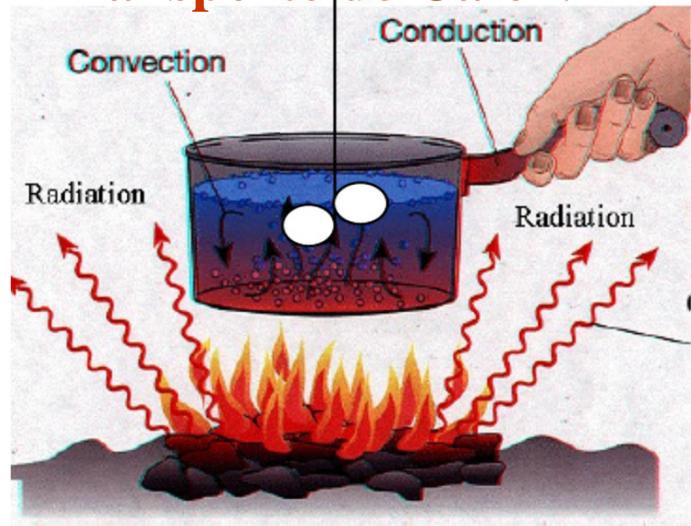
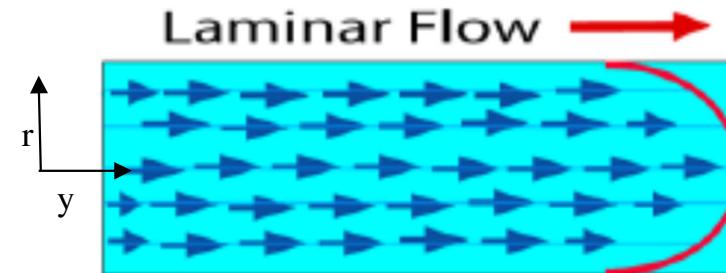


Transporte de Calor:



Transporte de momento:



$$\Psi = -\delta \frac{d\Gamma}{dx}$$

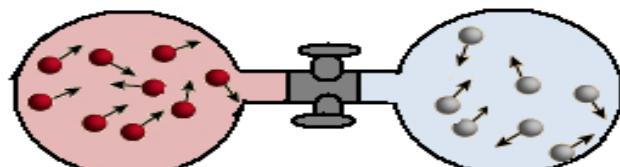
$$\tau_y = -\mu \frac{dv}{dr}$$

O movimento do fluido como um todo dá-se na direção y mas o transporte de momento devido ao movimento aleatório e das moléculas individuais dá-se segundo r.

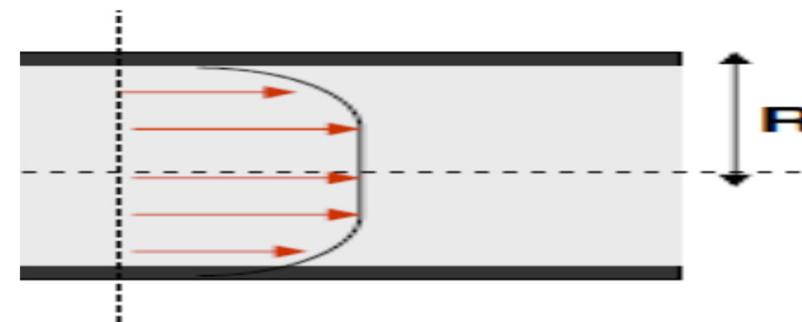
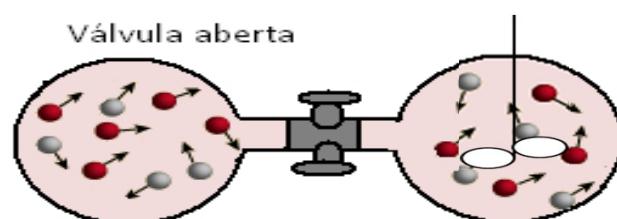
Transporte de Massa:

Difusão gasosa:

Válvula fechada



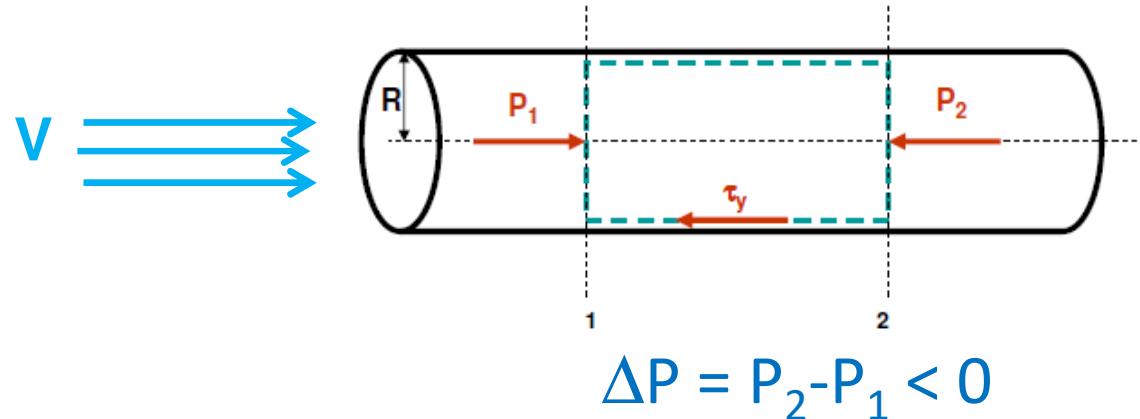
Válvula aberta



Mecanismo turbulento: envolve movimento aleatório de grupos de moléculas, macroscópico. (turbilhões)

Transporte de momento por mecanismo turbulento

Num fluido a circular num tubo:



Ex: $v = 10 \text{ ft/s}$

$$(-\Delta P)_{\text{eq Poiseille}} = 0,663 \text{ psi}$$

$$(-\Delta P)_{\text{medido}} = 15,4 \text{ psi}$$

Ex: $v = 0,1 \text{ ft/s}$

$$(-\Delta P)_{\text{eq Poiseille}} = (-\Delta P)_{\text{medido}}$$

$$\bar{V} = \frac{D^2}{32 \cdot \mu} \frac{(-\Delta P)}{L}$$

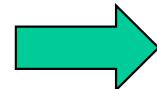
A QUEDA DE PRESSÃO
($-\Delta P$) MEDIDO
EXPERIMENTALMENTE
PARA ELEVADAS
VELOCIDADES DE
FLUXO



MUITO MAIOR DO
QUE A PERDA DE
PRESSÃO CALCULADA
A PARTIR DO MODELO
MOLECULAR (FLUXO
LAMINAR)

Eq de Hagen Poiseille (t. molecular)

**PARA BAIXAS
VELOCIDADES DE
CIRCULAÇÃO**



**O COMPORTAMENTO DO
FLUIDO É IGUAL AO MODELO DO
TRANSPORTE DE MOMENTO EM
FLUXO LAMINAR**

**PARA ELEVADAS
VELOCIDADES DE
CIRCULAÇÃO**



**O COMPORTAMENTO DO
FLUIDO DIFERE DO MODELO DO
TRANSPORTE DE MOMENTO EM
FLUXO LAMINAR**



**Há outra contribuição no
transporte de momento**

Experiência de Reynolds (1883):

It was in 1883 when Osborne Reynolds, a famous scientist and engineer tried to experiment on the relationship between the stability of fluid motion and the transition to turbulence.

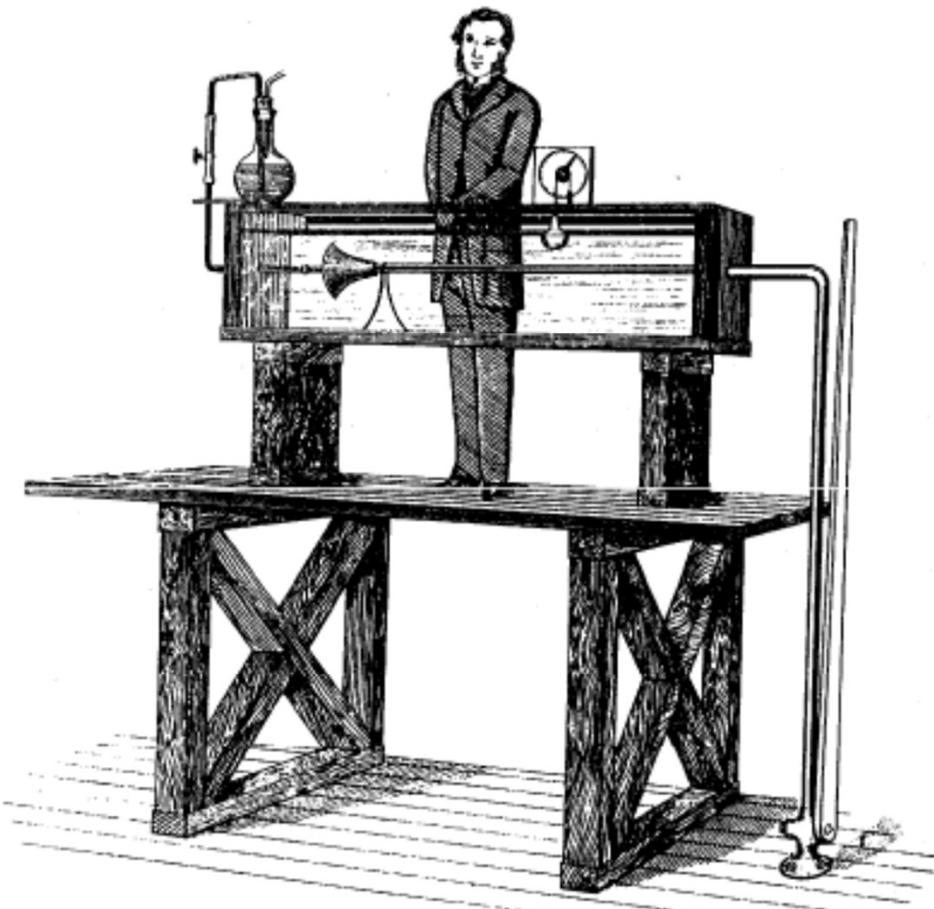


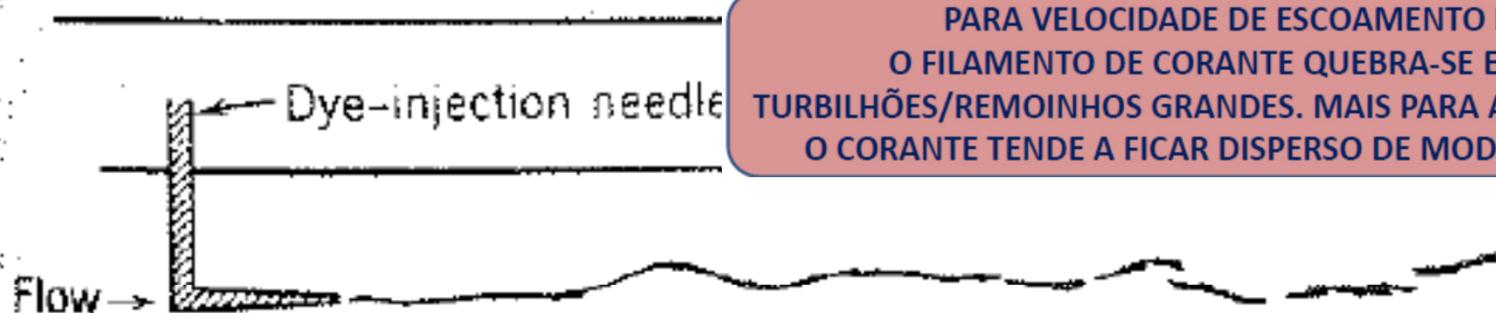
Fig. 9.1. Sketch of Reynolds's dye experiment, taken from his 1883 paper

velocidade

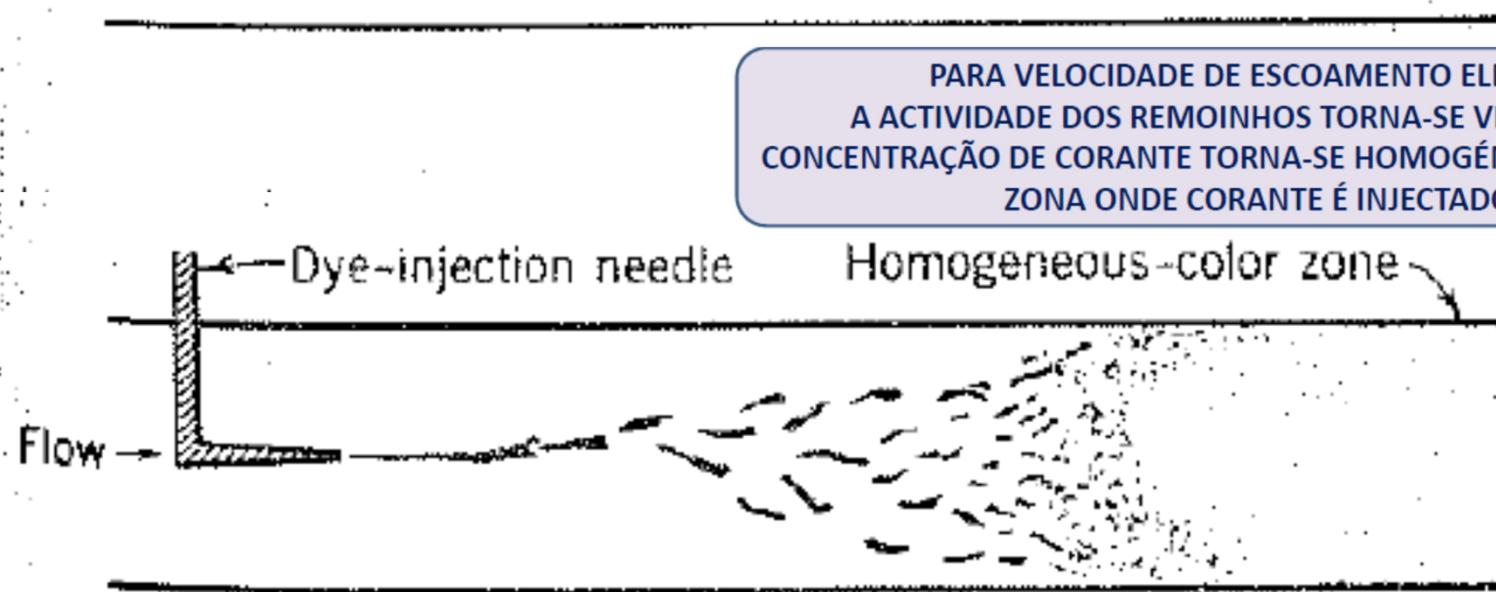
x
y



PARA BAIXA VELOCIDADE DE ESCOAMENTO
O FILAMENTO DE CORANTE MANTÉM A SUA IDENTIDADE, TENDENDO
A ALARGAR-SE À MEDIDA QUE PERCORRE O TUBO, DEVIDO À
DIFUSÃO MOLECULAR DO CORANTE



PARA VELOCIDADE DE ESCOAMENTO MÉDIA
O FILAMENTO DE CORANTE QUEBRA-SE EM VÁRIOS
TURBILHÕES/REMOINHOS GRANDES. MAIS PARA A FREnte NO TUBO,
O CORANTE TENDE A FICAR DISPERSO DE MODO HOMOGÉNEO

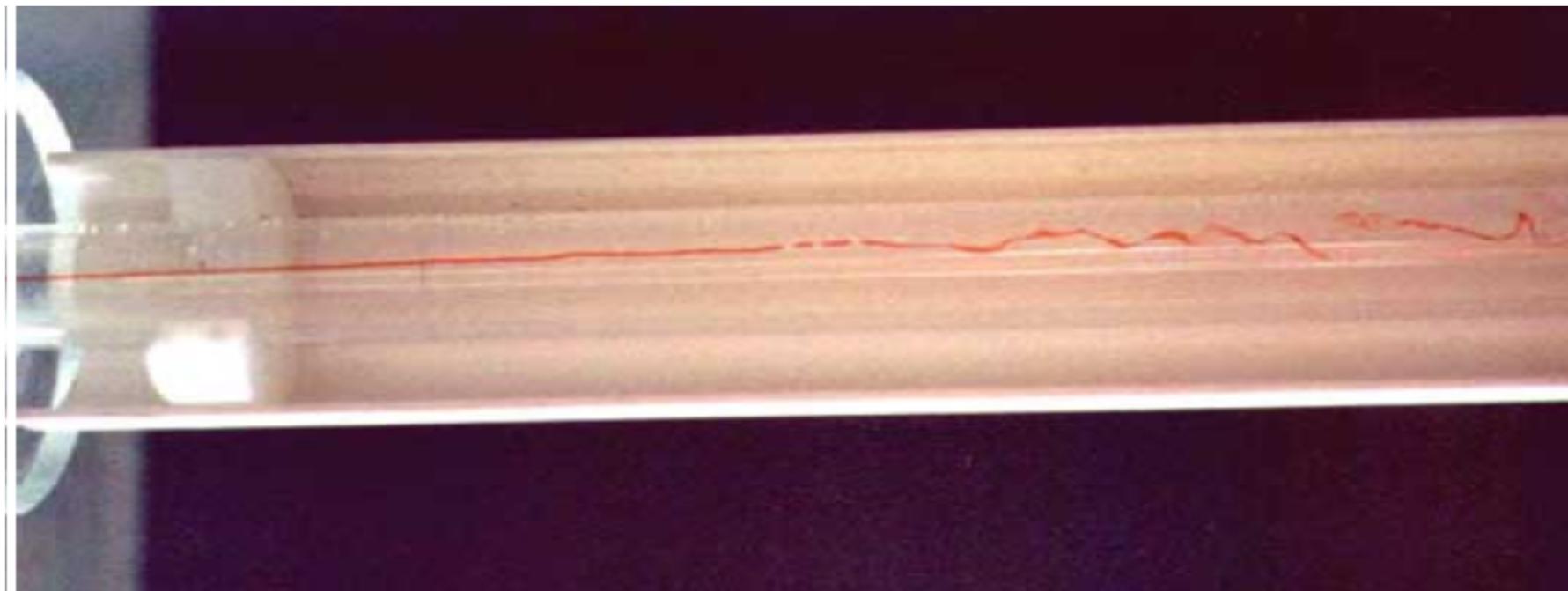


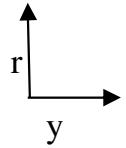
PARA VELOCIDADE DE ESCOAMENTO ELEVADA
A ACTIVIDADE DOS REMOINHOS TORNA-SE VIOLENTA E A
CONCENTRAÇÃO DE CORANTE TORNA-SE HOMOGÉNEA, PRÓXIMO DA
ZONA ONDE CORANTE É INJECTADO

<https://www.youtube.com/watch?v=vhDaCZZ0Sc4>

> 1,55 min

Injeção de um corante: transição de fluxo laminar para turbulento





1- ACIMA DE UMA DADA VELOCIDADE, PARA UM DADO SISTEMA,
FORMAM-SE GRANDES TURBILHÕES QUE SE MOVEM
PERPENDICULARMENTE AO FLUXO EM MOVIMENTO ALEATÓRIO

2- OS TURBILHÕES SÃO MAIORES E MAIS ABUNDANTES NO CENTRO
DO TUBO são visíveis, macroscópicos

3- AUMENTANDO A VELOCIDADE, AUMENTA O NÚCLEO TURBULENTO
ATÉ QUE TODO O TUBO É NÚCLEO TURBULENTO

Velocidade a partir da qual se formam turbilhões/remoinhos

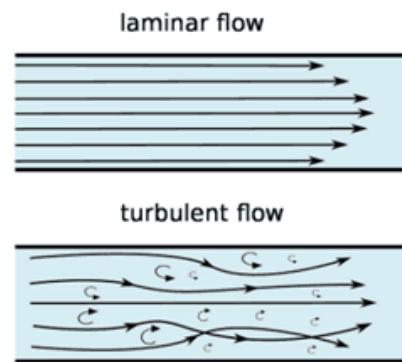
- **Características do sistema:** (Diâmetro da conduta, rugosidade da parede)
- **Propriedades do fluido:** densidade, viscosidade

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

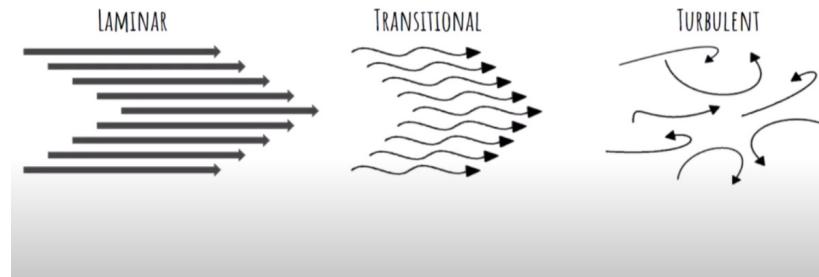
- Grupo adimensional que relaciona forças inércia/ forças viscosas
- Caracteriza a natureza do fluxo (laminar ou turbulento)

$$Re = \frac{\text{inertia forces}}{\text{viscous forces}} = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$$

↑ Velocity
↑ Characteristic dimension
↑ Density
↓ Viscosity



$Re \leq 2100$ – LAMINAR
 $3500 \geq Re \geq 21000$ – TRANSIÇÃO
 $Re \geq 3500$ – TURBULENTO



Têm também contribuição de t molecular

Transporte de momento total ou tensão de corte total exercida num fluido em regime turbulento

$$\tau_{total} = \tau_{molecular} + \tau_{turbulento}$$

= Transporte por mecanismo molecular

+ Transporte por mecanismo turbulentoo

Devido ao movimento aleatório de grupos de moléculas, remoinhos, turbilhões (Eddies)

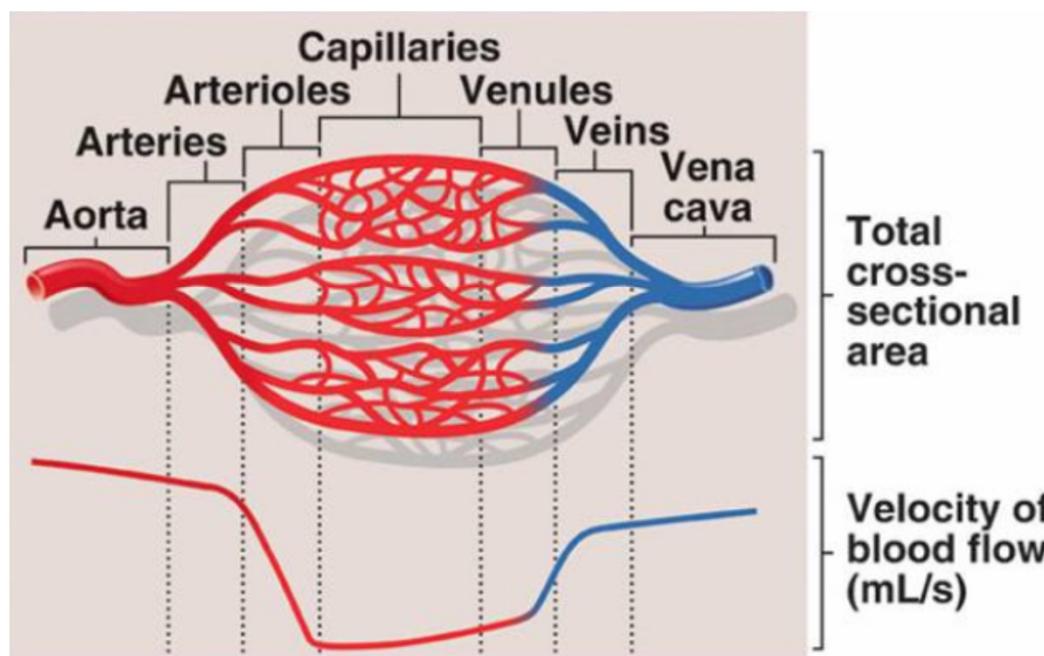
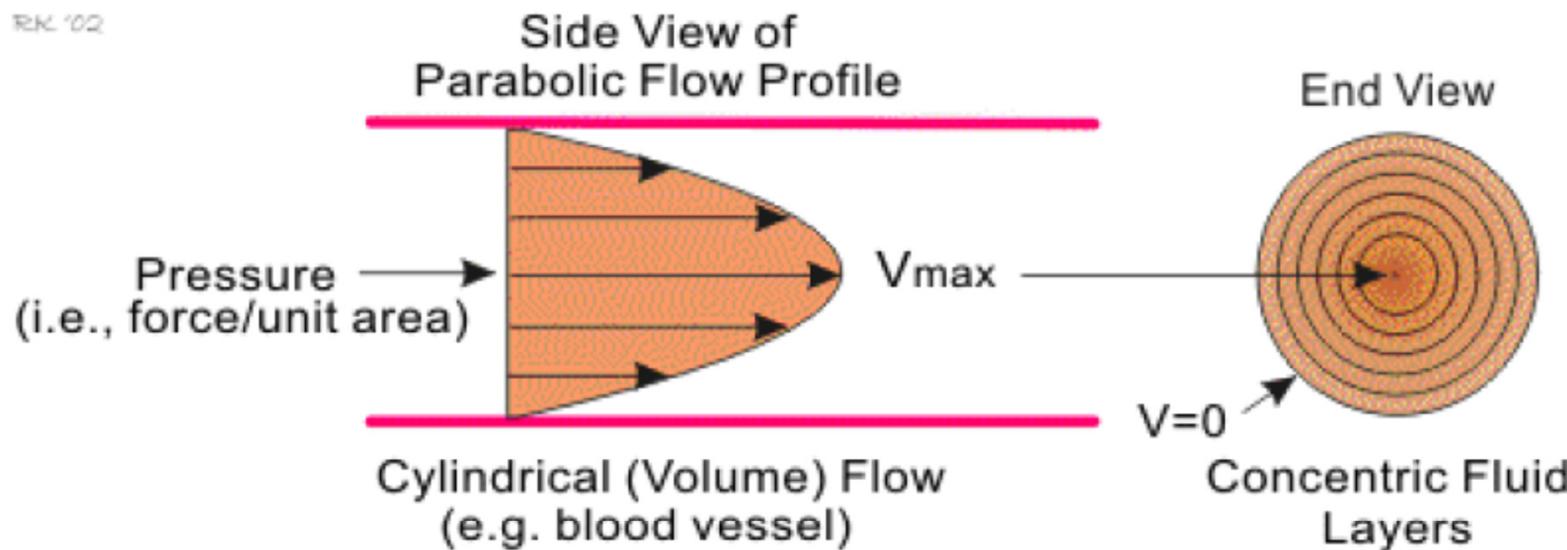
de certa maneira, o fluxo de momento por mecanismo turbulentoo é semelhante ao fluxo por mecanismo molecular mas numa escala muito maior de migração de massa

A maior parte do fluxo de fluidos com interesse em ciência, tecnologia e na vida do dia a dia são fluxos turbulentos.

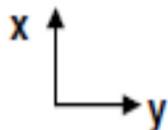
Mas há muitos exemplos de fluxos laminares. Ex: fluxo de sangue nos vasos capilares, fluxo de líquidos lubrificantes em máquinas, fluxo de águas subterrâneas em subsuperfícies porosas, etc.

<https://www.youtube.com/watch?v=9A-uUG0WR0w&t=18s>

RK '02



Transporte de momento total ou tensão de corte total exercida num fluido em regime turbulento



$$\tau_{total} = \tau_{molecular} + \tau_{turbulento}$$

= Transporte por mecanismo molecular

+ Transporte por mecanismo turbulento

Devido ao movimento aleatório de grupos de moléculas, remoinhos, turbilhões (Eddies)

Transporte por mecanismo molecular

$$\Psi = -\delta \frac{d\Gamma}{dx}$$

$$\Psi = -\frac{1}{6}lc \frac{d\Gamma}{dx}$$

$$\delta = \frac{1}{6}l.c$$

$$\tau_y = -\nu \frac{d(\rho v)}{dx} = -\mu \frac{d(v)}{dx}$$

Adicionar a contribuição do transporte por mecanismo turbulento

$$\Psi = -(\delta + E_x) \frac{d\Gamma}{dx}$$

$$\tau_y = -(\mu + \rho E_\tau) \frac{d\nu}{dx}$$

$E_\tau \sim v_{turbilhão\ direção\ x} \times \text{distância que percorre}$

TURBULÊNCIA: REMOINHOS, TURBILHÕES (EDDIES)

De difícil definição, é mais fácil de descrever do que de definir

$$E_\tau \text{ (difusividade turbilhonar)} \sim v_{\text{turbilhão}} \times \text{direção x} \times \text{distância que percorre}$$

The Reynolds experiment would certainly suggest that turbulence is characterized by random, chaotic motion of fluid particles. If an extremely sensitive and responsive device were used to measure velocity at a point in a fluid in turbulent flow, and if this device were arranged so that the x - (radial) and y - (axial) components of velocity were measured, the time response shown in Figure 12.2 would result.

v: velocidade do fluido na direção y

u: velocidade do fluido na direção x (radial)

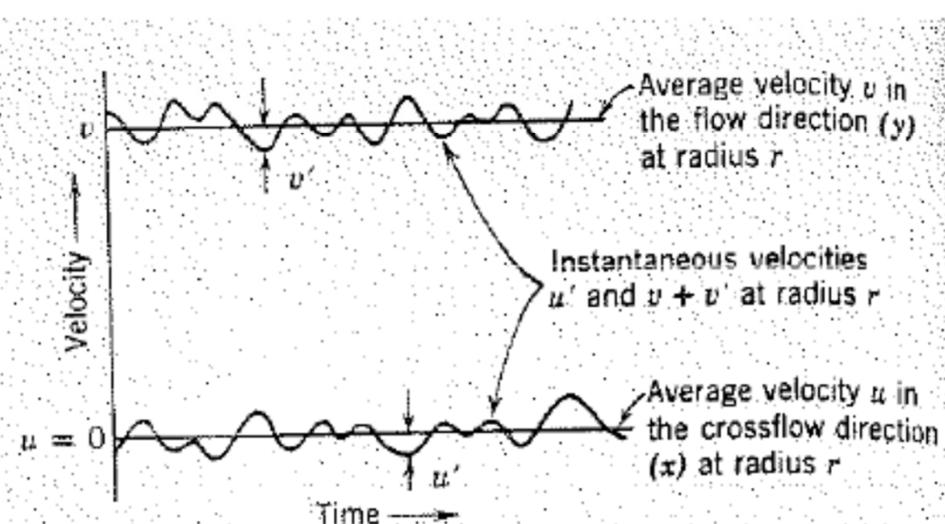
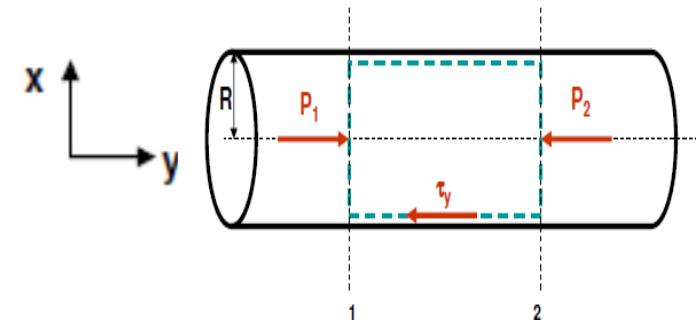


Figure 12.2. Instantaneous point velocities in the x and y-directions.



$$\bar{u} = \frac{1}{t} \int_0^t u dt$$

$$\bar{v} = \frac{1}{t} \int_0^t v dt$$

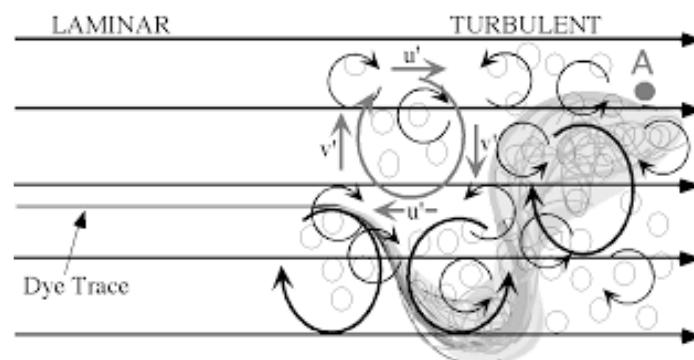
velocidade média do fluido num ponto na direção y

velocidade instantânea do fluido num ponto na direção y

Distância que percorre: distância que um pulso percorre até perder a sua identidade: **comprimento de mistura de Prandtl** ($\sim l$ = livre percurso médio das moléculas em t. molecular)

Prandtl assumiu que os turbilhões (eddies) se movem de uma forma semelhante às moléculas: movem-se dentro do fluido na direção x levando consigo o seu momento. Até que encontram uma região do fluido com uma velocidade = à sua velocidade instantânea e são absorvidos por esse novo ambiente, perdendo a sua identidade.

os turbilhões têm formas muito irregulares e com uma larga gama de tamanhos e estão em constante processo de desenvolvimento e decaimento. Não podem ser nitidamente delineados mas têm existência física real.



V – VELOCIDADE EM Y (na direcção do fluxo)

U – VELOCIDADE EM X (radial)

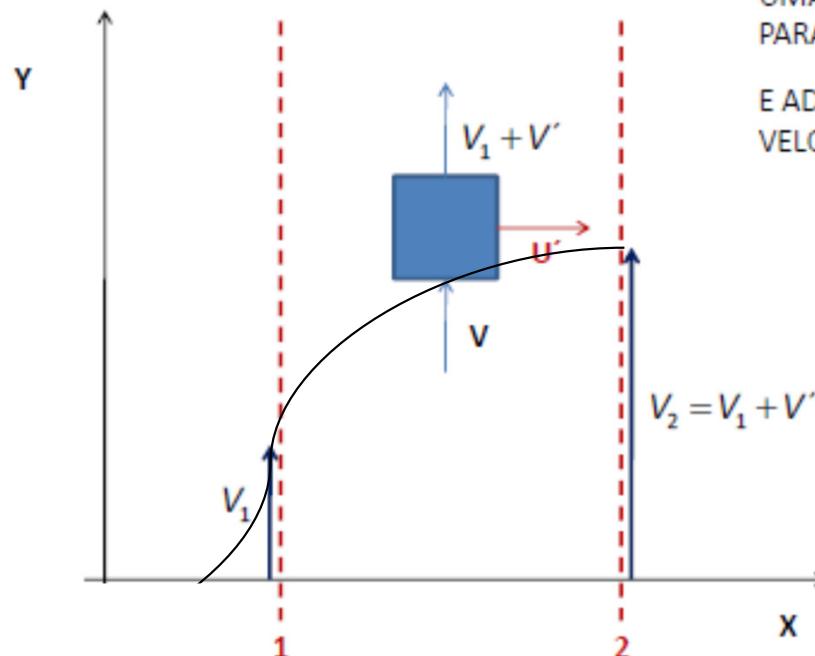
NA REGIÃO 1 A VELOCIDADE MÉDIA É

V_1

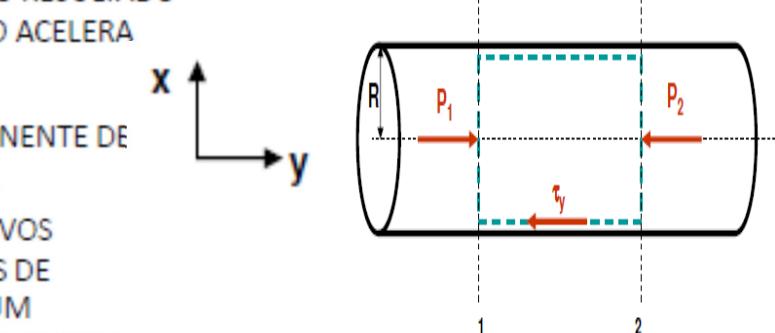
DÁ-SE UM PULSO E COMO RESULTADO UMA PORÇÃO DO FLUIDO ACELERA PARA $V_1 + V'$ E ADQUIRE UMA COMPONENTE DE VELOCIDADE RADIAL (u').

COM ESTES NOVOS COMPONENTES DE VELOCIDADE, UM TURBILHÃO É FORMADO EM 1.

X
Y



$$x_2 - x_1 = \text{comprimento de Prandtl} = \lambda$$



ASSUMAMOS QUE O TURBILHÃO CONSERVA A SUA IDENTIDADE NUM MOVIMENTO RADIAL ATRAVÉS DA DISTÂNCIA $x_2 - x_1$

ATÉ CHEGAR À REGIÃO 2 ONDE A VELOCIDADE MÉDIA SERÁ

$$V_2 = V_1 + V'$$

NESTE PONTO, O TURBILHÃO DECAI E DESAPARECE (PERDE A SUA IDENTIDADE)

The velocities at 1 and 2 can be related by

$$v_2 = v_1 + \frac{dv}{dx} (x_2 - x_1) = v_1 + v' \quad (12.9)$$

Reescrevendo a eq. 12.9, vem:

$$v' = \lambda \left(\frac{dv}{dx} \right)$$

$$E_\tau \sim v_{turbilhão\ direção\ x} \times distância\ que\ percorre = v' \times \lambda = \lambda^2 \times \frac{dv}{dx}$$

$$E_\tau = \lambda^2 \times \frac{dv}{dx}$$

↓
Difusividade turbilhonar

$$\tau_{turbulência} = \rho E_\tau \frac{dv}{dx}$$

$$\tau_{turbulência} = \rho (\lambda \frac{dv}{dx})^2$$

Para um fluido de densidade constante vem:

$$\tau_{total} = -(\mu + \rho E_\tau) \frac{dv}{dx} = -(\mu + \rho \lambda^2 \frac{dv}{dx}) \frac{dv}{dx}$$

Difusividade turbilhonar:
não é uma propriedade física e depende da posição e das condições de fluxo do fluido

Estas equações indicam que para elevadas velocidades de fluxo do fluido, há transporte de momento devido a mecanismo molecular E turbulento.

A difusividade turbilhonar varia desde ZERO (junto à parede) até ELEVADOS valores (na região turbulenta do fluxo).

Camada fronteira ou camada limite

Quando um fluido com uma velocidade V , passa sobre uma superfície sólida, a velocidade do elemento de volume de fluido que contacta com a superfície é reduzida para zero. $\tau = \infty$

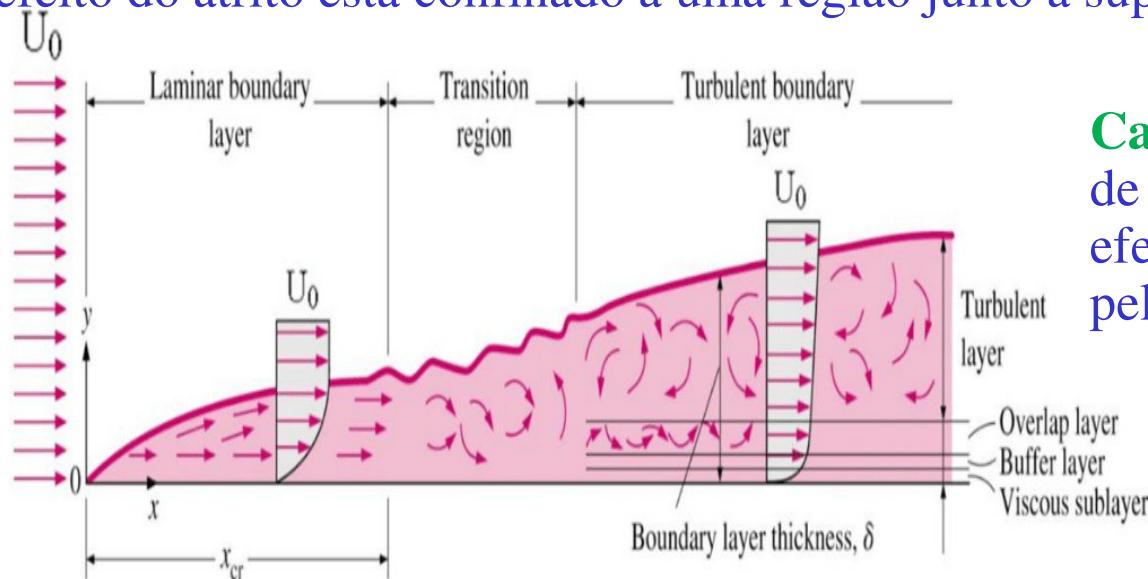
As sucessivas camadas de fluido são desaceleradas



estabelece-se um gradiente de velocidade perpendicular à direção do fluxo devido à elevada tensão de corte exercida pela superfície ou parede.

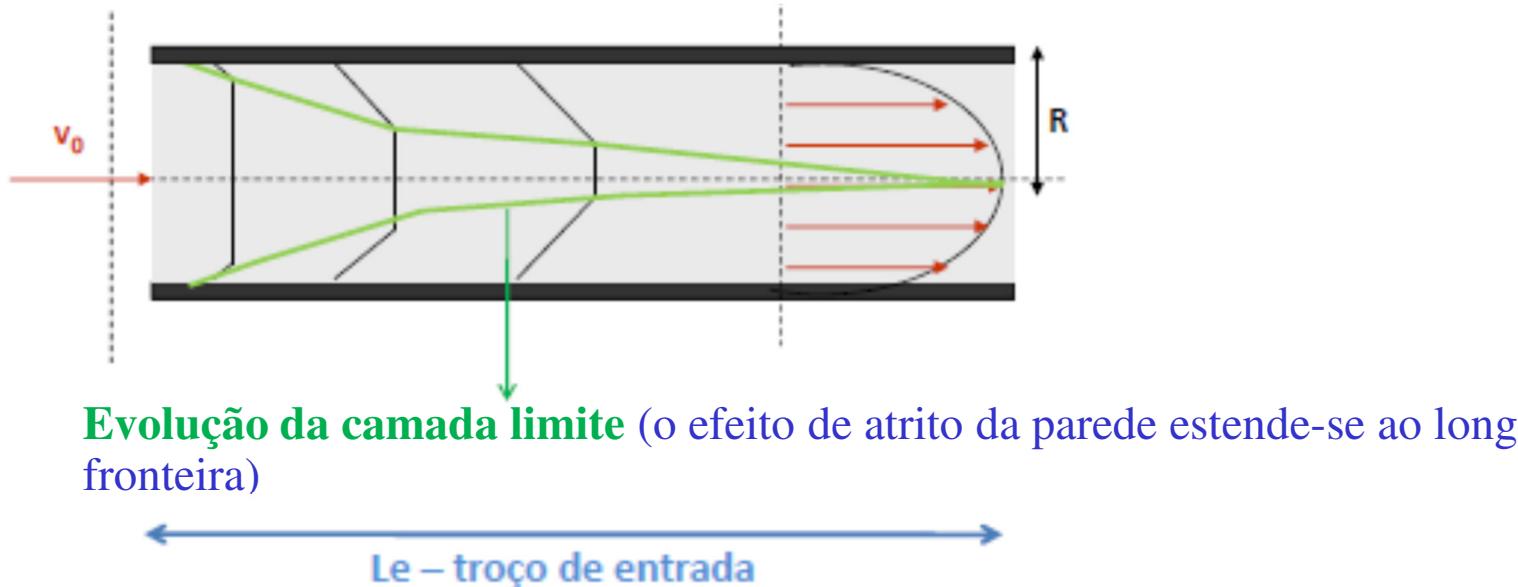
A velocidade do fluido varia desde zero (junto à superfície) até ao valor da velocidade na corrente de fluido não perturbada

Esta tensão ou atrito diminui com a distância à superfície. Pode-se considerar que o efeito do atrito está confinado a uma região junto à superfície → **Camada limite**



Camada limite: região na vizinhança de uma parede onde se faz sentir o efeito de atrito ou tensão exercidos pela parede.

Quando um fluido com velocidade uniforme entra num tubo, vai-se formando uma camada limite que aumenta de espessura ao longo do troço de entrada



O fluido na camada fronteira é retardado mas o fluxo permanece constante (E.E). Então o fluxo na corrente central é acelerado.

Estabelece-se um gradiente de velocidade. A velocidade do fluido varia desde zero (junto à superfície) até ao valor da velocidade na corrente não perturbada

A uma certa distância L da entarda, as camadas fronteira juntam-se no eixo do tubo e daí para diante ocupam toda a secção recta e permanecem constantes



Fluxo totalmente estabelecido

Se as camadas fronteira são laminares, estabelece-se um fluxo laminar no tubo

Se as camadas fronteira são turbulentas, estabelece-se um fluxo turbulento no tubo

A elevada tensão viscosa do fluido e a elevada tensão de corte na parede



Levam ao decaimento dos turbilhões
Inibe a formação de turbilhões



Fluxo laminar (junto a 1 superfície)

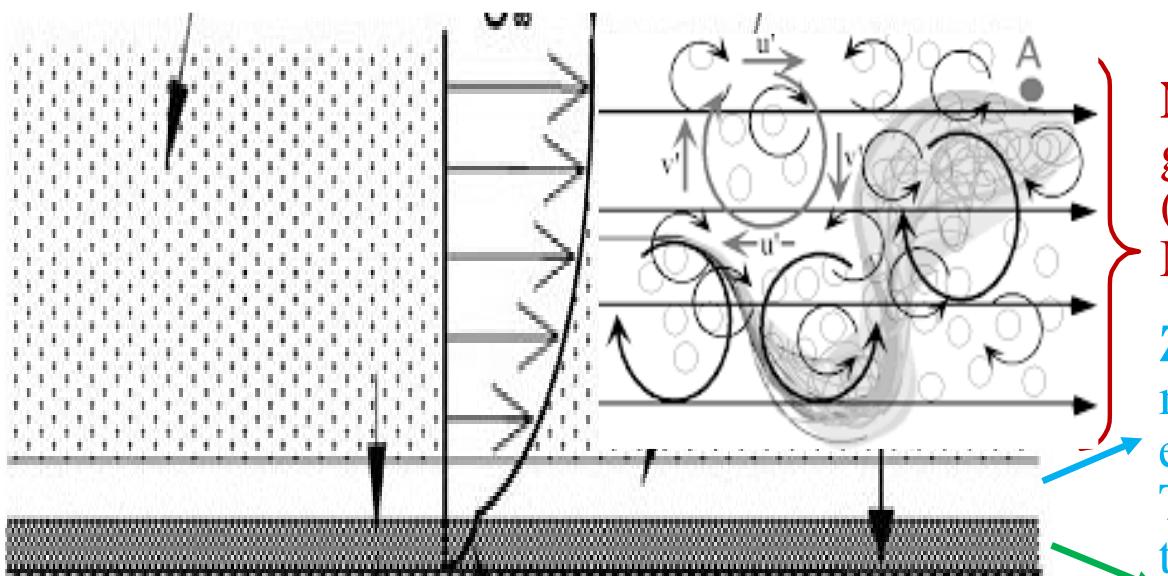
A tensão ou atrito diminui com a distância à superfície, está confinada a uma região junto à superfície



A actividade dos turbilhões é maior no centro



Núcleo turbulento



A actividade dos turbilhões é importante no mecanismo de transferência de momento. Mas também como meio de mistura física



Importante em T. massa e T. calor

Núcleo turbulento: mistura intensa. gradiente de [propriedade] pequeno (pouco t. molecular ou ~ 0)
Movimento de turbilhões: T. turbulento

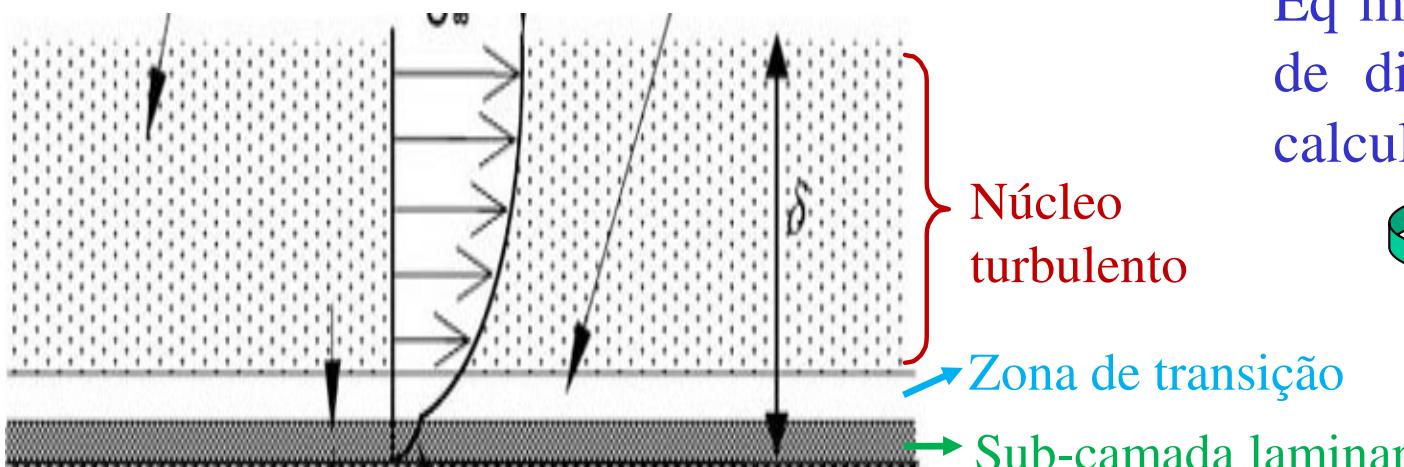
Zona de transição: mistura intermédia menor gradiente de [propriedade] mas existe (tb t. molecular)
Tb movimento de turbilhões: T. turbulento

Sub-camada laminar: não há mistura elevado gradiente da propriedade T. molecular

Turbilhões primários formam-se devido a instabilidades e a imperfeições da parede e vão-se multiplicando a não ser que haja um mecanismo de decaimento

$$\tau_y = -(\mu + \rho E_\tau(r)) \frac{dv}{dr}$$

A difusividade de transporte de momento turbulento (**difusividade turbilhonar**) depende de:
- velocidade
- posição (E max no centro e E=0 na parede)

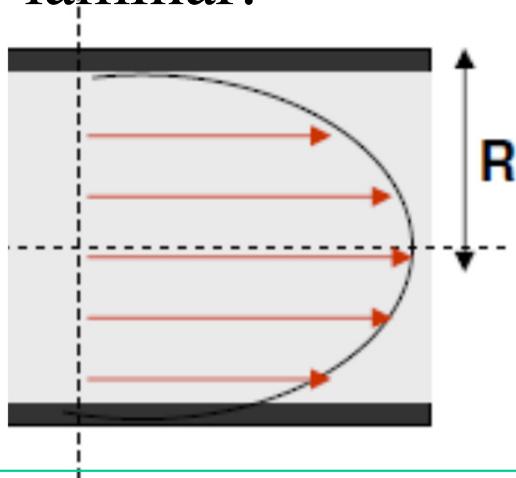


Eq muito mais complexa e de difícil integração para calcular E_r e $V(r)$



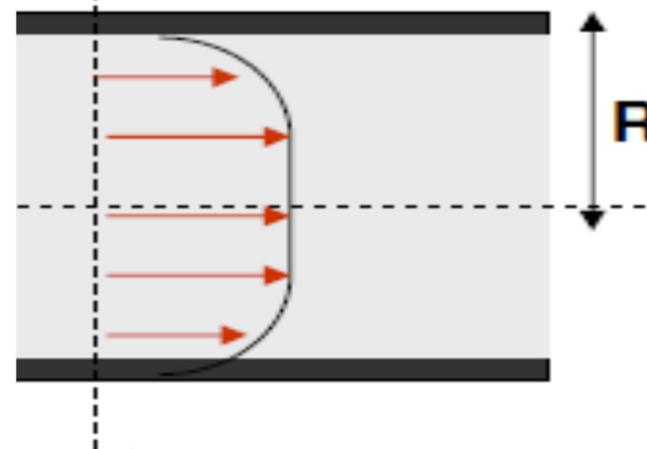
COMBINAR TEORIA E EXPERIÊNCIA

Fluxo laminar:



$$v_x = v_{máx} \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right)$$

Fluxo turbulento:



$$v_x = v_{máx} \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{1/7}$$

Experimental, Lei da 7^a potência

$$\tau_y = -\mu \frac{dv}{dr}$$

$$\tau_y = -(\mu + \rho E_\tau(r)) \frac{dv}{dr}$$

Distribuição de velocidades em fluxo turbulento

Nikuradse mediou a velocidade em cada ponto (direcção y) de um fluido em fluxo turbulento num tubo rugoso (1933).

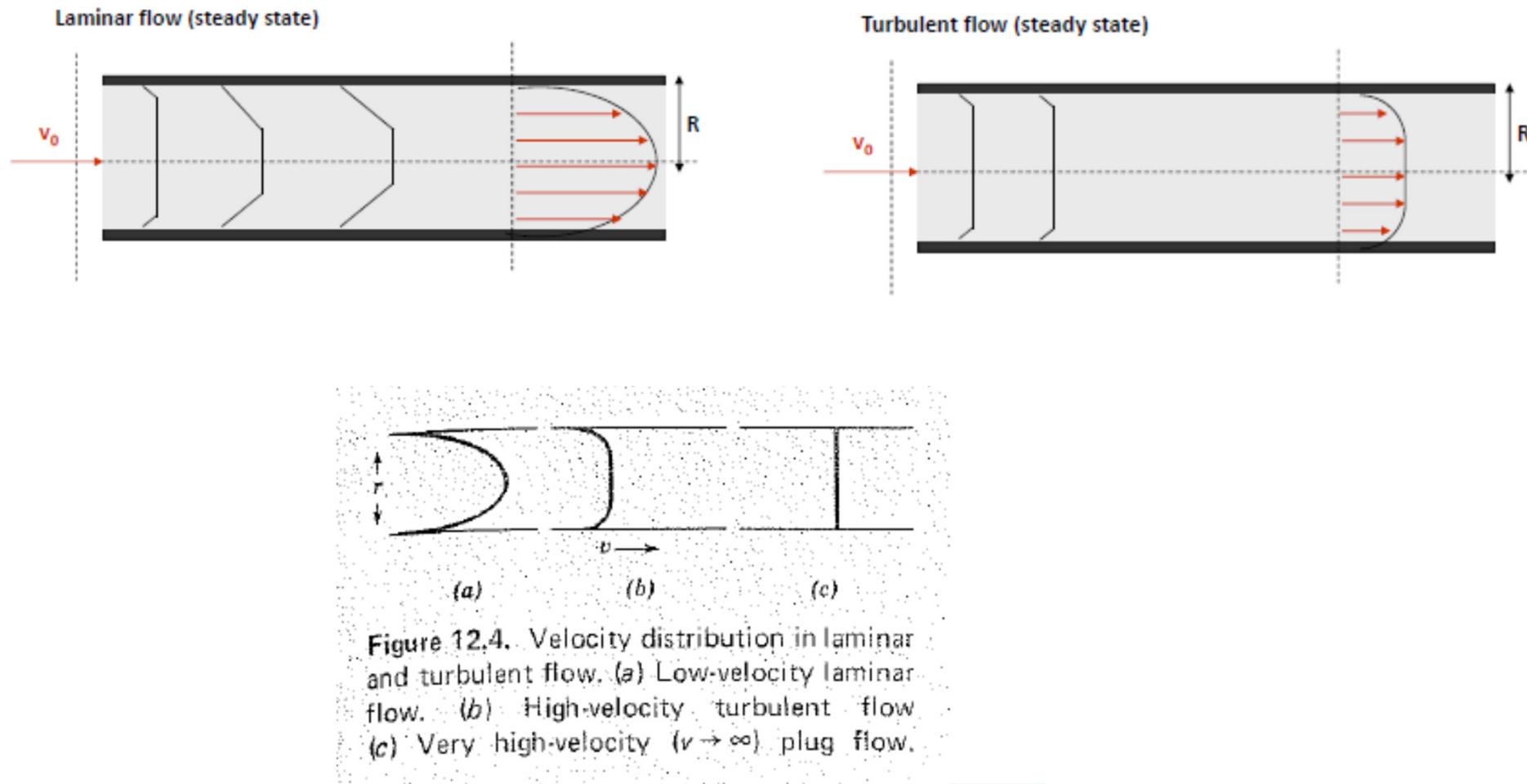
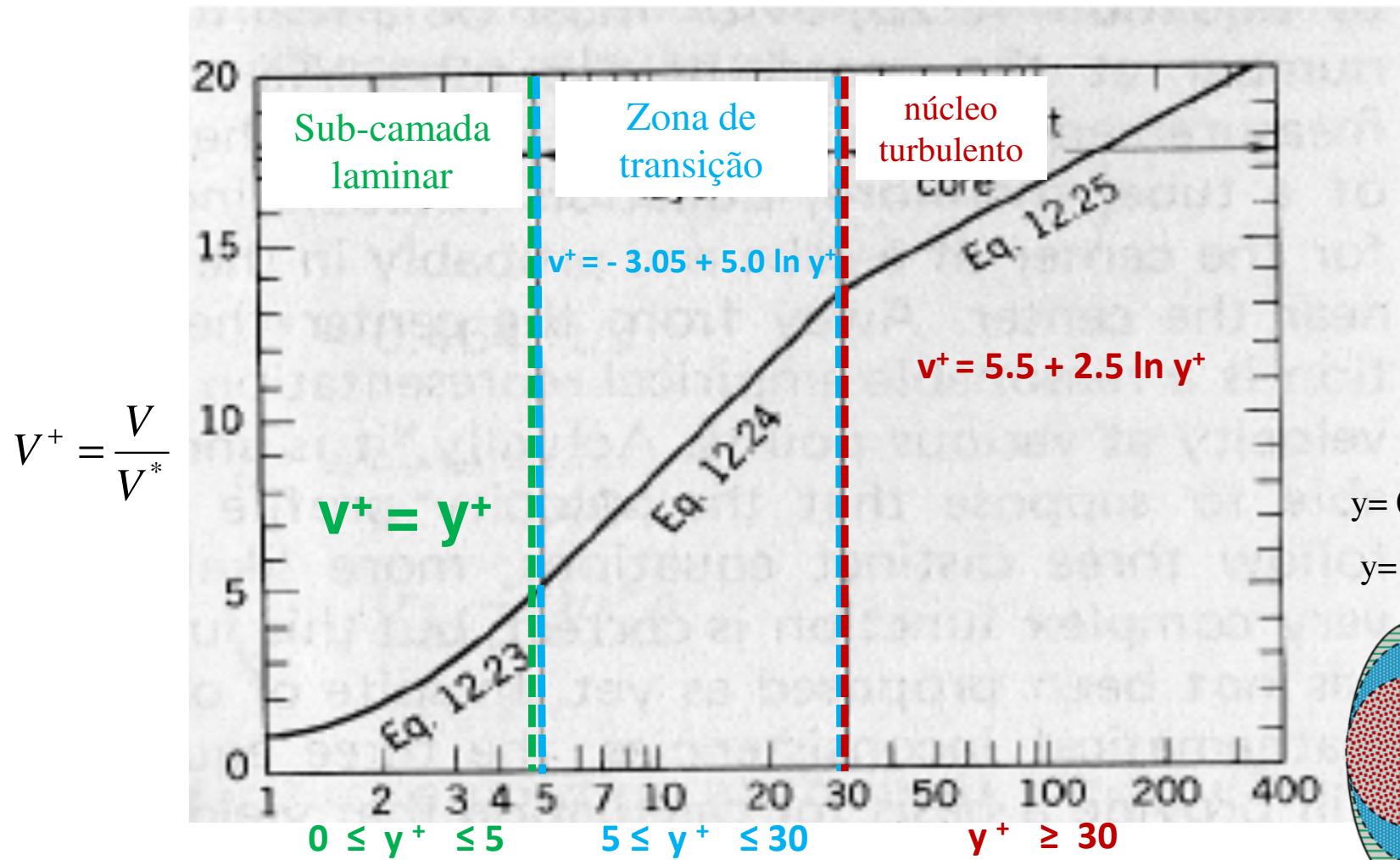


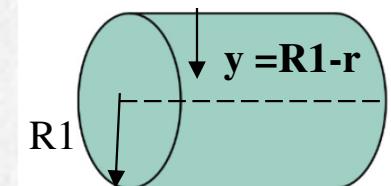
Figure 12.4. Velocity distribution in laminar and turbulent flow. (a) Low-velocity laminar flow. (b) High-velocity turbulent flow. (c) Very high-velocity ($v \rightarrow \infty$) plug flow.

Equações de Von Karman para tubos lisos

Von Kármán propos 3 equações empíricas para representar os dados de distribuição de velocidade obtidos por Nikuradse para qualquer fluido Newtoniano a circular em tubos lisos, independentemente da velocidade, densidade, viscosidade e tensão de corte da parede, para qualquer posição radial no tubo.

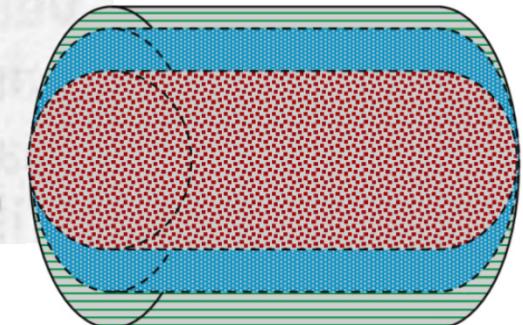


y é a distância à parede do tubo



$y = 0$ qdo $r = R_1$ parede

$y = R_1$ qdo $r = 0$ eixo



$$com \quad V^* = \sqrt{\frac{\tau_1}{\rho}} \text{ e } y = R_1 - r$$