a erosão do mesmo. Esta tensão é por si só um parâmetro de grande interesse no estudo do carreamento de cascalhos em poços de petróleo. A aplicação de uma metodologia com base nesta hipótese requer a determinação da tensão atuante e da tensão crítica requerida. A tensão atuante é calculada por meio de um programa de computador que resolve a equação diferencial do movimento do fluido no espaço anular. Este programa cobre os casos do escoamento laminar e turbulento. A tensão atuante é função da vazão e da geometria do anular na presença de leito, bem como das propriedades físicas do fluido. A tensão crítica requerida, por outro lado, é inicialmente obtida a partir de dados experimentais e, posteriormente, modelada em função das condições locais em torno da partícula.

A curva abaixo ilustra a aplicação da metodologia proposta. Com ela pode-se obter a altura do leito de cascalhos relacionada a valores de vazão e tensão de cisalhamento na superfície do leito, parâmetros que são obtidos durante a operação de poços, a vazão obtida de maneira direta através de medidas experimentais e a tensão cisalhante através de algum software que considere os parâmetros de fluido e geometria de poço no tratamento do escoamento analisado. Os dados experimentais foram extraídos da figura 6 do paper de Campos et al. (1994).

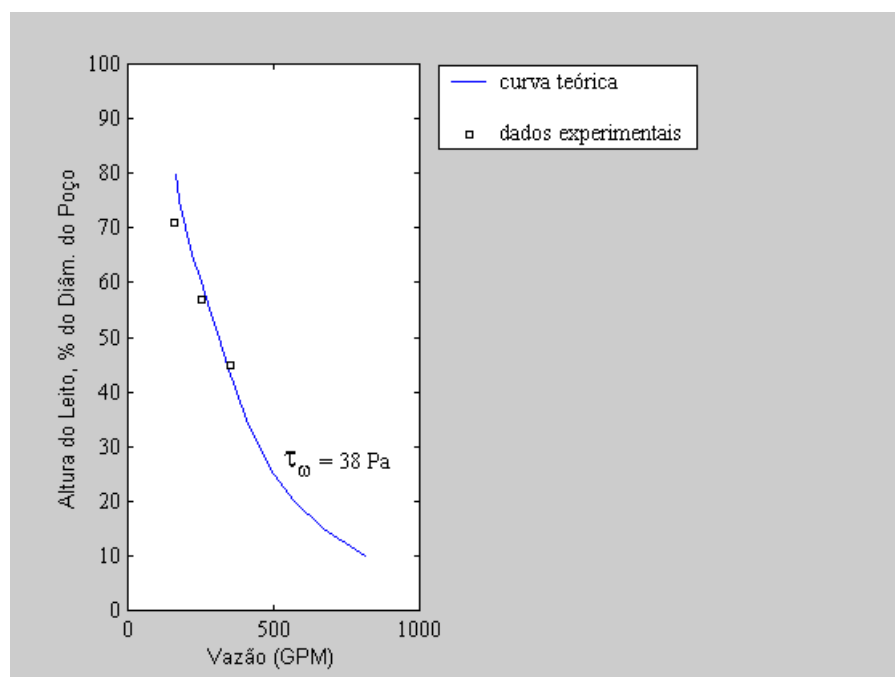


Figura 4- Altura de leito relacionada à vazão e tensão de cisalhamento

#### 3.1 - Modelo

Uma modelagem mecanicista da tensão crítica, em função do diâmetro das partículas, propriedades físicas do fluido e da partícula é apresentada. A magnitude da tensão crítica é função das condições locais em torno da partícula, por exemplo, diâmetro médio, peso aparente e forma da partícula, propriedades reológicas do fluido, não dependendo da vazão ou da geometria do anular

O objetivo em questão é, considerando fluidos Newtonianos e não-Newtonianos, obter expressões analíticas aproximadas para a tensão crítica em função de parâmetros característicos do escoamento, propriedades de fluidos e propriedades da partícula.

A geometria do modelo adotado para a determinação da tensão crítica, figura 5, considera as partículas de diâmetro uniforme empacotadas hexagonalmente em poços horizontais.

Considerando partículas em repouso, portanto a velocidade da partícula em relação ao fluido será igual a velocidade média da distribuição triangular de velocidades ( ver figura 5) adotada para o fluido nas proximidades da superfície do leito de cascalhos, isto é;

$$V_{rel} = \frac{v}{2} \quad (3.1)$$

Para obtermos uma expressão para a tensão crítica de cisalhamento, primeiro analisamos as condições de equilíbrio de rotação da partícula, a saber, somatório dos momentos das forças atuando nas partículas, em relação a qualquer ponto de referência, igual a zero. Por conveniência tomaremos esse balanço de forças em relação ao ponto P. Dessa análise uma equação de 2º grau para a velocidade relativa, que podemos chamar velocidade relativa crítica, entre a partícula e o fluido é então obtida. Como último passo na determinação da tensão crítica devemos relacionar de alguma forma a velocidade, na equação obtida da análise de equilíbrio, com a tensão de cisalhamento superficial. Para o caso Newtoniano essa relação é obtida a partir da lei de viscosidade de Newton e para fluidos não Newtonianos pela relação empírica entre o tensor cisalhante e a taxa de deformação, conhecida como "*Power-law*".

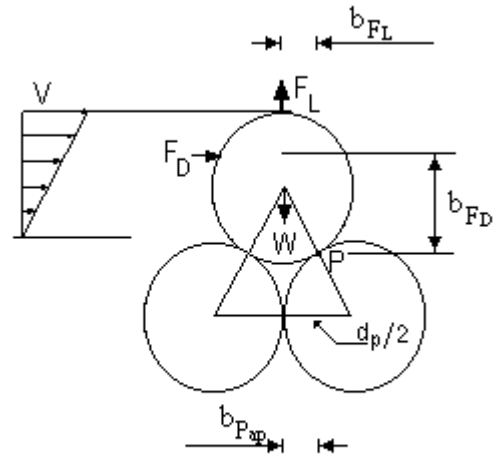


Figura 5- Partículas no leito de cascalhos

### 3.2 Fluidos Newtonianos

Neste estudo, estamos interessados em obter o valor limite para a tensão de cisalhamento na direção do fluxo. No escoamento analisado, regime laminar, permanente de fluidos incompressíveis, a única componente não nula do tensor de cisalhamento na direção do escoamento é  $\tau_{yx}$ . Em fluidos Newtonianos, caracterizados por uma relação linear entre o tensor de cisalhamento e o tensor de deformação, a componente  $\tau_{yx}$ , a qual doravante denotaremos apenas por  $\tau$ , é dada por,

$$\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.2)$$

onde  $\mu$  é a viscosidade e  $v$  a velocidade do fluido na direção do fluxo (direção x).

Usando a relação anterior, podemos estabelecer uma relação aproximada entre a velocidade do fluido no topo da partícula e a tensão de cisalhamento na direção do fluxo, que será muito útil na determinação da tensão crítica. Isso é feito aproximando a derivada de  $v$  em relação a  $y$  pela razão entre suas variações. Observando a figura 5 e, em particular a distribuição triangular de velocidades, podemos reescrever, de forma aproximada, a equação ( 3.2 ) como;

$$\tau \cong \frac{2\sqrt{3}\mu}{3d_p} v \quad (3.3)$$

### 3.3 Balanço de Forças

As principais forças atuando sobre a partícula de diâmetro  $d_p$  sujeito a um escoamento da esquerda para direita são (ver figura 5):

$$F_L = \frac{1}{2} C_L A \rho V_{rel}^2 , \quad (3.4)$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D A \rho V_{rel}^2 , \quad (3.5)$$

$$F_p = m g , \quad (3.6)$$

$$E = \rho_p V g , \quad (3.7)$$

onde  $F_D$  e  $F_L$  são as forças hidrodinâmicas de arraste e de “lift”, respectivamente,  $F_p$  é a força peso e  $E$  o empuxo.  $C_D$  e  $C_L$  são chamados coeficientes de arraste e de “lift”, respectivamente,  $\rho$  é a massa específica,  $A$  é a área projetada da partícula,  $V_{rel}$  é a velocidade relativa entre o fluido e a partícula,  $m$  é a massa da partícula,  $\rho_p$  a massa específica da partícula,  $V$  o volume da partícula e  $g$  a constante gravitacional.

A origem da força de suspensão da partícula pode ser vista de uma maneira simples aplicando-se a fórmula de conservação de Bernoulli entre os dois pontos extremos da partícula, o primeiro na parte inferior da partícula ( $P_1$ ), onde de acordo com a distribuição triangular de velocidades a velocidade da partícula é nula e o segundo ( $P_2$ ) na parte superior da partícula onde a velocidade é  $v$ .

A variação de pressão entre os pontos 1 e 2 é composta por dois termos. O segundo termo está relacionado à força de empuxo de natureza hidrostática, que será considerado na expressão do peso aparente e o primeiro de natureza hidrodinâmica é a força que estamos denominando neste trabalho de força de suspensão da partícula.

Considerando  $C_L$  independente do número de Reynolds, o coeficiente é determinado comparando as expressões para a força de lift, equação (3.4), com o termo hidrodinâmico na equação para a variação de pressão. Com este procedimento chegamos ao valor  $C_L = 4$ . Assim a força de “lift” pode ser expressa por,

$$F_L = \frac{1}{8} \pi \rho d_p^2 v^2 . \quad (3.8)$$

A força de arrasto ou arraste é uma força de natureza resistiva, na verdade uma força de reação do fluido sobre a partícula. A partícula em repouso, através do atrito, age no sentido de frear o fluido que reage e empurra a partícula para frente. A força de arraste depende do número de Reynolds da partícula. Para número de Reynolds pequenos ou da ordem de 0,1 pode-se usar a fórmula de Stokes,  $C_D = 24/Re_p$ . Assim a força de arraste (Bourgoyne, 1991), é expressa por;

$$F_D = \frac{12}{Re_p} A \rho V_{rel}^2 . \quad (3.9)$$

Substituindo na equação acima as expressões para a área  $A$ , velocidade relativa  $V_{rel}$  e para o número de Reynolds da partícula  $Re_p = \rho V_{rel} d_p / \mu$ , chegamos a expressão final para a força de arraste.

$$F_D = \frac{3}{2} \pi \mu d_p v \quad (3.10)$$

onde  $\mu$  é a viscosidade absoluta do fluido,  $d_p$  é o diâmetro médio das partículas e  $v$  é a velocidade máxima do fluido ao nível do topo da partícula.

A força gravitacional e o empuxo determinam o peso aparente da partícula, o qual é dado por,

$$P_{ap} = (\rho_p - \rho) \frac{\pi d_p^3}{6} g \quad (3.11)$$

onde  $\rho_p$  é a massa específica da partícula e  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $d_p$  é o diâmetro da partícula e  $g$  é a aceleração da gravidade.

A condição de equilíbrio de rotação da partícula, soma dos momentos das forças envolvidas igual a zero, é traduzida pela equação,

$$F_L b_{F_L} + F_D b_{F_D} - P_{ap} b_{P_{ap}} = 0, \quad (3.12)$$

onde,  $b_{F_L}$ ,  $b_{F_D}$  e  $b_{P_{ap}}$  são os braços de alavanca das forças “lift”, arraste e peso aparente, respectivamente, em relação ao ponto P.

Substituindo na equação para o balanço de forças os valores para os braços de alavanca e as expressões para as forças  $F_L$ ,  $F_D$  e  $P_{ap}$ , chegamos de maneira direta à seguinte expressão para o balanço de forças.

$$v^2 + 30.92 \frac{\mu}{\rho d_p} v - 1.333 \left( \frac{\rho_p}{\rho} - 1 \right) d_p g = 0. \quad (3.13)$$

Observe que a equação acima, é uma equação do segundo grau para a velocidade crítica. Usando a relação  $v = (0.866 d_p / \mu) \tau$ , a equação representativa do balanço de forças é colocada em termos da tensão de cisalhamento  $\tau$ . Como esta equação traduz uma condição física de equilíbrio, chamamos o valor específico da tensão de cisalhamento que a satisfaz de tensão de cisalhamento crítica ou simplesmente tensão crítica.

$$\tau_{crít}^2 + 35.712 \frac{\mu^2}{\rho d_p^2} \tau_{crít} - 1.777 \left( \frac{\rho_p}{\rho} - 1 \right) \frac{\mu^2 g}{d_p} = 0 \quad (3.14)$$

resolvendo então para  $\tau_{crít}$ , teremos,

$$\tau_{crít} = a \frac{\mu^2}{\rho d_p^2} \left[ \sqrt{1 + b \left( \frac{\rho_p}{\rho} - 1 \right) \frac{\rho^2 d_p^3 g}{\mu^2}} - 1 \right] \quad (3.15)$$

onde  $a$  e  $b$  são constantes a serem determinadas a partir da comparação com experimentos.

### 3.4 Fluido não-Newtoniano

De maneira análoga ao caso Newtoniano, pode-se chegar a uma expressão para a tensão crítica para fluidos não-Newtonianos. Em termos práticos, para o problema aqui considerado, as diferenças que surgem quando consideramos fluidos não-Newtonianos são fatores de



correção que devem ser aplicados aos coeficientes  $C_D$  e  $C_L$ , associados às forças de arraste e de flutuação. As correções são naturalmente consequência da nova condição reológica do fluido.

Substituindo as expressões corrigidas para os coeficientes  $C_L$  e  $C_D$  e a expressão para a velocidade em função de  $\tau$  na equação para o balanço de momentos, chega-se à seguinte fórmula para a tensão crítica para fluidos não-Newtonianos.

$$0.658^n Y(n) d_p \rho^{1/2} k(n)^{-1/n} \tau^{2+n/2n} + 1.793 \left( \frac{\sqrt{3}}{4} \right)^n X(n) \tau - 0.0386 (\rho_p - \rho) d_p g = 0. \quad (3.19)$$

#### 4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O modelo proposto permite a avaliação do escoamento laminar e turbulento de fluidos Newtonianos e não-Newtonianos em anulares excêntricos, com as hipóteses simplificadoras de escoamento isotérmico, permanente, totalmente desenvolvido, fluido incompressível e paredes do poço inexpandíveis. O comportamento reológico do fluido é representado pelo modelo “*Power-Law*”.

A análise dos perfis mostram um achatamento do perfil quando o regime de escoamento passa do laminar para o turbulento. Os gradientes de velocidade obtidos nas regiões próximas às paredes do anular aumentam com o aumento do número de Reynolds. No escoamento turbulento há uma melhor distribuição da quantidade de movimento, melhorando assim a limpeza do poço.

Neste trabalho, mostra-se que a altura de equilíbrio do leito correlaciona-se bem com um determinado valor constante da tensão cisalhante atuante na superfície do mesmo, aqui definida como tensão crítica de equilíbrio. Este conceito de tensão cisalhante crítica é superior ao de vazão crítica ou velocidade de deposição por se relacionar mais de perto com a erosão do leito.

Como mostrado anteriormente, a metodologia apresentada pode ser útil em trabalhos de campo, na determinação rápida e com boa aproximação da altura de equilíbrio do leito para diferentes fluidos de perfuração. Se a altura do leito é excessiva, a coluna de perfuração fica submetida a torque severo e resistência ao arraste, podendo ocorrer, inclusive, obstrução total do anular, o que impossibilitaria a circulação do fluido de perfuração. A partir dessa metodologia poder-se-ia especificar uma vazão mínima de projeto, compatível com a capacidade das bombas instaladas na sonda que garantisse uma altura de leito adequada. No modelo mecanicista desenvolvido aqui para a determinação desta tensão crítica de cisalhamento, não têm influência as variáveis globais como diâmetro do poço, vazão, etc., tendo influência apenas as variáveis locais como diâmetro da partícula, massa específica do fluido e da partícula, etc. Sendo um modelo mecanicista aparecem algumas constantes a serem determinadas empiricamente. A proposta futura seria usar o programa de computador e os dados experimentais da literatura para gerar um banco de dados, a fim de ajustar o modelo mecanicista, determinando valores para as constantes  $a$  e  $b$ , para calcular a tensão atuante na superfície de um leito de cascalhos em função de parâmetros geométricos, das propriedades dos fluidos e dos sólidos, e dos parâmetros operacionais.

## AGRADECIMENTOS

À Fenorte - Fundação Estadual Norte Fluminense e à PETROBRAS pelo apoio financeiro que permitiram o desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- Anderson, D. A. ; Tannehill, J. C. ; Pletcher, R. H., 1984, Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, Hemisphere Publishing Co.
- Azouz, I., 1994, Numerical Simulation of Laminar and Turbulent Flows of Wellbore Fluids in Annular Passages of Arbitrary Cross-Section, Ph.D. Thesis, The University of Tulsa, Tulsa, USA.
- Bird, R. B. ; Stewart, W. E. ; Lightfoot, E. N. : Transport Phenomena, John Wiley & Sons.
- Campos, W.; Azar, J.J. ; Shirazi, S. A. and Pilehvari, A. A., 1994, Mechanistic Modeling of Cuttings Transport in Highly Inclined Wells, FED-Vol. 189, Liquid-Solid Flows, ASME .
- Campos, W., 1995, Mechanistic Modeling of Cuttings Transport in Directional Wells, Ph.D. Thesis, The University of Tulsa, Tulsa, USA.
- Prandtl, L., 1926, Turbulent Flow, NACA TM 435.
- Schlichting, H., 1979, Boundary-Layer Theory, McGraw-Hill, 7<sup>a</sup> ed. .
- Spiegel, M. R. , 1973, Manual de Fórmulas e Tabelas Matemáticas, Coleção Schaum, McGraw-Hill.
- Van Driest, E. R., 1956, On Turbulent Flow Near a Wall, Journal of Aeronautical Science, Vol. 23, p. 485.
- White, F. M., 1974, Viscous Flow, McGraw Hill, pp. 126-127.

**Abstract.** *The cuttings transport during the drilling of highly inclined and horizontal wells is hindered by the creation of a cuttings bed in the annulus. In this work, it is shown that the equilibrium height of this bed can be determined from the shear stress on its surface. This fact enables the formulation of a methodology for evaluating the equilibrium height of the cuttings bed through the introduction of a new concept, that of critical shear stress. This is the shear stress that acts on the bed surface at the imminence of movement of the particles on the bed surface. The use of the methodology requires the determination of the acting shear stress and of the required critical shear stress. The acting shear stress is calculated by means of a computer program that solve the motion differential equations in the annular space; covering the cases of the laminar and turbulent flow regimes. The actuating shear stress is a function of flow rate and of the annular geometry in the presence of a cuttings bed; it is also a function of the physical properties of the fluid. On the other hand, the required critical shear stress is a function of the particles diameters and physical properties of the fluid and particles. A mechanistic model for the critical shear stress is also presented.*