



**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**  
**Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo**

## **PMI-1841 ENGENHARIA DE PERFURAÇÃO**

**AULA 9 – CIMENTAÇÃO (Exercícios)**

**AULA 10 – HIDRÁULICA DE PERFURAÇÃO**

**Wilson Siguemasa Iramina**

**Santos, setembro de 2016**

## **HIDRÁULICA DE PERFURAÇÃO – 1a parte**

- 1. Introdução**
- 2. Pressão hidrostática em coluna de líquidos**
- 3. Pressão hidrostática em coluna de gás**
- 4. Pressão hidrostática em colunas complexas de fluidos**
- 5. Conceito de densidade equivalente**
- 6. Pressões no anular durante operações de controle do poço**
- 7. Empuxo**
- 8. Forças Axiais na coluna de perfuração**
- 9. Breve revisão de mecânica de fluidos**
- 10. Exemplos e Exercícios**

## 1. INTRODUÇÃO

- Importância da mecânica de fluidos para o engenheiro de perfuração;
- Pressões de fluido extremamente altas são criadas nos poços e na coluna de perfuração (fluidos de perfuração e cimentação);
- Estas pressões devem ser consideradas em qualquer projeto de perfuração na solução de problemas;
- 3 condições principais: condição estática, onde o fluido do poço e a coluna central de tubos estão em repouso; operações de circulação na qual o fluido está sendo bombeado para o fundo do poço e subindo pelo espaço anular, e operações de manobra na qual a tubulação central é movimentada para cima e para baixo dentro do fluido;
- a 2a e a 3a condições apresentam um complicador: comportamento não-newtoniano dos fluidos e do cimento;

## 1. INTRODUÇÃO

- Dentre as diversas aplicações da hidráulica de perfuração; as seguintes são particularmente importantes:
  1. Cálculo das pressões hidrostáticas subsuperficiais que tendem a causar ruptura ou colapso nos tubos ou a fratura das formações expostas;
  2. Diversos aspectos na prevenção de Blowouts;
  3. Deslocamento de pastas de cimento;
  4. Seleção do bico de jato da broca;
  5. Pressões formadas devido ao movimento na vertical de tubos;
  6. Capacidade de carregamento dos fluidos de perfuração

## 2. PRESSÃO HIDROSTÁTICA EM COLUNAS DE LÍQUIDOS

Pressões em poços de subsuperfícies são determinadas facilmente pelas condições estáticas do poço. A variação de pressão com a profundidade em uma coluna de fluido pode ser obtida considerando-se o diagrama de corpo livre (mostrar figura) para forças verticais agindo sobre um elemento do fluido a uma profundidade  $D$  em um furo com uma seção de área  $A$ . A força descendente sobre o elemento de fluido exercido pelo fluido acima dele é dada pela pressão  $P$  vezes a área  $A$  da seção do elemento.

$$P = 0,052\rho_f D + P_0$$

$$P[\text{psi}]$$

$$\rho_f[\text{lbm/gal}]$$

$$D = \text{profundidade}[\text{pés}]$$

**ATENÇÃO!!!!!!**

**Memorize esta equação**

## 2. PRESSÃO HIDROSTÁTICA EM COLUNAS DE LÍQUIDOS

Uma importante aplicação da equação de pressão hidrostática é a determinação da densidade apropriada do fluido de perfuração.

A coluna de fluido no poço deve possuir densidade suficiente para provocar uma pressão no poço oposta à cada uma das camadas permeáveis de modo que seja maior do que a pressão no poro do fluido de formação na camada permeável.

### 3. PRESSÃO HIDROSTÁTICA EM COLUNAS DE GÁS

Em muitas operações de perfuração e de completação, um gás está presente em pelo menos uma porção do poço. Em alguns casos, um gás é injetado no poço a partir da superfície enquanto que em outros casos gas(es) pode(m) penetrar no poço vindos de uma formação de subsuperfície. A variação de pressão com a profundidade em uma coluna estática de gás é mais complexa do que em uma coluna estática de líquido porque a densidade do gás varia com a mudança de pressão.

O comportamento do gás pode ser descrito usando-se uma equação de gás real definida por:

$$pV = znRT = z \frac{m}{M} RT$$

Todos os parâmetros conhecidos (**espera-se!!!**), exceto talvez **z**

### 3. PRESSÃO HIDROSTÁTICA EM COLUNAS DE GÁS

O fator de desvio de gás **z** é uma medida de quanto se desvia o comportamento de um gás em relação a uma *gás ideal*. Um gás ideal é aquele em que não há forças atrativas entre as suas moléculas. Fatores de desvio para gases naturais tem sido determinados experimentalmente como função de temperatura e pressão e estão amplamente disponíveis na literatura sobre petróleo.

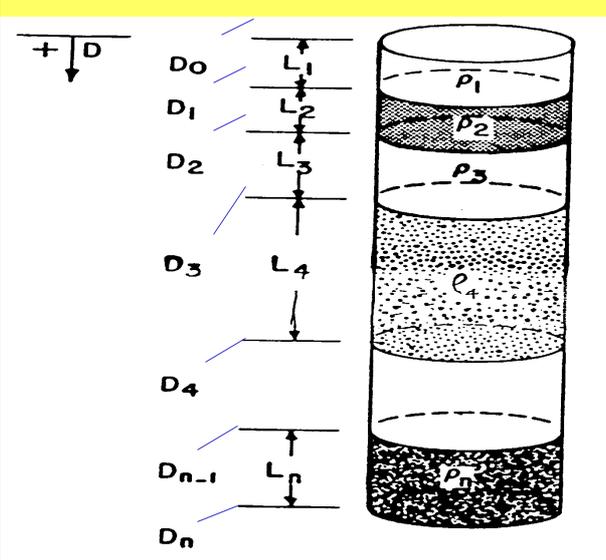
Nesta disciplina vamos simplificar bastante a abordagem e baseados na equação anterior com algumas derivações e integrações obtemos:

$$p = p_0 e^{-\frac{M(D-D_0)}{1544zT}}$$

#### 4. PRESSÃO HIDROSTÁTICA EM COLUNAS COMPLEXAS DE FLUIDOS

Em diversas operações de perfuração, a coluna de fluido do poço contém diversas seções de fluidos de diferentes densidades. A variação da pressão com a profundidade neste caso deve ser calculada separando-se o efeito de cada segmento de fluido.

$$p = p_0 + 0,052 \sum_{i=1}^n \rho_i (D_i - D_{i-1})$$



**Uma coluna complexa de líquidos**

$p = 0.052\rho D + p_0$

$\Delta p = 0.052\rho \Delta D$

$p = p_0 + 0.052 \sum_{i=1}^n \rho_i (D_i - D_{i-1})$

### 5. CONCEITO DE DENSIDADE EQUIVALENTE

Estudos de campo em uma determinada área frequentemente permitem indicadores para o desenvolvimento da máxima densidade de lama que formações a uma certa profundidade irão suportar sem fraturar durante uma operação normal de perfuração. Às vezes é útil comparar uma coluna de fluido complexa com uma coluna de fluido simples que é aberta para a atmosfera. Isto é possível obtendo-se uma densidade de lama equivalente  $\rho_e$  que é definido por:

$$\rho_e = \frac{P}{0,052D}$$

A densidade equivalente da lama deve ser sempre referenciada a uma profundidade específica.

### 6. PRESSÕES NO ANULAR DURANTE OPERAÇÕES DE CONTROLE DO POÇO

Uma das aplicações mais importantes das relações de pressão hidrostática é a determinação das pressões no espaço anular durante as *operações de controle do poço*.

Procedimentos de emergência tomados quando os fluidos de formação começam a se deslocar em direção do poço (kick).

A pressão no fundo do poço (Bottomhole Pressure) deve permanecer impreterivelmente acima da pressão de poro da formação para impedir influxo adicional de fluido de formação. Isto é dificultado pelo perigo de fraturamento de camadas mais fracas pela pressão hidráulica (blowout).

## 6. PRESSÕES NO ANULAR DURANTE OPERAÇÕES DE CONTROLE DO POÇO

### Identificação de kicks

Densidade do kick

$$\rho_k = \rho_m - \frac{P_c - P_{dp}}{0,052L_k}$$

$P_c$  = pressão no revestimento

$P_{dp}$  = pressão na coluna de perfuração

$L_k$  = comprimento do kick

$\rho_m$  = densidade equivalente da lama

## 6. PRESSÕES NO ANULAR DURANTE OPERAÇÕES DE CONTROLE DO POÇO

### Volume de lama misturada ao fluido de formação

#### Volume mínimo misturado ao kick

$$V_m = q \times t_d$$

$q$  = vazão da bomba

$t_d$  = tempo de detecção do kick antes de parar a bomba e fechar o BOP

#### Volume da zona contaminada pelo kick

$$V_k = G \times t_d$$

$q$  = Volume do ganho no tanque de lama

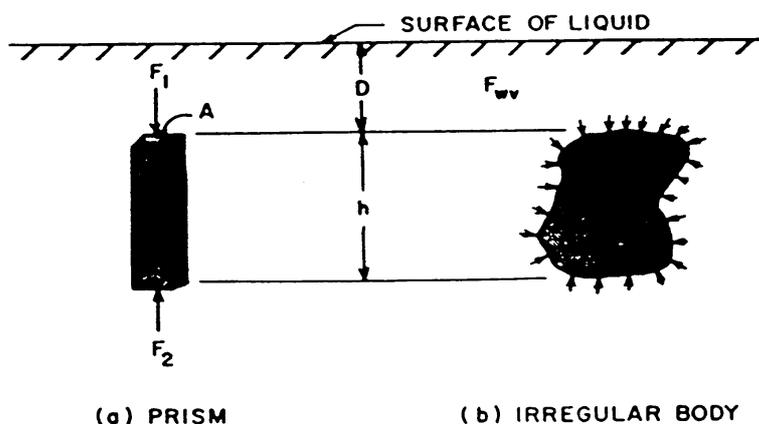
$t_d$  = tempo de detecção do kick antes de parar a bomba e fechar o BOP

## 7. EMPUXO

É preciso dar atenção às forças aplicadas sobre os equipamentos e coluna de perfuração que estão no poço devido à pressão hidrostática. Em alguns casos apenas a força resultante ou o momento de curvatura criado pela pressão hidrostática é necessário, enquanto que em outros a tensão axial ou a compressão em um dado ponto no equipamento submerso é desejado.

O efeito (net effect) da pressão hidráulica agindo sobre um corpo ou material estranho imerso no fluido do poço é chamado de **empuxo**.

**Força de empuxo = peso do fluido deslocado (Arquimedes, 250 A.C.)**



**Forças Hidráulicas agindo sobre um corpo submerso**

## Peso deslocado (buoyed)

$$\begin{aligned} W_e &= W - F_b \\ &= W - \rho_f V \\ &= W - \rho_f \frac{W}{\rho_s} \end{aligned}$$

$W_e$  = peso deslocado (empuxo)  
 $W$  = peso do equipamento no ar  
 $F_b$  = Força de empuxo  
 $V$  = volume do corpo  
 $\rho_f$  = densidade do fluido  
 $\rho_s$  = densidade do corpo



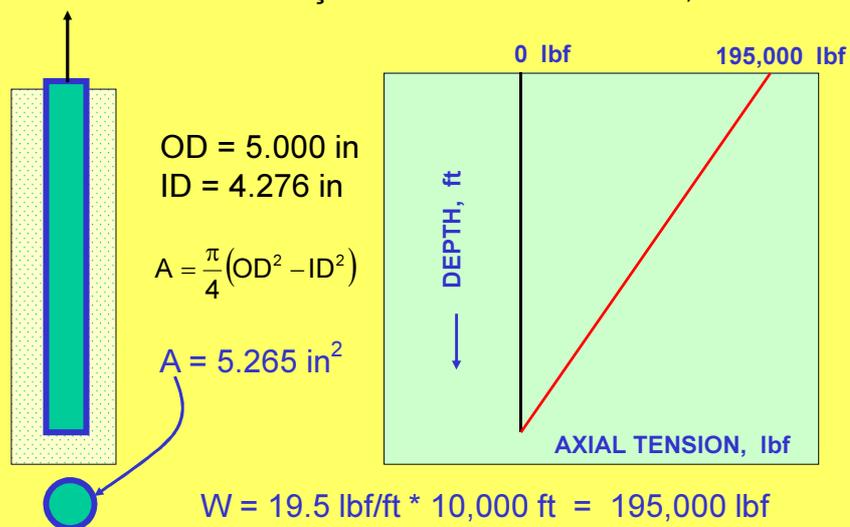
$$W_e = W \left( 1 - \frac{\rho_f}{\rho_s} \right)$$

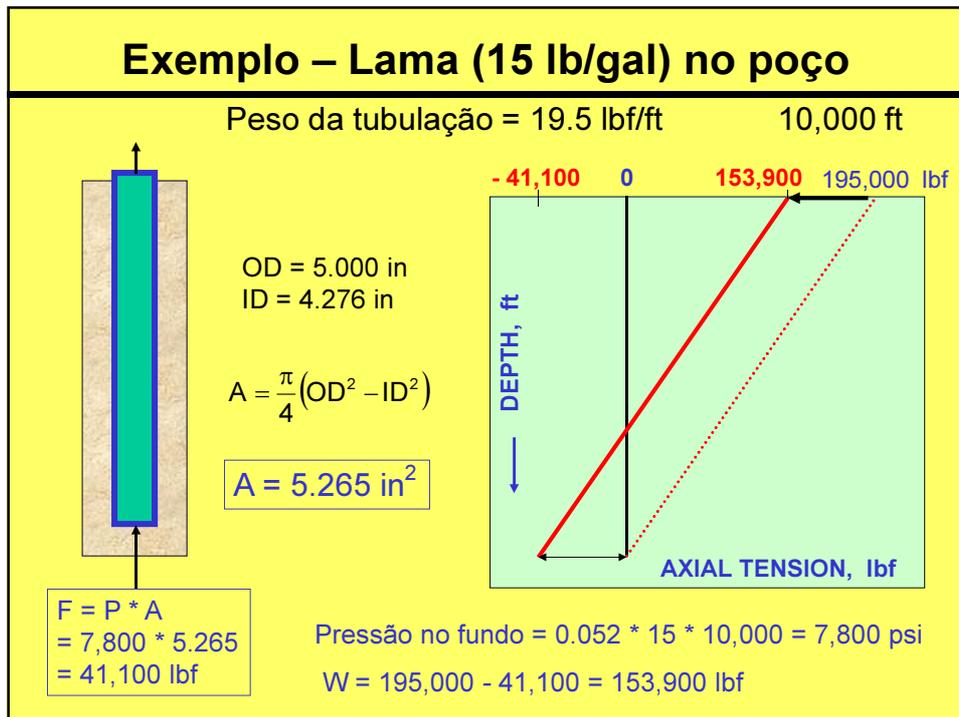
Fator de empuxo

Válido para um corpo sólido ou para um tubo aberto na extremidade

## Exemplo simples – Furo vazio

Peso da tubulação = 19.5 lbf/ft      10,000 ft





### Exemplo

Para o aço,  $\rho_s = 65.5 \text{ lbm/gal}$  (= 490 lbf/ft<sup>3</sup>)

Mergulhado na lama, ( $\rho_f = 15.0 \text{ lbm/gal}$ )

O fator de empuxo é:

$$\left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}\right) = \left(1 - \frac{15.0}{65.5}\right) = 0.771$$

Uma coluna de perfuração pesa 100,000 lbs no ar.

O peso devido ao empuxo =  $100,000 * 0.771 = 77,100 \text{ lbs}$

## 8. FORÇAS AXIAIS NA COLUNA DE PERFURAÇÃO

Na situação anterior, somente se levava em conta o simples efeito da pressão hidrostática sobre a tubulação. No entanto, em alguns casos é preciso levar em conta a tensão axial em um certo ponto da coluna de tubos. A solicitação axial é a tensão aplicada sobre a tubulação dividida pela área da seção transversal do aço.

Quando a tensão axial deve ser determinada, os pontos efetivos de aplicação da pressão hidrostática devem ser considerados e a relação de Arquimedes não pode ser aplicada.

## 8. Forças Axiais na coluna de perfuração

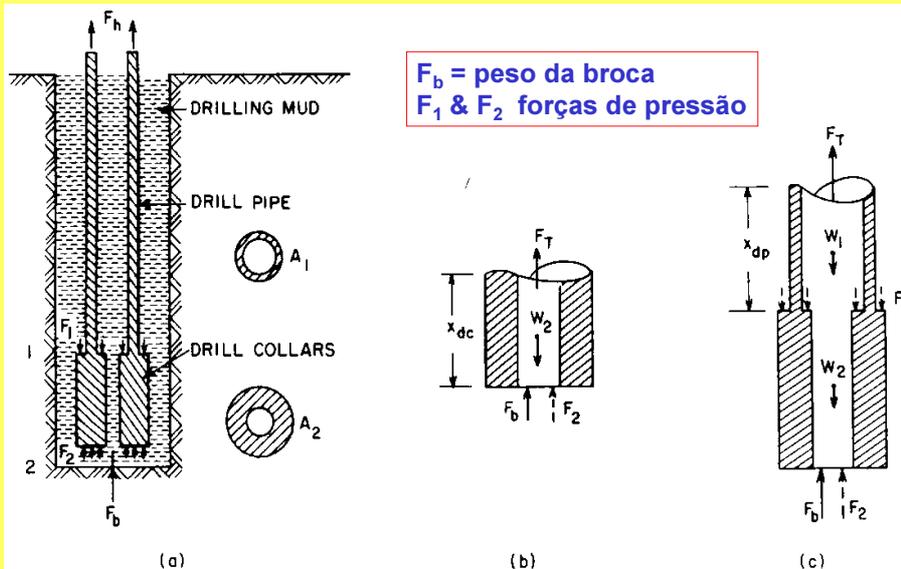


Fig. 4.10—Effect of hydrostatic pressure on axial forces in drillstring: (a) schematic of drillstring, (b) free body diagram for drill collars, and (c) free body diagram for drillpipe.

## Tensão axial na coluna de perfuração

### Exemplo

Uma coluna de perfuração consiste de uma tubulação de 10.000 pés (19,5 lbf/ft) e 600 pés de colares (147 lbf/ft) suspensa sobre o fundo do poço por uma lama de 15 lbf/gal. ( $F_b = \text{peso da broca} = 0$ ).

- Qual é a tensão axial na coluna de perfuração em função da profundidade?

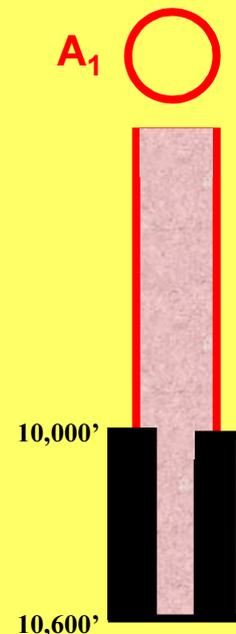
### Exemplo – cont.

Pressão no topo dos colares  
 $= 0.052 (15) 10,000 = 7,800 \text{ psi}$

Pressão no fundo dos colares  
 $= 0.052 (15) 10,600 = 8,268 \text{ psi}$

Área da seção transversal do tubo,

$$A_1 = \frac{19.5 \text{ lb/ft}}{490 \text{ lb/ft}^3} * \frac{144 \text{ in}^2}{\text{ft}^2} = 5.73 \text{ in}^2$$

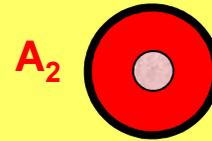
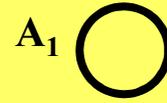


### Exemplo – cont.

Área da seção transversal dos colares,

$$A_2 = \frac{147}{490} * 144 = 43.2 \text{ in}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Diferenti al area} &= A_2 - A_1 \\ &= 43.2 - 5.73 = 37.5 \text{ in}^2 \end{aligned}$$



### Exemplo – cont.

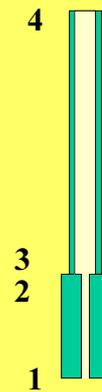
1. A 10,600 ft. (Fundo dos comandos)

Força compressiva =  $p A$

$$= 8,268 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} * 43.2 \text{ in}^2$$

$$= 357,200 \text{ lbf}$$

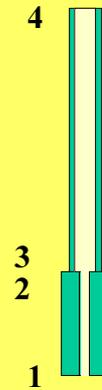
[ Tensão axial = - 357,200 lbf ]



### Exemplo – cont.

2. A 10,000 ft+ (topo dos colares)

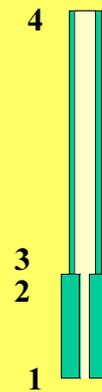
$$\begin{aligned}
 F_T &= W_2 - F_2 - F_b \quad \leftarrow \quad F_b = F_{BIT} = 0 \\
 &= 147 \text{ lbf/ft} * 600 \text{ ft} - 357,200 \\
 &= 88,200 - 357,200 \\
 &= -269,000 \text{ lbf}
 \end{aligned}$$



### Exemplo – cont.

3. A 10,000 ft- (Fundo da tubulação)

$$\begin{aligned}
 F_T &= W_1 + W_2 + F_1 - F_2 - F_b \\
 &= 88,200 + 7800 \text{ lbf/in}^2 * 37.5 \text{ in}^2 - 357,200 \\
 &= 88,200 + 292,500 - 357,200 \\
 &= + 23,500 \text{ lbf}
 \end{aligned}$$



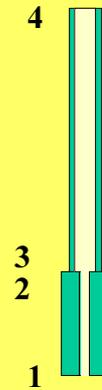
## Exemplo – cont.

### 4. Na superfície

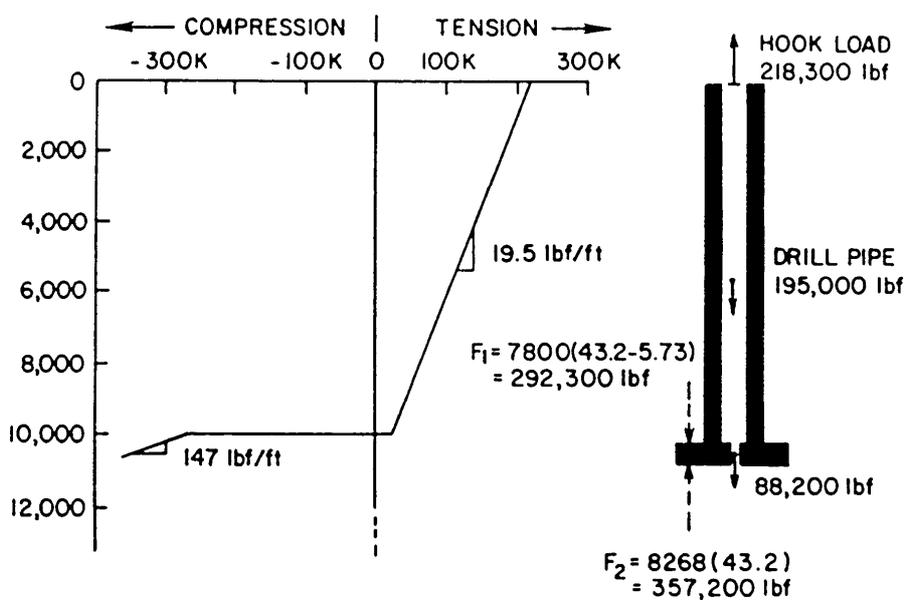
$$\begin{aligned}
 F_T &= W_1 + W_2 + F_1 - F_2 - F_b \\
 &= 19.5 * 10,000 + 88,200 \\
 &\quad + 292,500 - 357,200 - 0 \\
 &= 218,500 \text{ lbf}
 \end{aligned}$$

Alternativamente:  $F_T = W_{AR} * FE$

$$= 283,200 * 0.7710 = 218,345 \text{ lbf}$$

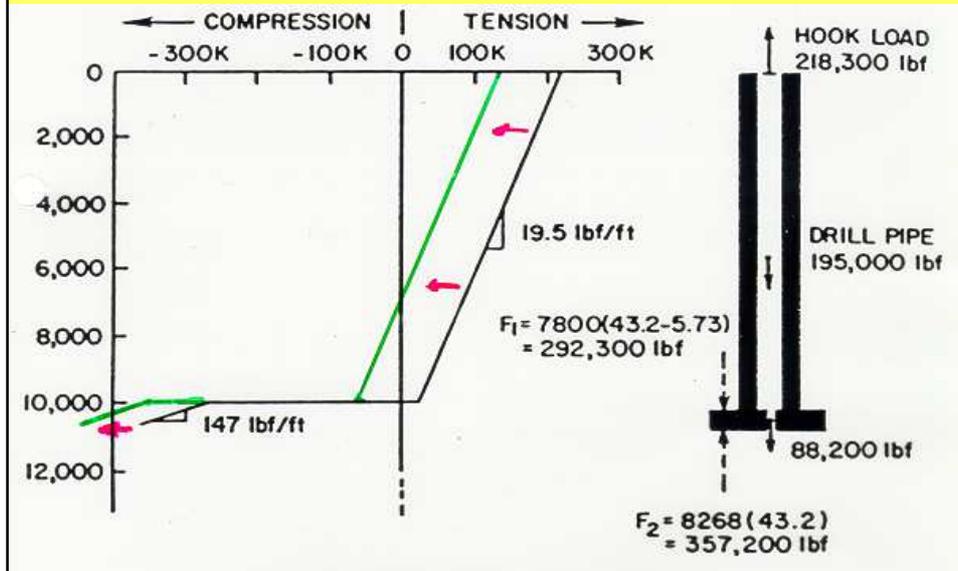


Empuxo



Tensões axiais como função da profundidade para o exemplo

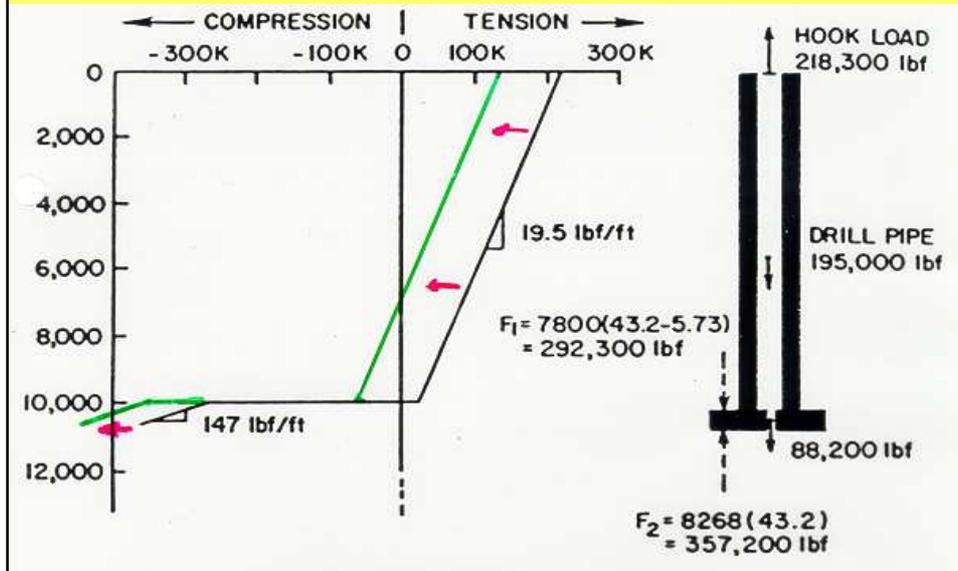
## Carga Axial com $F_{BIT} = 68,000 \text{ lbf}$



### Exemplo - Resumo

1. A 10,600 ft  $F_T = -357,200 \text{ lbf}$  [compressão]
2. A 10,000 + ft  $F_T = -269,000 \text{ lbf}$  [compressão]
3. A 10,000 - ft  $F_T = +23,500 \text{ lbf}$  [tensão]
4. Na Superfície  $F_T = +218,500 \text{ lbf}$  [tensão]

## Carga Axial com $F_{BIT} = 68,000$ lbf



### 9. BREVE REVISÃO DE MECÂNICA DE FLUIDOS

-Fluxo Laminar

-Fluxo turbulento

$$N_{Re} = \frac{Dv\rho}{\mu}$$

Balço de energia mecânica

$$\frac{dp}{\rho} + \frac{v dv}{g_c} + \frac{g dz}{g_c} + \frac{2 f_f v^2 dL}{g_c D} + dw_s = 0$$

$$\Delta p = \frac{g \rho \Delta z}{g_c} + \frac{\rho \Delta v^2}{2g_c} + \frac{2 f_f \rho v^2 L}{g_c D}$$

$$p_1 = \Delta p_s + \Delta p_v + \Delta p_p - \Delta f_f = p_2$$

$\Delta p_s$  = Pressão hidrostática

$\Delta p_v$  = Cinética/ velocidade

$\Delta p_p$  = Ganho na pressão devido à bomba

$\Delta f_f$  = Força de atrito

### **HIDRÁULICA DE EQUIPAMENTOS DE PERFURAÇÃO**

- Muito da potência produzida pelos fluidos de perfuração bombeados é perdida no sistema de circulação através das linhas de superfície, de perfuração e espaço anular;
- Esta perda não traz benefício algum à performance das brocas de perfuração;
- Esta potência perdida pode ser usada em diferentes formas para ajudar na limpeza da broca / fundo do furo;
- A má utilização da energia hidráulica resulta numa ação deficiente da broca sobre a rocha a ser perfurada, uma vez que os dentes da broca têm que retrabalhar os cascalhos acumulados no fundo do poço, além dos cones se apoiarem no colchão formado pelos cascalhos.

### **DIVERSAS TEORIAS PARA SE ENCONTRAR O PONTO ÓTIMO DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS**

- Máxima velocidade nos jatos, usando a máxima pressão permissível na bomba – atualmente em desuso;
- Máxima potência nos jatos, usando a máxima pressão permissível na bomba;
- Máxima força de impacto
- Máxima força de impacto efetiva

De modo geral existem dois regimes de fluxo:

- fluxo laminar: o fluido se move ao longo de trajetórias definidas e as equações de fluxo são determinadas analiticamente

$$P \sim \mu q$$

- fluxo turbulento: o fluido se move de forma caótica e neste caso não existem modelos analíticos, porém pode-se estabelecer correlações usando-se o conceito de fator de fricção

$$P \sim \rho f q^2$$

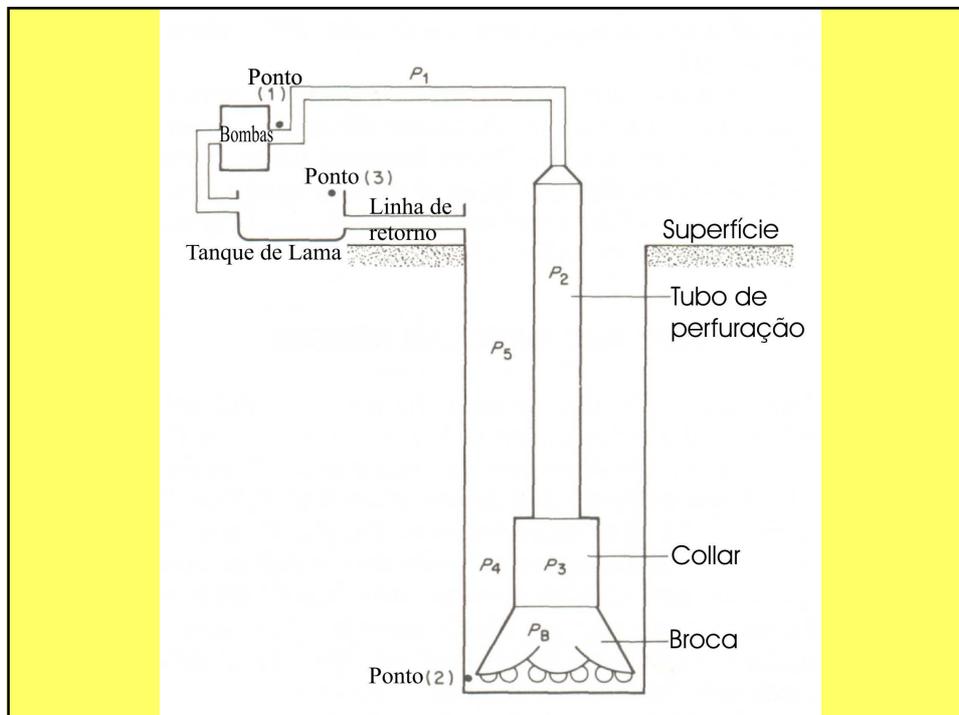
P=perda ou queda na pressão; q=taxa de fluxo,

$\mu$  = viscosidade;  $\rho$  = densidade do fluido; f = fator de fricção.

A perda de pressão para o fluxo em dutos depende do regime do fluxo: no laminar a perda é proporcional à viscosidade e à taxa de fluxo enquanto que no turbulento a perda é proporcional à densidade e ao quadrado da taxa de fluxo. Estas equações somente são válidas para fluidos newtonianos. Para fluidos não-newtonianos existem relações mais complexas, mas que de modo geral possuem tendência similar.

### Potência hidráulica (hydraulic horsepower)

Uma medida de energia por unidade de tempo obtida nos jatos da broca. Normalmente calculada pela equação  $HHP = P \cdot Q / 1714$ , onde  $P$  é a pressão em psi,  $Q$  é a vazão em galões/min e 1714 é um fator de conversão para da HHP em termos de CV. Os fabricantes freqüentemente recomendam que a energia hidráulica do fluido nos jatos esteja em uma faixa em particular de HHP (ex. 2,0 a 7,0 HHP) para assegurar o dente da broca e a limpeza do fundo do furo sejam adequados e evitar a erosão prematura da broca em si (máximo HHP).



### Perdas de pressão

Devido às forças friccionais, o sistema de circulação irá perder energia quando o fluido é bombeado do ponto 1 para o ponto 2 e depois de volta para o ponto 3 que é o tanque da lama de perfuração. Portanto, o objetivo principal da hidráulica de perfuração é calcular as perdas de pressão resultantes das forças friccionais em cada parte do sistema de circulação.

Quatro perdas de carga:

- perdas de carga nas conexões de superfície;
- perdas de carga nos tubos;
- perdas de carga no espaço anular;
- perdas de carga na broca

Estas perdas dependem do tipo de fluido utilizado e do tipo de fluxo no sistema de circulação.

### Perdas nas conexões de superfície

As perdas de carga nas conexões de superfície ( $P_1$ ) ocorrem no standpipe, na mangueira, no swivel e no kelly.

Dificuldade em se estimar estas perdas: dependem das dimensões e geometria e também do uso contínuo dos fluidos de perfuração.

Pode-se usar a seguinte equação geral para estimar a perda:

$$P_1 = E \rho^{0,8} Q^{1,8} (PV)^{0,2} \quad [psi \text{ ou } bar]$$

$\rho$  = densidade do fluido [lb/gal] ou [kg/l]

$Q$  = vazão [gpm] ou [l/m]

$E$  = constante que depende do tipo de equipamento de superfície

$PV$  = viscosidade plástica [cP]

### Perdas no espaço anular e na tubulação

As perdas na tubulação ocorrem dentro dos tubos e colares de perfuração (pontos P2 e P3 no desenho).

As perdas no espaço anular ocorrem ao redor dos tubos e colares de perfuração (pontos P4 e P5 no desenho).

As magnitudes destas perdas dependem:

- das dimensões dos tubos de perfuração (ou dos colares de perfuração): diâmetro interno e externo e comprimento;
- propriedades reológicas do fluido de perfuração: peso específico, viscosidade plástica e **ponto de escoamento**;
- tipo de fluxo: laminar, turbulento

O comportamento dos fluidos varia de acordo com a posição dentro do furo, assumindo valores diferentes, por exemplo, no fundo do poço.

### Uso de dois modelos:

- Modelo plástico de Bingham
- Modelo da lei da potência

### **Queda de pressão na broca**

O objetivo de qualquer programa hidráulico é otimizar a perda de pressão na broca de modo a maximizar a limpeza no fundo do poço. Para um dado comprimento da coluna de perfuração e determinadas propriedades de um fluido de perfuração, as perdas P1, P2, P3 P4 e P5 serão constantes. No entanto, a perda na broca será largamente influenciada pelos tamanhos de jato que irão influenciar na quantidade de potência hidráulica disponível na broca. Quanto menor o jato, maior a perda de pressão e maior a velocidade do jato.

### **Otimização de hidráulica de brocas**

Todos os programas hidráulicos começam pelo cálculo das quedas de pressão nas várias partes do sistema de circulação.

Objetivo: melhorar o rendimento da perfuração através da otimização da hidráulica como os parâmetros de perfuração.

Determinação da vazão ótima através da variação da perda de carga no sistema, bem como a combinação de jatos ótima, e conseqüentemente os parâmetros adequados.

## **Cálculo da variação da perda de carga no sistema em função da vazão**

### **1. Teste na sonda antes de se retirar a coluna para a troca da broca.**

O teste consiste em se efetuar três leituras de pressão de bombeio para três vazões pré-estabelecidas.

Limites de vazão:

Vazão mínima:  $35\phi$  (trinta e cinco vezes o diâmetro do poço)

Vazão máxima:  $50\phi$  (cinquenta vezes o diâmetro do poço)

Para o teste, escolhe-se 2 pontos bem próximos aos limites e um terceiro ponto intermediário.

### **2. Determinação da perda de carga no sistema.**

Perda de carga nos jatos da broca ( $\Delta PB$ ): obtido no gráfico das 3 pressões de bombeio.

$$\Delta P_{\text{sist}} = P_{\text{bombeio}} - \Delta PB$$

Cálculo da perda de carga nos jatos da broca

Traçado da variação de perda de carga no sistema em função da vazão a uma dada profundidade.

### **3. Otimização hidráulica**

Determinação da vazão ótima: aquela em que

$$\Delta P_{\text{sist}} = \Delta PB/2$$

$$\Delta P_{\text{sist}} = (1/3)\Delta P_{\text{bombeio}}$$

$$\Delta PB = (2/3)\Delta P_{\text{bombeio}}$$

#### 4. Determinação da combinação de jatos ótima

$$\Delta P_{B\acute{o}tima} = 2\Delta P_{sist \acute{o}tima}$$

#### A otimização da hidráulica de fundo

No início de cada fase do poço e de posse dos dados das bombas de lama e da vazão mínima necessária para carrear os cascalhos no anular faz-se a escolha do diâmetro das camisas que serão utilizadas nas bombas.

Determina-se, para os intervalos regulares ou para cada broca descida no poço, os diâmetros de jatos que farão com que se tenha no fundo do poço a maximização da variável desejada conforme o critério escolhido.

Dois critérios mais tradicionais de maximização:

Maximização da potência dos jatos;

Maximização da força de impacto dos jatos

Parâmetros a serem conhecidos

a) Pressão Máxima de Bombeio: menor valor entre a pressão de trabalho da parte hidráulica da bomba ("fluid end") e a pressão correspondente ao esforço máximo na haste intermediária na parte mecânica da bomba ("power end"), que varia de acordo com os diferentes diâmetros de camisas e pistões.

Potência Hidráulica: potência hidráulica transferida ao fluido pela bomba, desprezando a pressão na sucção.

Dada por:

$$Ph = (Ps \times Q)/1714$$

Onde: Ph = potência hidráulica em HP;

Ps = pressão de bombeio em psi

Q = vazão real em gpm

Perda de Carga Útil: nos orifícios da broca ocorre uma transformação de energia da forma pressão para a forma cinética. Esta energia cinética adquirida pelo fluido é logo dissipada no fundo do poço. Por isso a queda de pressão que ocorre nos jatos da broca é chamada de perda de carga na broca ou perda de carga útil. Sua expressão é:

$$PB = (RO \times Q^2) / (10858 \times Aj^2)$$

Onde, PB = perda de carga útil (psi)

RO = massa específica do fluido (lbm/gal)

Q = vazão (gpm)

Aj = área total dos jatos (pol<sup>2</sup>)

Perda de Carga Parasita: soma das perdas de carga em todo o sistema de circulação exceto na broca, ou seja, nos equipamentos de superfície, no interior da coluna e no espaço anular. Em seu cálculo, considera-se o fluido em fluxo turbulento. O erro induzido por esta hipótese é pequeno, pois ela, em geral, não é verdadeira apenas no anular, onde a perda de carga é menos de 10% do total. É dada por:

$$P = K_p \times Q^m$$

Onde, P = perda de carga parasita (psi)

K<sub>p</sub> = fator de perda de carga parasita

Q = vazão (gpm)

m = expoente (normalmente 1,8)

Procedimento para a determinação da combinação ótima de jatos para perfurar determinado trecho do poço.

Escolha das camisa das bombas de lama

Escolher aquela cujo diâmetro permita trabalhar com a máxima pressão de bombeio possível.

Determinação da vazão a ser utilizada

Determinada a camisa, a pressão de bombeio passa a ser constante e a vazão pode variar entre o limite mínimo, indispensável para o carreamento dos cascalhos e máxima, que pode ser a vazão máxima dada pela bomba ou a vazão crítica para fluxo turbulento no anular (indesejável para evitar alargamento do poço).

A vazão ótima de bombeio será aquela que, ou maximiza a potência hidráulica na broca (Q<sub>op</sub>) ou maximiza a força de impacto (Q<sub>oi</sub>), dependendo do critério de otimização escolhido.

$$Q_{op} = [P_s / ((m + 1) \times K_p)]^{1/m}$$

$$Q_{oi} = ((2 \times P_s) / (m + 2) \times K_p)^{1/m}$$

$$K_p = (P_s - P_B) / Q^m$$

Nem sempre é necessário usar a máxima potência possível na broca para se obter boa limpeza do fundo do poço. Em formações duras, por exemplo, 3 HP/pol2 são suficientes para boa limpeza. Usar valores mais altos significa maior consumo de combustível, maior desgaste das bombas e até maior desgaste da broca.

Quando se maximiza a potência hidráulica tem-se aproximadamente 65% da potência de bombeio consumida na broca. Se se maximiza a força de impacto, tem-se aproximadamente 48% da potência disponível na superfície consumida na broca.

Existem vários procedimentos gráficos para a otimização hidráulica (Método Hughes)