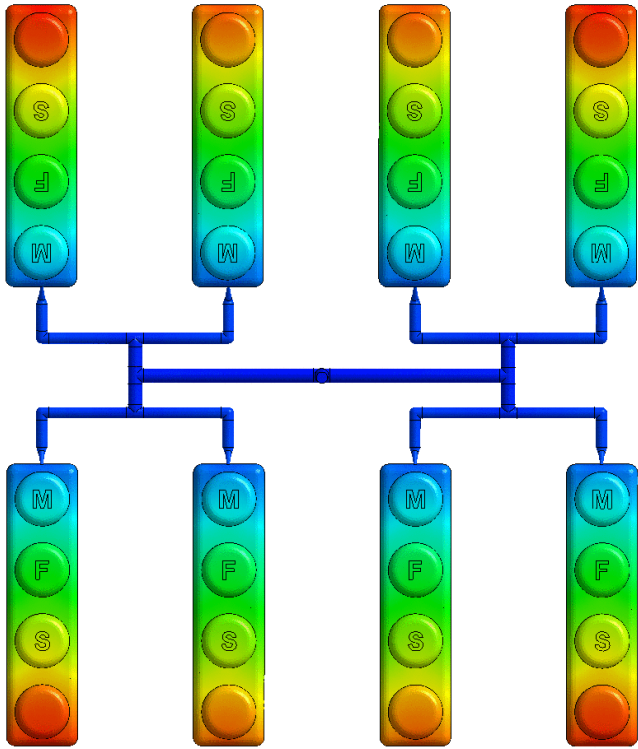


ESCOAMENTO EM DUTOS: cálculo de perdas de carga e transientes fluidodinâmicos

Paulo Seleglim Jr.
Universidade de São Paulo





<https://ingenieria-plastica.com>



As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

$$\left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \vec{u} \right) = -\vec{\nabla} P + \frac{1}{Re} \nabla^2 \vec{u} + \sum \frac{1}{R_k} F_k$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} T \right) = \frac{1}{Re Pr} \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) + \frac{Ec}{Re} \Phi(\vec{u})$$



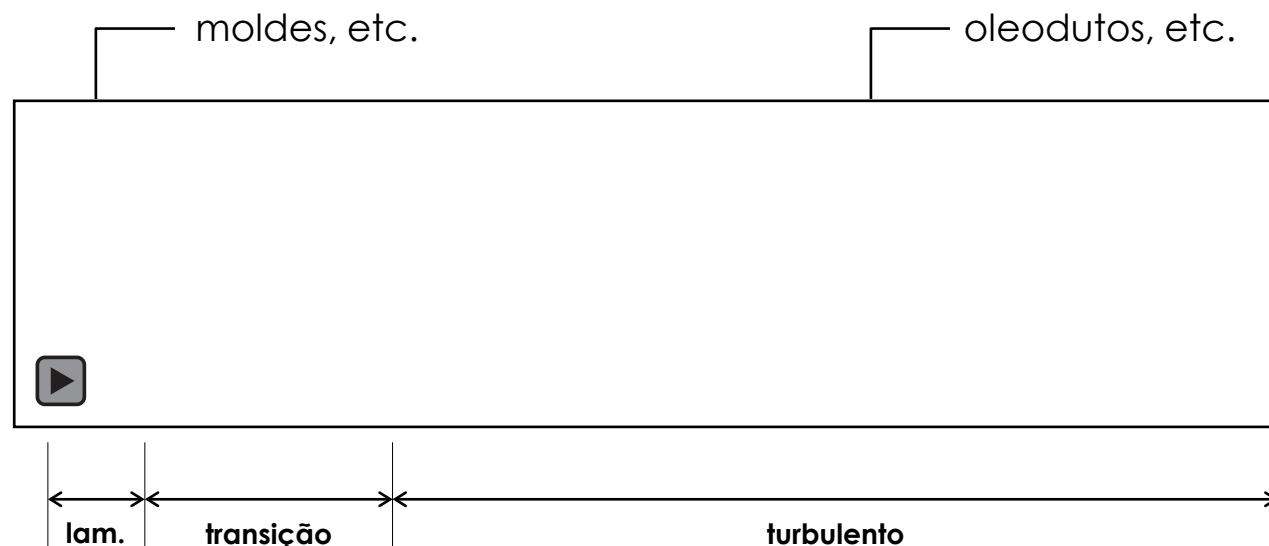
As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.

Adimensionalização das equações governantes...

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

$$\left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \vec{u} \right) = -\vec{\nabla} P + \frac{1}{Re} \nabla^2 \vec{u} + \Sigma \frac{1}{R_k} F_k$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} T \right) = \frac{1}{Re Pr} \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) + \frac{Ec}{Re} \Phi(\vec{u})$$



$$\frac{Ec}{Re} = \frac{\mu U/D}{Cp(T_s - T_\infty)} \quad \text{Eckert}$$



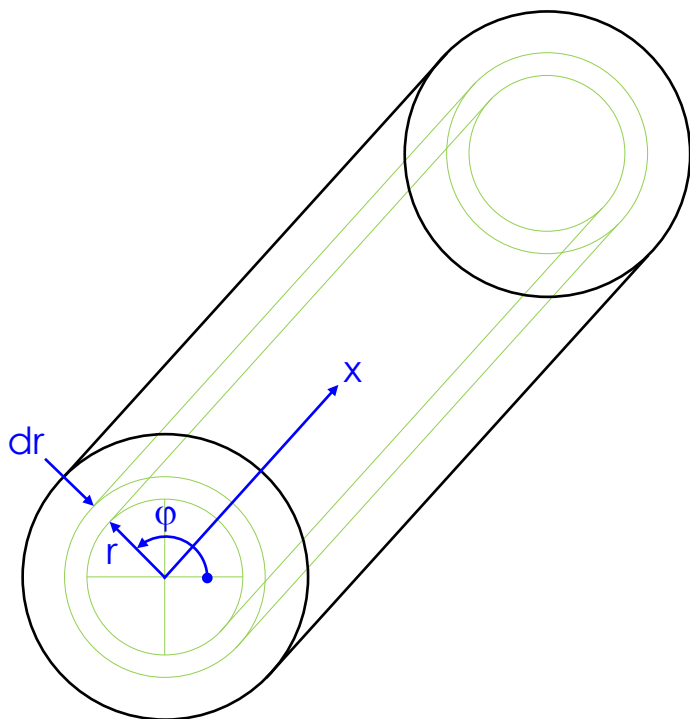
significativo quando $U \gg \nu$
e/ou $visc \gg \nu$

$$Re_D = \frac{\rho U D}{\mu} = \frac{\text{efeitos dinâmicos}}{\text{efeitos viscosos}}$$

$$Ec = \frac{U^2}{Cp(T_s - T_\infty)} = \frac{\text{energia cinética}}{\text{entalpia c. limite}}$$



As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.



$$\vec{u} = (u_r, u_x, u_\phi)$$

~~$$\rho \cdot \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \vec{u} \right) = -\vec{\nabla} P + \mu \nabla^2 \vec{u} + \Sigma \vec{F}_k$$~~

$$\vec{u} = (0, u_x(r), 0) \rightarrow \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \vec{u} \equiv 0$$

$$\vec{\nabla} P = \mu \nabla^2 \vec{u}$$

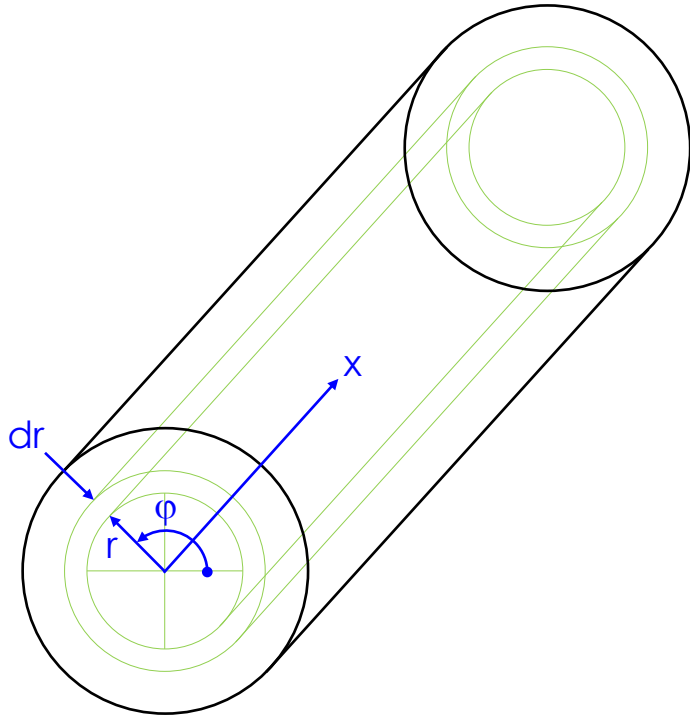
$$\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial r}, \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} \right) P = \mu \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right) (0, u_x(r), 0)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_x}{\partial r} \right) = \mu \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_x}{\partial r} \right) = cte$$

↑ só depende de x

↑ só depende de r





$$\vec{u} = (u_r, u_x, u_\phi)$$

$$\mu \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_x}{\partial r} \right) = r \frac{\partial P}{\partial x}$$

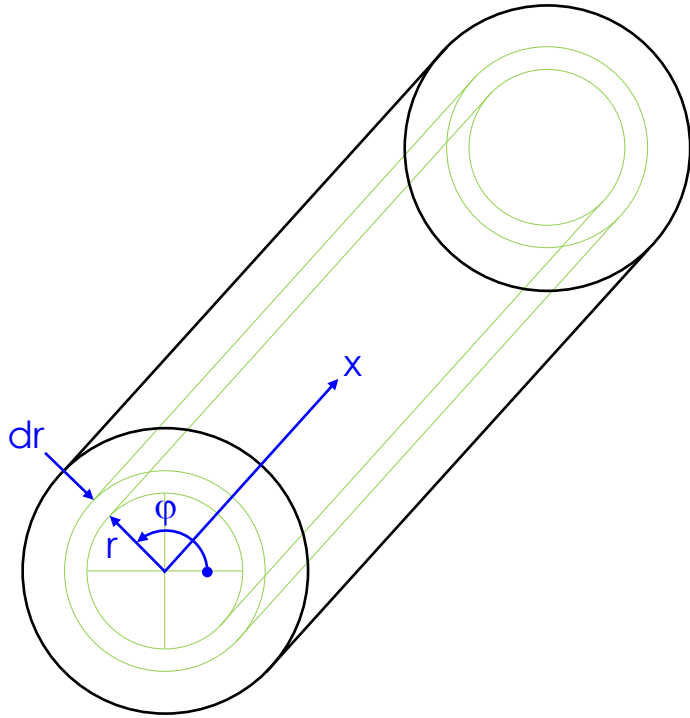
$$\mu \left(r \frac{\partial u_x}{\partial r} \right) = \frac{r^2}{2} \frac{\partial P}{\partial x} + C1 \quad \rightarrow \quad \frac{\partial u_x}{\partial r} = \frac{r}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{C1}{r\mu}$$

$$u_x(r) = \frac{r^2}{4\mu} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{C1}{\mu} \ln(r) + C2$$

$$u_x(0) < \infty \quad - \frac{R^2}{4\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \dots \quad pq \quad u_x(R) = 0$$

$$u_x(r) = \frac{1}{4\mu} \frac{\partial P}{\partial x} (r^2 - R^2)$$





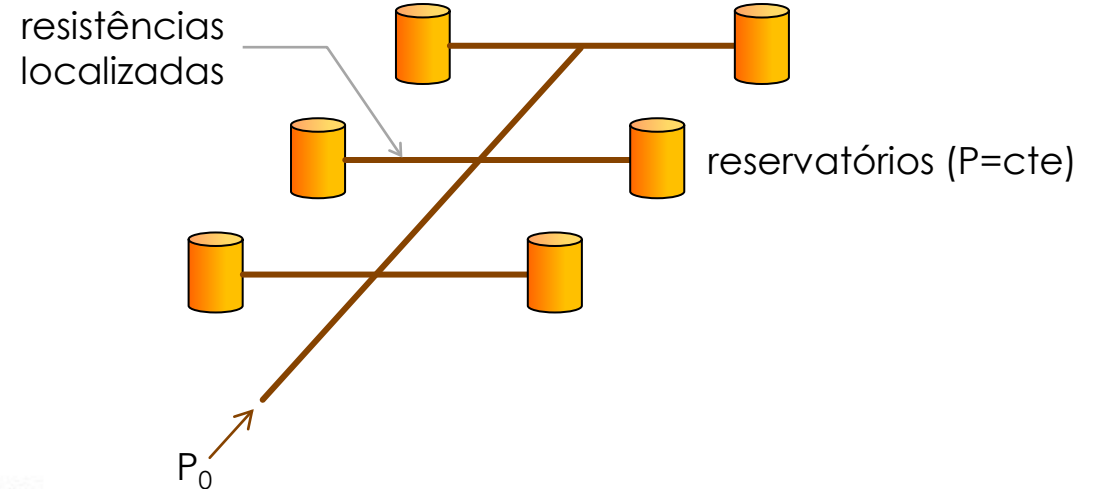
$$\vec{u} = (u_r, u_x, u_\phi)$$

$$u_x(r) = \frac{1}{4\mu} \frac{\partial P}{\partial x} (r^2 - R^2)$$

$$\tau_{rx}(r) = \mu \frac{\partial u_x}{\partial r} = \frac{r}{2} \frac{\partial P}{\partial x}$$

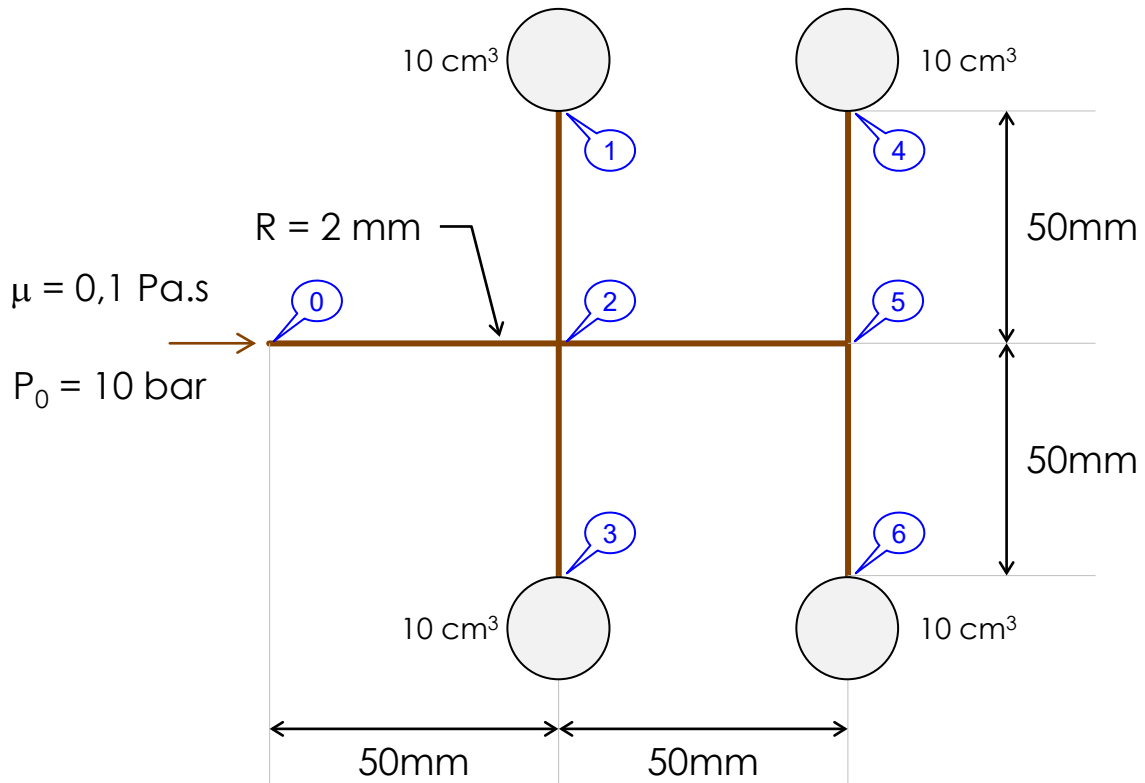
$$Q = \int_0^R u_x(r) 2\pi r dr = -\frac{\pi R^4}{8\mu} \frac{\partial P}{\partial x}$$

$$\frac{8\mu}{\pi L R^4} = \frac{\Delta P}{Q} \rightarrow R_\mu = \frac{8\mu L}{\pi R^4} = \frac{\Delta P}{Q} = \text{resist\^encia viscosa}$$



As quest\~oes postadas no Chat do YouTube ser\~ao respondidas ao final da aula.

Exemplo: injeção em um molde de plástico...



$$R_\mu = \frac{8\mu L}{\pi R^4} = \frac{8 \cdot 0,1 \cdot 50 \times 10^{-3}}{\pi (2 \times 10^{-3})^4} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{10^6 \text{ cm}^3} = 7,958 \times 10^{-3} \frac{\text{bar}}{\text{cm}^3/\text{s}}$$

$$P_0 - P_2 = R_\mu \cdot Q_{02}$$

$$P_2 - P_1 = R_\mu \cdot Q_{21}$$

$$P_2 - P_3 = R_\mu \cdot Q_{23}$$

$$P_2 - P_5 = R_\mu \cdot Q_{25}$$

$$P_5 - P_4 = R_\mu \cdot Q_{54}$$

$$P_5 - P_6 = R_\mu \cdot Q_{56}$$

$$Q_{02} = Q_{21} + Q_{23} + Q_{25}$$

$$Q_{25} = Q_{54} + Q_{56}$$

$$\left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla P + \frac{1}{Re} \nabla^2 \vec{u} + \Sigma \frac{1}{R_k} F_k$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$



Montagem e solução do sistema de equações...

$$P_0 - P_2 = R_\mu \cdot Q_{02}$$

$$P_2 - P_1 = R_\mu \cdot Q_{21}$$

$$P_2 - P_3 = R_\mu \cdot Q_{23}$$

$$P_2 - P_5 = R_\mu \cdot Q_{25}$$

$$P_5 - P_4 = R_\mu \cdot Q_{54}$$

$$P_5 - P_6 = R_\mu \cdot Q_{56}$$

$$Q_{02} = Q_{21} + Q_{23} + Q_{25}$$

$$Q_{25} = Q_{54} + Q_{56}$$

Parâmetros conhecidos:

geométricas → L 's e R 's

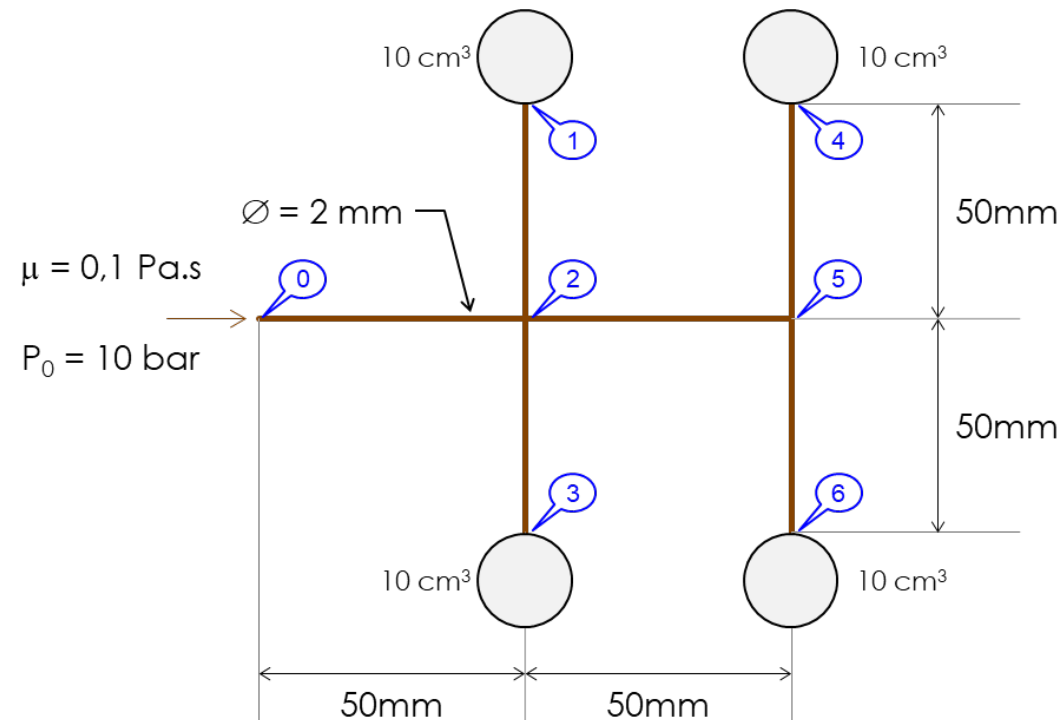
physical → μ

operacionais → P_0, P_1, P_3, P_4, P_6

Incógnitas do problema:

pressões → P_2, P_5

vazões → $Q_{02}, Q_{21}, Q_{23}, Q_{25}, Q_{54}, Q_{56}$



Montagem e solução do sistema de equações...

$$P_0 - P_2 = R_\mu \cdot Q_{02}$$

$$P_2 - P_1 = R_\mu \cdot Q_{21}$$

$$P_2 - P_3 = R_\mu \cdot Q_{23}$$

$$P_2 - P_5 = R_\mu \cdot Q_{25}$$

$$P_5 - P_4 = R_\mu \cdot Q_{54}$$

$$P_5 - P_6 = R_\mu \cdot Q_{56}$$

$$Q_{02} = Q_{21} + Q_{23} + Q_{25}$$

$$Q_{25} = Q_{54} + Q_{56}$$

Parâmetros conhecidos:

geométricas → L 's e R 's

physical → μ

operacionais → P_0, P_1, P_3, P_4, P_6

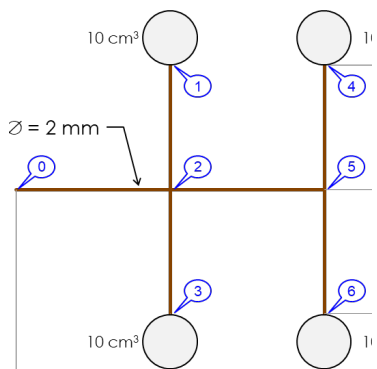
Incógnitas do problema:

pressões → P_2, P_5

vazões → $Q_{02}, Q_{21}, Q_{23}, Q_{25}, Q_{54}, Q_{56}$

	P_2	P_5	Q_{02}	Q_{21}	Q_{23}	Q_{25}	Q_{54}	Q_{56}	
eq. 1	-1		$-R_\mu$						$-P_0$
eq. 2	+1			$-R_\mu$					$+P_1$
eq. 3	+1				$-R_\mu$				$+P_3$
eq. 4	+1	-1				$-R_\mu$			0
eq. 5		+1					$-R_\mu$		$+P_4$
eq. 6		+1						$-R_\mu$	$+P_6$
eq. 7			+1	-1	-1	-1			0
eq. 8						+1	-1	-1	0

incógnitas =



As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.

Montagem e solução do sistema de equações...

$$P_0 - P_2 = R_\mu \cdot Q_{02}$$

$$P_2 - P_1 = R_\mu \cdot Q_{21}$$

$$P_2 - P_3 = R_\mu \cdot Q_{23}$$

$$P_2 - P_5 = R_\mu \cdot Q_{25}$$

$$P_5 - P_4 = R_\mu \cdot Q_{54}$$

$$P_5 - P_6 = R_\mu \cdot Q_{56}$$

$$Q_{02} = Q_{21} + Q_{23} + Q_{25}$$

$$Q_{25} = Q_{54} + Q_{56}$$

escoamento couette molde de injeção - Excel

Arquivo Página Inicial Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Suplementos Ajuda Diga-me o que você deseja fazer

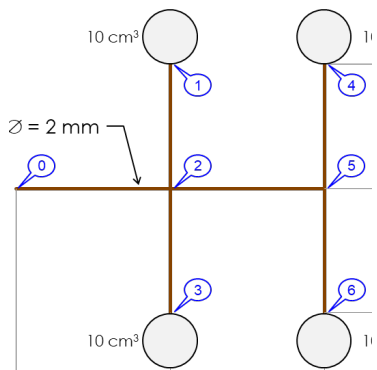
Recortar Colar Área de Transferência Recortar Copiar Pincel de Formatação Fonte Alinhamento Número Estilos

Calibri 11 Calibri 11 Quebrar Texto Automaticamente Mesclar e Centralizar

Normal Bom Neutro Ruim Cálculo Célula de Ve...

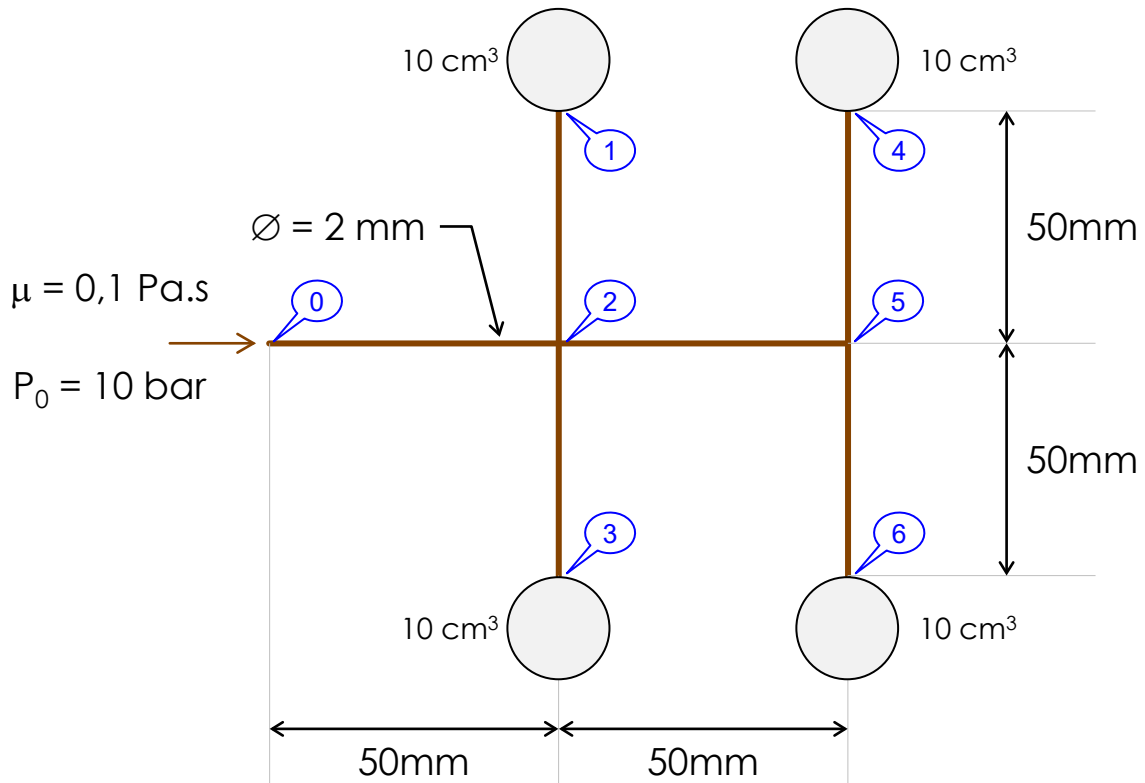
RR =8*B1*B2*0,001/(PI()* (B3*0,001)^4)*0,000000000001

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	mu	0,1 Pa.s				P2	P5	Q02	Q21	Q23	Q25	Q54	Q56		T.I.		
2	L	50 mm		eq 1		-1	0	-0,00796	0	0	0	0	0		-1		
3	R	2 mm		eq 2		1	0	0	-0,00796	0	0	0	0		0		
4	P0	1 bar		eq 3		1	0	0	0	-0,00796	0	0	0		0		
5	P1	0 bar		eq 4		1	-1	0	0	0	-0,00796	0	0		0		
6	P3	0 bar		eq 5		0	1	0	0	0	0	-0,00796	0		0		
7	P4	0 bar		eq 6		0	1	0	0	0	0	0	-0,00796		0		
8	P5	0 bar		eq 7		0	0	1	-1	-1	-1	0	0		0		
9	P6	0 bar		eq 8		0	0	0	0	0	1	-1	-1		0		
10																	
11	R	0,00795775 bar/(cm3/s)				P2	P5	Q02	Q21	Q23	Q25	Q54	Q56		solu		
12				eq 1		-0,27273	0,27273	0,27273	0,18182	0,09091	0,09091	-0,00217	-0,00072		0,27273	P2	bar
13				eq 2		-0,09091	0,09091	0,09091	-0,27273	0,36364	0,36364	-0,00072	-0,00289		0,09091	P5	bar
14				eq 3		-91,3918	-34,2719	-34,2719	-22,8479	-11,424	-11,424	0,27273	0,09091		91,3918	Q02	c3/s
15				eq 4		-34,2719	-91,3918	34,2719	22,8479	11,424	11,424	-0,27273	-0,09091		34,2719	Q21	c3/s
16				eq 5		-34,2719	34,2719	-91,3918	22,8479	11,424	11,424	-0,27273	-0,09091		34,2719	Q23	c3/s
17				eq 6		-22,8479	22,8479	22,8479	-68,5438	-34,2719	-34,2719	-0,18182	0,27273		22,8479	Q25	c3/s
18				eq 7		-11,424	11,424	11,424	-34,2719	-79,9678	45,6959	-0,09091	-0,36364		11,424	Q54	c3/s
19				eq 8		-11,424	11,424	11,424	-34,2719	45,6959	-79,9678	-0,09091	-0,36364		11,424	Q56	c3/s



As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.

Montagem e solução do sistema de equações...



$$R_\mu = \frac{8\mu L}{\pi R^4} = \frac{8 \cdot 0,1 \cdot 50 \times 10^{-3}}{\pi (2 \times 10^{-3})^4} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{10^6 \text{ cm}^3} = 7,958 \times 10^{-3} \frac{\text{bar}}{\text{cm}^3/\text{s}}$$

$$P_0 - P_2 = R_\mu \cdot Q_{02}$$

$$P_2 - P_1 = R_\mu \cdot Q_{21}$$

$$P_2 - P_3 = R_\mu \cdot Q_{23}$$

$$P_2 - P_5 = R_\mu \cdot Q_{25}$$

$$P_5 - P_4 = R_\mu \cdot Q_{54}$$

$$P_5 - P_6 = R_\mu \cdot Q_{56}$$

$$Q_{02} = Q_{21} + Q_{23} + Q_{25}$$

$$Q_{25} = Q_{54} + Q_{56}$$

$$P_2 = 0,2727 \text{ bar}$$

$$P_5 = 0,0909 \text{ bar}$$

$$Q_{02} = 9,191,3918 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$Q_{21} = 34,2719 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$Q_{23} = 34,2719 \text{ cm}^3/\text{s}$$

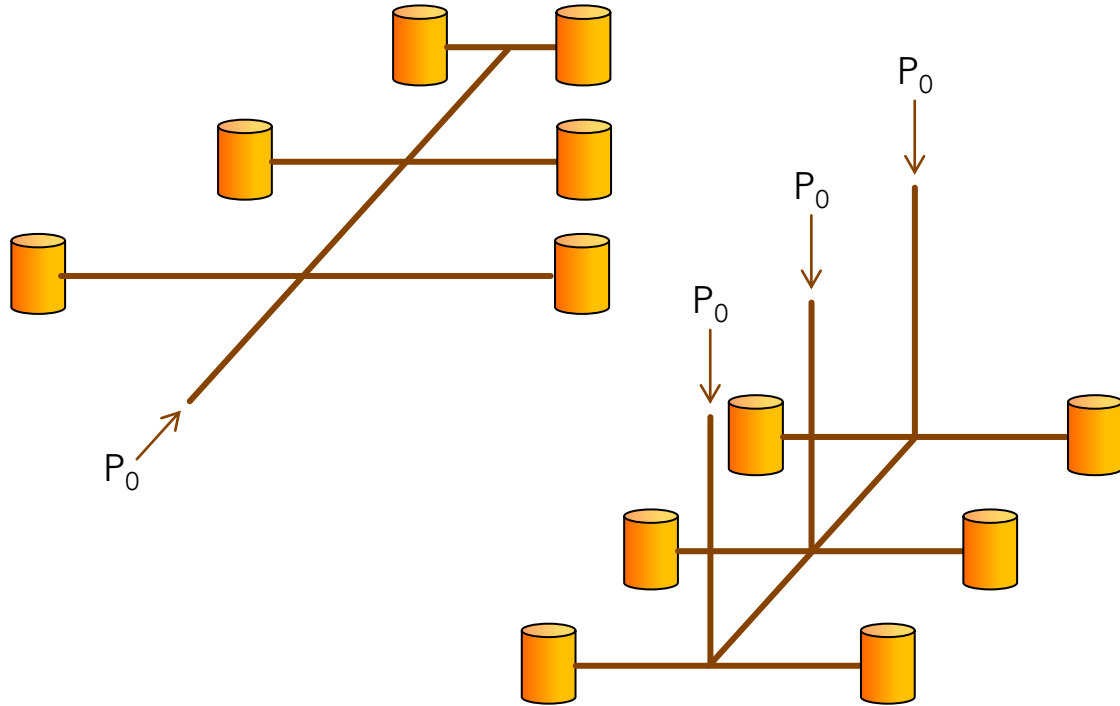
$$Q_{25} = 22,8479 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$Q_{54} = 11,4240 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$Q_{56} = 11,4240 \text{ cm}^3/\text{s}$$



Montagem e solução do sistema de equações...



$$R_{\mu} = \frac{8\mu L}{\pi R^4} = \frac{8 \cdot 0,1 \cdot 50 \times 10^{-3}}{\pi (2 \times 10^{-3})^4} \cdot \frac{1m^3}{10^6 cm^3} = 7,958 \times 10^{-3} \frac{bar}{cm^3/s}$$

$$P_0 - P_2 = R_{\mu} \cdot Q_{02}$$

$$P_2 - P_1 = R_{\mu} \cdot Q_{21}$$

$$P_2 - P_3 = R_{\mu} \cdot Q_{23}$$

$$P_2 - P_5 = R_{\mu} \cdot Q_{25}$$

$$P_5 - P_4 = R_{\mu} \cdot Q_{54}$$

$$P_5 - P_6 = R_{\mu} \cdot Q_{56}$$

$$Q_{02} = Q_{21} + Q_{23} + Q_{25}$$

$$Q_{25} = Q_{54} + Q_{56}$$

$$P_2 = 0,2727 bar$$

$$P_5 = 0,0909 bar$$

$$Q_{02} = 9,191,3918 cm^3/s$$

$$Q_{21} = 34,2719 cm^3/s$$

$$Q_{23} = 34,2719 cm^3/s$$

$$Q_{25} = 22,8479 cm^3/s$$

$$Q_{54} = 11,4240 cm^3/s$$

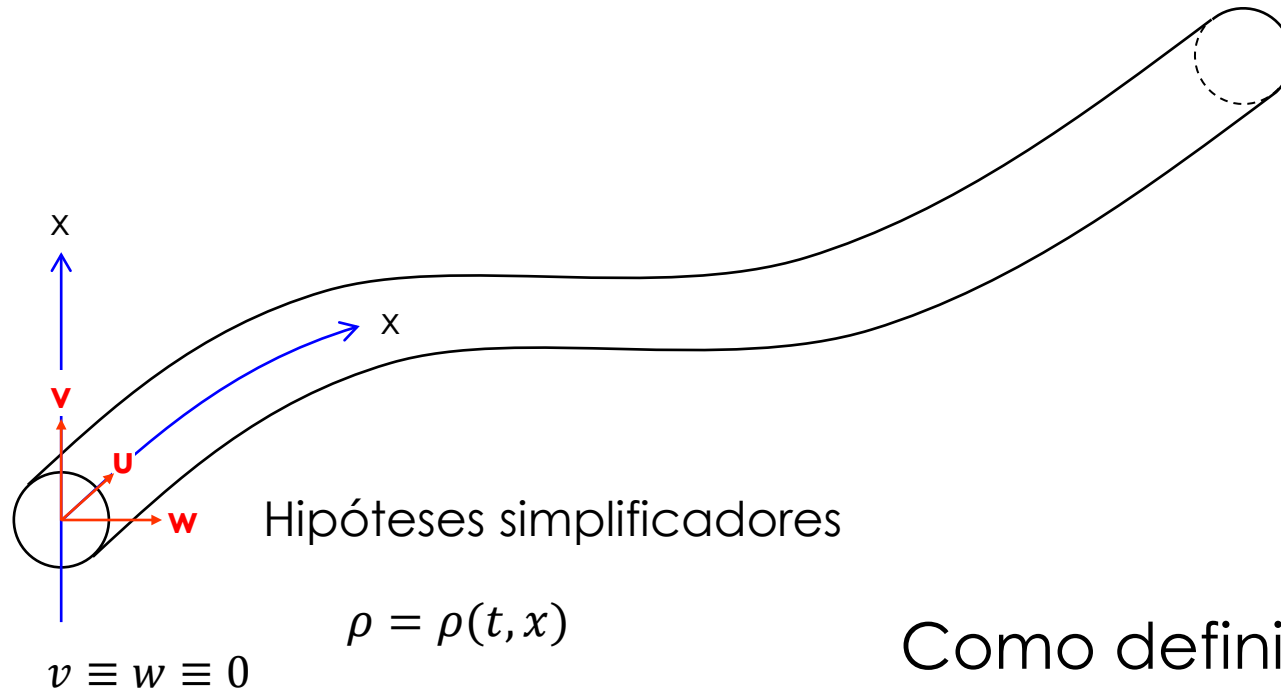
$$Q_{56} = 11,4240 cm^3/s$$



As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.

Dutos: $L \gg D \rightarrow$ efeitos de inércia são importantes...

Escoamento em dutos: obtenção das equações governantes...



Hipóteses simplificadores

$$v \equiv w \equiv 0$$

$$\rho = \rho(t, x)$$

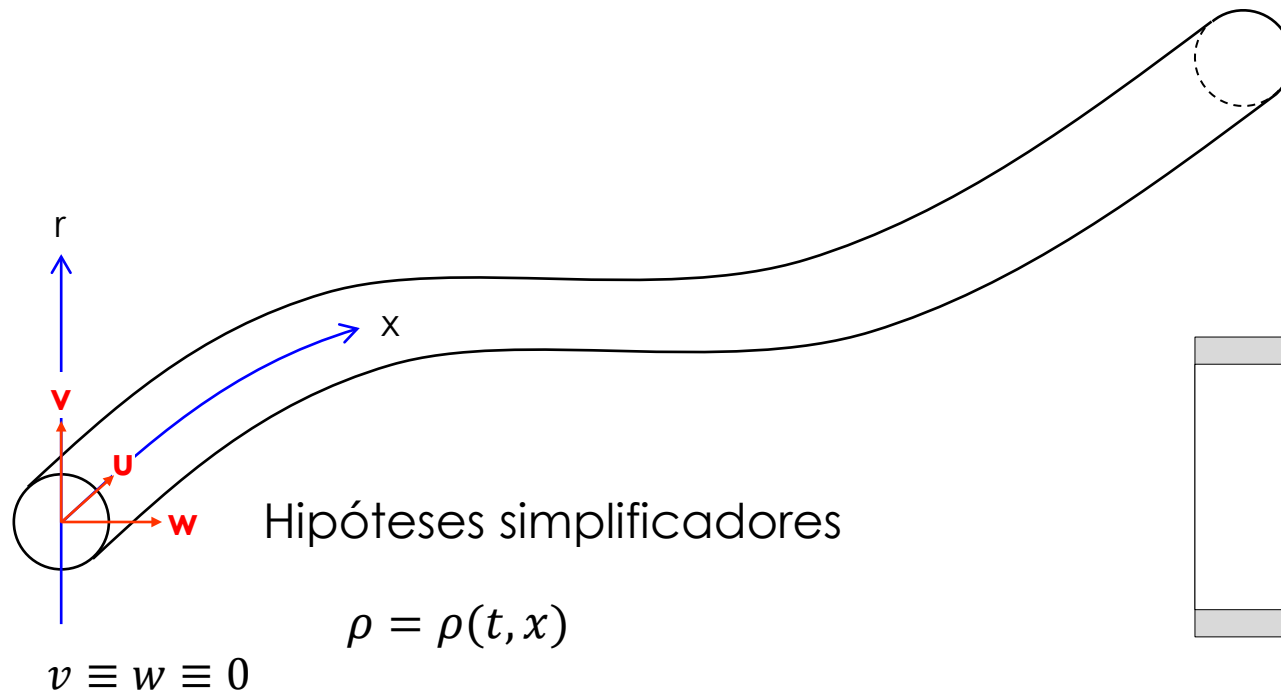
$$u = u(t, x)$$

Como definir uma velocidade média representativa do escoamento para cada posição ao longo do duto ?



As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.

Escoamento em dutos: obtenção das equações governantes...

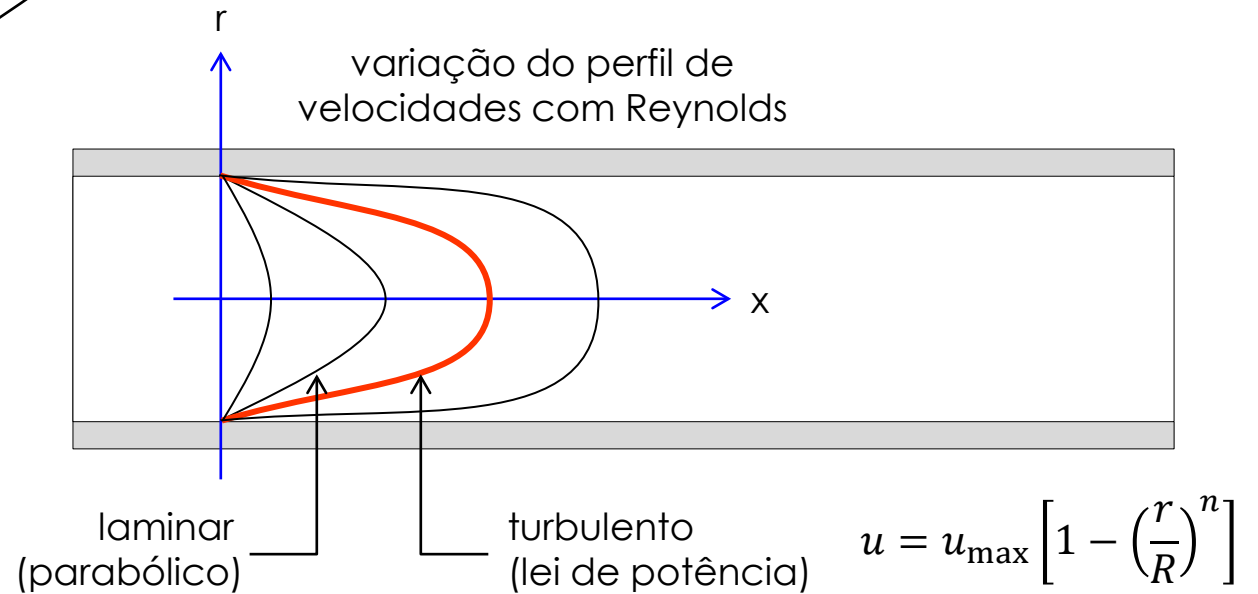


Hipóteses simplificadores

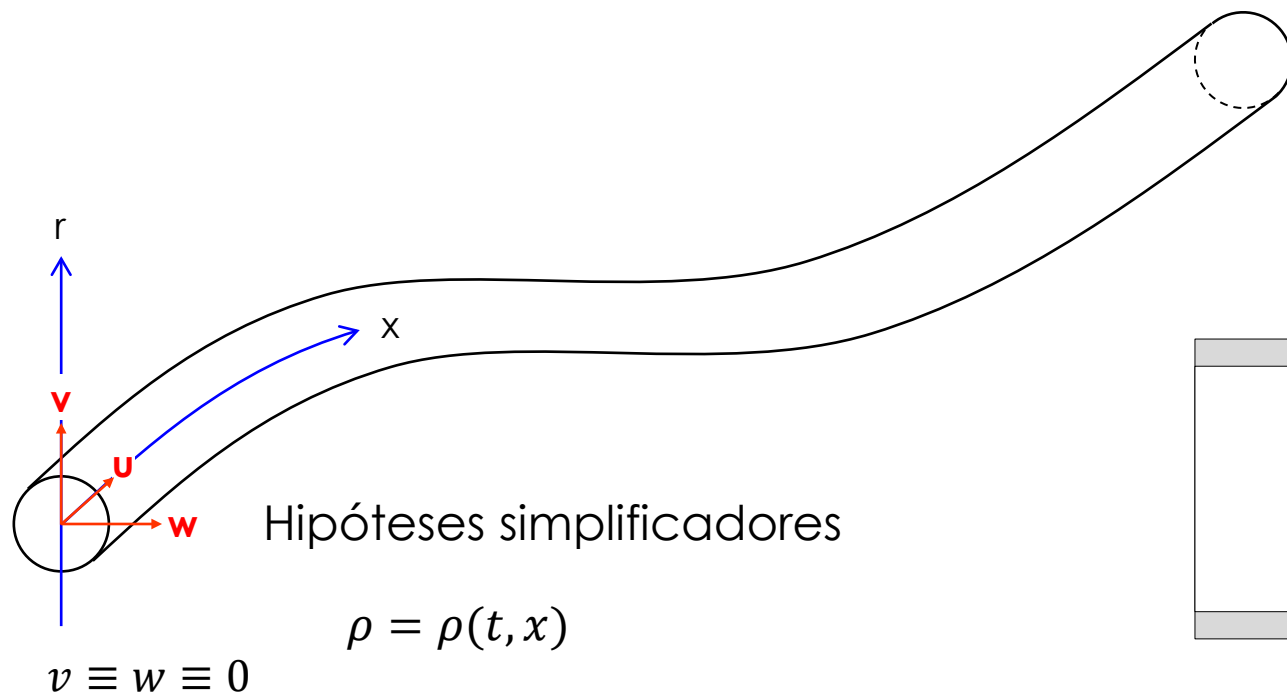
$$v \equiv w \equiv 0$$

$$\rho = \rho(t, x)$$

$$u = u(t, x)$$



Escoamento em dutos: obtenção das equações governantes...

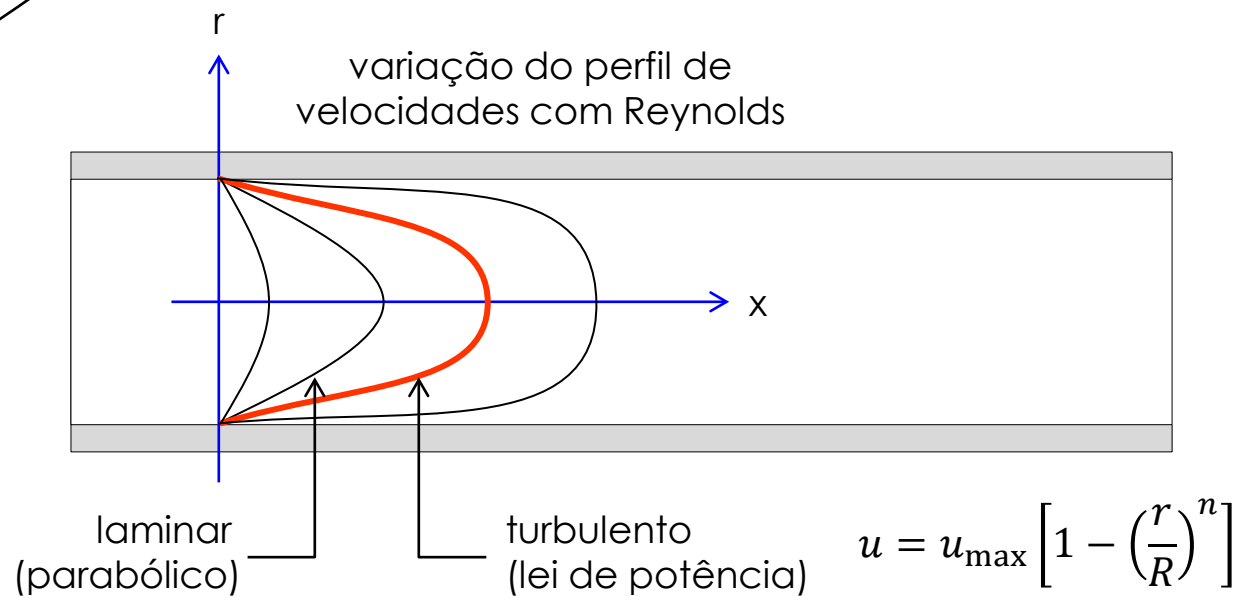


Hipóteses simplificadores

$$\rho = \rho(t, x)$$

$$v \equiv w \equiv 0$$

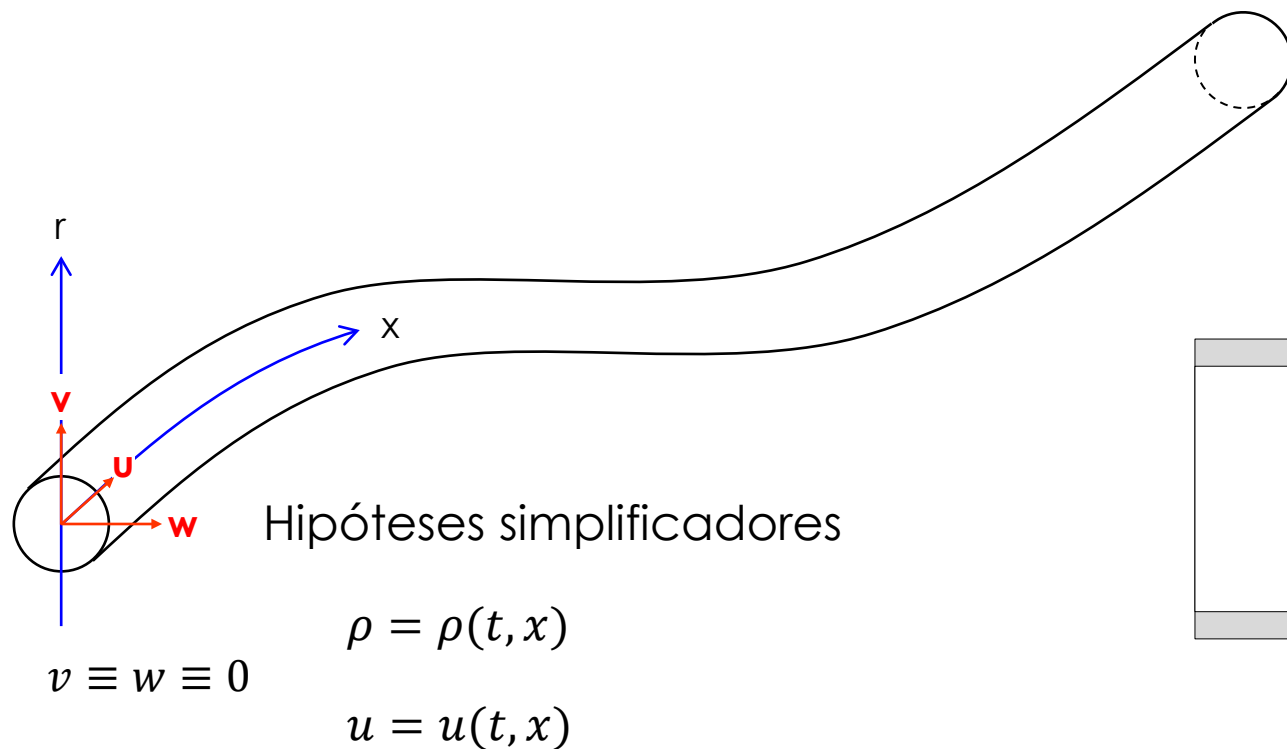
$$u = u(t, x)$$



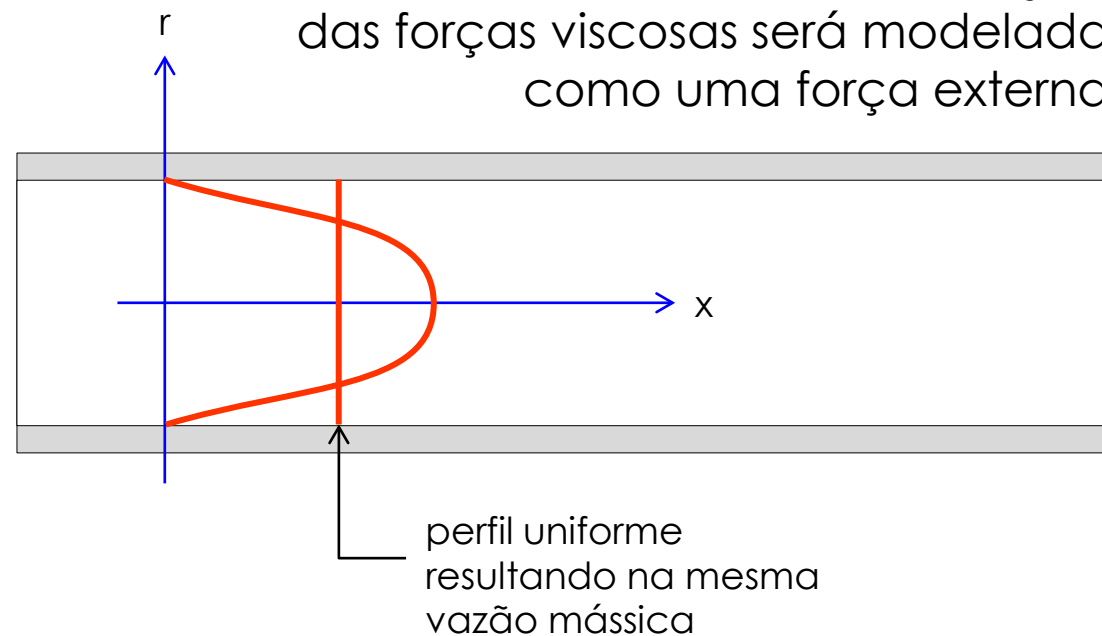
$$\dot{m} = \rho \int_A u(x, r) \cdot dA = \rho \frac{A}{A} \int_A u(x, r) \cdot dA = \rho \cdot u_{med}(x) \cdot A$$



Escoamento em dutos: obtenção das equações governantes...



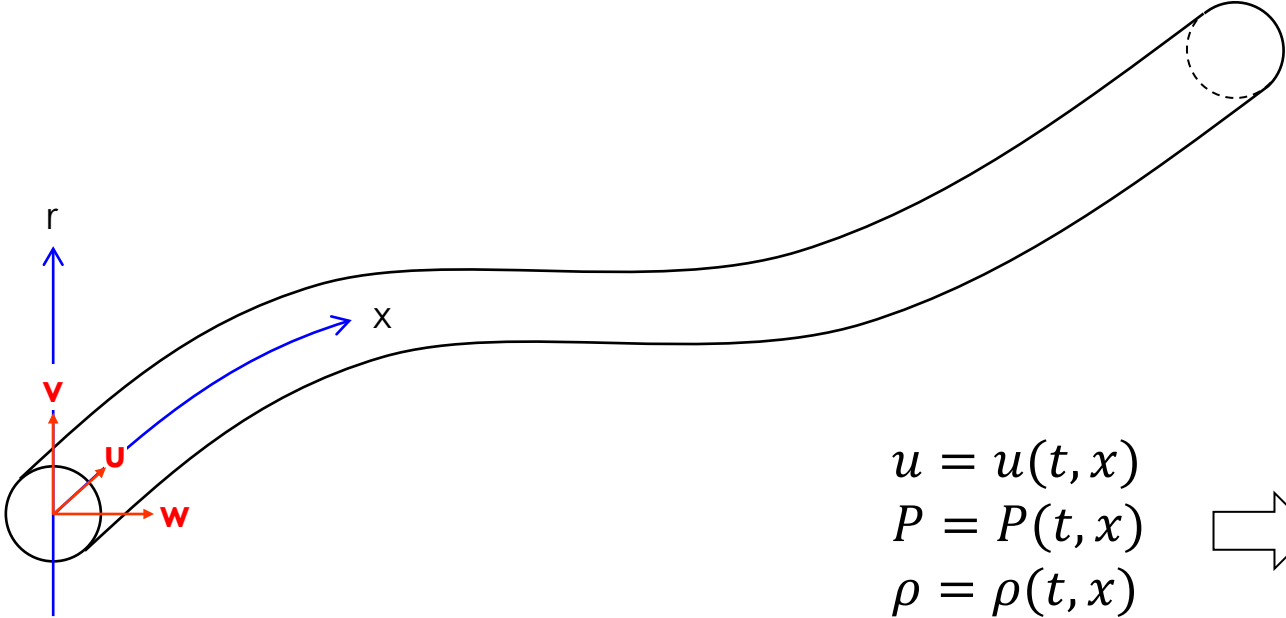
Obs.: não havendo escorregamento entre as camadas de fluido, a ação das forças viscosas será modelada como uma força externa



$$u_{med}(x) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{A} \int_A u(t, x, r) \cdot dA \rightarrow u(t, x)$$



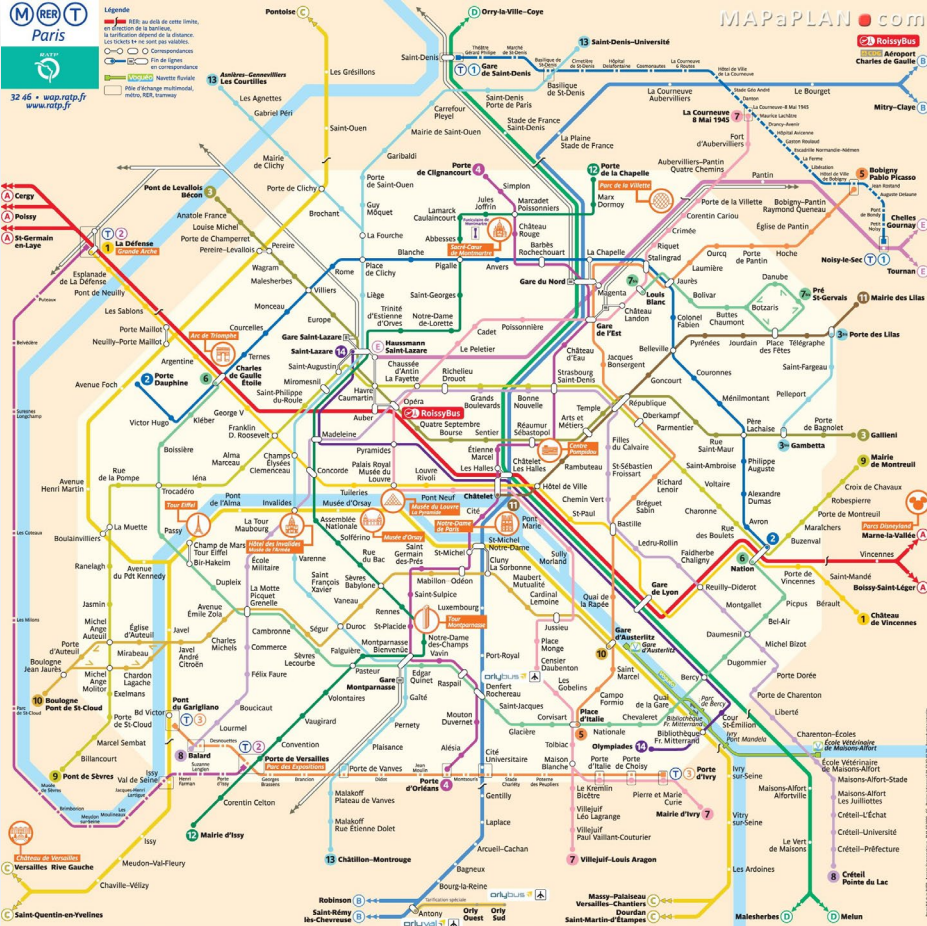
Escoamento em dutos: obtenção das equações governantes...



$$u = u(t, x)$$
$$P = P(t, x)$$
$$\rho = \rho(t, x)$$

Equações especializadas (caminho para a solução)

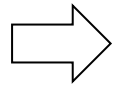
Obs.: a densidade pode ser calculada em função da pressão e temperatura



As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.

Escoamento em dutos: obtenção das equações governantes...

$$\begin{aligned}u &= u(t, x) \\ P &= P(t, x) \\ \rho &= \rho(t, x)\end{aligned}$$



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{U}) = 0$$

$$\rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

Derivada material: derivada tomada ao longo de um caminho movendo-se com velocidade u

$$\frac{D\odot}{Dt} = \frac{\partial \odot}{\partial t} + u \frac{\partial \odot}{\partial x}$$

Módulo de elasticidade volumétrica de um fluido (compressibilidade)

$$K = \frac{\Delta P}{\Delta Vol / Vol} = \frac{\Delta P}{\rho / \Delta \rho}$$

Velocidade de propagação de pequenas perturbações acústicas (isentrópica)

$$a^2 = \frac{K}{\rho}$$

$$\rightarrow \frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{K} \frac{DP}{Dt} + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \rightarrow$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$



As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.

Escoamento em dutos: obtenção das equações governantes...

$$\begin{aligned}
 u &= u(t, x) \\
 P &= P(t, x) \\
 \rho &= \rho(t, x)
 \end{aligned}
 \Rightarrow
 \rho \cdot \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{u} + \Sigma \vec{F}_{3D}
 \rightarrow
 \rho \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \sum \vec{F}_{3D}$$

Força gravitacional exercida sobre o fluido em função da inclinação da tubulação em relação à horizontal

$$F_g = \rho g \sin \theta$$

Como não há deslizamento entre as camadas de fluido a ação das forças viscosas pode ser modelada pela equação de Darcy-Weisbach

$$F_\mu = \pm f \cdot \frac{\rho}{D} \cdot \frac{u^2}{2} \rightarrow F_\mu = f \cdot \frac{\rho}{D} \cdot \frac{u \cdot |u|}{2}$$

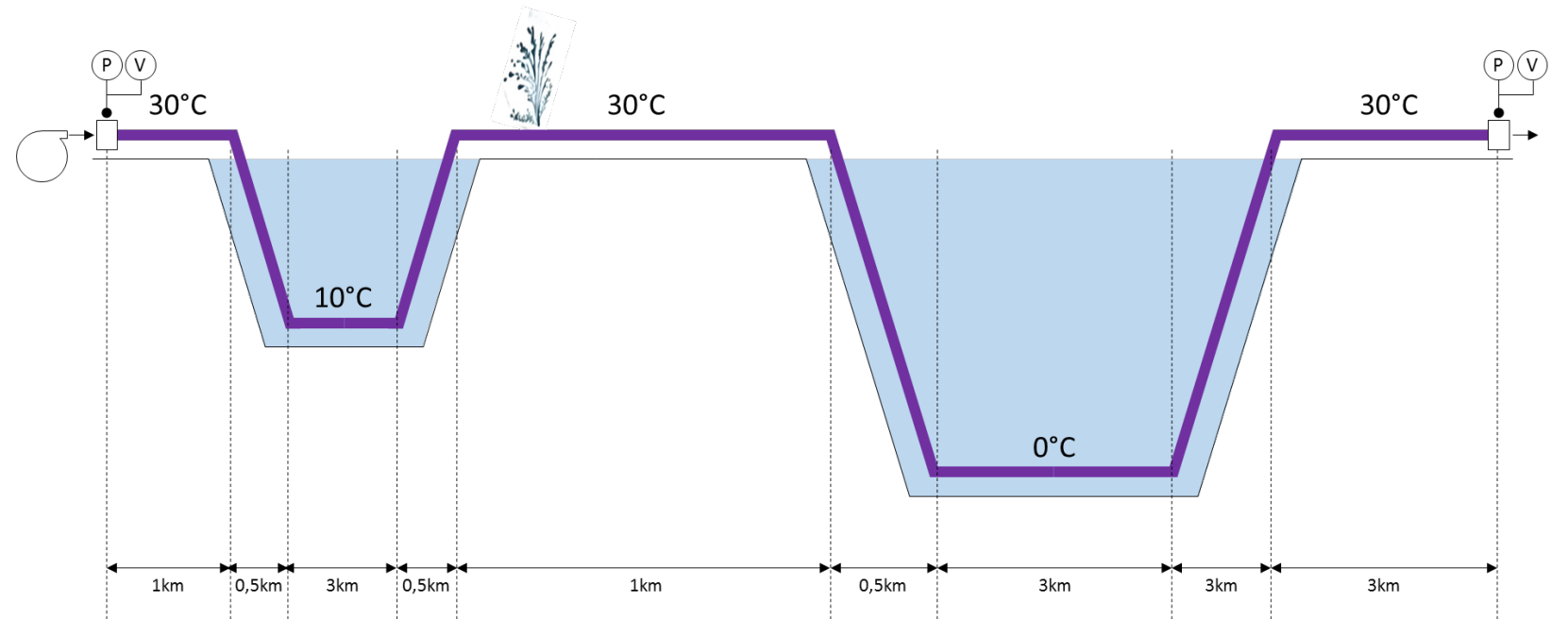
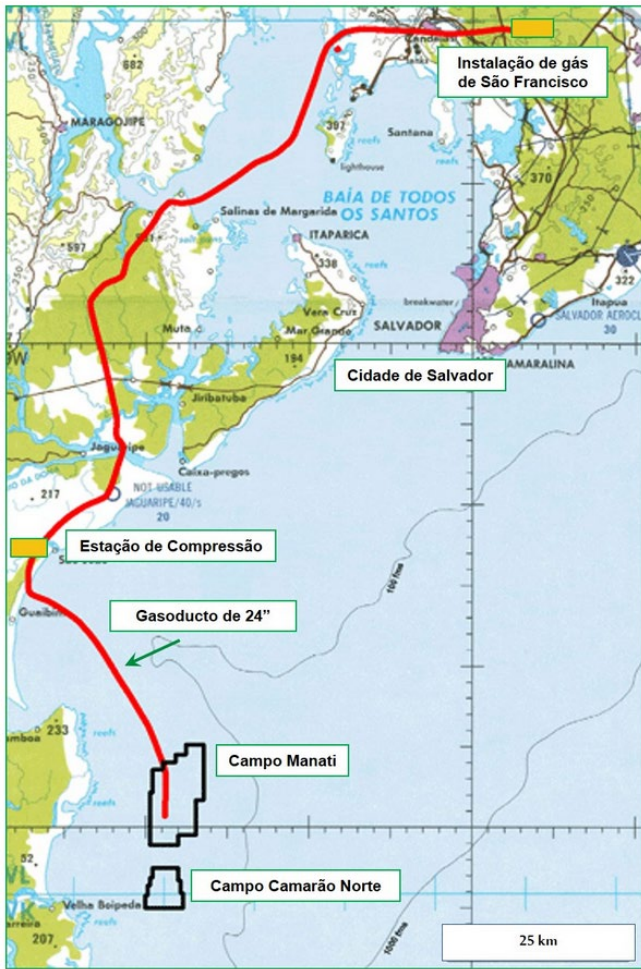


$$\rho \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \sum \vec{F}_{3D} \rightarrow \frac{\partial u}{\partial t} + \cancel{u \cdot \frac{\partial u}{\partial x}} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \sin \theta + f \cdot \frac{u|u|}{2D} = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

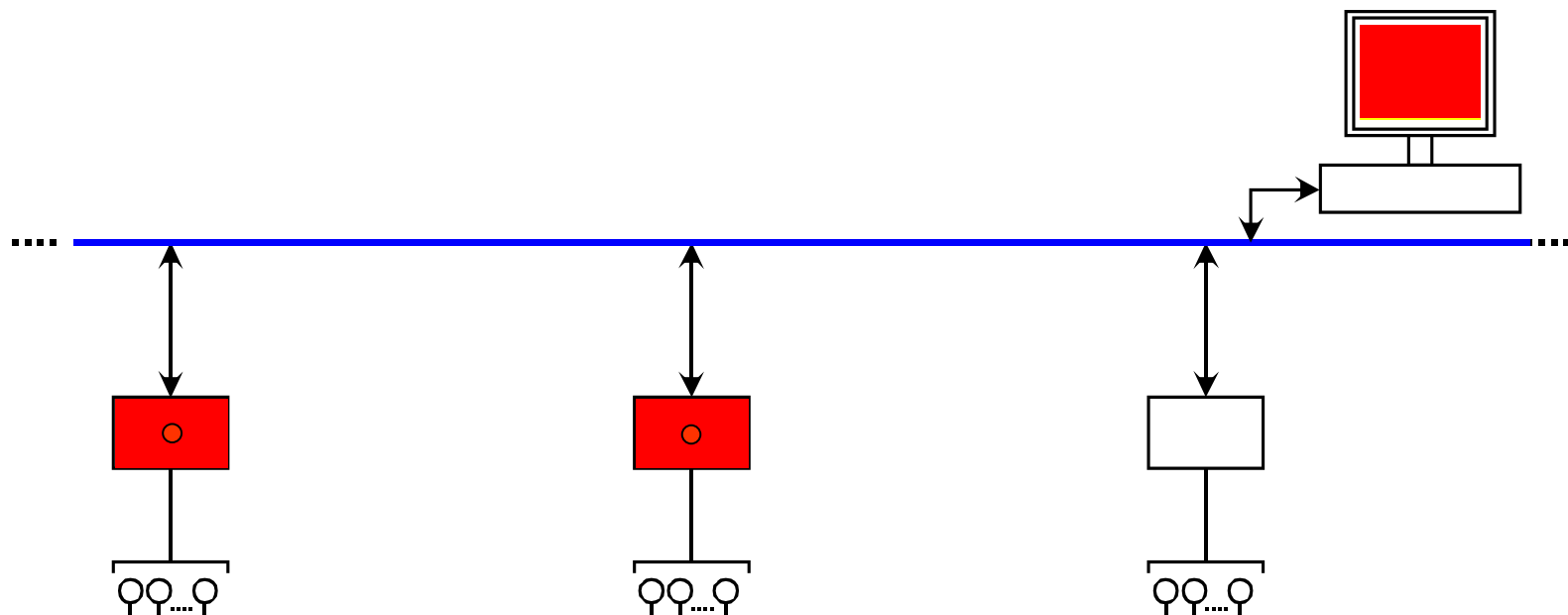
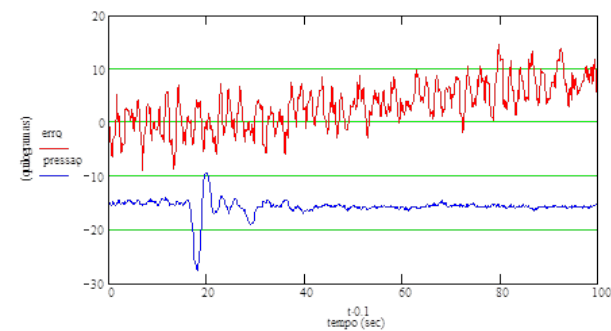
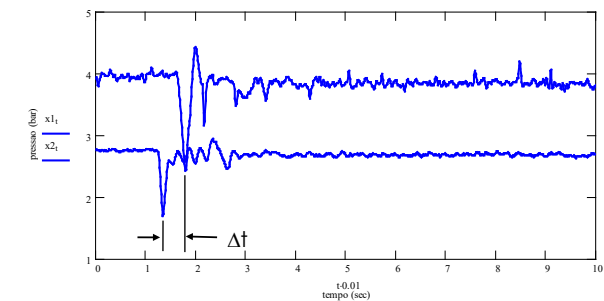
$$u \ll a \rightarrow \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \sin \theta + f \cdot \frac{u|u|}{2D} = 0$$

Exemplo real: detecção de vazamentos em
oleodutos e gasodutos...

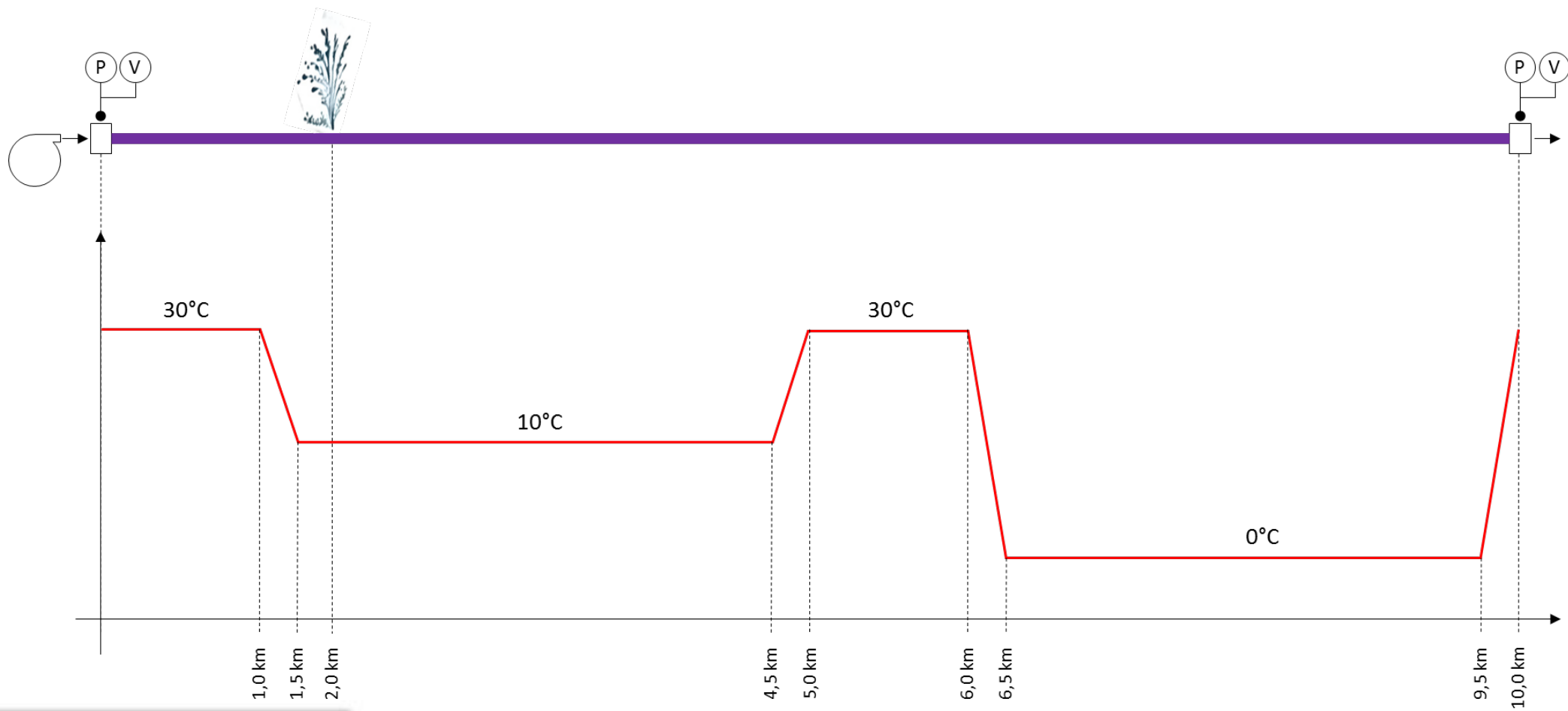




Arquitetura de um sistema de detecção passiva de vazamentos...



As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.



As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.

Simulador “faster than real time”...

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

$$\left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \vec{u} \right) = -\vec{\nabla} P + \frac{1}{Re} \nabla^2 \vec{u} + \Sigma \frac{1}{R_k} F_k$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} T \right) = \frac{1}{Re Pr} \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) + \frac{E}{Re} \Phi(\vec{u})$$



$$\frac{\partial P}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

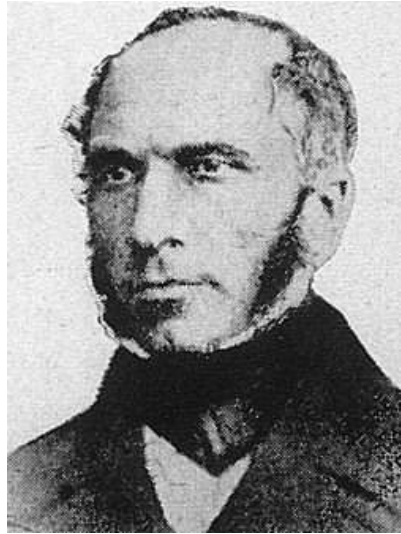
$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \sin \theta + f \cdot \frac{u|u|}{2D} = 0$$



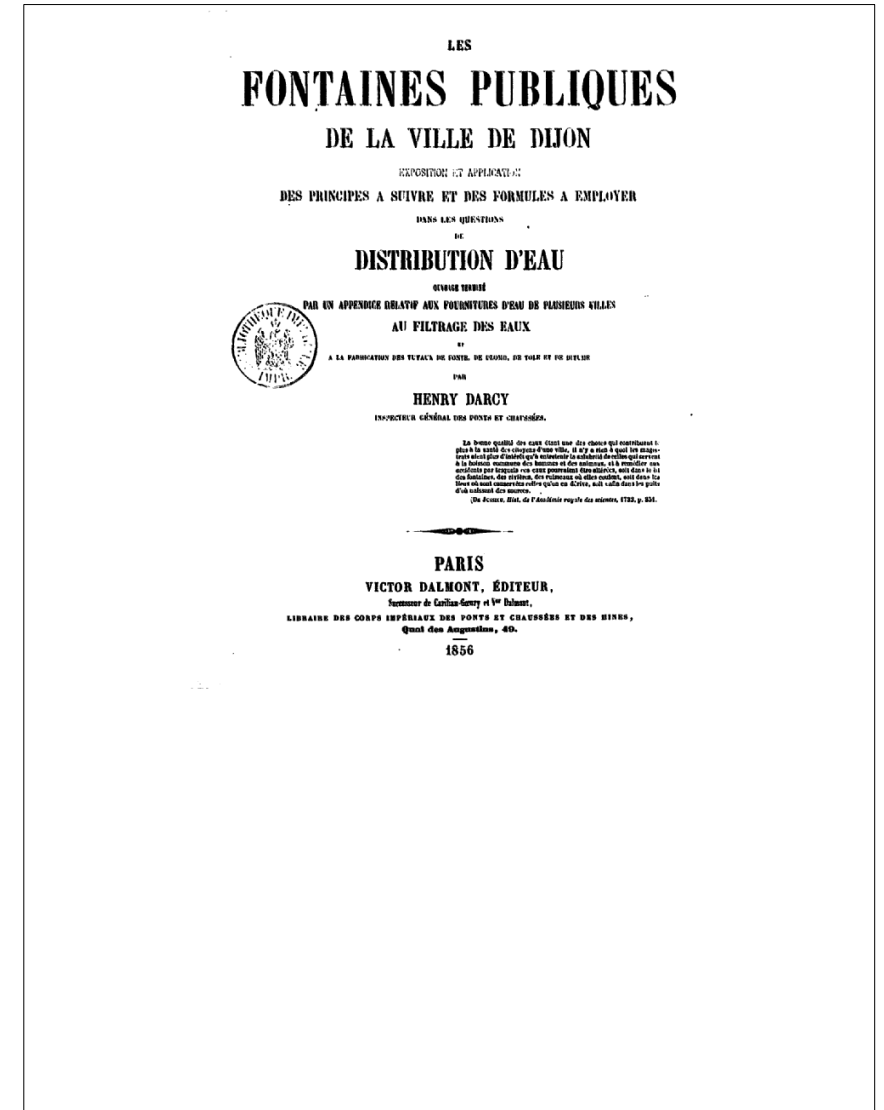
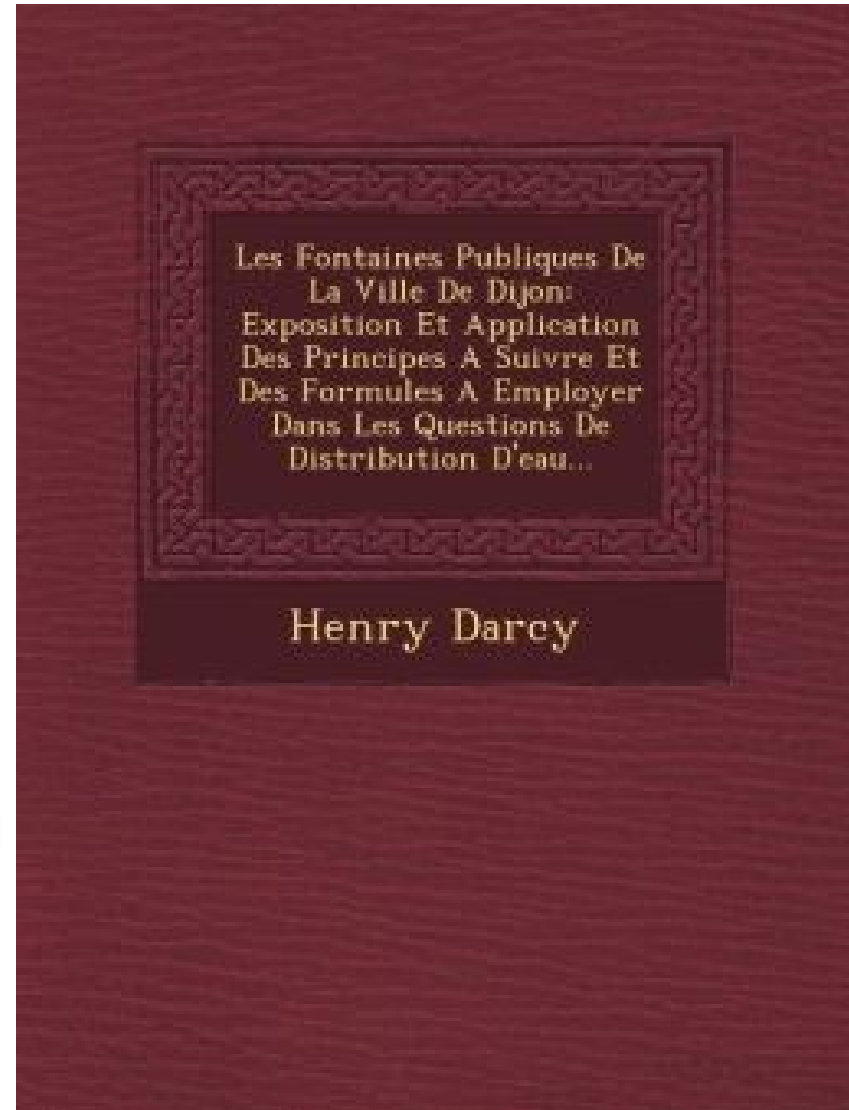
As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.

Abordagem histórica: Darcy-Weisbach...

A equação de Darcy-Weisbache e o cálculo do fator de atrito...



Henry Darcy



As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.

A equação de Darcy-Weisbach e o cálculo do fator de atrito...

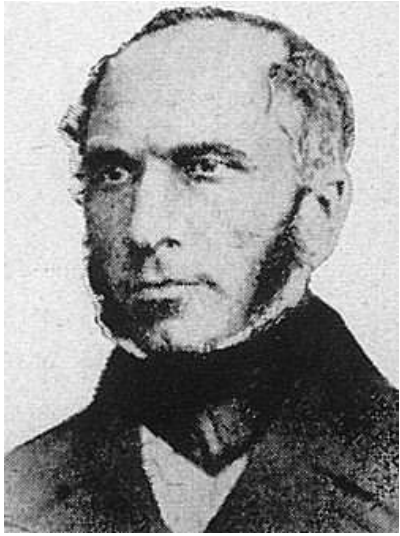


Henry Darcy

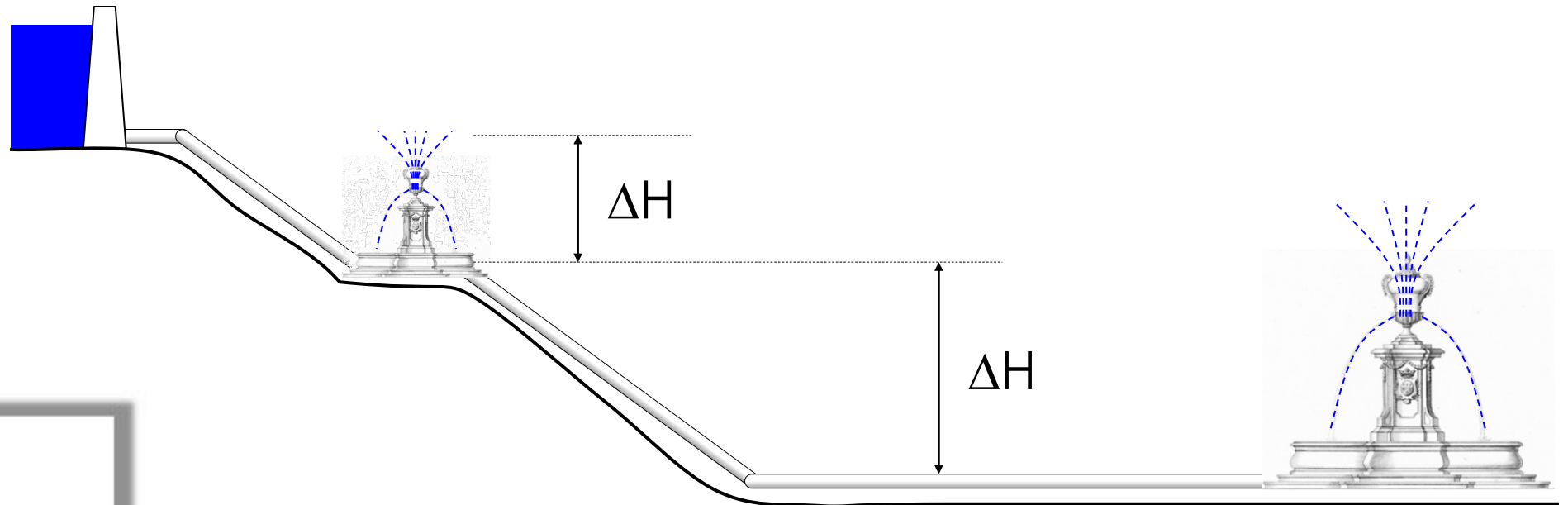


As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.

A equação de Darcy-Weisbach e o cálculo do fator de atrito...



Henry Darcy

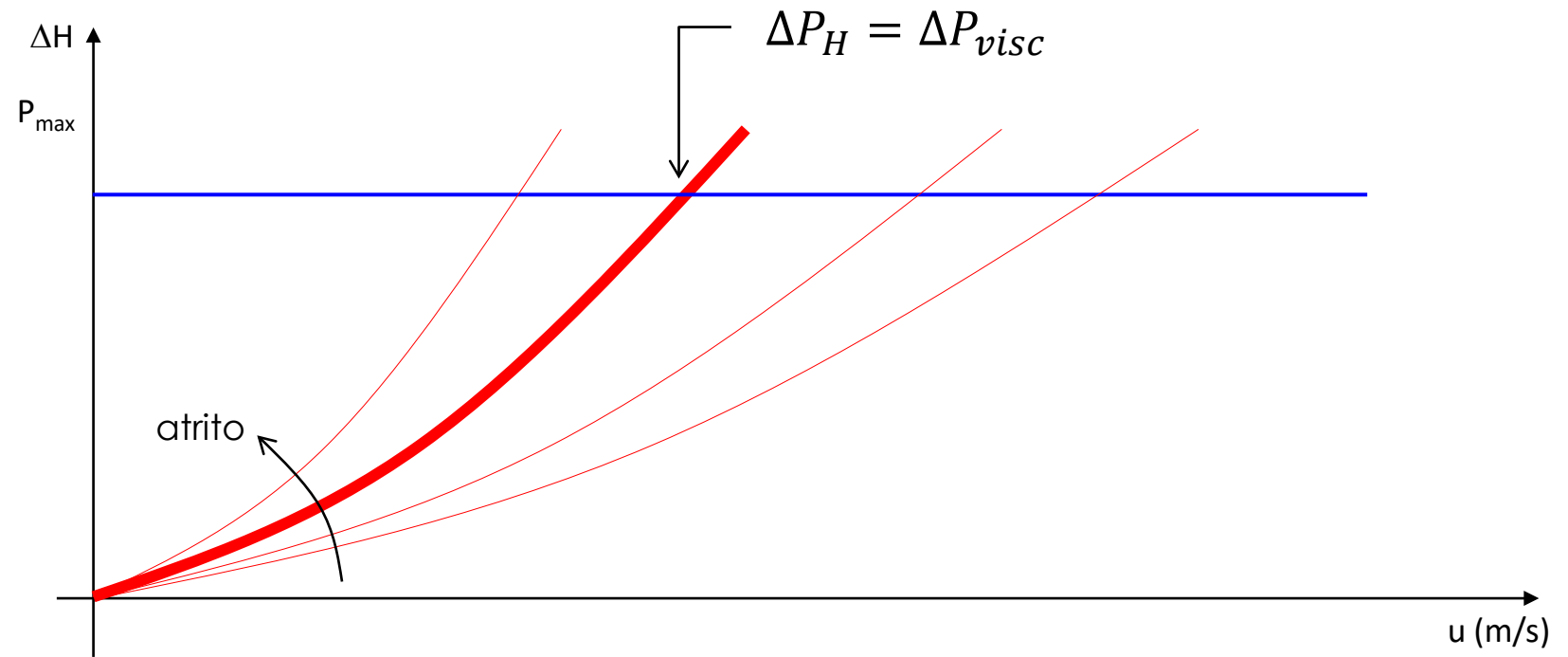


As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.

A equação de Darcy-Weisbach e o cálculo do fator de atrito...



Henry Darcy



$$\Delta P_{visc} \stackrel{\text{def}}{=} f \cdot \frac{L}{D} \cdot \rho \frac{V^2}{2} \rightarrow f = f(Re, e/D)$$

fator de atrito



As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.

A equação de Darcy-Weisbach e o cálculo do fator de atrito...

Laminar ($Re < 2500$)

$$f = \frac{64}{Re}$$

Turbulento ($Re > 4000$)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(3.7 \frac{e}{D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

...Colebrook-White

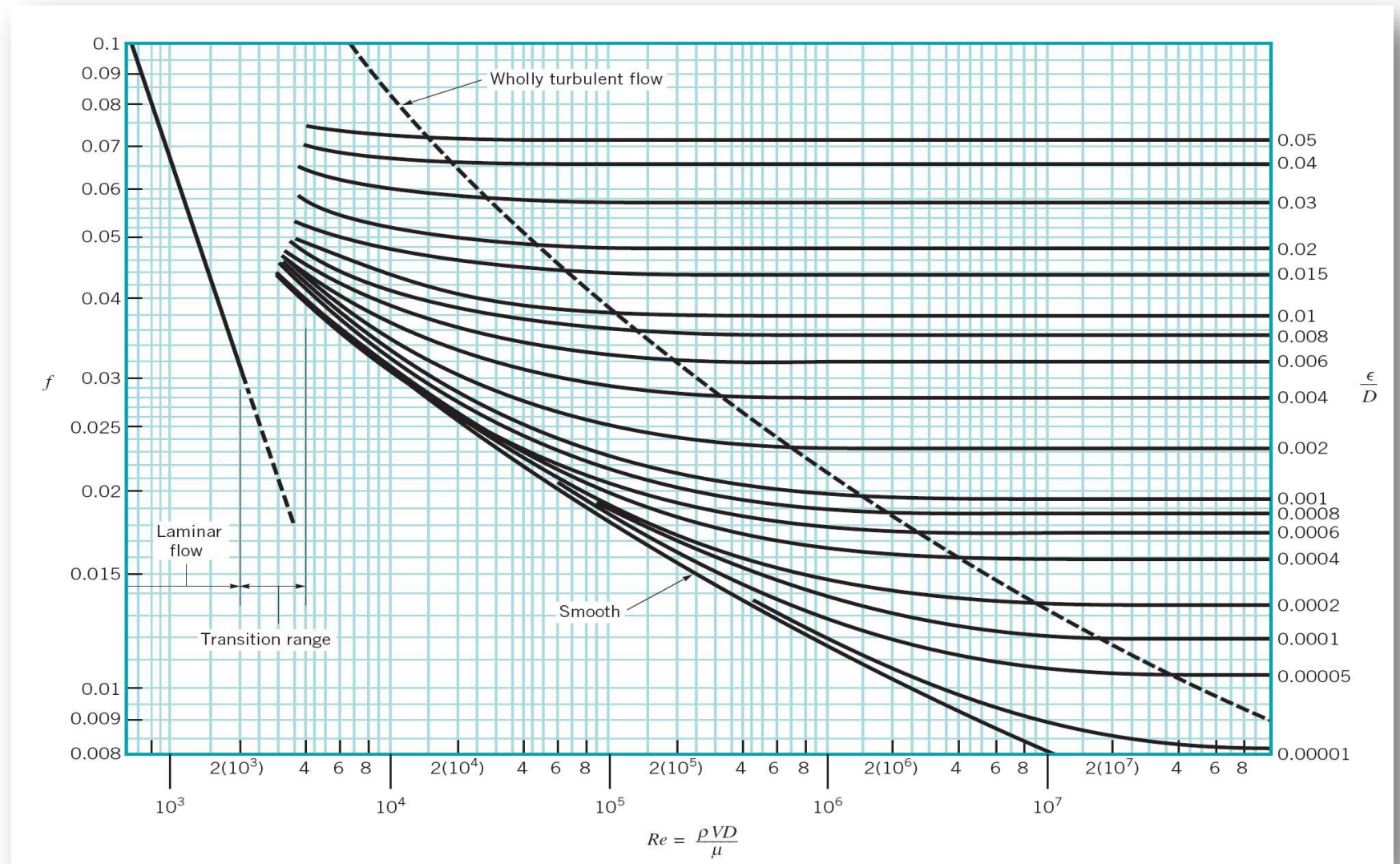
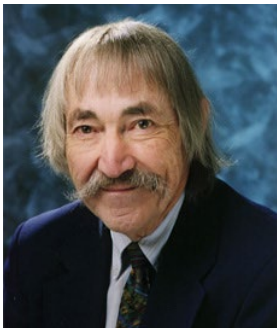


Diagrama de Moody



As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.

A equação de Darcy-Weisbach e o cálculo do fator de atrito...

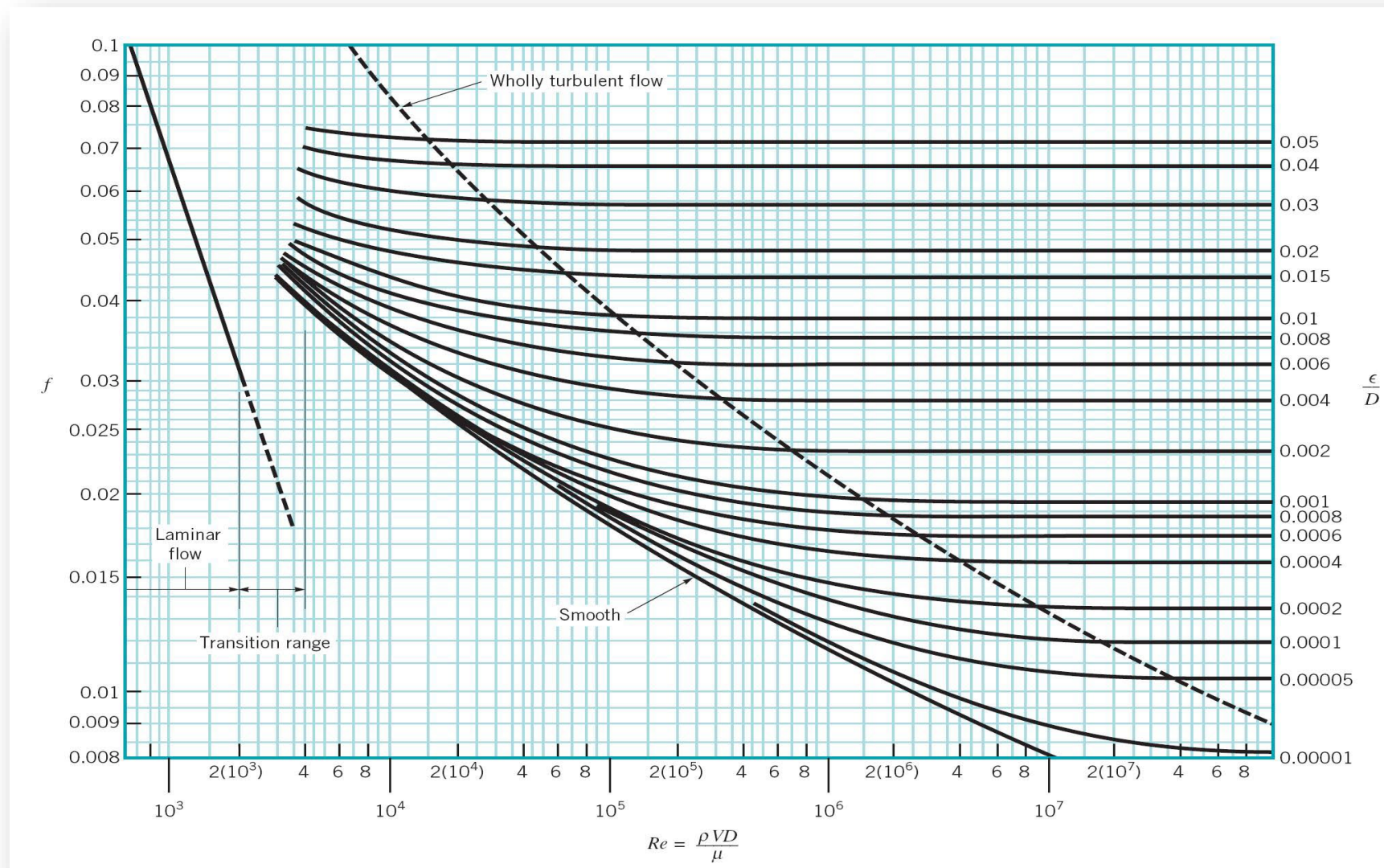


Stuart W. Churchill

$$f = 8 \cdot \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + (A + B)^{-1,5} \right]^{1/12}$$

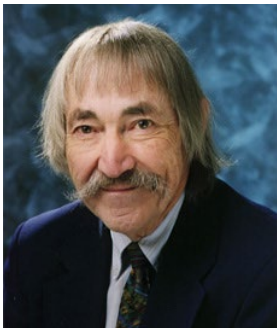
$$A = \left\{ 2,457 \ln \left[\left(\left(\frac{7}{Re} \right)^{0,9} + 0,27 \cdot \frac{\epsilon}{D} \right)^{-1} \right] \right\}^{16} \quad B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16}$$

$$Re = \frac{4 \cdot m}{\mu \pi D}$$



As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.

A equação de Darcy-Weisbach e o cálculo do fator de atrito...



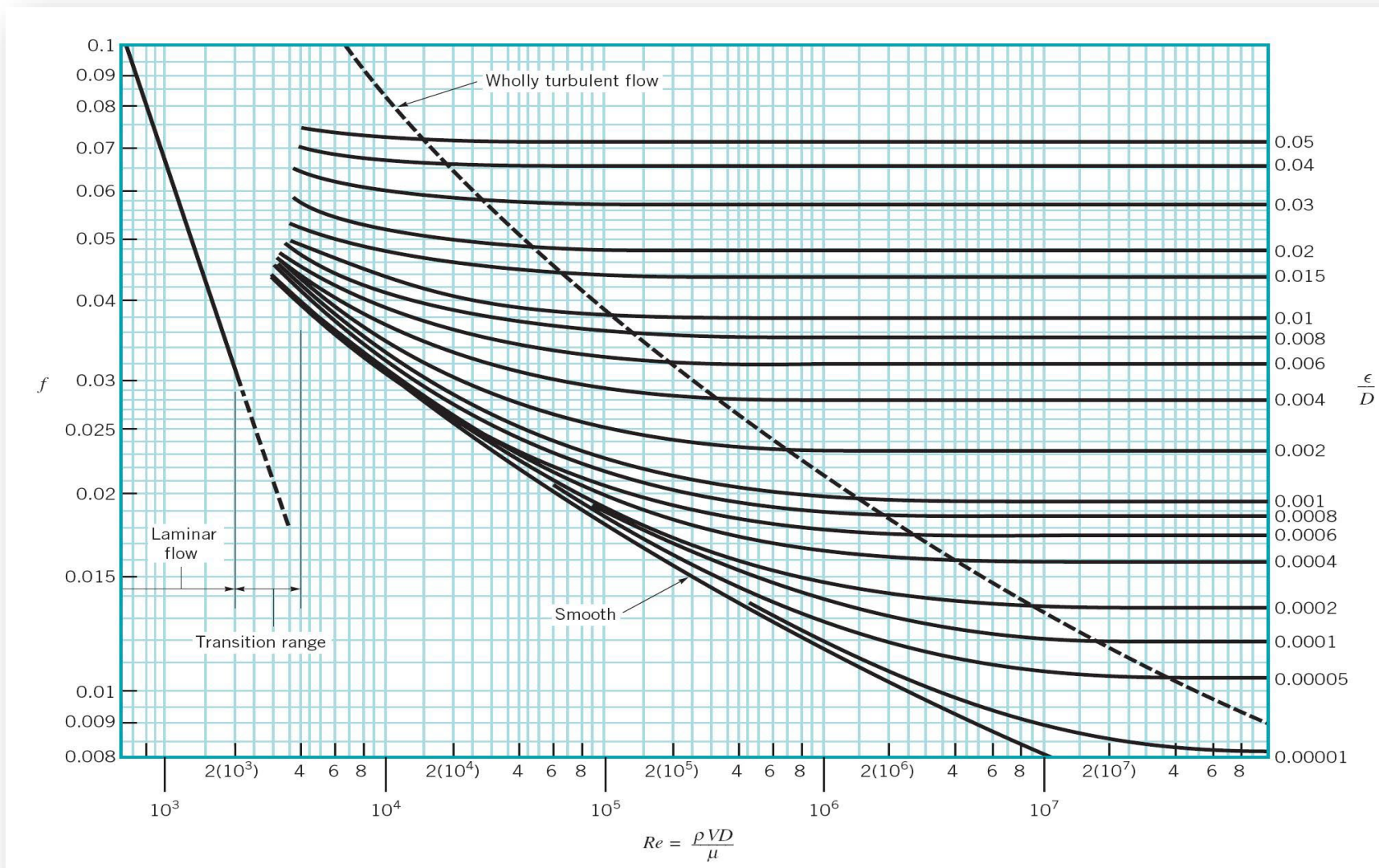
Stuart W. Churchill



$$f = 8 \cdot \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + (A + B)^{-1,5} \right]^{1/12}$$

$$A = \left\{ 2,457 \ln \left[\left(\left(\frac{7}{Re} \right)^{0,9} + 0,27 \cdot \frac{\epsilon}{D} \right)^{-1} \right] \right\}^{16} \quad B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16}$$

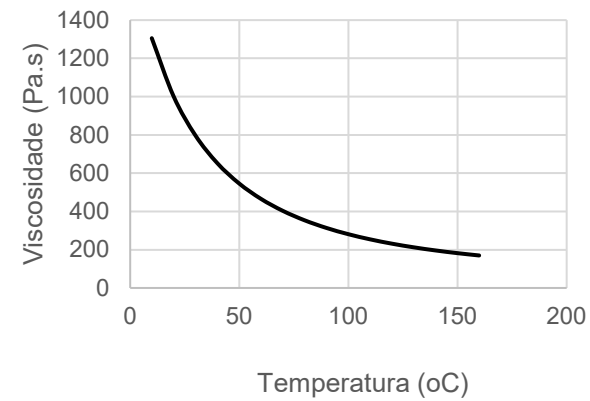
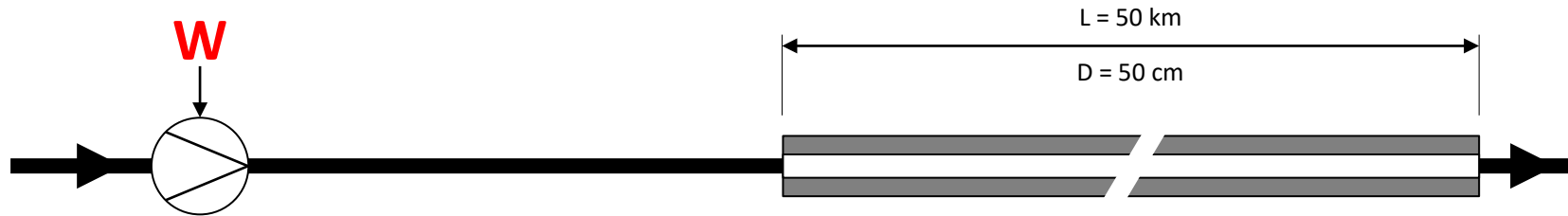
$$Re = \frac{4 \cdot m}{\mu \pi D}$$



As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.

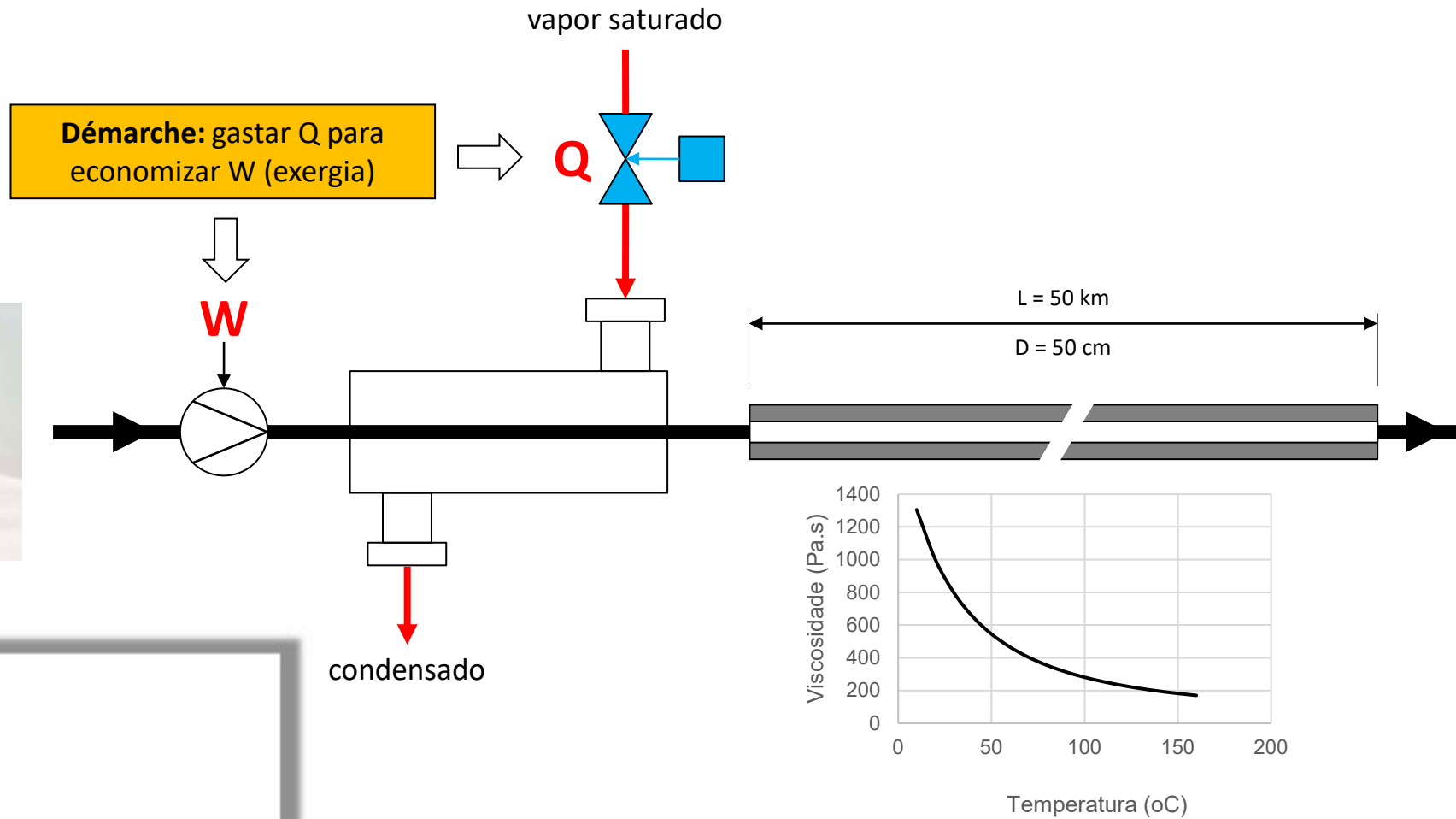
Aplicação: bombeamento de óleo pesado...

Exemplo: bombeamento de óleo ultra viscoso...



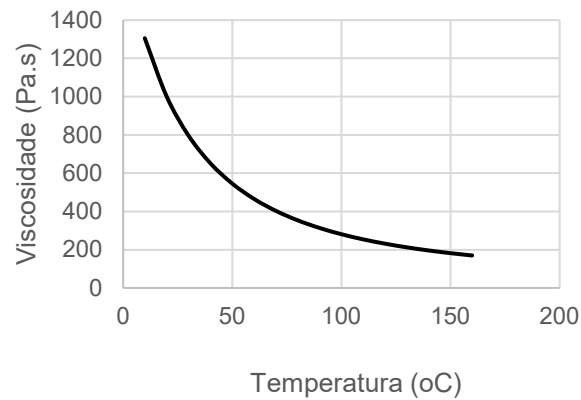
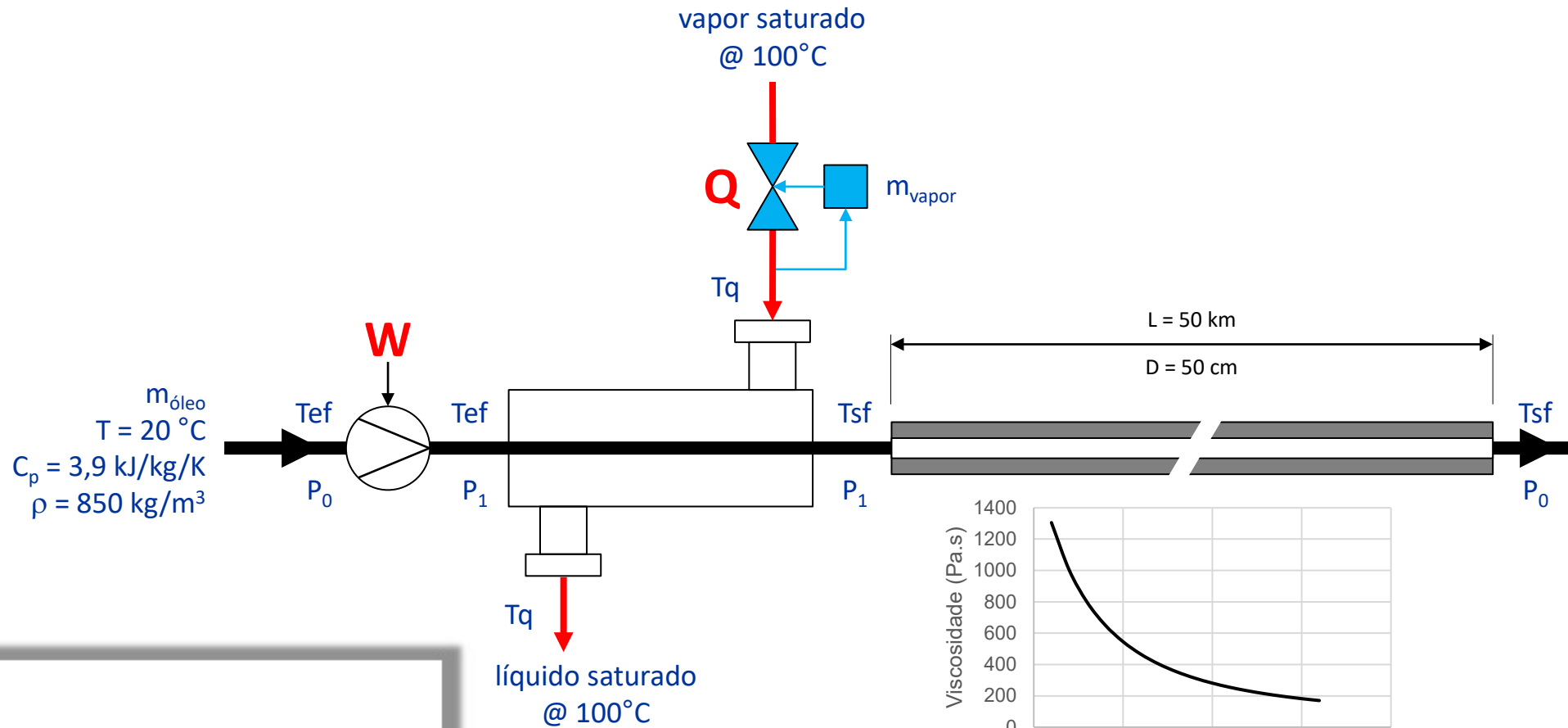
As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.

Exemplo: bombeamento de óleo ultra viscoso...



As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.

Exemplo: bombeamento de óleo ultra viscoso...



$$\mu(T) = 6.7109 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 - 2.9844 \cdot 10^{-3} \cdot T^3 + \dots$$

$$\dots + 5.0341 \cdot 10^{-1} \cdot T^2 - 4.0864 \cdot 10^{+1} \cdot T + 1.6546 \cdot 10^{+3} \quad [\mu] = \text{Pa} \cdot \text{s}, [T] = \text{°C}$$

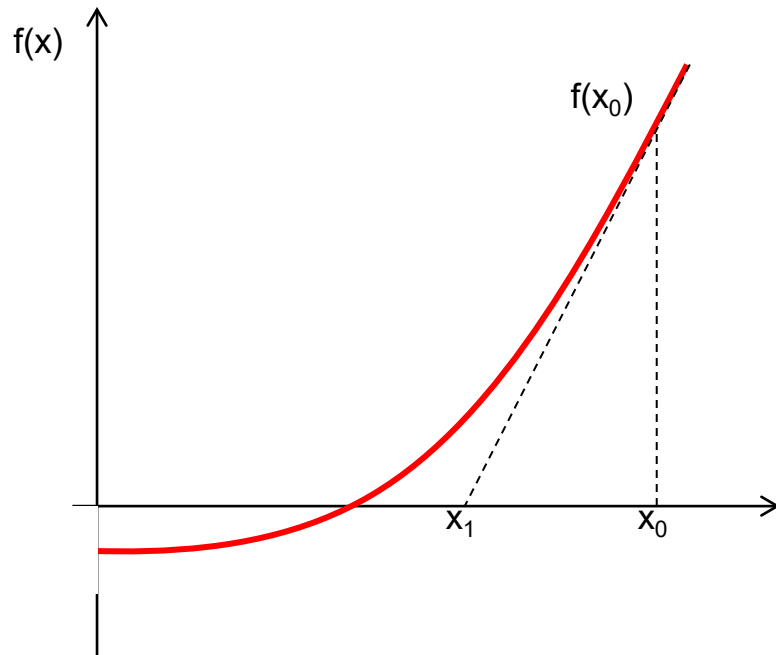
Solução de Equações Não Lineares

NEWTON – RAPHSON



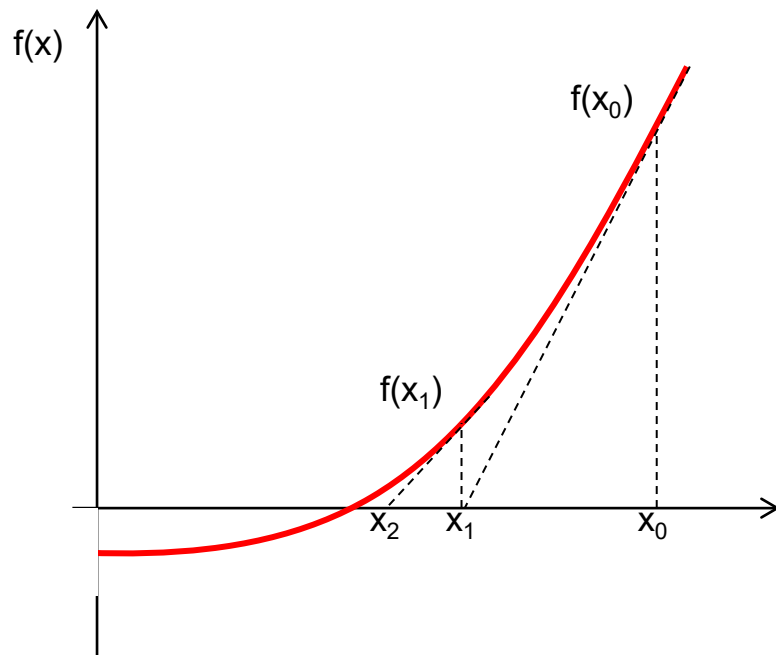
As questões postadas no Chat do YouTube
serão respondidas ao final da aula.

Solução: método de Newton-Raphson 1D



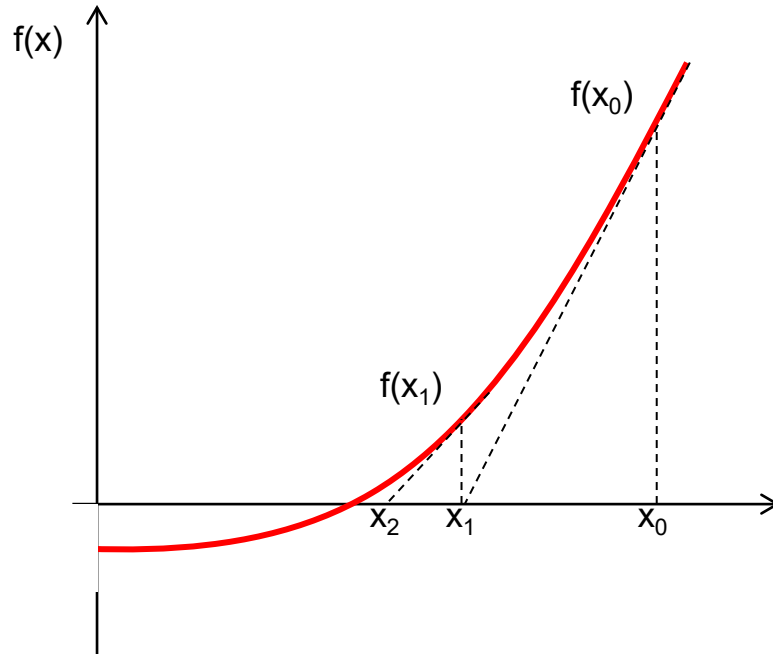
As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.

Solução: método de Newton-Raphson 1D



As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.

Solução: método de Newton-Raphson 1D



Equação da reta tangente:

$$y = a \cdot x + b$$

$$a = f'(x_0)$$

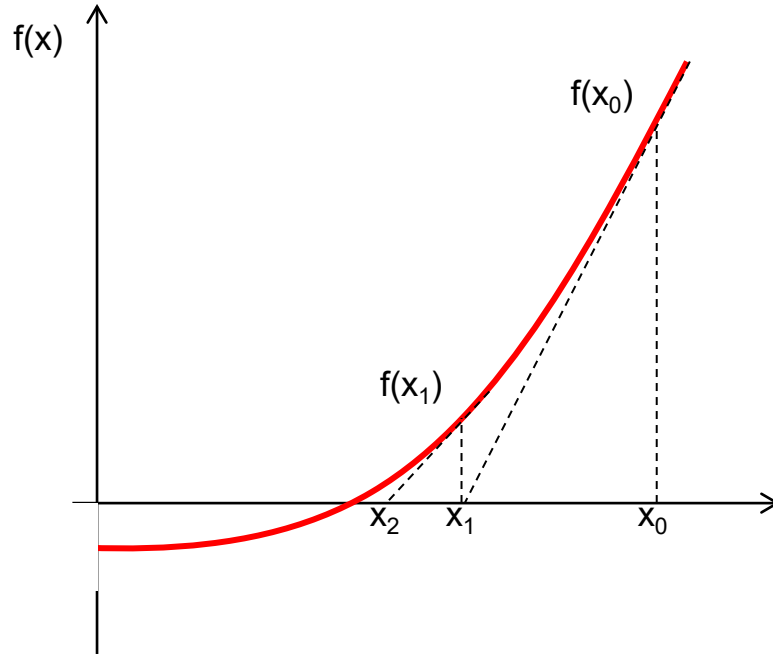
$$f(x_0) = f'(x_0) \cdot x_0 + b$$

$$b = f(x_0) - f'(x_0) \cdot x_0$$



As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.

Solução: método de Newton-Raphson 1D



Equação da reta tangente:

$$y = a \cdot x + b$$

$$a = f'(x_0)$$

$$f(x_0) = f'(x_0) \cdot x_0 + b$$

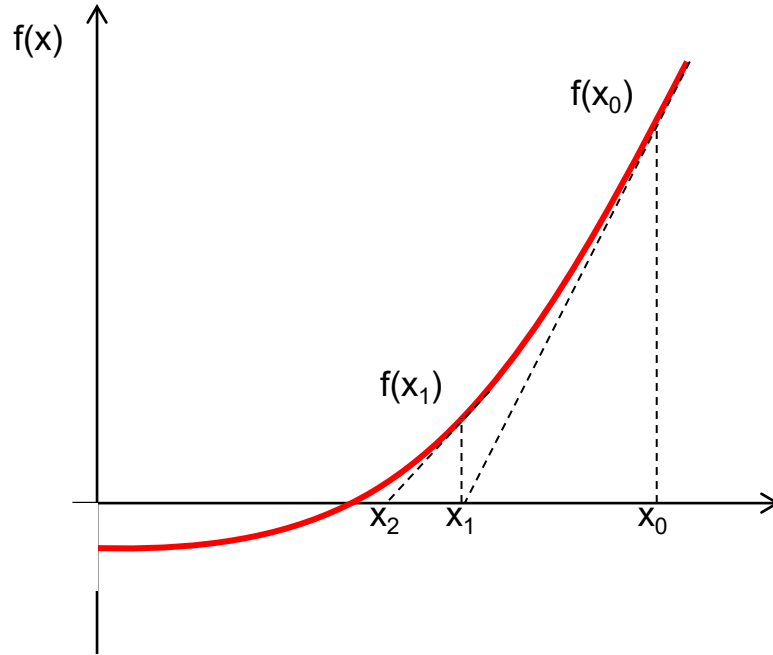
$$b = f(x_0) - f'(x_0) \cdot x_0$$

Raiz da reta tangente:

$$x = -b/a$$

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$$

Solução: método de Newton-Raphson 1D



Equação da reta tangente:

$$y = a \cdot x + b$$

$$a = f'(x_0)$$

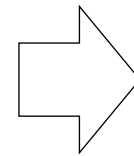
$$f(x_0) = f'(x_0) \cdot x_0 + b$$

$$b = f(x_0) - f'(x_0) \cdot x_0$$

Raiz da reta tangente:

$$x = -b/a$$

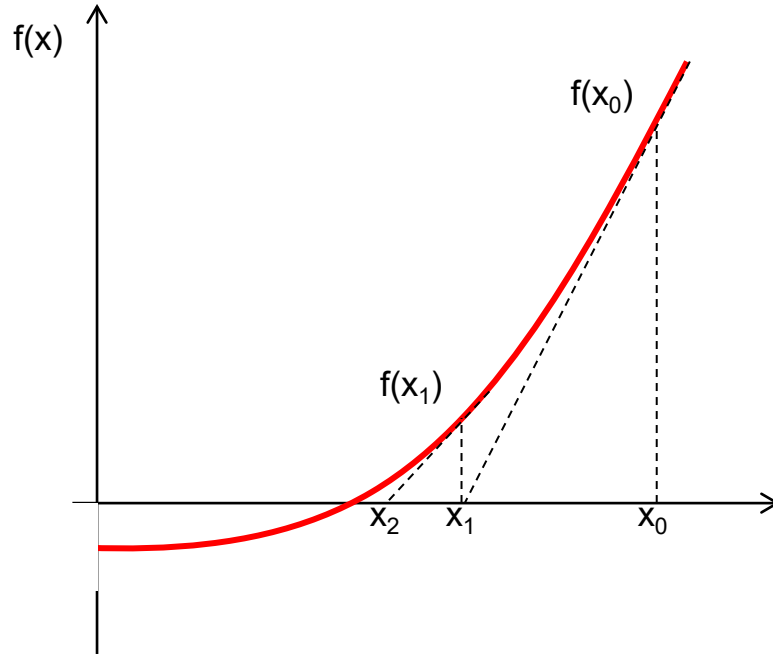
$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$$



Fórmula de recorrência

$$x_{k+1} = x_k - \frac{1}{f'(x_k)} \times f(x_k)$$

Solução: método de Newton-Raphson 1D



Equação da reta tangente:

$$y = a \cdot x + b$$

$$a = f'(x_0)$$

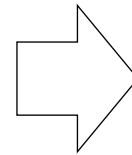
$$f(x_0) = f'(x_0) \cdot x_0 + b$$

$$b = f(x_0) - f'(x_0) \cdot x_0$$

Raiz da reta tangente:

$$x = -b/a$$

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$$



Fórmula de recorrência $N \times N$

$$\vec{x}_{k+1} = \vec{x}_k - \text{Jac}_k^{-1} \times \vec{f}(\vec{x}_k)$$

Solução: método de Newton-Raphson 1D

Fórmula de recorrência

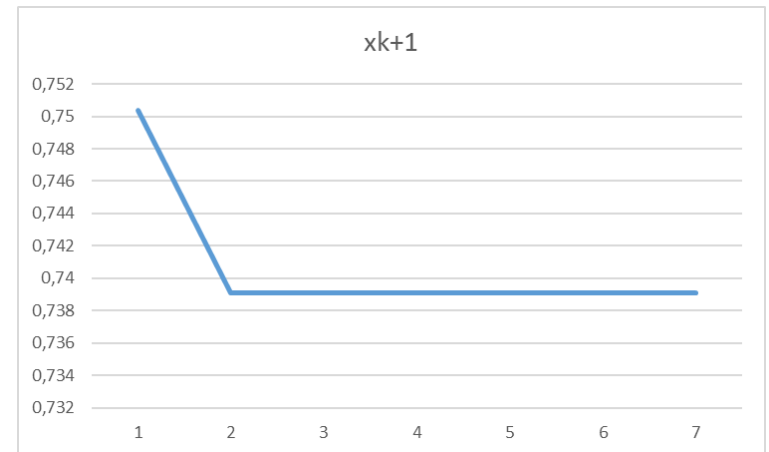
$$f(x) = \cos(x) - x = 0$$

$$f'(x) = -\sin(x) - 1$$

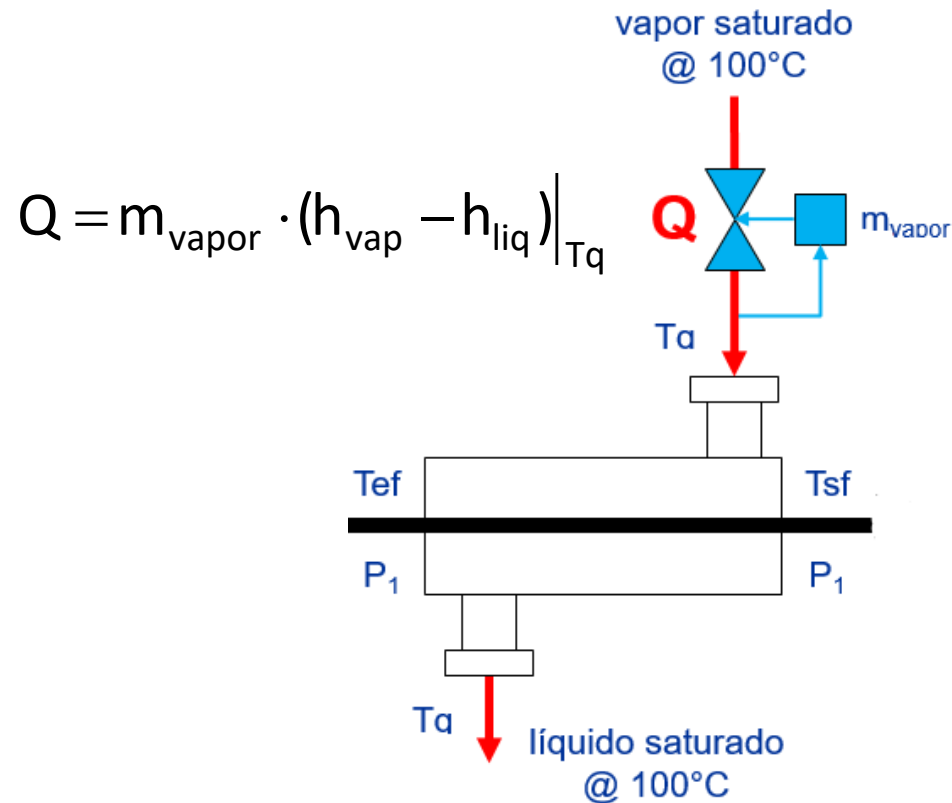
$$x_{k+1} = x_k - \frac{1}{f'(x_k)} \times f(x_k)$$

$$x_{k+1} = x_k - \frac{\cos(x_k) - x_k}{-\sin(x_k) - 1}$$

xk	f(xk)	f'(xk)	xk+1
1	-0,4597	-1,84147	0,750364
0,750364	-0,01892	-1,6819	0,739113
0,739113	-4,6E-05	-1,67363	0,739085
0,739085	-2,8E-10	-1,67361	0,739085
0,739085	0	-1,67361	0,739085
0,739085	0	-1,67361	0,739085
0,739085	0	-1,67361	0,739085



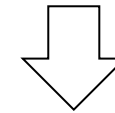
Exemplo: bombeamento de óleo ultra viscoso...



$$Q = m_{\text{vapor}} \cdot (h_{\text{vap}} - h_{\text{liq}}) \Big|_{Tq}$$

$$Q = m_{\text{óleo}} C_{p_{\text{óleo}}} \cdot (T_{\text{sf}} - T_{\text{ef}})$$

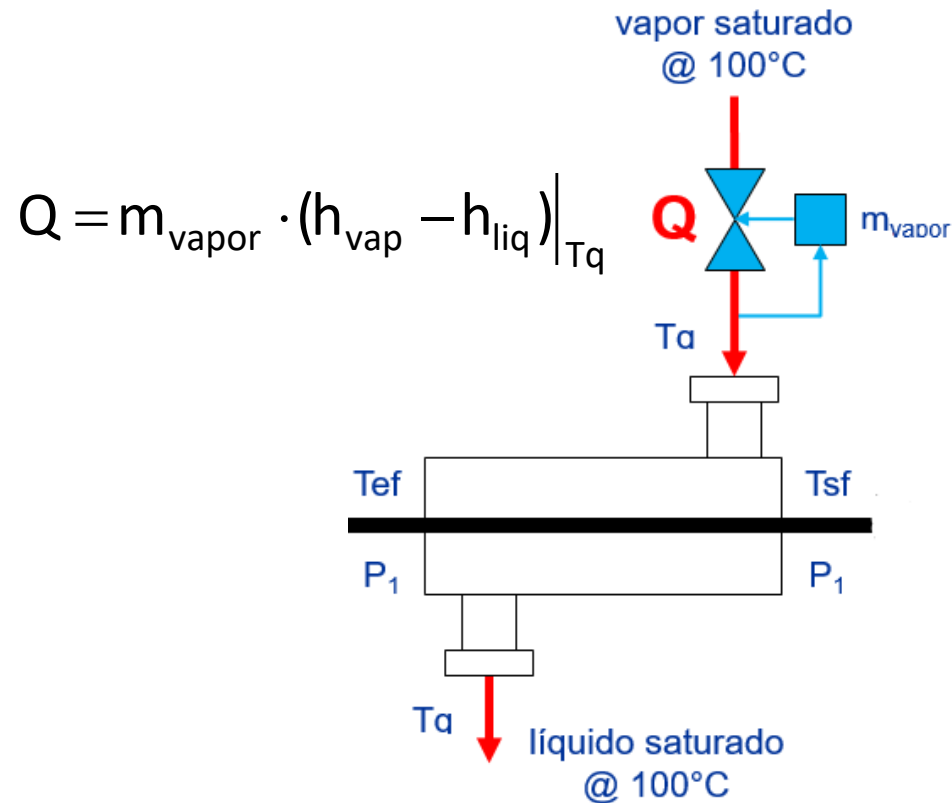
$$Q = UA \cdot \Delta \bar{T} \rightarrow \Delta \bar{T} = \frac{[(Tq - T_{\text{sf}}) - (Tq - T_{\text{ef}})]}{\ln \left(\frac{Tq - T_{\text{sf}}}{Tq - T_{\text{ef}}} \right)}$$



$$(Tq - T_{\text{sf}}) = (Tq - T_{\text{ef}}) \cdot \exp \left(\frac{-UA}{m_{\text{óleo}} C_{p_{\text{óleo}}}} \right)$$



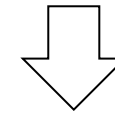
Exemplo: bombeamento de óleo ultra viscoso...



$$Q = m_{\text{vapor}} \cdot (h_{\text{vap}} - h_{\text{liq}}) \Big|_{T_q}$$

$$Q = m_{\text{óleo}} C_{p_{\text{óleo}}} \cdot (T_{sf} - T_{ef})$$

$$Q = UA \cdot \Delta \bar{T} \rightarrow \Delta \bar{T} = \frac{[(T_q - T_{sf}) - (T_q - T_{ef})]}{\ln \left(\frac{T_q - T_{sf}}{T_q - T_{ef}} \right)}$$

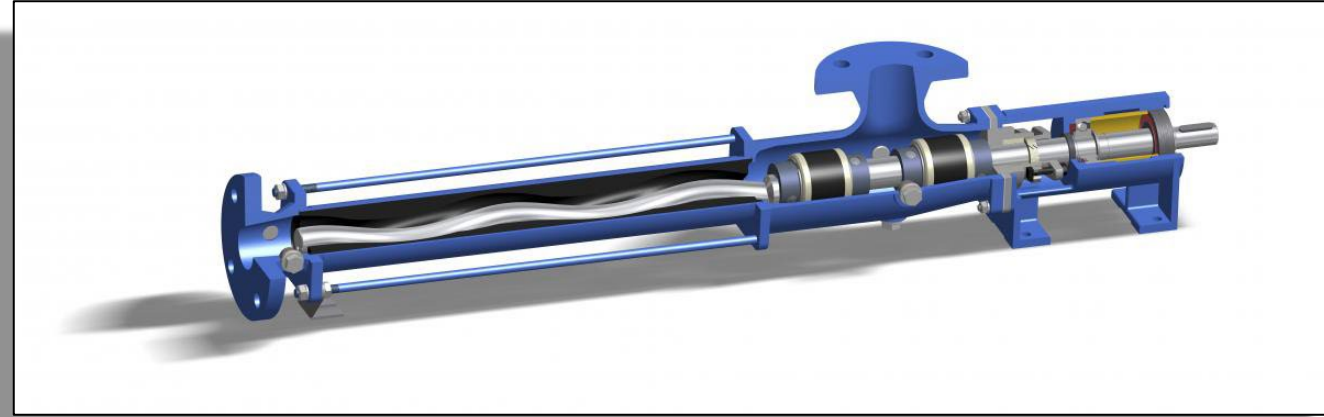
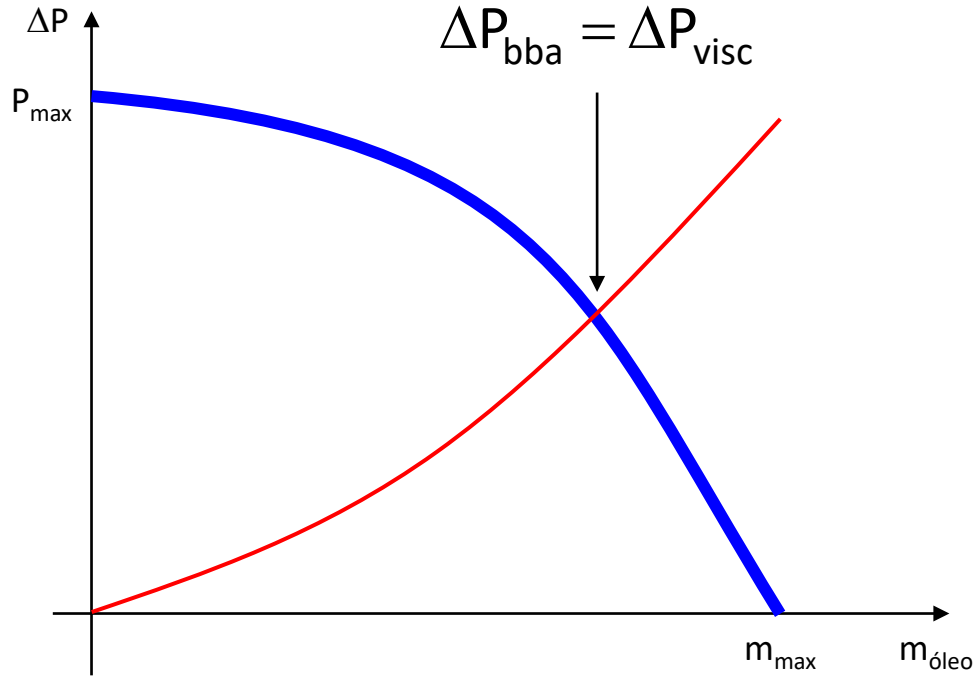


$$(T_q - T_{sf}) = (T_q - T_{ef}) \cdot \exp \left(\frac{-UA}{m_{\text{óleo}} C_{p_{\text{óleo}}}} \right)$$

$$f_1 = (T_q - T_{sf}) - (T_q - T_{ef}) \cdot \exp \left(\frac{-UA}{m_{\text{óleo}} C_{p_{\text{óleo}}}} \right)$$

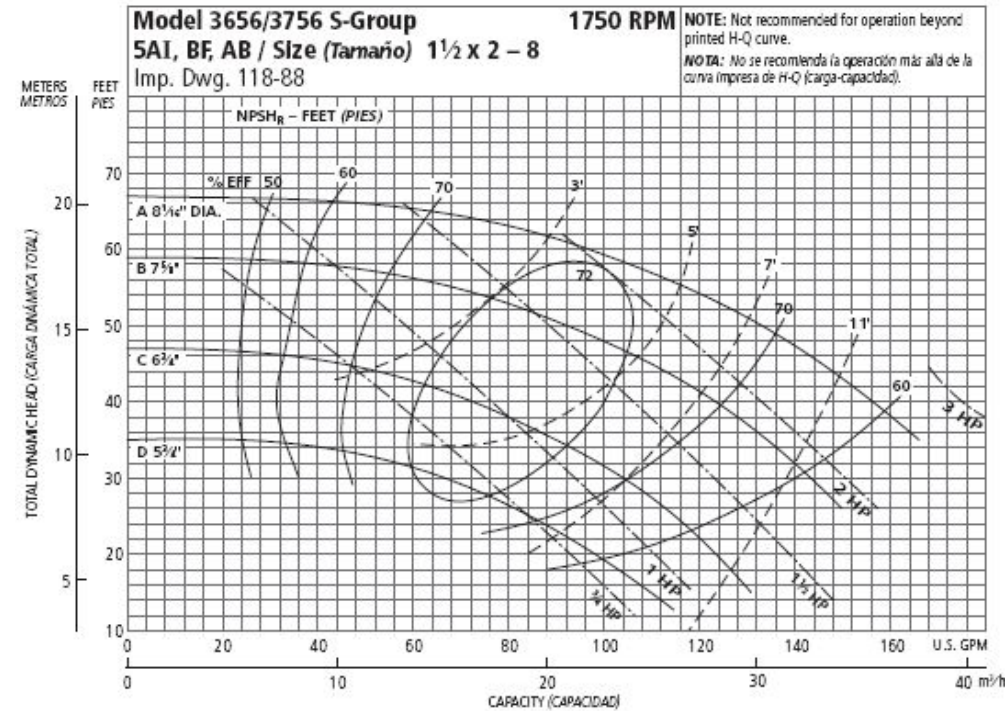


Exemplo: bombeamento de óleo ultra viscoso...



Os parâmetros P_{max} , m_{max} e n podem ser obtidos das curvas fornecidas pelo fabricante...

$$\Delta P_{bba} = P_{max} \cdot \left[1 - \left(\frac{m_{\acute{o}leo}}{m_{max}} \right)^n \right]$$



As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.

Exemplo: bombeamento de óleo ultra viscoso...

$$f_2 = P_{\max} \cdot \left[1 - \left(\frac{m_{\text{óleo}}}{m_{\max}} \right)^n \right] - f(\text{Re}) \cdot 0,8106 \frac{L}{\rho D^5} \cdot m^2$$

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot m_{\text{óleo}}}{\mu \pi D}$$

$$T = T_{\text{sf}}$$

$$\mu(T) = 6.7109 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 - 2.9844 \cdot 10^{-3} \cdot T^3 + \dots$$

$$\dots + 5.0341 \cdot 10^{-1} \cdot T^2 - 4.0864 \cdot 10^{+1} \cdot T + 1.6546 \cdot 10^{+3}$$



Exemplo: bombeamento de óleo ultra viscoso...

$$f_1(m_{\text{óleo}}, T_{\text{sf}}) = (T_q - T_{\text{sf}}) - (T_q - T_{\text{ef}}) \cdot \exp\left(\frac{-UA}{m_{\text{óleo}} C_{p_{\text{óleo}}}}\right)$$

$$f_2(m_{\text{óleo}}, T_{\text{sf}}) = P_{\text{max}} \cdot \left[1 - \left(\frac{m_{\text{óleo}}}{m_{\text{max}}} \right)^n \right] - f(\text{Re}) \cdot 0,8106 \frac{L}{\rho D^5} \cdot m_{\text{óleo}}^2$$

$$\begin{bmatrix} m_{\text{óleo}} \\ T_{\text{sf}} \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} m_{\text{óleo}} \\ T_{\text{sf}} \end{bmatrix}_k - [\text{Jac}]_k^{-1} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}_k$$



Exemplo: bombeamento de óleo ultra viscoso...

T1 Aquecimento de óleo para reduzir a potência de bombeio.xlsx - Excel

Arquivo Página Inicial Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Suplementos Diga-me o que você deseja fazer

Normal Visualização da Quebra de Página da Página Layout Modos de Exibição Personalizados Modos de Exibição de Pasta de Trabalho

Regrua Barra de Fórmulas Linhas de Grade Títulos

Zoom 100% Zoom na Seleção

Nova Janela Organizar Tudo Congelar Painéis

Dividir Ocultar Exibir Lado a Lado Rolagem Sincronizada Redefinir Posição da Janela

Alterar Janelas Macros

A1 parâmetros

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	parâmetros					xk			fk			móleo	Tsf	
2	Cp	4,19 kJ/kg/K			móleo	0,64796256	kg/s	f1	0	oC	f1	-36,0056364	-1	
3	ρ	998 kg/m3			Tsf	87,3154972	oC	f2	0,00E+00	Bar	f2	-235,518819	1,39722013	
4														
5	Tef	20 oC				xk			fk			1	2	
6	Tq	100 oC			móleo	0,64796256	kg/s	dmóleo	0	kg/s	1	-0,00488835	-0,003498624	
7	UA	5 kW/k			Tsf	87,3154972	oC	dTsf	0	oC	2	-0,8239919	0,1259702	
8														
9	Pmax	150 bar												
10	mmax	5 kg/s			Desempenho									
11	n	1,2 nd			μ	3,27914E-01	Pa.s							
12					Re	33,546	nd							
13	D	7,50E-02 m			f	1,908	nd	= 64/Re						
14	L	50000 m			P	137,082	bar							
15	e	1 mm			V	8,818	m/min							
16					Wbba	534,013	kW							
17	eps	0,01 any			TT	94,506	horas							
18														
19														

Planilha1

Pronto

190%



As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.

Exemplo: bombeamento de óleo ultra viscoso...



Tutorial: Bombeio de Óleo

https://www.youtube.com/watch?v=6SlqQKqvMzs&index=2&list=PLmho8Rcnd60c_duh02aThHOAHp-x7fma-&t=1002s

YouTube BR

Sistema de pré-aquecimento de óleo "baiano"...

Démarche: gastar Q para economizar W (exergia)

vapor saturado

Q

W

condensado

$L = 50 \text{ km}$
 $D = 50 \text{ cm}$

Viscosidade (Pa.s)

Temperatura (°C)

Tutoriais e exercícios

Paulo Seleglim - 2 / 6

- 1 Tutorial: Balanço de exergia em uma turbina de dois estágios Paulo Seleglim
- 2 Tutorial: Bombeio de Óleo Pesado Paulo Seleglim
- 3 Ao Vivo: TUTORIAL - CICLOS DE RANKINE MODIFICADOS 1/2 Paulo Seleglim
- 4 Ao Vivo: TUTORIAL - CICLOS DE RANKINE MODIFICADOS 2/2 Paulo Seleglim
- 5 Ex. 6-1 Çengel de Transcal Paulo Seleglim
- 6 Tutorial - Análise Exergética Caldeira Regenerativa + Turbina Paulo Seleglim

Tutorial: Bombeio de Óleo Pesado

216 views

13 0 SHARE

Paulo Seleglim
Published on Aug 19, 2016

EDIT VIDEO

Modelagem e simulação de sistemas industriais
O Método de Newton-Raphson:
Simulação do Bombeio de Óleo Pesado

T3 Conversão de Energia Térmica 1/3
Paulo Seleglim
647 views
2:31:47

Introduction to Exergy
Paulo Seleglim
77 views
New
2:03:19

T2 Análise Técnico-Econômica

Digite aqui para pesquisar

POR 12:21
PTB2 01/10/2017

<https://youtu.be/6SlqQKqvMzs>



As questões postadas no Chat do YouTube serão respondidas ao final da aula.



Search

Upload

- Home
- My Channel
- Trending
- Subscriptions 1
- History
- Watch Later

- LIBRARY
- Curso de Energias Re...
 - Trocadores de Calor - ...
 - Curso de Modelagem ...
 - Show more

- SUBSCRIPTIONS
- Khan Academy 23
 - QueenVEVO 19
 - Os Pingos nos Is... 11
 - Roda Viva 11
 - Aerosmith - Topic 7
 - Sesame Street 6
 - Stanford Precour... 5
 - StarTalk Radio 5
 - DIE ANTWOORD ... 4
 - Matando Robôs ... 4
 - The Allman Brot... 3
 - World Science Fe... 3

2,992 subscribers 279,004 views Video Manager



Paulo Seleglim

View as: Yourself

Subscribe 2,992

- Home
- Videos
- Playlists
- Channels
- Discussion
- About

For returning subscribers For new visitors

What to watch next

OPERAÇÃO OTIMIZADA DE USINAS HIDRELÉTRICAS

Curvas de rendimento operacional ótimo

2:19:58

Centrais de Geração Eólica e Hidrelétrica

by Paulo Seleglim 117 views Streamed 2 weeks ago

Carros Híbridos: Eficiência Energética no Setor de Transportes

by Paulo Seleglim 199 views Streamed 2 weeks ago

1:10:05

T4 EXERGIA QUÍMICA 2/3

by Paulo Seleglim 108 views Streamed 3 weeks ago

2:49:30

T4 ANÁLISE EXERGÉTICA: Trabalho Mínimo em Processos de Separação 2/3

by Paulo Seleglim 150 views Streamed 1 month ago

2:18:10

Channel tips

- Filming on your phone
- Improving Content ID

View all »

None

+ Add channels

Related channels

Me Salva!



- | | | | |
|--------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1. Lindner, Kurt | 27. Tschinkel, Dr. J.G. | 53. Urbanski, Arthur | 79. Wiesman, Walter |
| 2. Jungert, Wilhelm | 28. Drawe, Gerhard P. | 54. Tiller, Werner | 80. Buchhold, Dr. Theodor |
| 3. Debus, Dr. Kurt | 29. Heller, Gerhard | 55. Woerdemann, Hugo | 81. Rees, Dr. Eberhard H. |
| 4. Fischel, Dr. Edward | 30. Boehm, Josef | 56. Schilling, Dr. Martin | 82. Hirschler, Otto |
| 5. Gruene, Dr. Hans F. | 31. Muehlner, Dr. J.W. | 57. Schuler, Albert E. | 83. Poppel, Theodor A. |
| 6. Mrazek, Dr. William | 32. Rudolph, Dr. Arthur | 58. Lindenmayr, Hans J. | 84. Kroll, Gustav A. |
| 7. | 33. Angele, Wilhelm | 59. Zoike, Helmut | 85. Voss, Werner E. |
| 8. Schlitt, Dr. Helmuth | 34. Ball, Erich K. | 60. Paul, Hans G. | 86. Beier, Anton |
| 9. Axter, Dr. Herbert | 35. Heusinger, Bruno K. | 61. Rothe, Heinrich C. | 87. Zeiler, Albert |
| 10. Vowe, Theodor K. | 36. Novak, Max E. | 62. Roth, Ludwig | 88. Schlidt, Rudolf H. |
| 11. Beichel, Rudolf | 37. Mueller, Dr. Fritz | 63. Steinhoff, Dr. Ernst | 89. Steurer, Dr. Wolfgang |
| 12. Helm, Bruno K. | 38. Finzel, Alfred J. | 64. Reissig, Gerhard H. | 90. deBeek, Gerd W. |
| 13. Holderer, Oscar | 39. Fuhrmann, Herbert | 65. Klaus, Ernst K. | 91. Millinger, Heinz |
| 14. Minning, Rudolf | 40. Stuhlinger, Dr. Ernst | 66. Weidner, Dr. Hermann | 92. Dannenberg, Konrad K. |
| 15. Friedrich, Dr. Hans | 41. Guendel, Herbert | 67. Lange, Hermann | 93. Palaoro, Hans R. |
| 16. Haukohl, Guenther H. | 42. Fichtner, Hans | 68. Paetz, Robert | 94. Neubert, Erich W. |
| 17. Dhom, Friedrich | 43. Hager, Dr. Karl | 69. Merk, Helmut | 95. Sieber, Dr. Werner |
| 18. Tessmann, Bernhard | 44. Kuers, Werner R. | 70. Jacobi, Walter W. | 96. Hellebrand, Emil A.H. |
| 19. Heimburg, Karl L. | 45. Bergeler, Herbert | 71. Grau, Dieter E. | 97. Hosenthien, Hans H. |
| 20. Geissler, Dr. Ernst | 46. Maus, Hans H. | 72. Schwarz, Friedrich | 98. Bauschinger, Oscar |
| 21. Duerr, Friedrich | 47. Schwidetzky, Dr. W. | 73. Von Braun, Dr. Wernher | 99. Michel, Dr. Joseph |
| 22. | 48. Hoelker, Dr. Rudolf | 74. Wittmann, Albin E. | 100. Scheufelen, Claus |
| 23. Milde, Hans W. | 49. Kaschig, Erich K. | 75. Hoberg, Otto A. | 101. Burose, Walter |
| 24. Luehrsen, Hannes | 50. Rosinski, Werner | 76. Schulze, William A. | 102. Fleischer, Karl |
| 25. Patt, Kurt E. | 51. Scharnowski, Heinz | 77. | 103. Gengelbach, Werner |
| 26. Eisenhardt, Otto K. | 52. Vandersee, Fritz | 78. Thiel, Dr. Adolf K. | 104. Beduerftig, Hermann M. |
| | | | 105. Hintze, Guenther |

ESCOAMENTO EM

TUBULAÇÕES

