



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

PMI-1841 ENGENHARIA DE PERFURAÇÃO

AULA 11 – HIDRÁULICA DE PERFURAÇÃO – 2ª Parte

Wilson Siguemasa Iramina

Santos, setembro de 2016

HIDRÁULICA DE PERFURAÇÃO – 2a parte

- 11. Jatos das brocas**
- 12. Potência Hidráulica**
- 13. Força Hidráulica de impacto**
- 14. Fluxo laminar – modelos reológicos – revisão**
- 15. Fluxo laminar em tubos e anulares**
- 16. Fluxo turbulento em tubos e anulares**
- 17. Otimização da Hidráulica de Perfuração**
- 18. Exercícios**

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_{op}) ou maximiza a força de impacto (Q_{oi}), 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)

11. JATOS DAS BROCAS

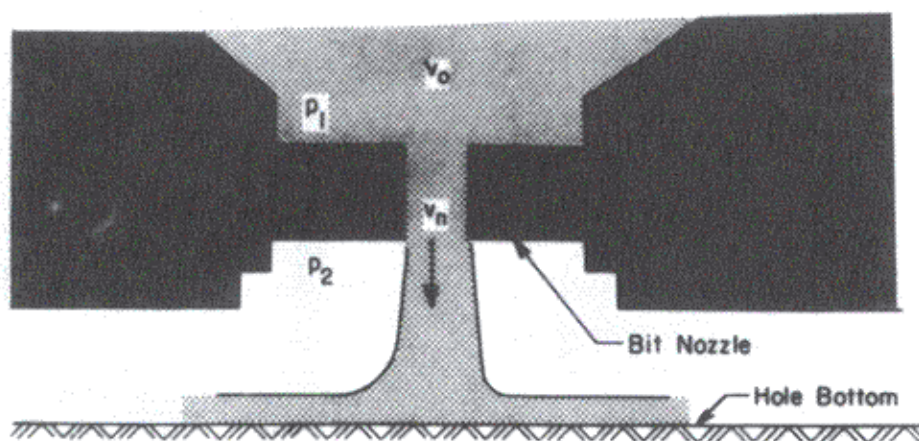


Fig. 4.17—Flow through a bit nozzle.

11. JATOS DAS BROCAS

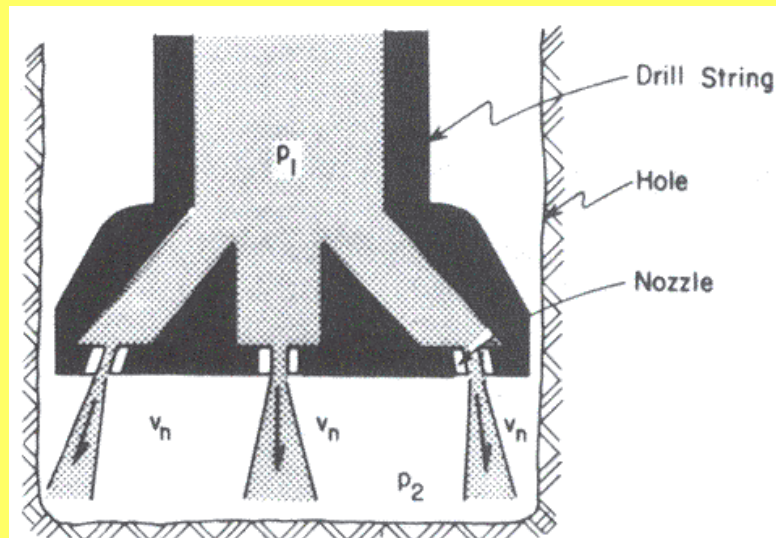


Fig. 4.18—Flow through parallel nozzles.

Velocidade do jato

$$v_n = C_d \sqrt{\frac{\Delta p_b}{8.074 \times 10^{-4} \rho}}$$

C_d = Nozzle discharge coefficient
usually equal to 0.95

Queda na pressão da broca

$$\Delta p_b = \frac{8.33 \times 10^{-5} \rho q^2}{C_d^2 A_t^2}$$

Exemplo: Uma lama de 12 PPG flui através de 3 jatos de uma broca com diâmetro de 13/32 pol com uma vazão de 400 gpm. Calcule a queda de pressão na broca.

Example 4.13. A 12.0-lbm/gal drilling fluid is flowing through a bit containing three $1\frac{3}{32}$ -in. nozzles at a rate of 400 gal/min. Calculate the pressure drop across the bit.

Solution. The total area of the three nozzles is given by

$$\begin{aligned} A_t &= \frac{\pi}{4(32)^2} (13^2 + 13^2 + 13^2) \\ &= 7.67 \times 10^{-4} (169 + 169 + 169) \\ &= 0.3889 \text{ sq in.} \end{aligned}$$

Using Eq. 4.34, the pressure drop across the bit is given by

$$\begin{aligned} \Delta p_b &= \frac{8.311 \times 10^{-5} (12)(400)^2}{(0.95)^2 (0.3889)^2} \\ &= 1,169 \text{ psi.} \end{aligned}$$

12. POTÊNCIA HIDRÁULICA (Hydraulic Horsepower)

Uma vez que a potência é a taxa do trabalho sendo feito, a energia W da bomba pode ser convertida para potência hidráulica P_H multiplicando-se W pela taxa de fluxo da massa (q). Deste modo, se a vazão for expressa em gal/min e a pressão Δp em psi, temos:

$$P_H = \frac{\Delta p_p q}{1714}$$

Onde P_H é expresso em potência hidráulica (multiplicando-se pelo termo $q/1714$)

12. POTÊNCIA HIDRÁULICA (Hydraulic Horsepower)

Qual a HHP de uma bomba entregando 400 gpm a 3,000 psi = ?

Fórmula da potência hidráulica

$$HHP = \frac{q\Delta p}{1714}$$

PORTANTO,

$$HHP = \frac{400 * 3,000}{1714}$$

A Potência Hidráulica da bomba = 700 hp

13. FORÇA HIDRÁULICA DE IMPACTO

O objetivo do jatos da broca é melhorar a ação de limpeza do fluido de perfuração no fundo do poço. Antes do uso de brocas com jatos, as lascas de rocha não eram removidas de maneira eficiente e muito da vida útil das brocas era consumida pela remoagem dos fragmentos.

A ação de limpeza dos jatos ainda não está totalmente compreendida, mas diversos pesquisadores chegaram à conclusão de que a ação de limpeza dos jatos é maximizada pela maximização da força hidráulica de impacto total do fluido que sai dos jatos contra o fundo do furo.

13. FORÇA HIDRÁULICA DE IMPACTO

Exemplo: Com os dados disponibilizados abaixo, qual a força hidráulica de impacto desenvolvida por uma broca?

$$C_D = 0.95$$

$$q = 400 \text{ gal/min}$$

$$\rho = 12 \text{ lb/gal}$$

$$\Delta p_n = 1,169 \text{ psi}$$

$$F_j = 0.01823 \ C_D \ q \sqrt{\rho \ \Delta p}$$

Impact = rate of change of momentum

$$F_j = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = \left(\frac{m}{\Delta t} \right) \Delta v = \frac{\rho \ q \ v_n}{32.17 * 60}$$

$$F_j = 0.01823 \ c_d \ q \sqrt{\rho \ \Delta p}$$



$$F_j = 0.01823 * 0.95 * 400 \sqrt{12 * 1169} = \underline{\underline{820 \text{ lbf}}}$$

14. Fluxo Laminar

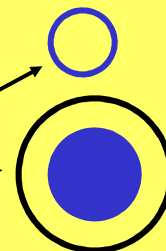
Modelos Reológicos

- Newtoniano
- Plástico ou de Bingham
- De potência (Power-Law)

Viscosímetro Rotational

Fluxo Laminar em um poço

- Fluxo de fluido em tubo
- Fluxo de fluido em um anular



Reologia é a ciência que estuda a deformação e o escoamento da matéria. Essa ciência envolve o estudo de materiais cujo comportamento pode ser modelado dentro de dois extremos: puramente elásticos (Lei de Hooke) e puramente viscosos (Lei de Newton da viscosidade).

Dessa maneira, o ponto alto de materiais reologicamente complexos é a apresentação de dois comportamentos, dependendo-se da solicitação imposta, caracterizando-se os materiais visco-elásticos.

Exemplos típicos desse tipo de material dentro da Engenharia de Petróleo são os fluidos de fraturamento (géis a base de HPG – hidróxi propil guar) utilizados em operações de estimulação de poços e fluidos de perfuração com aditivos poliméricos (goma xantana, CMC, HEC).

O objetivo básico da Reometria é a utilização de aparatos experimentais que permitam levantar os parâmetros das equações reológicas de estado que governam o comportamento do material submetido ao escoamento e deformação. Essas equações de estado apresentam a relação existente entre o tensor de desvio de tensão e o tensor deformação, caracterizando-se a lei constitutiva do material que será utilizada nas equações governantes do movimento/escoamento e deformação do material.

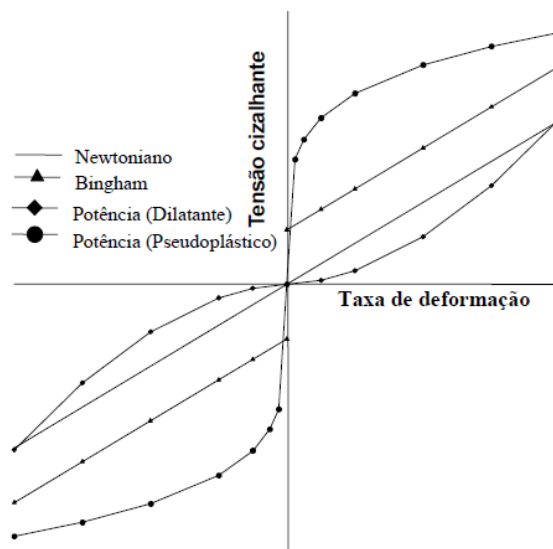
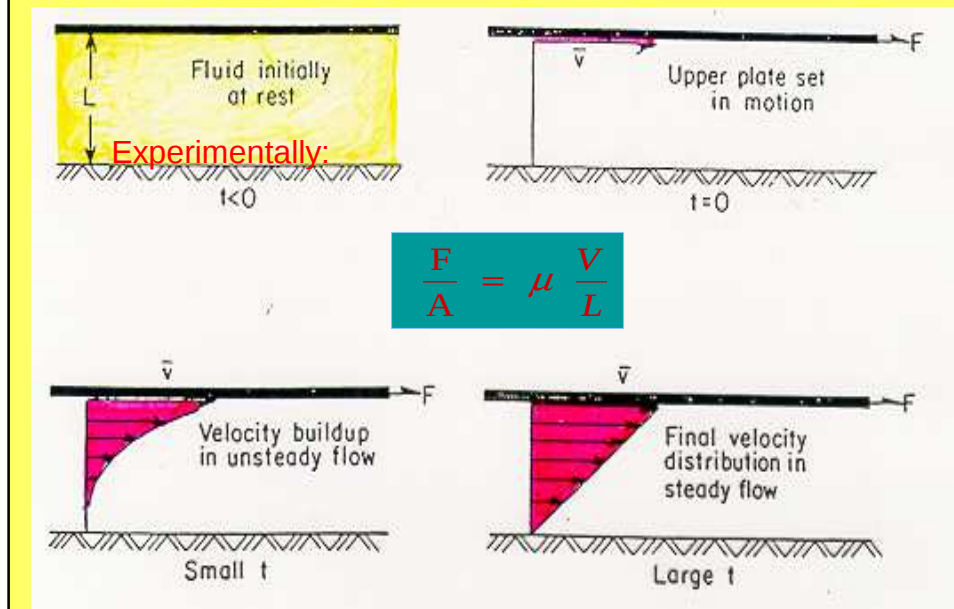


Figura 5.1: Modelos reológicos.

Fluxo Laminar de fluidos Newtonianos



Modelo de fluido Newtoniano

Em um fluido newtoniano a **tensão de cisalhamento** é diretamente proporcional à **taxa de cisalhamento** (em um fluxo laminar):

i.e.,

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad \frac{\text{dyne}}{\text{cm}^2} = \mu \left(\frac{1}{\text{sec}} \right)$$

A constante de proporcionalidade μ , é a **viscosidade** do fluido e é independente da taxa de cisalhamento.

Modelo de fluido Newtoniano

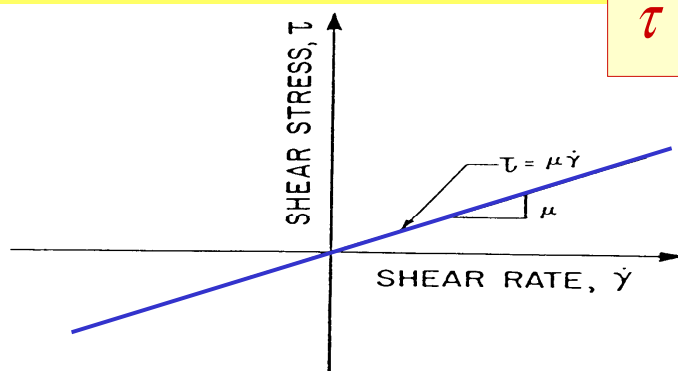
$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \frac{\text{dyne} \cdot \text{sec}}{\text{cm}^2}$$

A Viscosidade pode ser expressa em poise ou centipoise.

$$1 \text{ poise} = 1 \frac{\text{dyne} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{s}}$$

$$1 \text{ centipoise} = 0.01 \text{ poise}$$

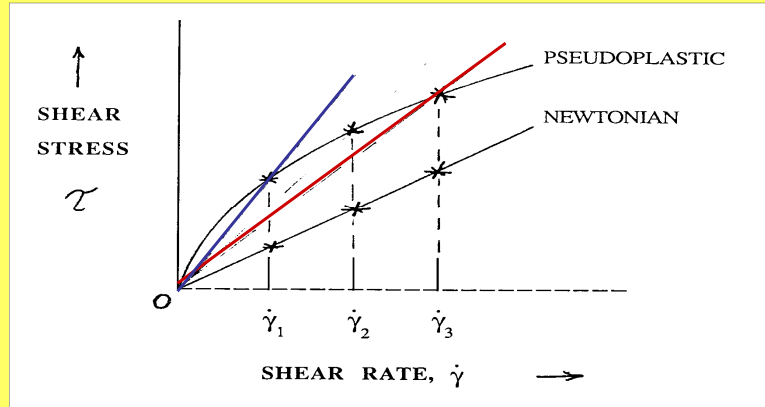
Shear Stress vs. Shear Rate for a Newtonian Fluid



$$\tau = \mu \dot{\gamma}$$

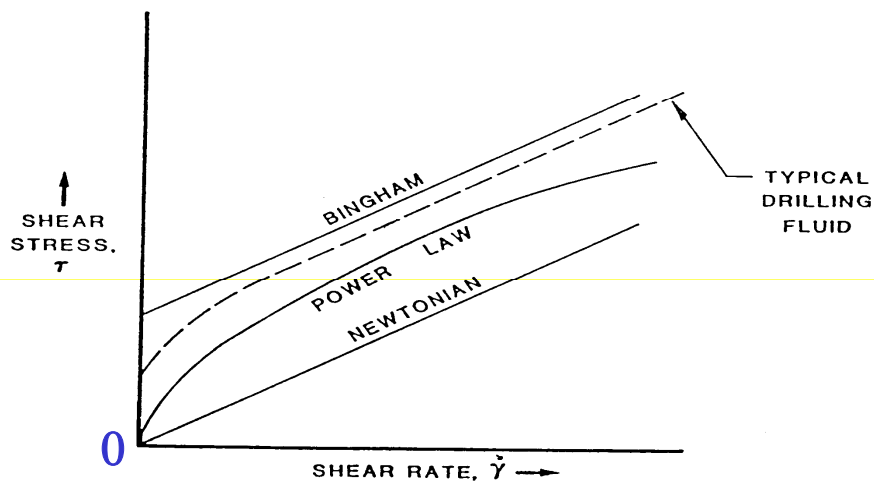
Slope of line = μ

Apparent Viscosity



Apparent viscosity = $\tau / \dot{\gamma}$
 is the slope at each shear rate, $\dot{\gamma}_1, \dot{\gamma}_2, \dot{\gamma}_3$.

(Plotted on linear paper)



Typical Drilling Fluid Vs. Newtonian, Bingham and Power Law Fluids

Rheological Models

1. Newtonian Fluid:

$$\tau = \mu \dot{\gamma}$$

τ = shear stress
 μ = absolute viscosity
 $\dot{\gamma}$ = shear rate

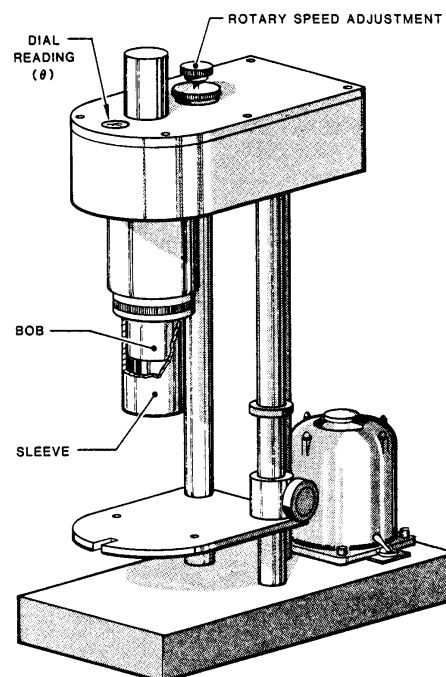
2. Bingham Plastic Fluid:

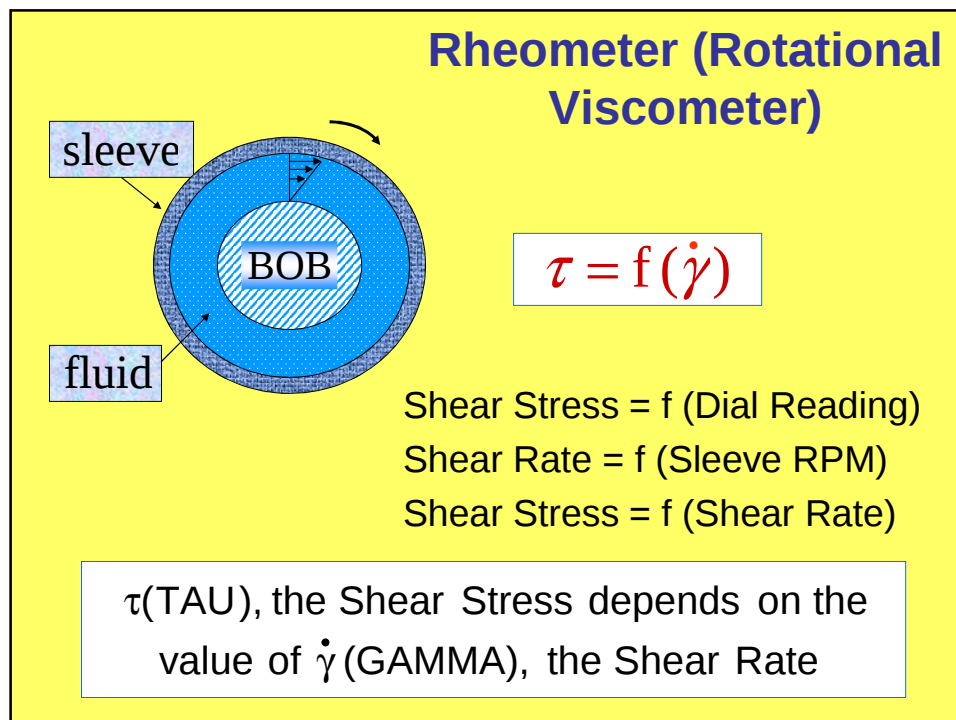
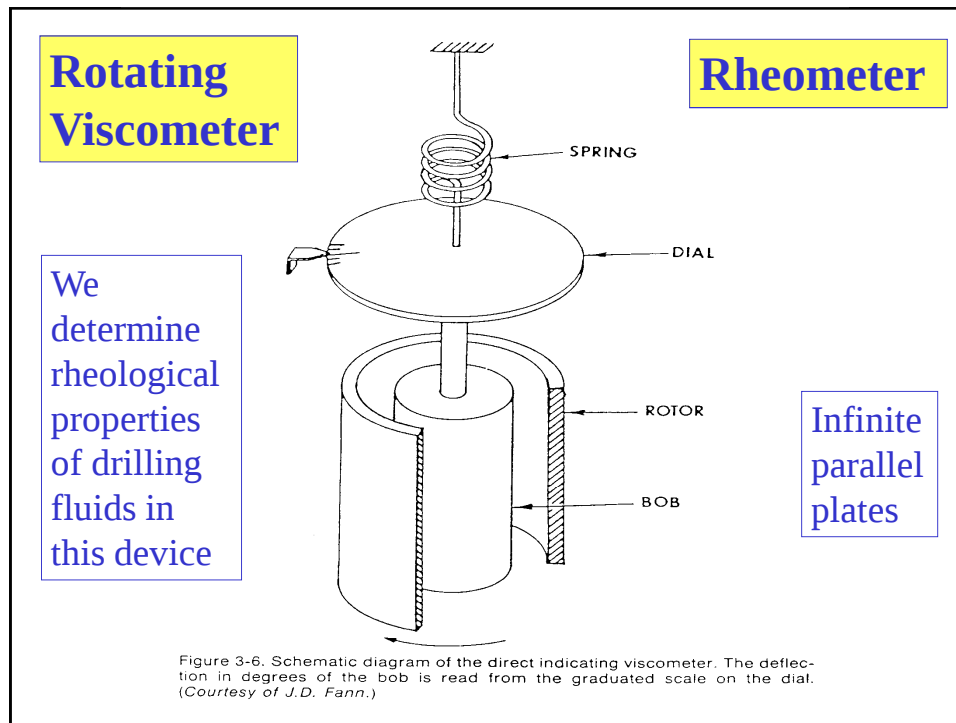
$$\tau = \tau_y + \mu_p \dot{\gamma}$$

τ_y = yield point
 μ_p = plastic viscosity

What if $\tau_y = 0$?

Rotating
Sleeve
Viscometer





Rheometer - base case

<u>N (RPM)</u>	<u>γ (sec⁻¹)</u>
3	5.11
6	10.22
100	170
200	340
300	511
600	1022
RPM * 1.703 = sec ⁻¹	

Example

A rotational viscometer containing a **Bingham plastic fluid** gives a dial reading of 12 at a rotor speed of 300 RPM and a dial reading of 20 at a rotor speed of 600 RPM

Compute plastic viscosity and yield point

$$\mu_p = \theta_{600} - \theta_{300}$$

$$= 20 - 12$$

$$\mu_p = 8 \text{ cp}$$

$$\begin{aligned} \theta_{600} &= 20 \\ \theta_{300} &= 12 \end{aligned}$$

See Appendix A

Example

$$\theta_{600} = 20$$

$$\theta_{300} = 12$$

$$\tau_y = \theta_{300} - \mu_p$$

(See Appendix A)

$$= 12 - 8$$

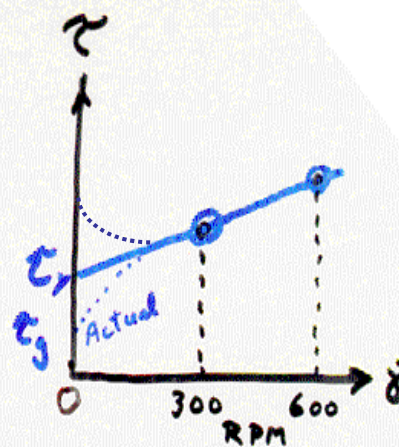
$$\tau_y = 4 \text{ lbf/100 ft}^2$$

Gel Strength

Rheometer

Gel Strength

= shear stress at which fluid movement begins.



Gel Strength

= shear stress at which fluid movement begins

- The yield strength, extrapolated from the **300** and **600 RPM** readings is not a good representation of the gel strength of the fluid
- Gel strength may be measured by turning the rotor at a low speed and noting the dial reading at which the gel structure is broken (usually at 3 RPM)

Gel Strength

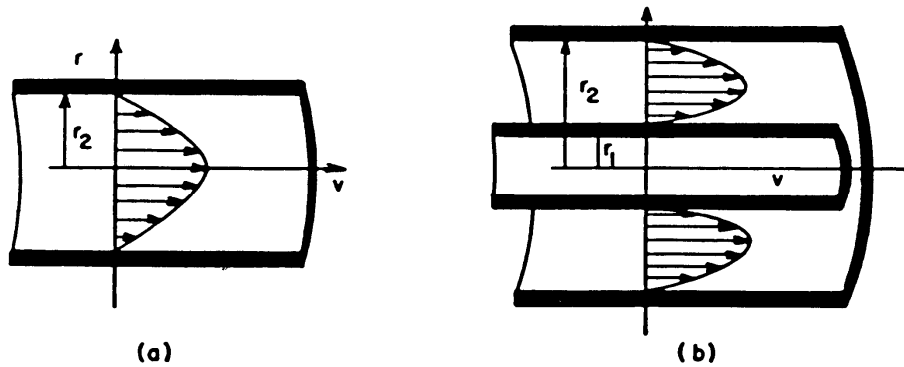
The gel strength is the **maximum** dial reading when the viscometer is started at **3 rpm**.

In field units, $\tau_g = 1.06 \theta$ lbf / 100 ft²

In practice, this is often approximated to

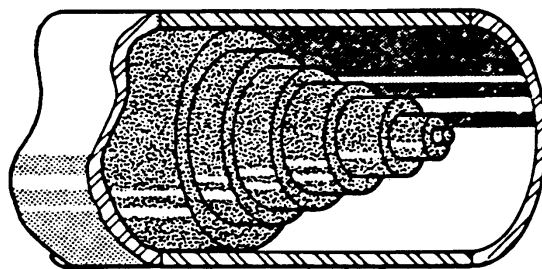
$$\tau_g = \theta_{\max,3} \text{ lbf / 100 ft}^2$$

Velocity Profiles (laminar flow)



**Fig. 4-26. Velocity profiles for laminar flow:
(a) pipe flow and (b) annular flow**

3D View of Laminar Flow in a pipe - Newtonian Fluid



**“It looks like concentric rings of fluid
telescoping down the pipe at different velocities”**

**Table 4.3 - Summary of Equations
for Rotational Viscometer**

**Newtonian
Model**

$$\mu_a = \theta_{300}$$

or

$$\mu_a = \frac{300}{N} \theta_N$$

$$\dot{\gamma} = \frac{5.066}{r^2} N$$

**Table 4.3 - Summary of Equations for
Rotational Viscometer**

Bingham Plastic Model

$$\mu_p = \theta_{600} - \theta_{300}$$

or

$$\mu_p = \frac{300}{N_2 - N_1} (\theta_{N_2} - \theta_{N_1})$$

$$\tau_y = \theta_{300} - \mu_p$$

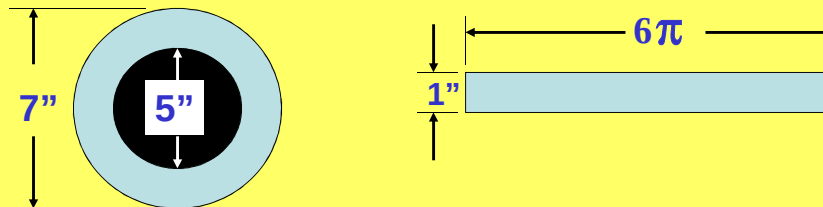
or

$$\tau_y = \theta_{N_1} - \mu_p \frac{N_1}{300}$$

$$\tau_g = \theta_{\max} \text{ at 3 rpm}$$

Example 4.22

Compute the frictional pressure loss for a 7" x 5" annulus, 10,000 ft long, using the slot flow representation in the annulus. The flow rate is 80 gal/min. The viscosity is 15 cp. Assume the flow pattern is laminar.



Example 4.22

The average velocity in the annulus,

$$\bar{v} = \frac{q}{2.448(d_2^2 - d_1^2)} = \frac{80}{2.448(7^2 - 5^2)}$$

$$\bar{v} = 1.362 \text{ ft/s}$$

$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{\mu \bar{v}}{1000(d_2 - d_1)^2}$$

Example 4.22

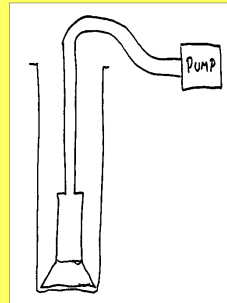
$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{\mu \bar{v}}{1000(d_2 - d_1)^2}$$

$$\Delta p_f = \frac{dp}{dL} D = \frac{(15) (1.362) (10,000)}{1000 (7 - 5)^2}$$

$$\Delta p_f = 51 \text{ psi} \quad (= 51.0750)$$

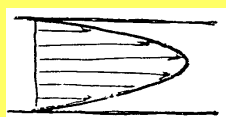
Pressão total da bomba

- Perdas de pressão em equipamentos na superfície
- Perda de pressão no tubo de perfuração
- Perda de pressão nos colares
- Perda de pressão através dos jatos da broca
- Perda de pressão no anular entre os colares e a parede do poço
- Perda de pressão no anular entre o tubo de perfuração e a parede do poço
- Diferença da pressão hidrostática (ρ varia)



Types of flow

Laminar



Turbulent

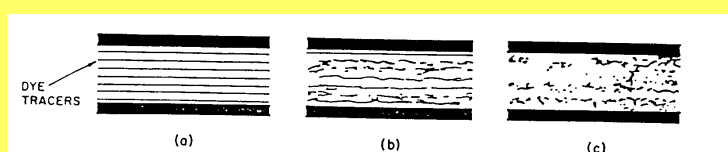
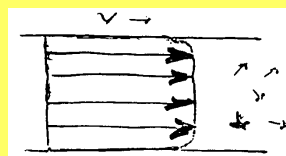


Fig. 4-30. Laminar and turbulent flow patterns in a circular pipe: (a) laminar flow, (b) transition between laminar and turbulent flow and (c) turbulent flow

15. FLUXO LAMINAR EM TUBOS E ANULARES

O engenheiro de perfuração lida principalmente com o fluxo descendente de fluidos de perfuração e cimento para o fundo do poço e a ascensão por meio do espaço anular. Se a taxa de bombeamento é baixa o suficiente para que o fluxo seja laminar, os modelos newtonianos, plásticos e de potência podem ser empregados para se desenvolver uma relação matemática entre a taxa de fluxo e a queda de pressão por atrito. Existem diversas simplificações para a aplicação deste modelos.

FLUXO LAMINAR - FLUIDO NEWTONIANO

$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{\mu \bar{v}}{1500d^2}$$

Muito importante para a
Engenharia de Perfuração!!!!

$\bar{v}$ = velocidade média do fluxo, ft/s

μ = viscosidade, cp

dp_f/dL = gradiente de pressão friccional, psi/ft

Diâmetro do tubo, pol

16. FLUXO TURBULENTO EM TUBOS E ANULARES

Em muitas operações de perfuração, o fluido de perfuração é bombeado a uma taxa muito alta para que seja mantido um fluxo laminar.

A lâmina de fluido se torna instável e se quebra em um padrão de fluxo difuso e caótico. A transferência de momento causada por este movimento de fluido caótico faz com que a distribuição da velocidade se torne mais uniforme na porção central do conduto do que no fluxo laminar.

No entanto, uma fina camada na região próxima à parede do tubo normalmente ainda permanece com fluxo laminar. Seguem-se os modelos de fluxo turbulento.

Fluxo Turbulento - Fluido Newtoniano

$$N_{Re} = \frac{928 \rho \bar{v} d}{\mu}$$

where ρ = fluid density, lbm/gal

$\bar{v}$ = avg. fluid velocity, ft/s

d = pipe I.D., in

μ = viscosity of fluid, cp.

Assume-se frequentemente que o fluxo de fluido é **turbulento** se **$N_{re} > 2100$**

Fluxo Turbulento - Fluido Newtoniano

Fluxo Turbulento – Fluido de Bingham

No tubo

$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{\rho^{0.75} \bar{v}^{1.75} \mu^{0.25}}{1800 d^{1.25}}$$

$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{\rho^{0.75} \bar{v}^{1.75} \mu_p^{0.25}}{1800 d^{1.25}}$$

No anular

$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{\rho^{0.75} \bar{v}^{1.75} \mu^{0.25}}{1396 (d_2 - d_1)^{1.25}}$$

$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{\rho^{0.75} \bar{v}^{1.75} \mu_p^{0.25}}{1396 (d_2 - d_1)^{1.25}}$$

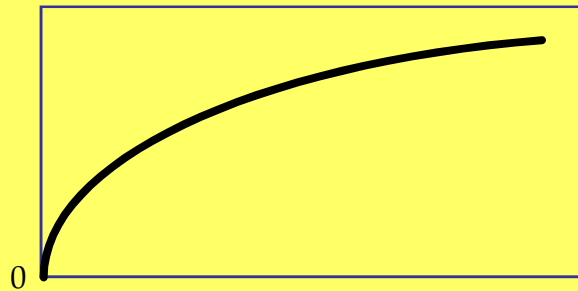
Modelo de potência da API

K = índice de consistência

n = índice de comportamento do fluxo

$$\tau = K \dot{\gamma}^n$$

SHEAR
STRESS
 τ
psi



SHEAR RATE, $\dot{\gamma}$, sec⁻¹

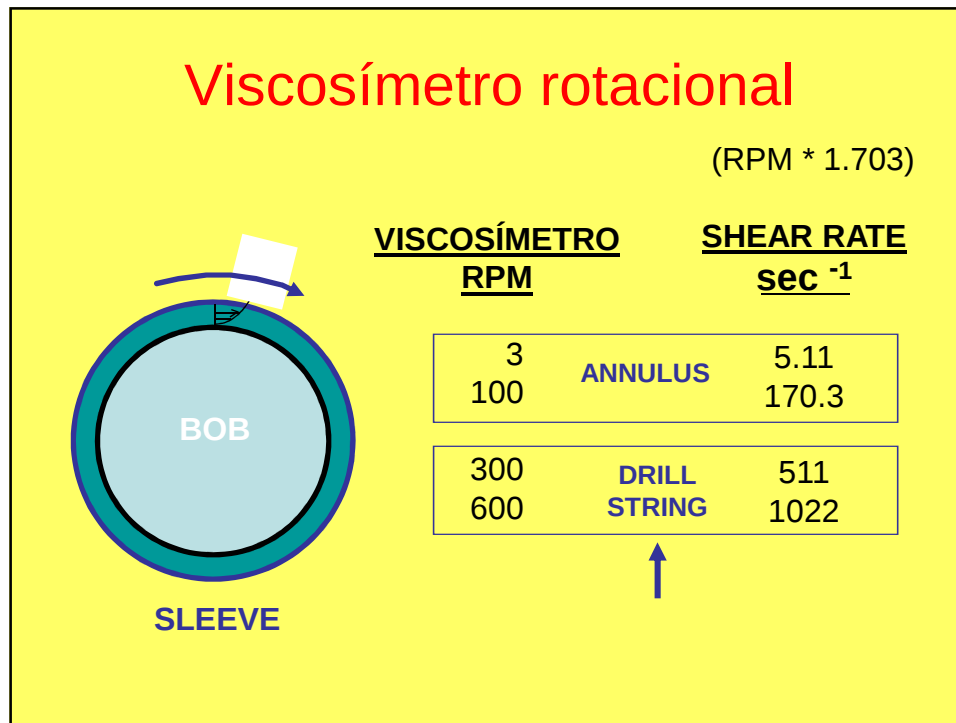
API RP 13D

Recommended Practice on the Rheology and Hydraulics of Oil-well Drilling Fluids,

POWER-LAW

This model is the best approximation for the behaviour of Polymer based fluids. The parameter K is usually called the consistency index of the fluid, and the parameter n is usually called either the power-law exponent or the non-Newtonian index. The deviation of the dimensionless flow-behaviour index from unity characterises the degree to which the fluid behaviour is non-Newtonian.

Parameter	c.g.s Units	Field Units
Viscosity	1 poise (100 cp, 1 dyne-s/cm ² , 1 g/cm.s)	1/479 lbf-s/sq ft.
Yield Point	1 dyne/cm ²	1/4.79 lbf/100 sq. ft.
Consistency Index, K	1 dyne-s ⁿ /cm ² (1 g/cm.s ²⁻ⁿ)	1/479 lbf-s ⁿ /sq.ft.



Pipe Flow - Laminar

In the above example the flow down the drillpipe was turbulent.

Under conditions of very high viscosity, the flow may very well be laminar.

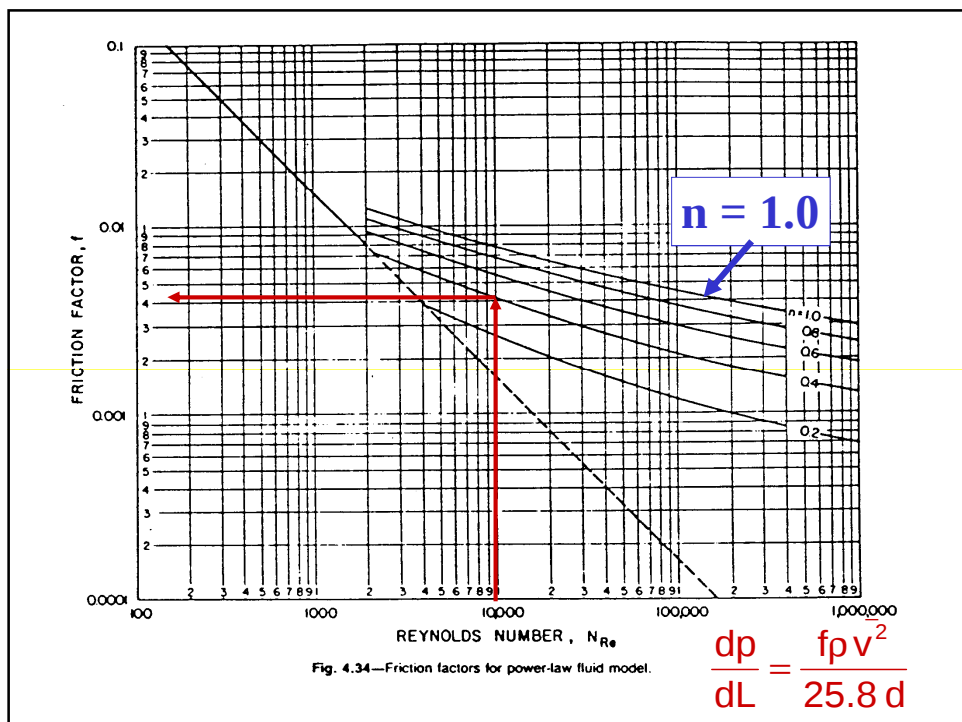
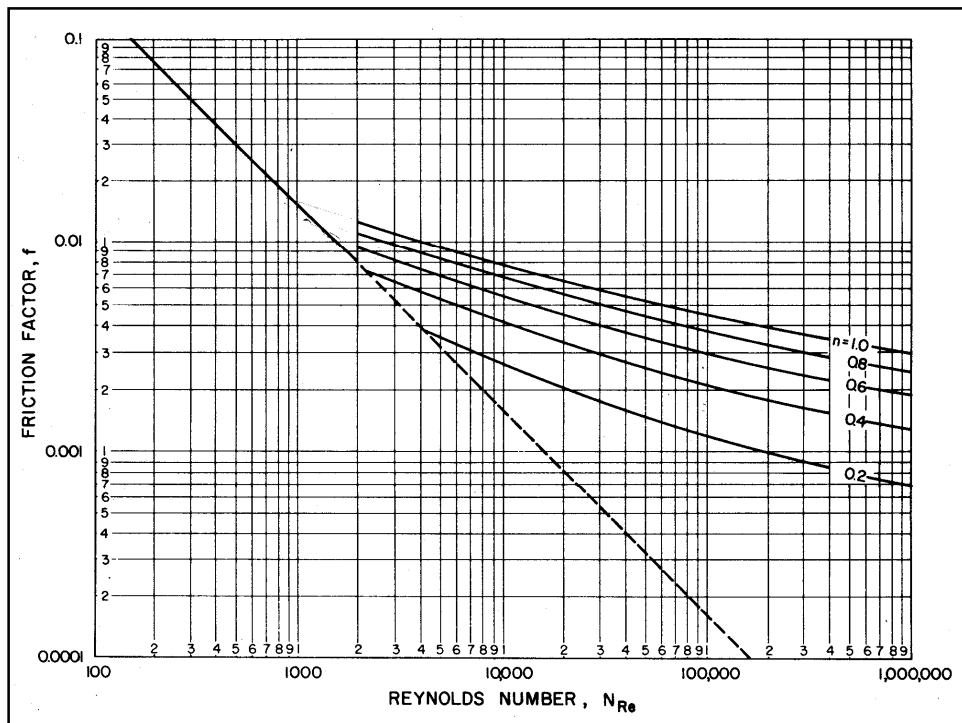
NOTE: if $N_{Re} < 2,100$, then Friction Factor in Pipe (f):

Then

$$f = \frac{16}{N_{Re}}$$

and

$$\left(\frac{dP}{dL}\right) = \frac{f V^2 \rho}{25.81 D}$$



EXEMPLO

- a) Calcule a velocidade de um fluido em um tubo de 5" OD, 4,276" ID e 19,5 lbf/ft para uma vazão de 150 gpm.
- b) Determine a perda de pressão da situação acima considerando um fluido de Bingham com uma viscosidade plástica de 20 cp, um YP de 15 lb/100 ft² e uma densidade de 10 ppg.
- c) Agora determine a perda de pressão da situação acima considerando um fluido do tipo power law com um índice de comportamento de fluxo (n) 0,75 e um índice de consistência de 70 eq cp.