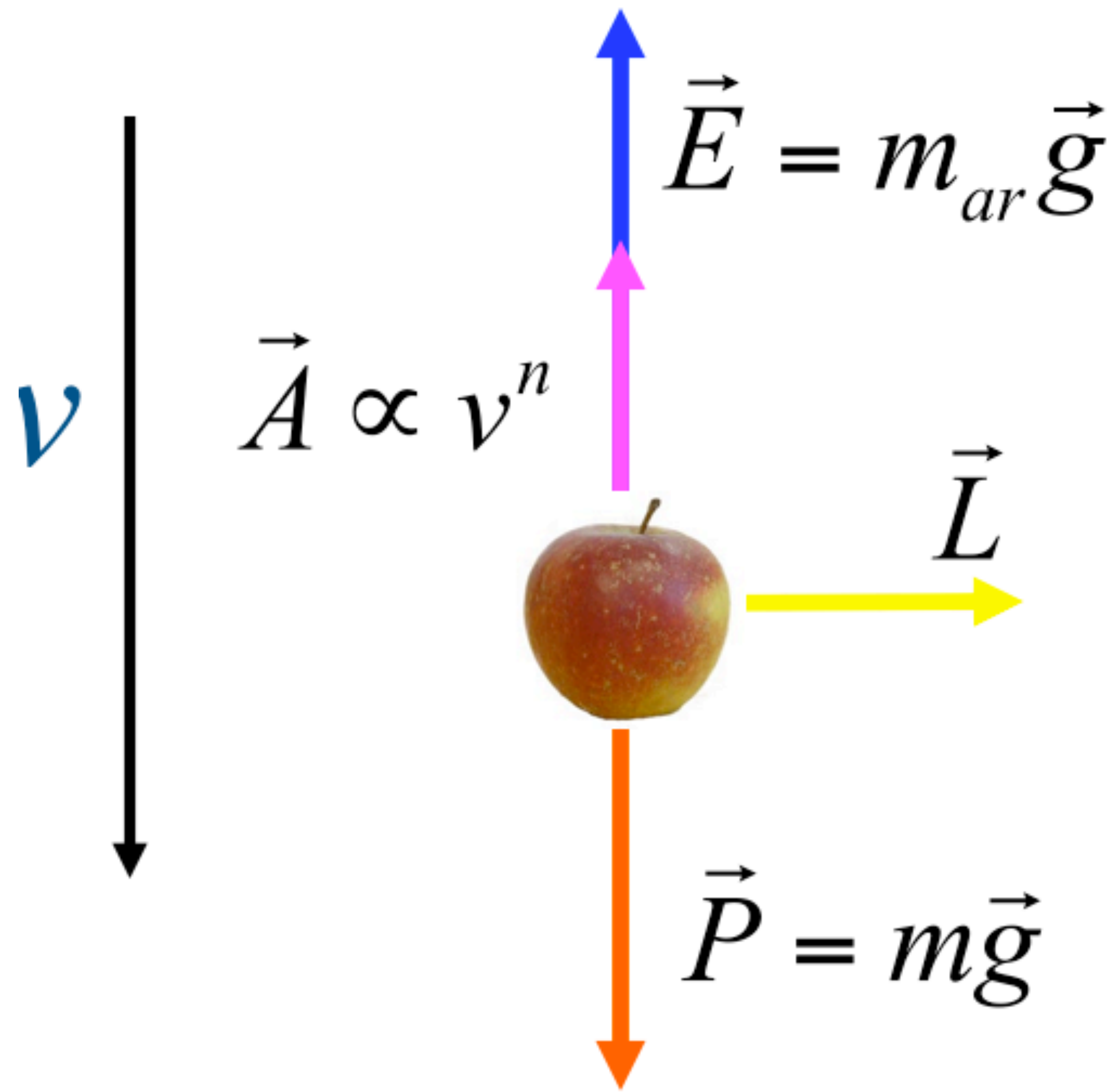
Aula 3
Estudo do movimento de queda de corpos

Física Experimental II
Segundo semestre de 2012

Proposta do experimento

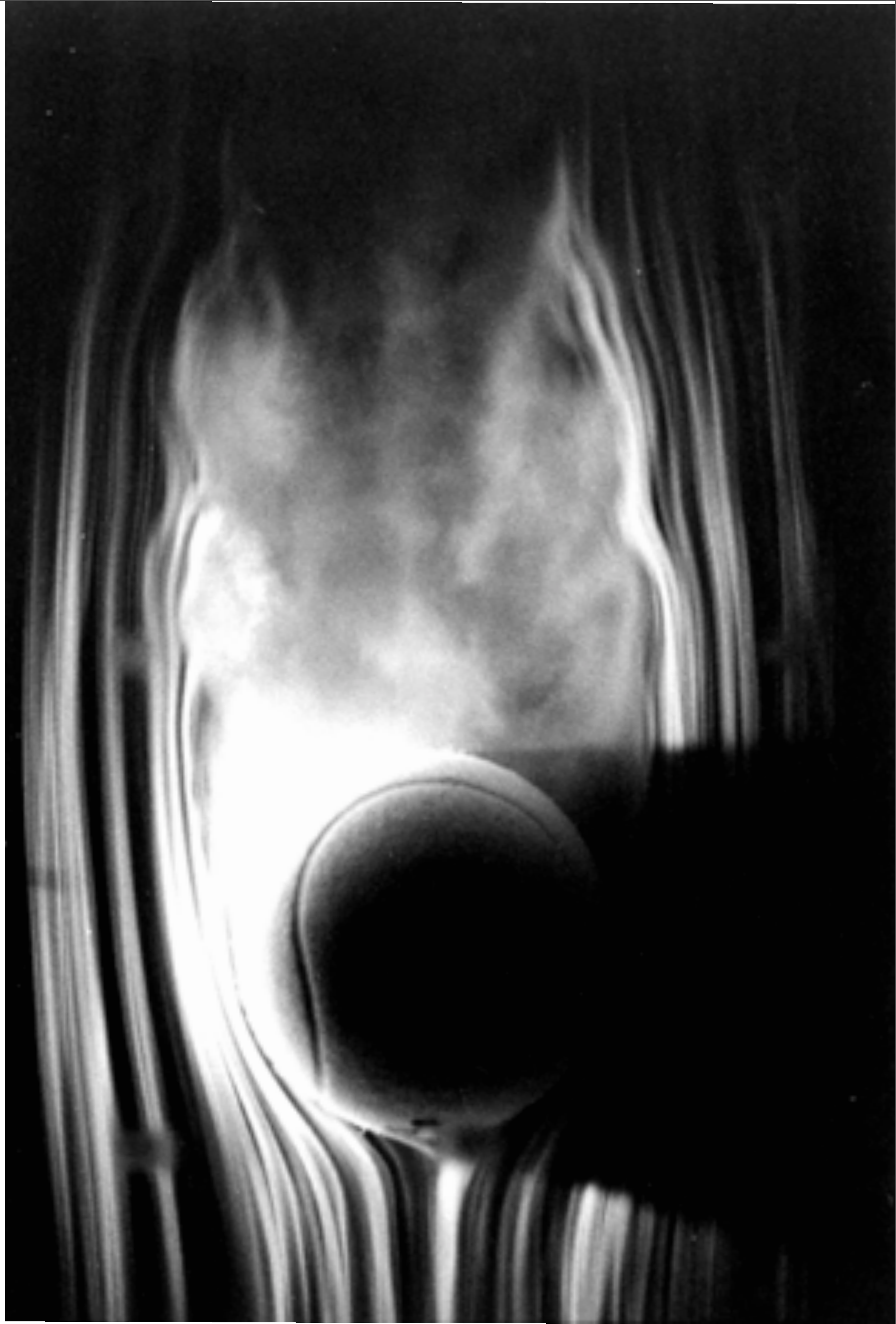
- Aula passada: Corpo em queda livre
    - Outras forças que não sejam o peso são desprezíveis
    - Aceleração é muito próxima a da gravidade
- O que acontece se tentarmos fazer com que outras forças sejam significativas
    - Estudar o movimento de queda decorpos em óleo
        - Empuxo e resistência do meio tornam-se importantes



Resistência do meio

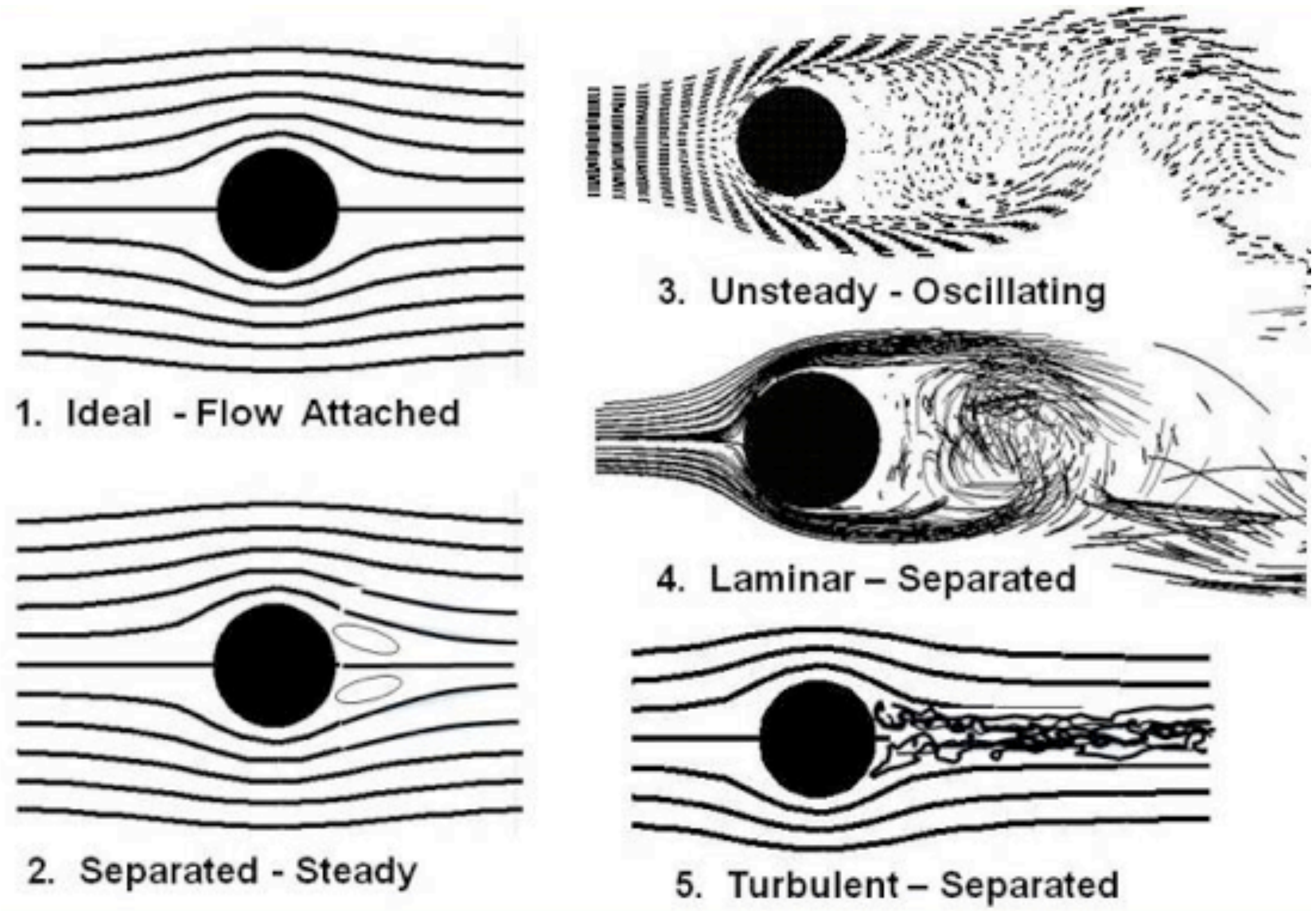
- Movimento de um corpo em um meio viscoso
    - Equação de Navier-Stokes para descrever o movimento de um fluído
        - Surge da resolução do problema usando a segunda Lei de Newton e leis de conservação (energia, momento e massa)
        - Em geral não é solúvel analiticamento
    - O efeito sobre o corpo é o aparecimento de uma força de arrasto proporcional a uma potência da velocidade do corpo de sentido contrário ao do movimento

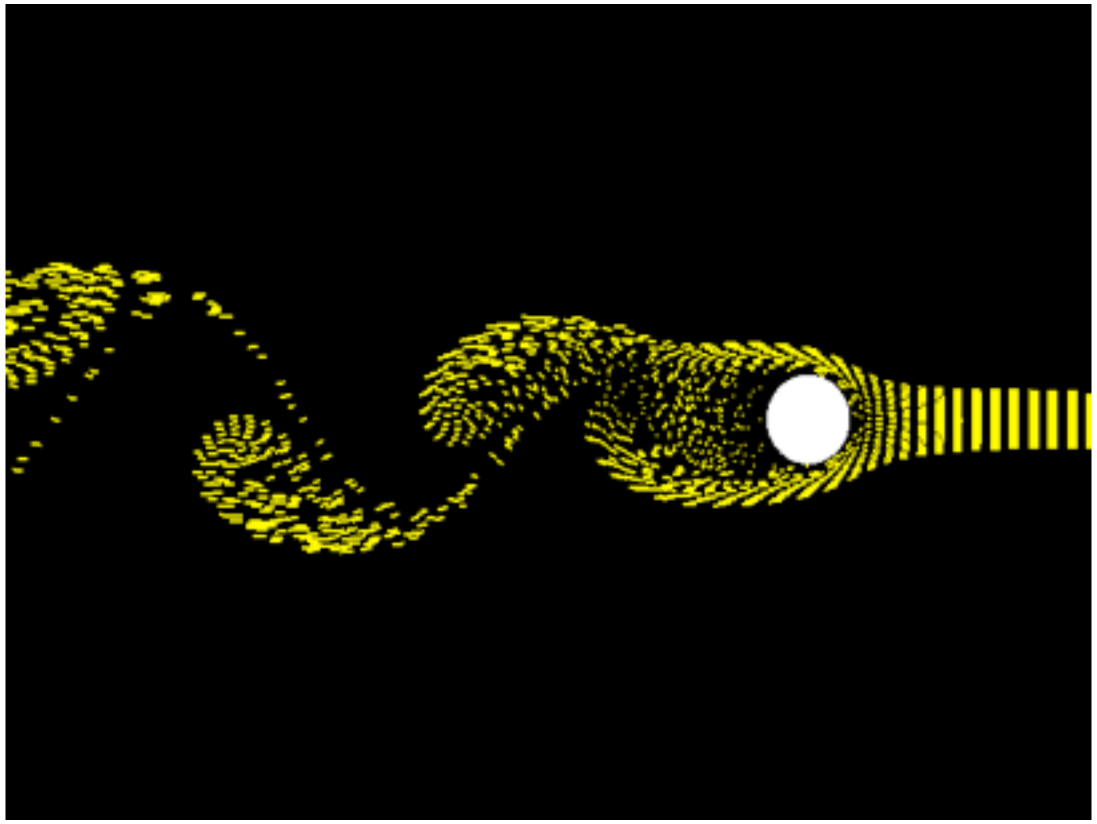
$$|\vec{A}| \propto \; v^n$$



Fluxo laminar e turbulento

- Regime laminar
    - O fluído escorre pelo corpo de forma que podemos intepretá-lo como lâminas que se movimentam uma em relação à outra
- Regime turbulento
    - As lâminas são desfeitas gerando vórtices dos mais diversos tamanhos. O arrasto torna-se maior na medida em que o remime torna-se turbulento



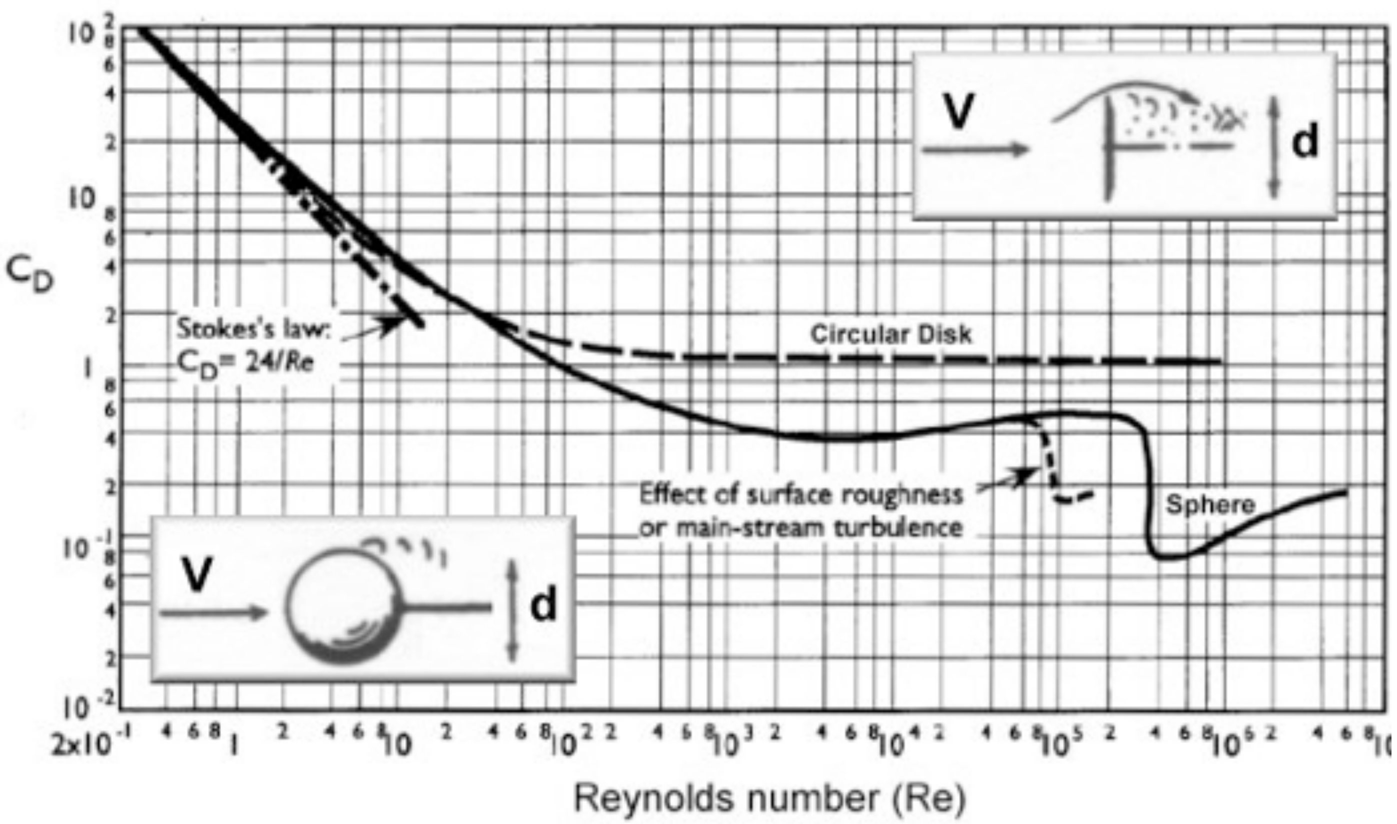


Qual regime de fluxo?

- Número de Reynolds
  - “Número” de diferentes situações de movimento do fluido em torno de um corpo
  - Para uma esfera

$$R_e = \frac{\rho v L}{\eta}$$

$$\rho = \text{densidade do fluido}$$
$$\eta = \text{viscosidade do fluido}$$
$$v = \text{velocidade do corpo}$$
$$L = \text{diâmetro da esfera}$$

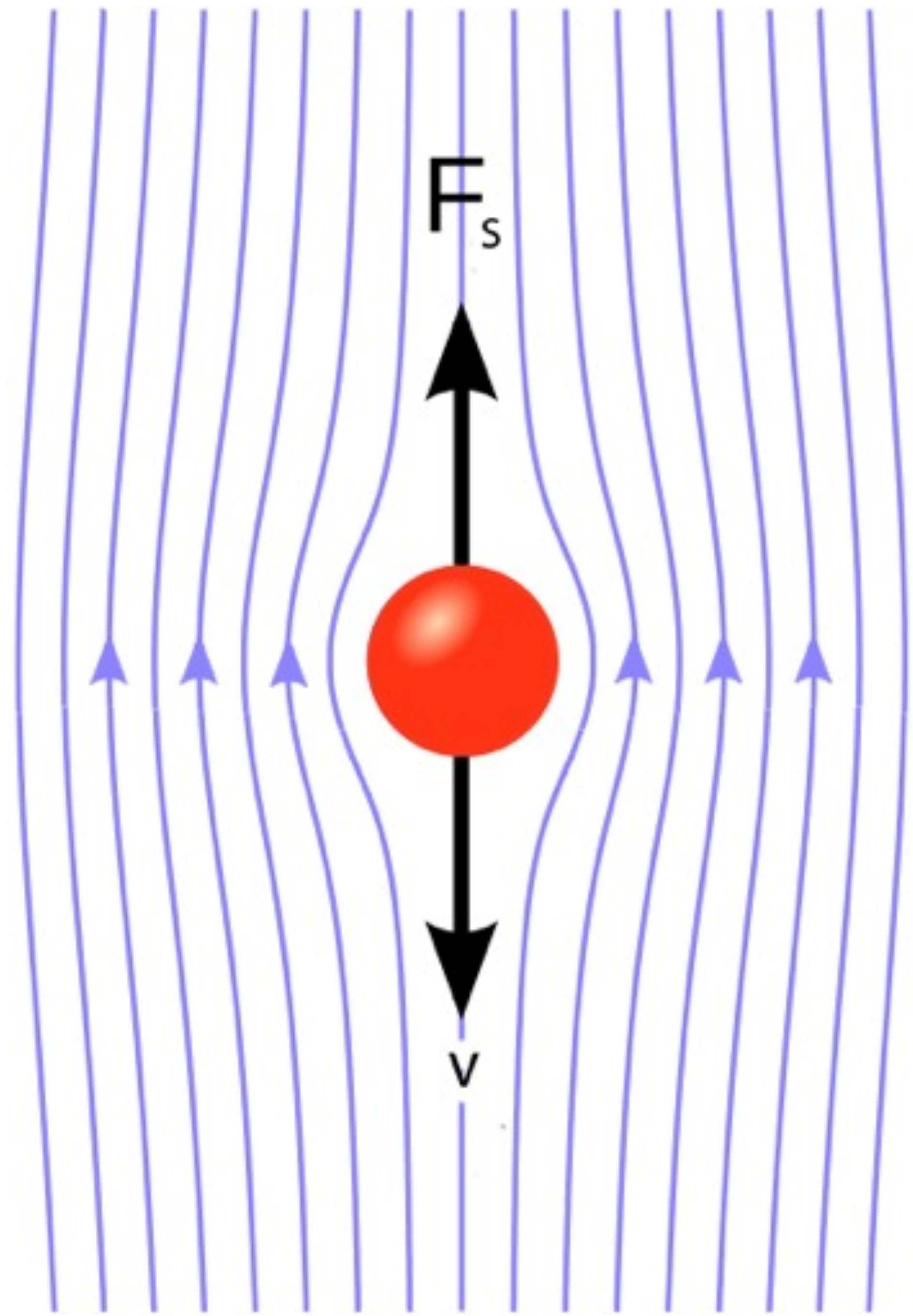


- Para baixos valores, tipicamente da ordem de 2-3, o regime é bem próximo ao do laminar

Fluxo laminar

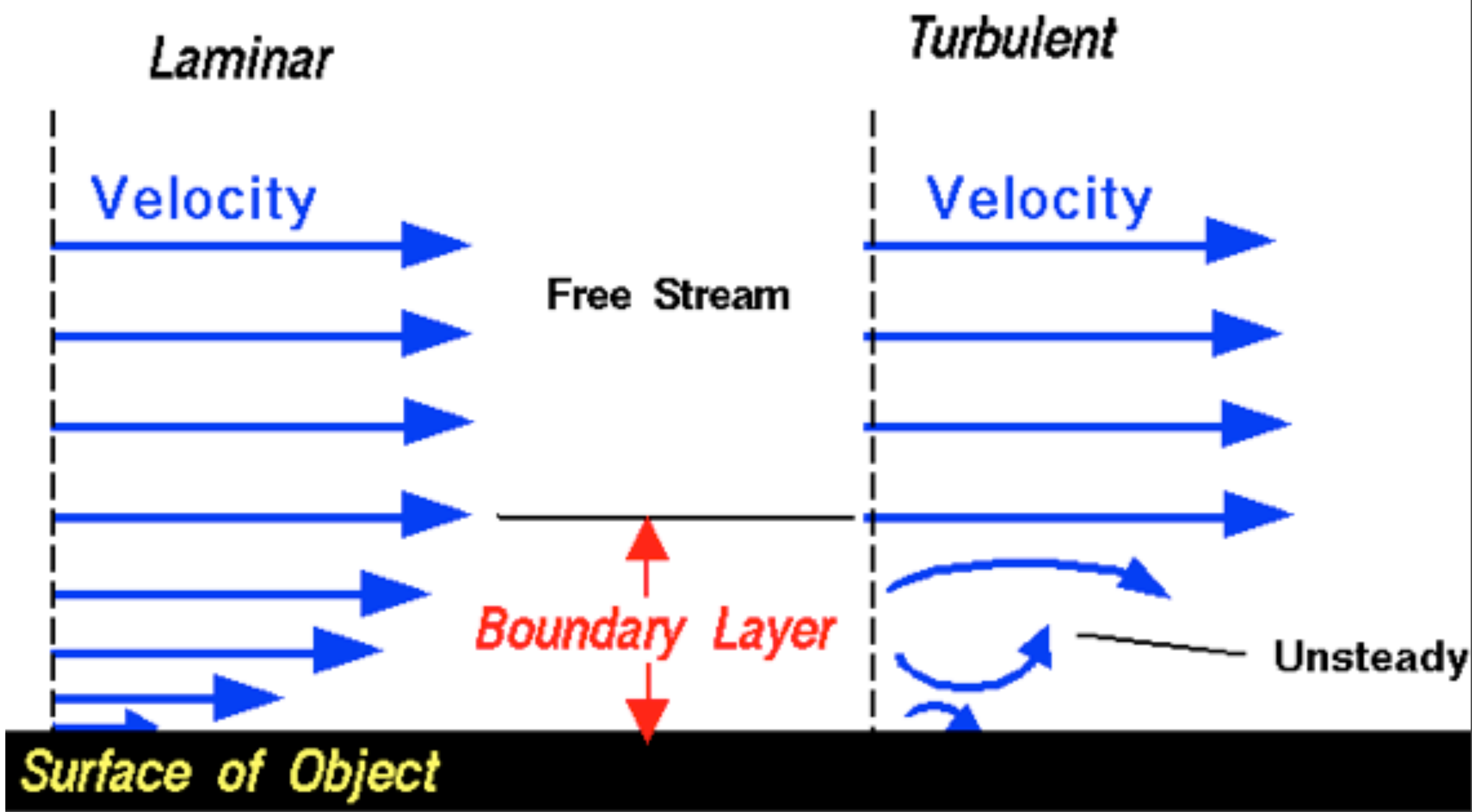
- Equações de Navier-Stokes podem ser resolvidas analiticamente
  - Lei de Stokes (1851) para uma esfera de raio r.
    - Em fluxo laminar
    - Meio infinito

$$\vec{A} = \vec{F}_S = -6\pi\eta r\vec{v}$$



Fluxo laminar em meio finito

- E se o fluido estiver contido em um cano?
  - Superficie do cano muda fluxo do fluido, alterando o arrasto
    - Correção de Landenburg para uma esfera de raio r em um tubo de raio R



- Velocidade de escoamento é nula na superficie

$$\alpha = 1 + \frac{9r}{4R} + \left(\frac{9r}{4R}\right)^2$$

$$\vec{A} = \vec{F}_{SL} = -6\pi\eta r\alpha\vec{v}$$

Equilíbrio de forças

- Força resultante corresponde à soma do peso, empuxo e arrasto

$$m\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_R = \vec{P} + \vec{E} + \vec{F}_{SL}$$

- Movimento unidimensional

$$m\frac{dv}{dt} = F_R = m_{esfera}g - m_{fluido}g - 6\pi\eta r\alpha v$$

- Em termos de volume

$$m\frac{dv}{dt} = F_R = \left(\rho_{esfera} - \rho_{fluido}\right)Vg - 6\pi\eta r\alpha v$$

- Velocidade limite

$$0 = \left(\rho_{esfera} - \rho_{fluido}\right)Vg - 6\pi\eta r\alpha v_L$$

  - Força resultante é nula

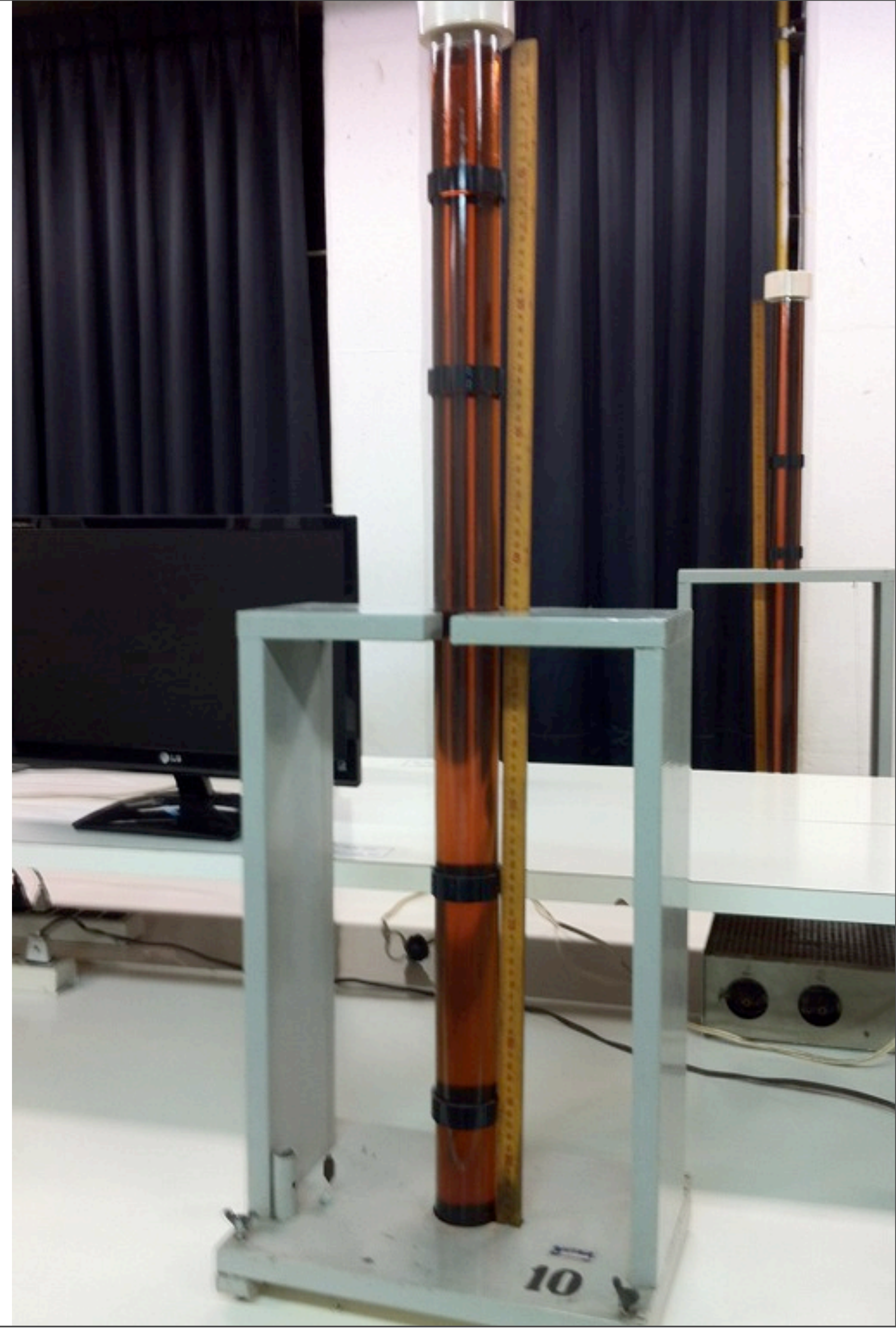
$$V = \frac{4}{3}\pi r^3$$

  - Velocidade constante

$$\boxed{\alpha v_L = \frac{2}{9}\left(\frac{\rho_{esfera} - \rho_{fluido}}{\eta}\right)gr^2}$$

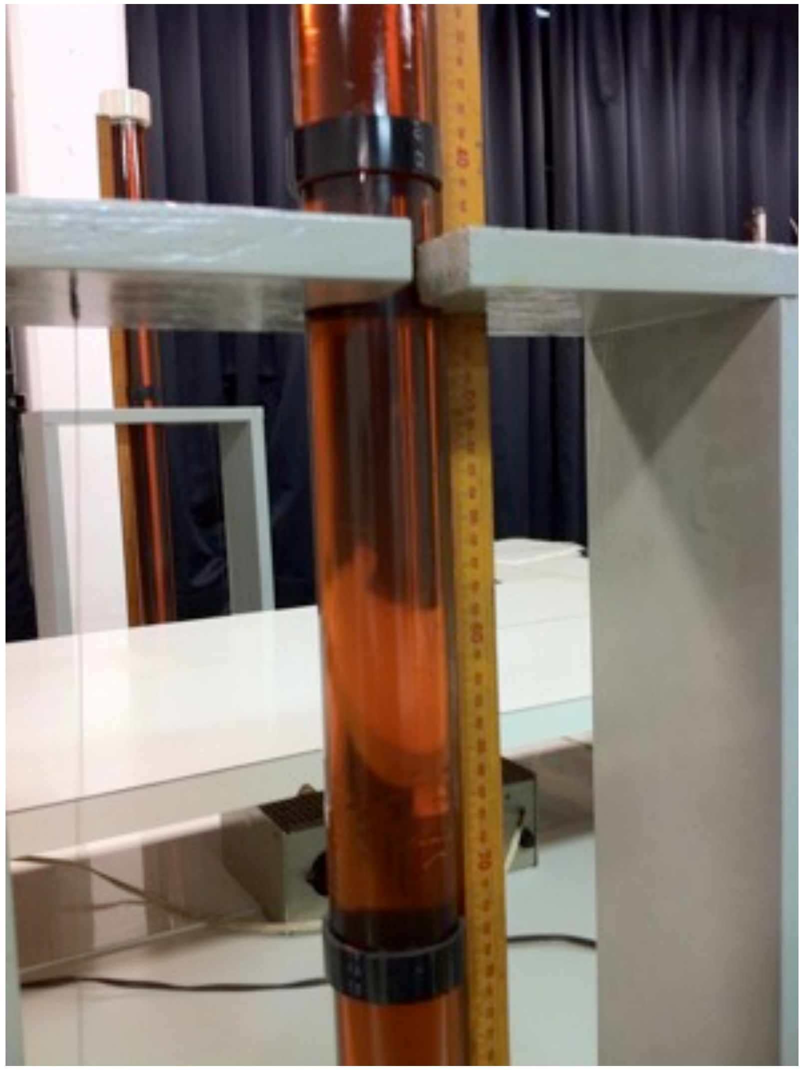
Objetivos

- Estudar o movimento de corpos em um fluido viscoso a partir do estudo das velocidades limites de queda desses corpos
    - Determinar a velocidade limite
    - Determinar regimes laminares e turbulentos
    - Medir a viscosidade do fluido (no caso, óleo)
        - Comparar a valores tabelados



Procedimento

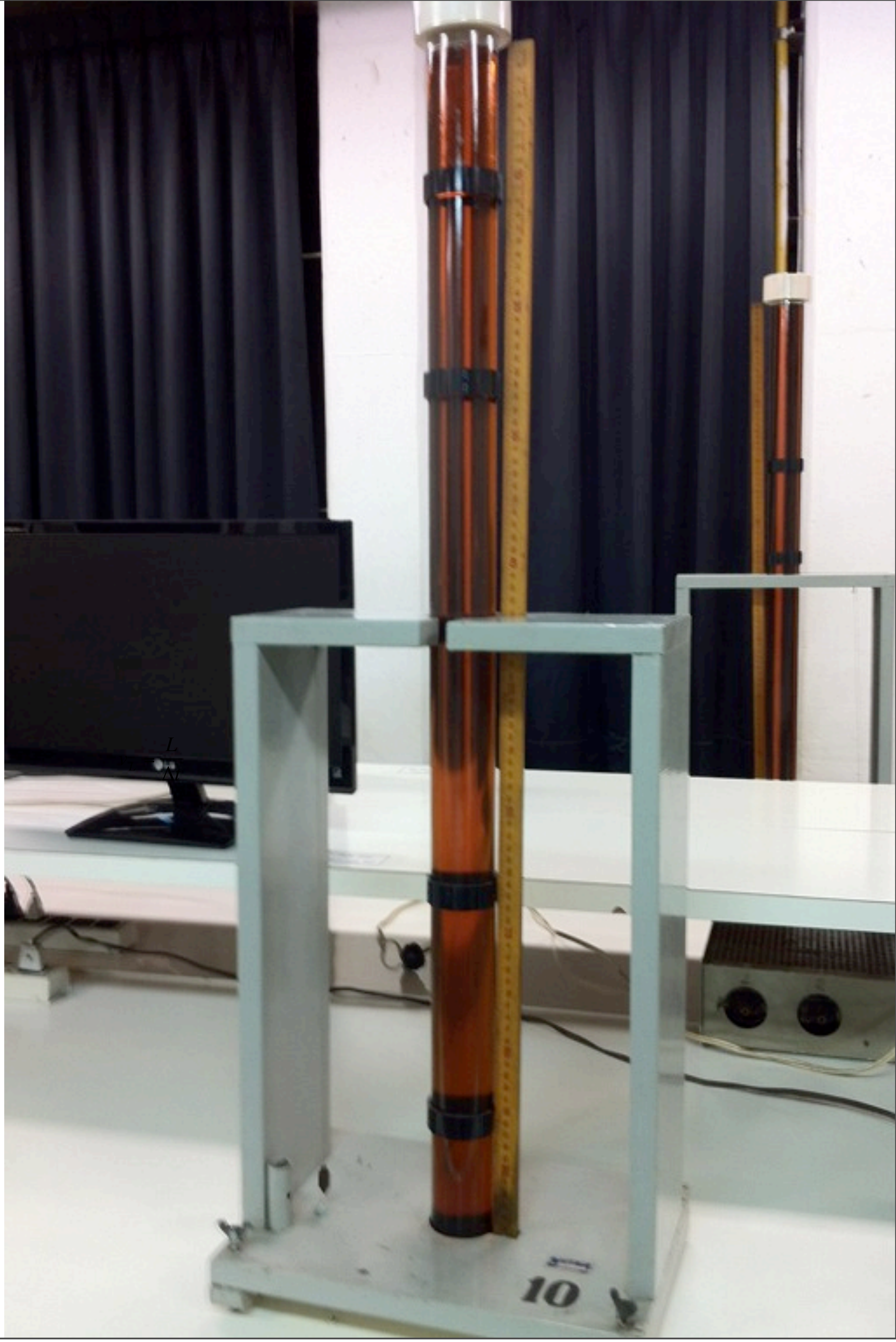
- Preparação peliminar
  - Checar nivelamento da torre de óleo
  - Medir raios das bolinhas
  - Medir o raio do tubo
  - Medir a temperatura da sala
  - Medir a densidade do óleo
  - Determinar região onde velocidade já atingiu o limite
    - usar esfera de maior raio para isso
  - Estabelecer distância para medida de tempo
    - $L \sim$ 30-50 cm é suficiente
- Lembre-se que medidas possuem incertezas



Procedimento

- Medidas
    - Medir tempo de queda das esferas metálicas
        - Repetir ~10 vezes para cada tipo de esfera
        - Fazer para todos os tipos de esferas
- Determinar o tempo médio de queda ΔT para cada tipo de esfera e sua incerteza
    - Qual é a incerteza do valor médio?
- Determinar a velocidade limite para cada tipo de esfera
    - Lembre-se de calcular a incerteza

$$v_L = \frac{L}{\Delta T}$$



Análise

- Determinar α para cada tipo de esfera (e sua incerteza)

$$\alpha = 1 + \frac{9r}{4R} + \left(\frac{9r}{4R}\right)^2$$

- Calcular αv_L para cada tipo de esfera (e sua incerteza)

- Calcular r^2 para cada tipo de esfera (e sua incerteza)

- Calcular o número de Reynolds para cada tipo de esfera (e sua incerteza)

$$R_e = \frac{\rho v L}{\eta}$$

Neste caso, L é o tamanho característico da esfera, ou seja, o diâmetro

  - Quais esferas você espera ter fluxo laminar?

Análise

- Fazer o gráfico de αv_L em função de r^2 .
    - Se o fluxo for laminar esperamos obter uma reta. Isso ocorre?
    - Ocorre para as esferas que você previu o fluxo laminar?
- Ajuste somente os dados das eferas onde há fluxo laminar a uma reta que passa pela orígem
    - Determine a viscosidade do óleo a partir do coeficiente do ajuste e compare com valor tabelado

$$\alpha v_L = \frac{2}{9}\left(\frac{\rho_{esfera} - \rho_{fluido}}{\eta}\right) g r^2$$

- Use o valor de gravidade que você mediu semana passada
- IMPORTANTE: Use unidades no CGS. Ver apêncide no roteiro de aula

Cuidado!

- Este é um experimento SUJO!
    - mantenha as mãos limpas, principalmente se for utilizar um computador