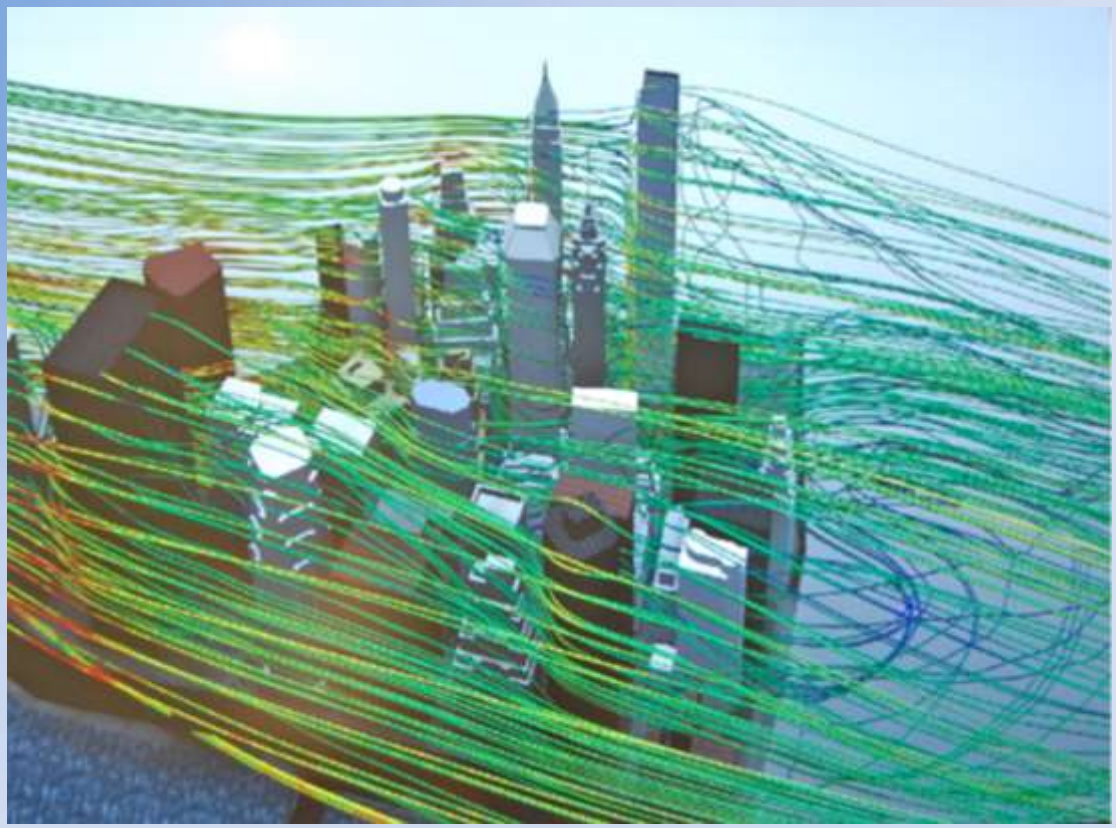


PEF 3522 – Ação do Vento das Edificações (Parte I)

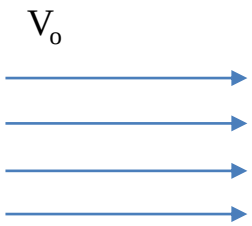
Prof. Henrique Campelo Gomes
Prof. Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti
2019

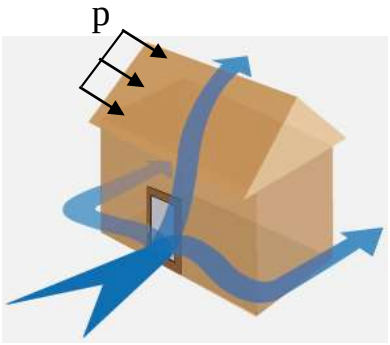
➢ Motivação: por que estudar a Ação do Vento nas Estruturas?

Resp.: O vento constitui um carregamento (esforço) de fundamental importância que atua nas estruturas civis, podendo ser a ação mais crítica. Principalmente nos casos de Estruturas Leves (metálicas e de madeira) e Edifícios Altos.

- Estado Limite Último (ELU): Colapso parcial ou total
- Estado Limite de Serviço (ELS): Desempenho. Atenção especial aqui para as Vibrações Excessivas

O efeito do vento numa edificação é "sentido" por pressões atuantes em parte ou em toda a superfície da mesma





$$p \propto V_0^2$$

➢ Acidentes e Prejuízos causados pelo vento

Hurricane (furacão) damage to the Meyer-Kiser Bank Building - Miami, Florida (1926)

Panoramic view of Miami after the hurricane, wryly titled "Miami's New Drydock" ; September 18, 1926

Prejuízo de USD 75 milhões

$V_{máx}$=240 km/h

➢ Acidentes e Prejuízos causados pelo vento

Ciclone Tracy, Darwin, Austrália, 24-25 dezembro (1974)

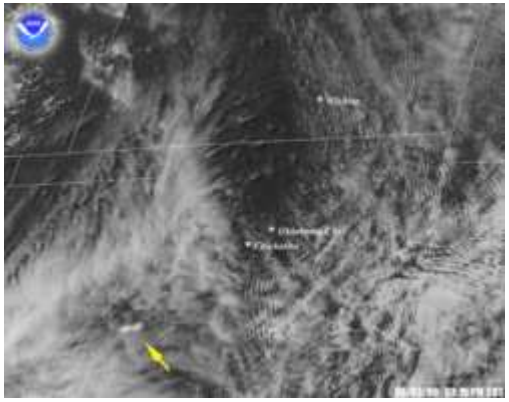
Prejuízo de USD 300 milhões

Cerca de 70 mortes

$V_{máx}$=240 km/h

➢ Acidentes e Prejuízos causados pelo vento

Bridge Creek–Moore tornado, Oklahoma City, May 3rd (1999)



Prejuízo de USD 1 bilhão

Cerca de 40 mortes

Tornado de Categoria F5 ($V_{máx}$=480 km/h)

➢ Acidentes e Prejuízos causados pelo vento

E no Brasil?

Acontecem Furacões, Tornados ou Ciclones?

Qual a diferença entre eles?

Ciclones:

- Movimento circulatório do ar em torno de um centro de baixa pressão, independente de serem violentos
- Diâmetros da ordem de 1000 km
- Geralmente trazem mau tempo, com precipitações e ventos fortes.

(Flórida, 2007) ➡ *Tropical storm*

Categoria dos Ciclones Tropicais:

Velocidade aproximada (km/h)	Nome	Em Inglês
< 40	Perturbação tropical	Tropical disturbance
40 a 60	Depressão tropical	Tropical depression
60 a 120	Tormenta tropical	Tropical storm
> 120	Furacão	Hurricane

Tornados:

- Fenômeno extremamente violento e ainda pouco conhecido
- Diâmetros da ordem de 80 m
- Velocidades podem superar os 300 km/h

Classificação	Velocidade dos ventos (km/h)
F0	65-115
F1	115-180
F2	180-250
F3	250-330
F4	330-420
F5	420-530

(Escala Fujita, válida também para ciclones)

No nosso curso, adotaremos o termo "Tormenta" para designar os sistemas meorológicos que originam ventos de alta velocidade (ventos fortes), independente do seu mecanismo de formação

Escala Fujita

Scale	Wind speed estimate[8]		Potential damage[8]	
	mph	km/h		
F0	< 73	< 116	Light damage. Some damage to chimneys; branches broken off trees; shallow-rooted trees pushed over; sign boards damaged.	
F1	73–112	117–180	Moderate damage. The lower limit is the beginning of hurricane wind speed; peels surface off roofs; mobile homes pushed off foundations or overturned; moving vehicles pushed off the roads; attached garages may be destroyed.	
F2	113–157	181–253	Significant damage. Roofs torn off frame houses; mobile homes demolished; boxcars overturned; large trees snapped or uprooted; high-rise windows broken and blown in; light-object missiles generated.	
F3	158–206	254–332	Severe damage. Roofs and some walls torn off well-constructed houses; trains overturned; most trees in forest uprooted; heavy cars lifted off the ground and thrown.	
F4	207–260	333–418	Devastating damage. Well-constructed houses leveled; structures with weak foundations blown away some distance; cars thrown and large missiles generated.	
F5	261–318	419–512	Incredible damage. Strong frame houses lifted off foundations and carried considerable distances to disintegrate; automobile sized missiles fly through the air farther than 100 meters (110 yards); trees debarked; steel reinforced concrete structures badly damaged and skyscrapers toppled	

➢ Furacões no Brasil?

Em 1994, durante um Congresso realizado em Varsóvia, a Companhia de Resseguros de Munique já fazia previsões nada agradáveis para o Brasil, no que diz respeito a furacões: (adaptado de Blessman[1])

“A temperatura da água em algumas partes do Atlântico Sul alcançará a temperatura crítica de 27° C, abrindo a porta para o desenvolvimento de ciclones tropicais até agora não encontrados nesta parte do mundo. Não é necessário dizer que tais ciclones constituirão então um tremendo risco ao longo da costa do Brasil”

A afirmativa se baseava em estudos que indicavam um aumento de CO2 da atmosfera de mais de 100% nos próximos cem anos. (adaptado de Blessman[1])

[1] Blessmann, J. (2011). O Vento na Engenharia Estrutural. Editora da UFRGS. 2013.

➢ Furacões no Brasil?

Furacão Catarina (março de 2004, litoral de Santa Catarina e Rio Grande do Sul)

Image credit: NASA/International Space Station crew.

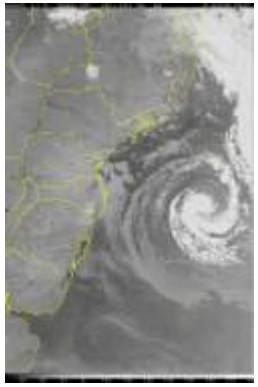
Hurricane-force Storm Hits Brazil
The crew of the International Space Station photographed the cyclone making landfall on the southern Brazilian state of Catarina -- the storm has been unofficially dubbed "Hurricane Catarina".

The South Atlantic Basin has only seen two tropical cyclones, but no hurricanes. However, the last week in March, a circulation center well off the coast of southern Brazil developed tropical cyclone characteristics and continued to intensify as it moved westward.

The system developed an eye and apparently reached hurricane strength on Friday, March 26, before eventually making landfall late on Saturday, March 27, 2004.

Fonte: NASA

https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_154_catalina.html
(Acessado em 6/8/2018)



26/03/2004. **Previsão do Tempo** (*segundo algum telejornal*). Uma massa de ar seco cobre o sul do Brasil, garantindo tempo aberto não só no RS, mas em grande parte da Região Sul. As temperaturas continuam amenas ao amanhecer, elevando-se rapidamente ao longo do dia. SQN.

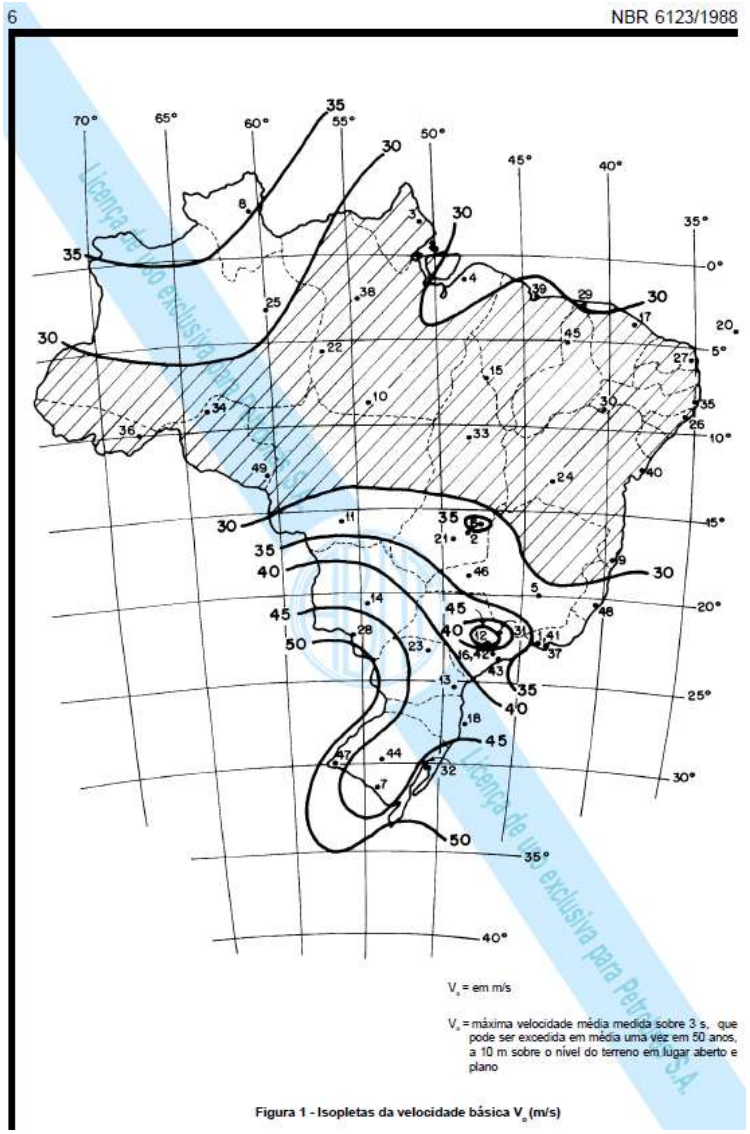
27/03/2004. **CPTEC**(*Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos*). Informou que não havia motivos para alardes; trava-se de fenômeno rotineiro, com ventos de apenas 60 a 70 km/h e com chuva moderada. SQN.

Furacão Catarina

28/03/2004. **Os Fatos:** No dia seguinte, este fenômeno "rotineiro" causou uma destruição como nenhuma outra na costa sul de SC e norte do RS. Sua velocidade ultrapassou os 150 km/h.

É interessante notar que, para efeito de comparação, os temporais que já castigaram há décadas a região sul do país têm rajadas que chegam a ultrapassar 140 km/h.

Vo: Velocidade Básica do Vento



Fatores que afetam no cálculo das pressões de vento nas estruturas:

- Região (Vo)
- Forma/Tamanho da estrutura
- Topografia
- Vizinhança
- Altura
- Finalidade da Edificação
- etc

Como se formam a maioria das rajadas de vento no Brasil ?

Os grandes ventos causadores de tragédias naturais são os ciclones tropicais que, quando superam a velocidade de 120 km/h, recebem a denominação de Furacão (Hurricane).

Nem sempre os furacões mais severos são os que causam mais estragos, pois dependem da região atingida, duração, segurança das edificações, densidade populacional, etc.

Causas dos Acidentes:

- Causas Aerodinâmicas
- Causas Estruturais

➢ Causas Aerodinâmicas dos Acidentes

Coeficientes Aerodinâmicos:

Ângulo de incidência, forma geométrica e proporções entre as dimensões da edificação

Velocidade Máxima do Vento:

A força é proporcional ao quadrado da velocidade. No Brasil, temos velocidades máximas entre 30 m/s e 50 m/s, dependendo da região. Isso quer dizer que as forças podem ser quase 3x maiores...

Pressão Interna

Objetos Lançados pelo Vento

➢ Causas Estruturais dos Acidentes

Falta de Ancoragem:

Telhas, terças, tesouras, etc.

Contraventamento Insuficiente:

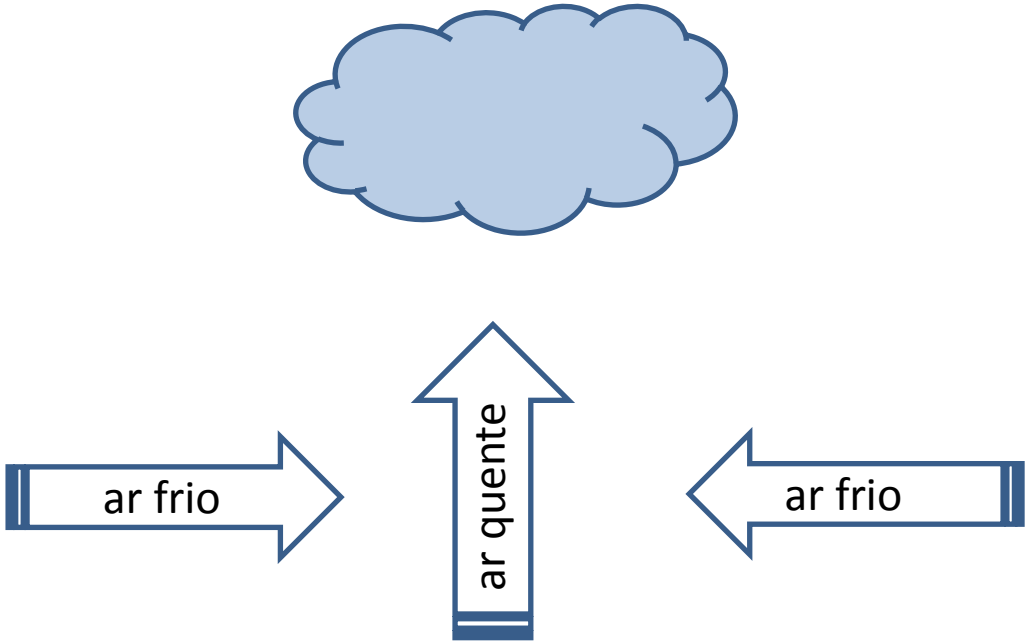
Fundação Inadequada:

Especialmente em estruturas leves (tombamento)

Paredes Inadequadas

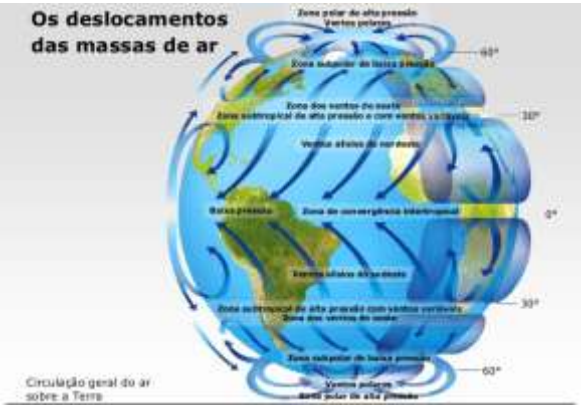
➢ Introdução: Aspectos Meteorológicos

Vento: o vento é o ar em movimento relativo à superfície da Terra. A principal causa da formação dos ventos são as diferenças de pressão atmosférica.



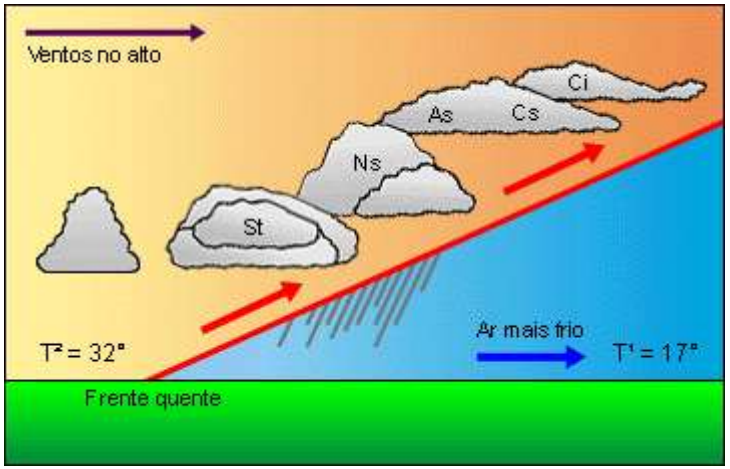
O vapor de água e CO2 são pouco “transparentes” à radiação infravermelha emanada pela superfície da Terra, provocando o aquecimento da atmosfera.

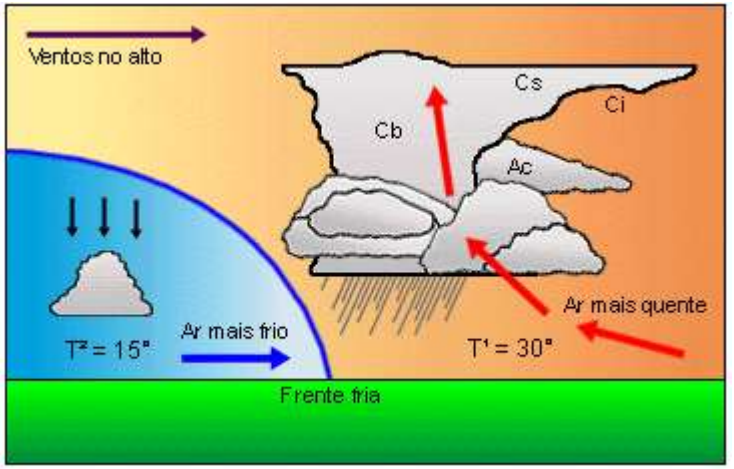
Some-se a isso o movimento de rotação da Terra:



Massas de Ar:

São caracterizadas por suas grandes dimensões (de até muitas centenas de quilômetros) e por um gradiente de temperatura vertical de pouca variação. Essas massas colidem e, usualmente, não podem se misturar. A superfície que separa duas massas de ar é chamada de *superfície frontal* e a intersecção desta com a superfície terrestre, de ***frente***.



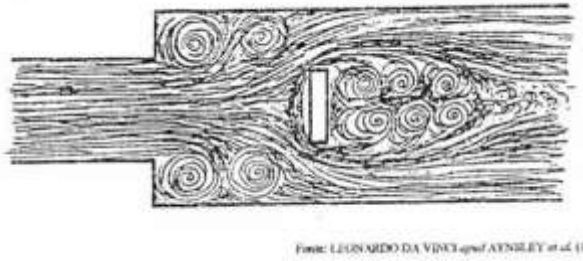


OBS: a subida rápida de ar quente, devido à forma abrupta da frente fria, pode formar tormentas que, apesar de breves, podem ser violentas

➢ Introdução: Um pouco de Mecânica dos Fluidos

O problema de escoamento de fluidos e seus efeitos sobre corpos imersos (obstáculos) não é uma tarefa simples.

Leonardo da Vinci(1452-1519, Italy)



Van Gogh (1853-1890, Netherland)

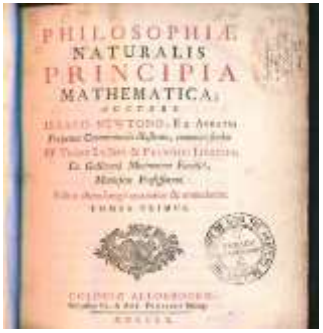
- Dedution of mass conservation equation for one-dimensional incompressible flow;
- Leonardo's notes also contains accurate description of various viscous fluid flow phenomena.

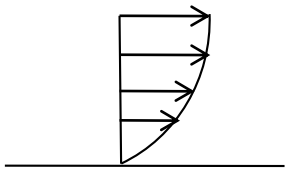
Edme Mariotte (1620-1684, France)

•Primeiro túnel de vento para medir arrasto de corpos imersos em escoamento:

"Traité du mouvement des eaux "(1686)

Isaac Newton (1643-1727, England)





$$\tau \propto \frac{\partial u}{\partial y}$$

"The resistance which arises from the lack of lubricity in the parts of a fluid – other things being equal – is proportional to the velocity by which the parts are being separated from each other"

"But the world was apparently not ready for viscous-flow theory" (Frank White, 1991)

Daniel Bernoulli (1700-1782)

Leonhard Euler (1707-1783)

d'Alambert (1717-1783)

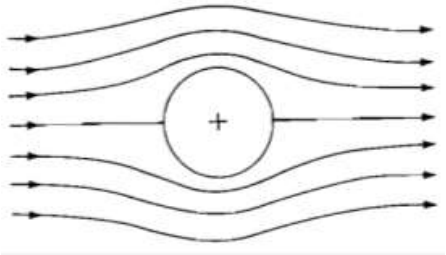
Eqs. de Bernoulli:

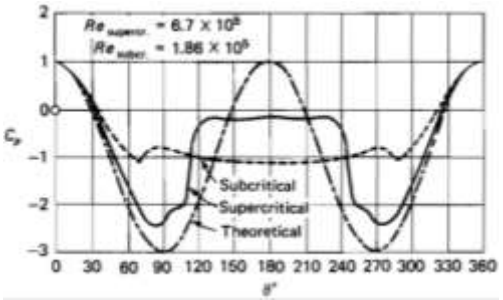
pressão estática

$$\rho g h_1 + p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = \rho g h_2 + p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

pressão dinâmica

Em 1752, d'Alambert publicou seu famoso paradoxo.





Navier (1827)

Cauchy (1828)

Poisson (1829)

St. Venant (1843)

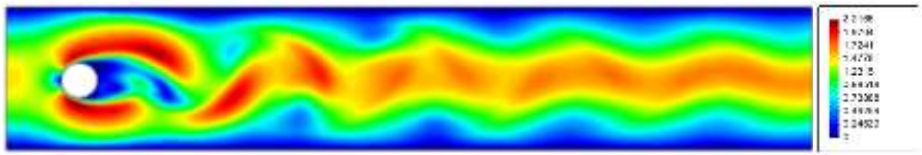
Stokes (1845)

Na primeira metade do século XIX, vários autores incorporaram o termo viscoso às equações de Euler. Stokes foi o primeiro a utilizar o coef. de viscosidade μ.

Eq. de Navier-Stokes:

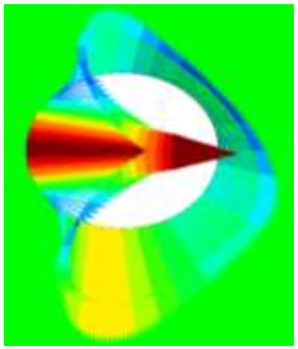
(dir x)

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = \frac{\partial(p)}{\partial x} + b_x + F_{viscous}$$



Campo de velocidades para Re=100

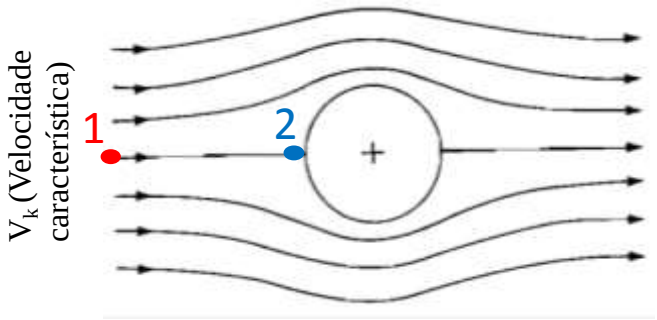
Campo de pressões para Re=100



Tensões no contorno do cilindro

Resultados semelhantes podem ser obtidos também através de ensaios em Túnel de Vento !!!

Pressão Estática e Pressão Dinâmica:



$$\rho g h_1 + p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = \rho g h_2 + p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

No Ponto 1: $\begin{cases} v_1 = V_k \\ p_1 = p_{atm} \\ h_1 = h \end{cases}$ No Ponto 2: $\begin{cases} v_2 = 0 \\ p_2 = ? \\ h_2 = h \end{cases}$

$$p_2 = p_{atm} + \frac{1}{2}\rho v_1^2$$

A pressão estática que nos interessa é a pressão efetiva, ou seja, descontada da pressão atmosférica

$$\Delta p_e = p_2 - p_{atm} = \frac{1}{2}\rho V_k^2$$

Para outros pontos no contorno do cilindro, a pressão estática será, em geral, numericamente diferente da pressão dinâmica

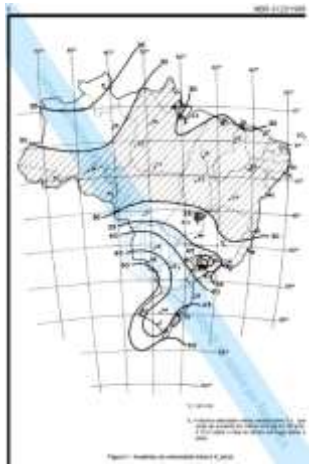
É conveniente definir, portanto, um coeficiente de pressão ou de forma (c) que relaciona a pressão estática com a pressão dinâmica para todos os pontos do obstáculo:

$$p = c\frac{1}{2}\rho V_k^2 = c.q$$

onde q é a pressão dinâmica $q = \frac{1}{2}\rho V_k^2$

Passo a Passo da NBR6123:

Vo: Velocidade Básica do Vento



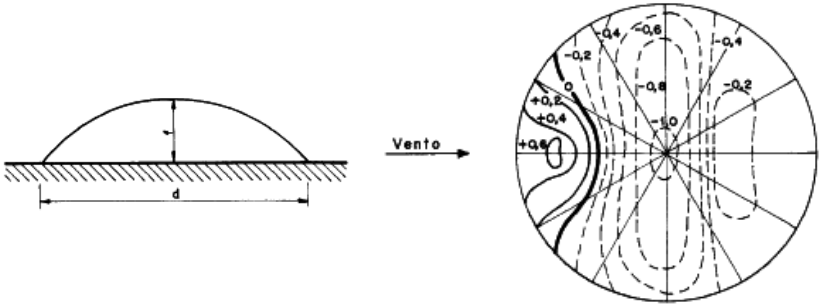
$$V_k = S_1 . S_2 . S_3 . V_0$$

(Velocidade Característica)

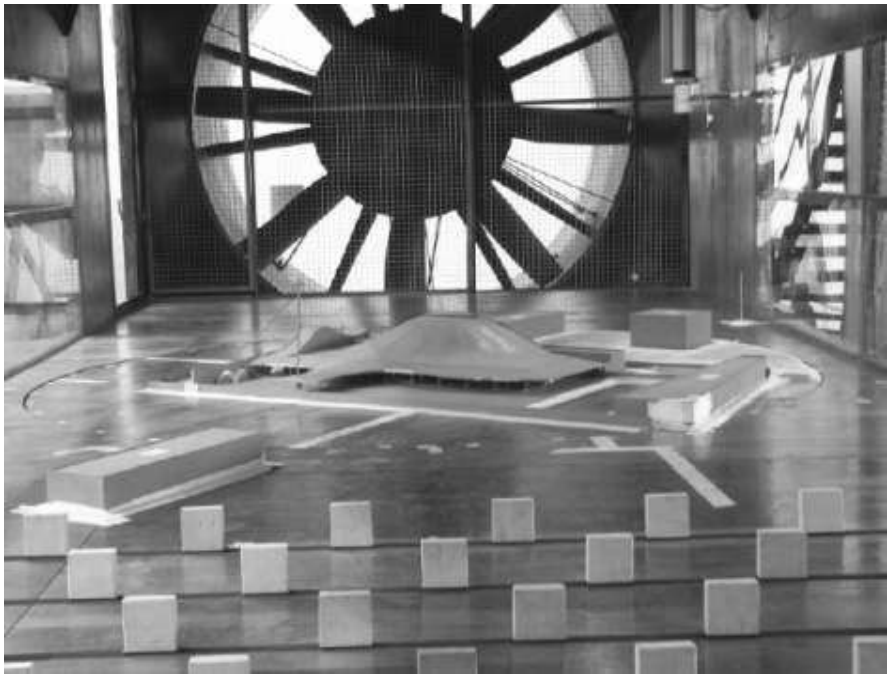
$$q = \frac{1}{2}\rho V_k^2$$

(pressão dinâmica)

Coeficientes de Pressão C
(NBR6123)

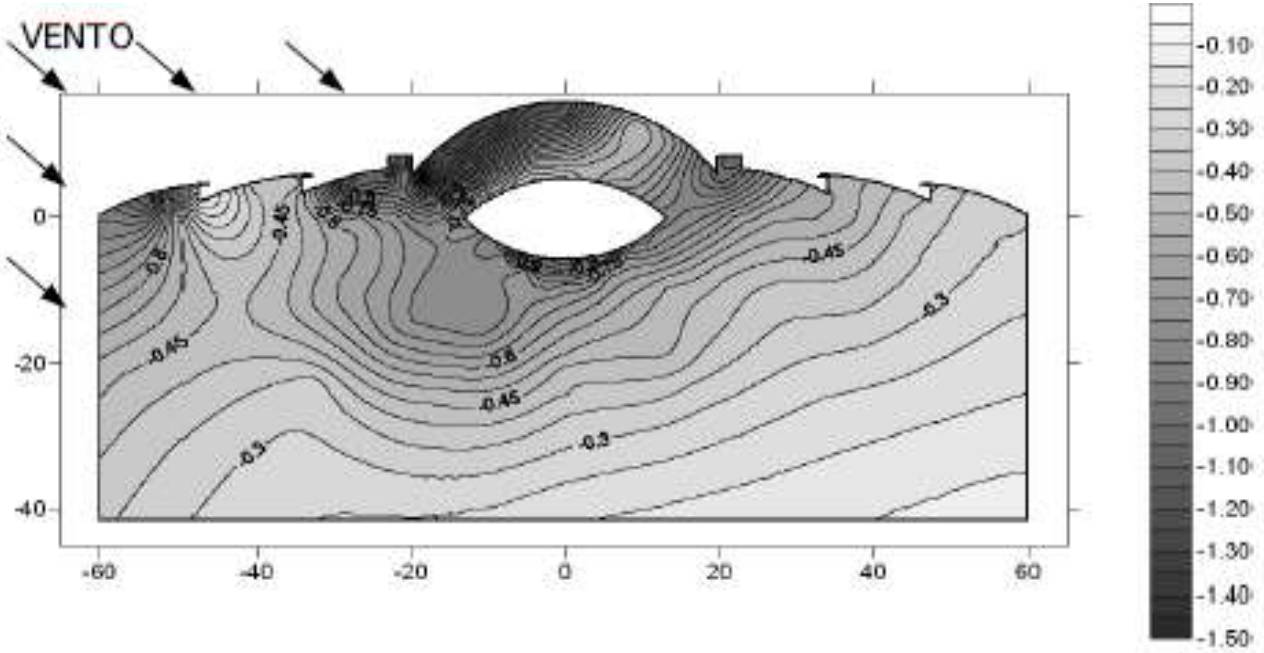


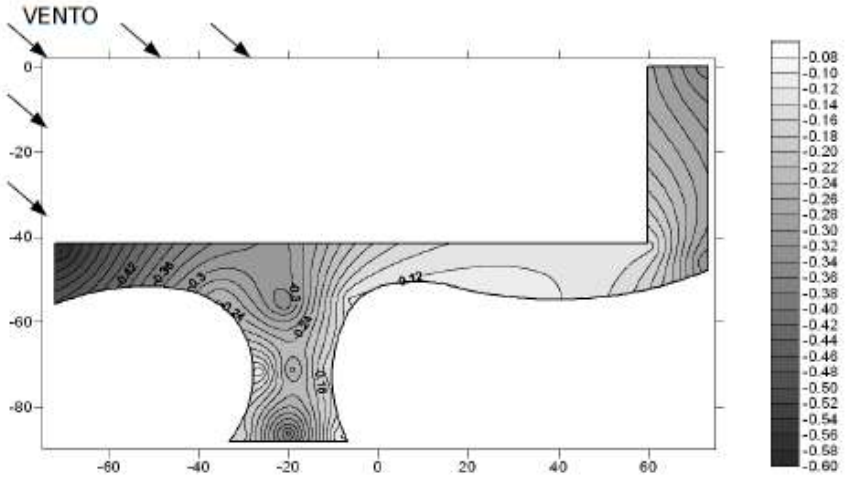
EXEMPLO – SANTUÁRIO PADRE MARCELO ROSSI



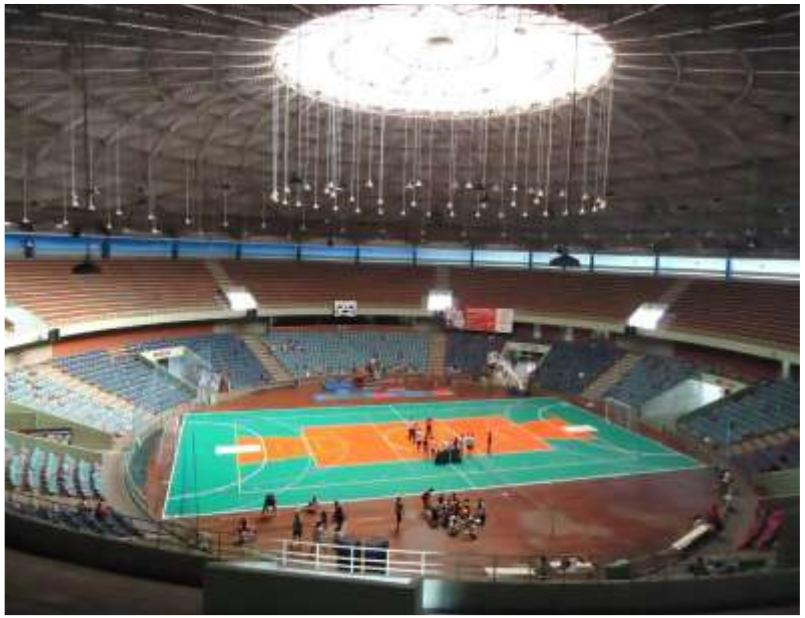
➢ Túnel de Vento e CFD

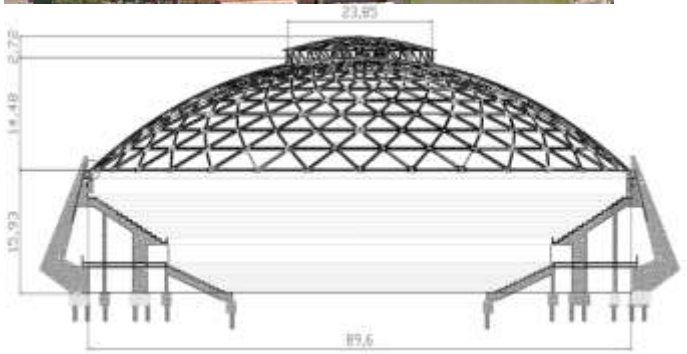
EXEMPLO – SANTUÁRIO PADRE MARCELO ROSSI





Ginásio Poliesportivo Geraldo Magalhães





Nome de Guerra: Geraldão

- Cobertura metálica em Domo apoiada sobre estrutura em C.A.
- Inauguração: 1970
- Estrutura da cobertura em arcos treliçados de alumínio
- Apoios “móveis” na direção radial
- Falta de manutenção levou à interdição em 2011

Ginásio Poliesportivo Geraldo Magalhães

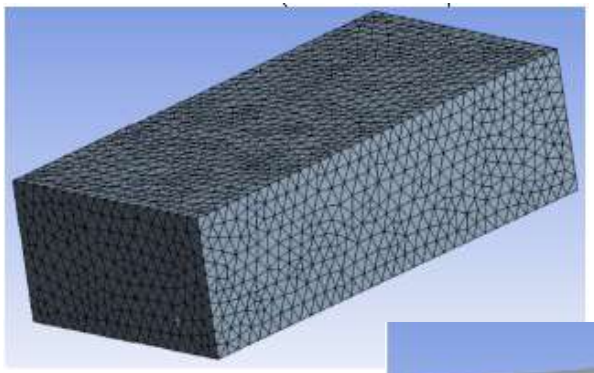
- Outras estruturas em Domo

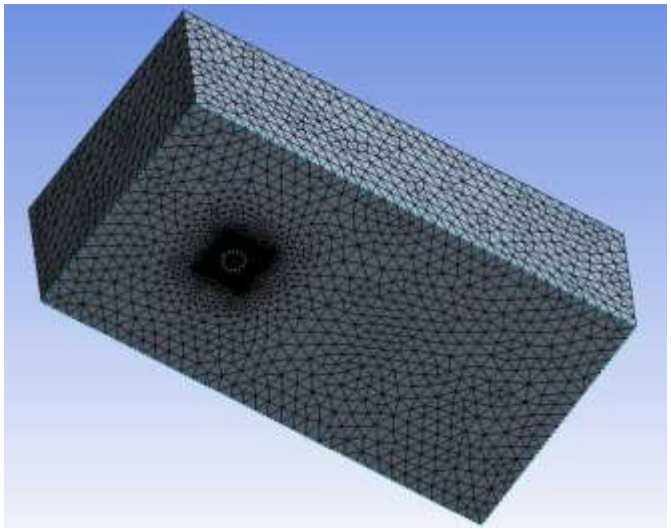
Figura 2 - Tacoma Dome (Estados Unidos)

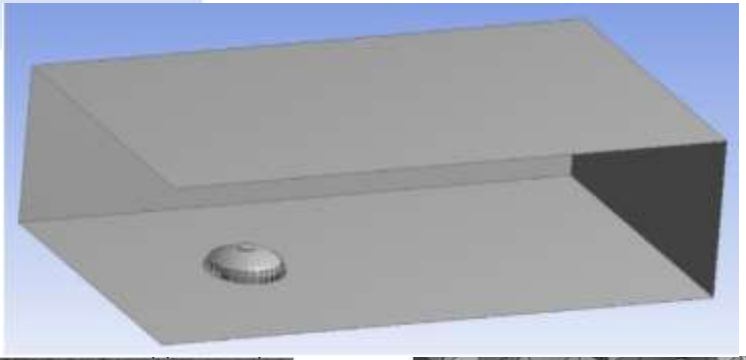
Figura 3 - Ticketpro Dome (África do Sul)

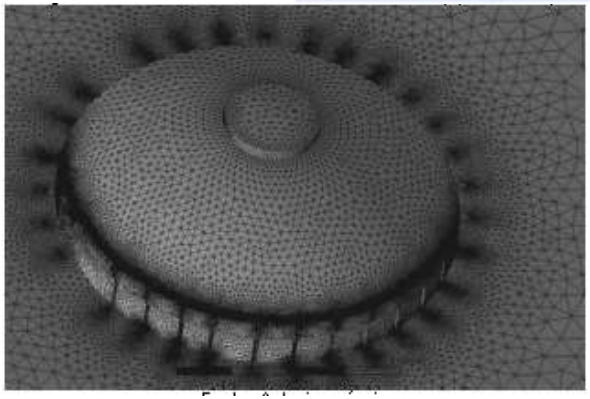
Fig. 3. Domed roof of Taj Mahal in Agra, India.

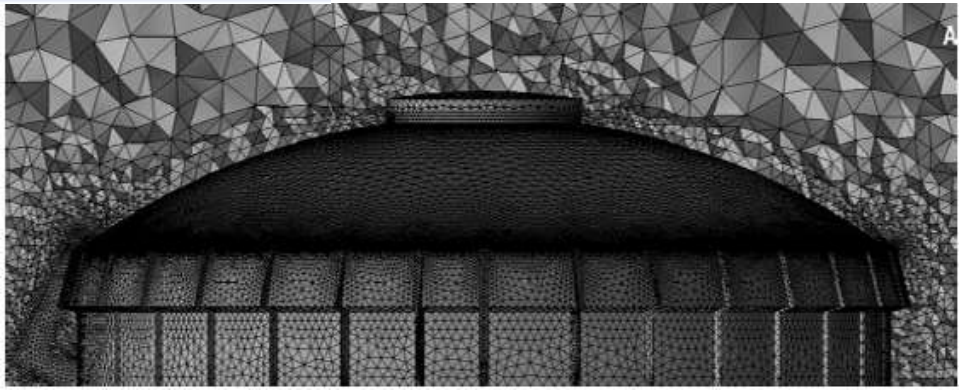
Ginásio Poliesportivo Geraldo Magalhães



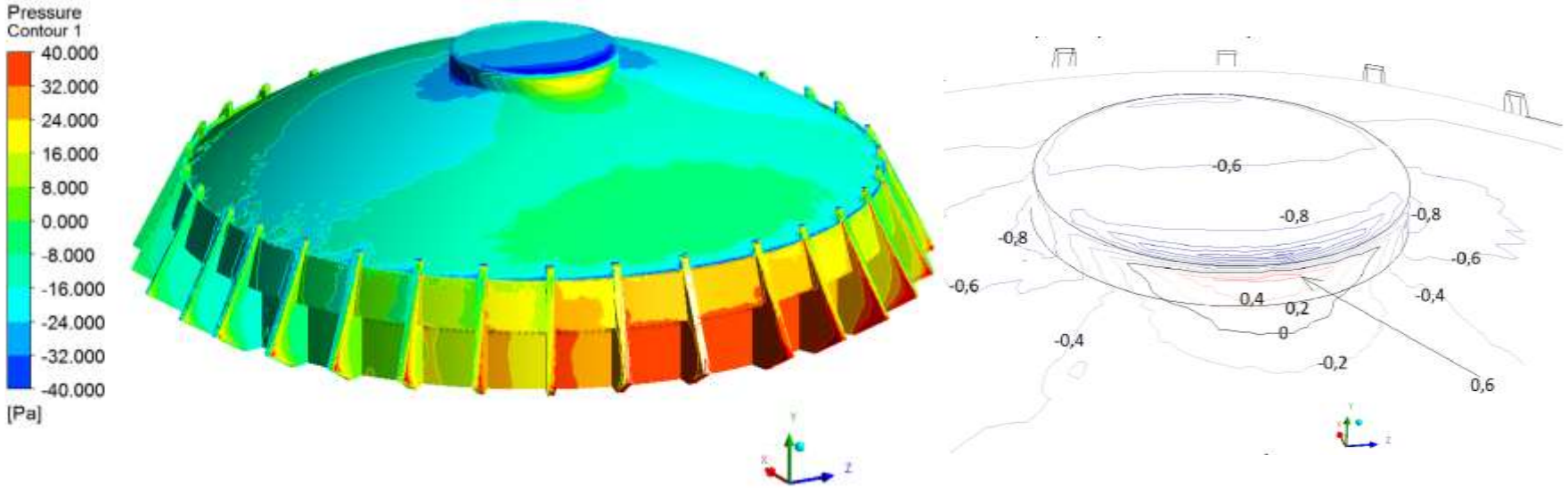


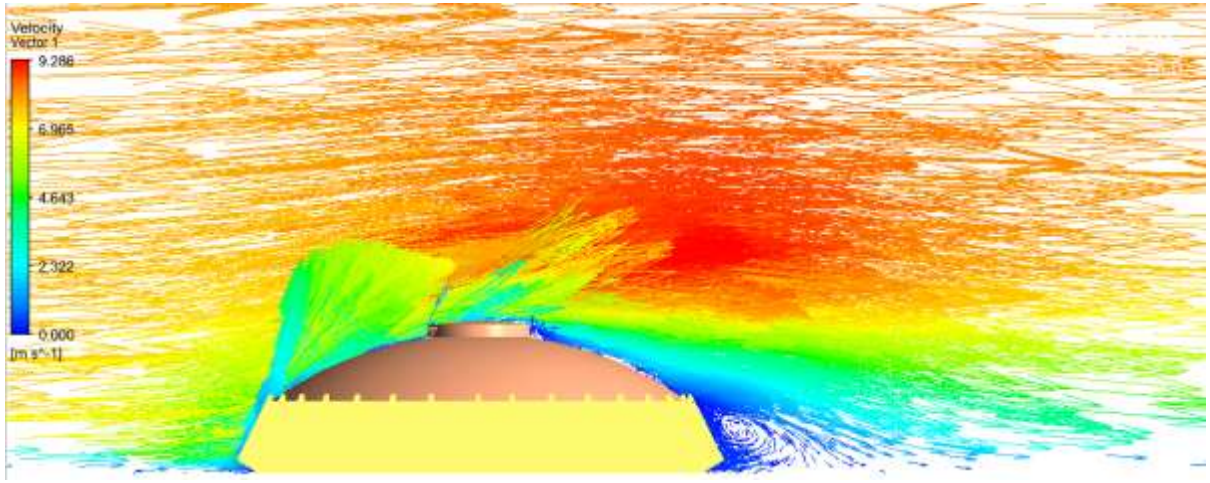




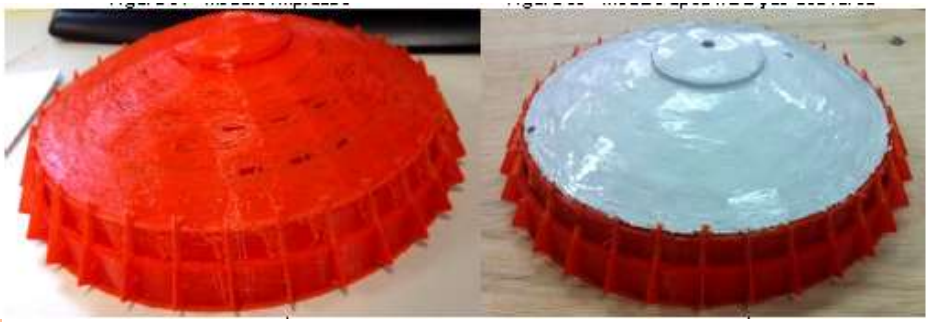


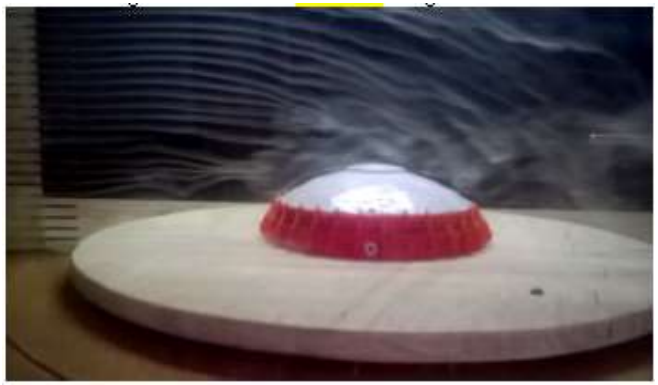
Ginásio Poliesportivo Geraldo Magalhães





Ginásio Poliesportivo Geraldo Magalhães



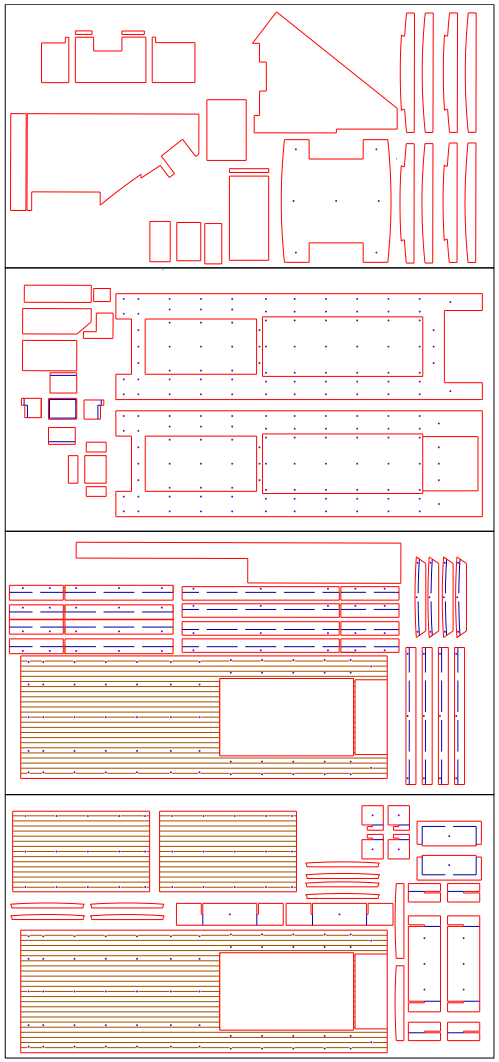


Túnel de vento (Edifícios Altos)

- Balneário Camboriú

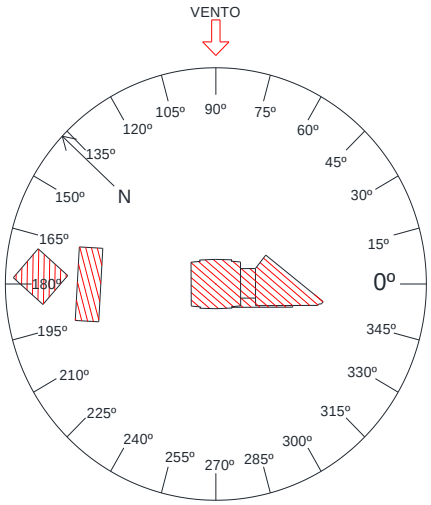
- Eldorado Tower

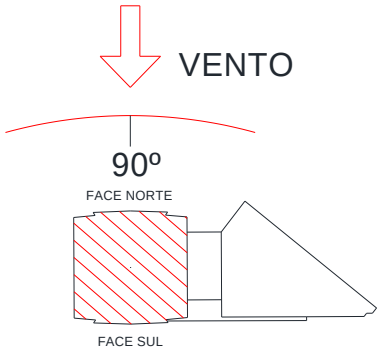
Túnel de vento (Edifícios Altos)



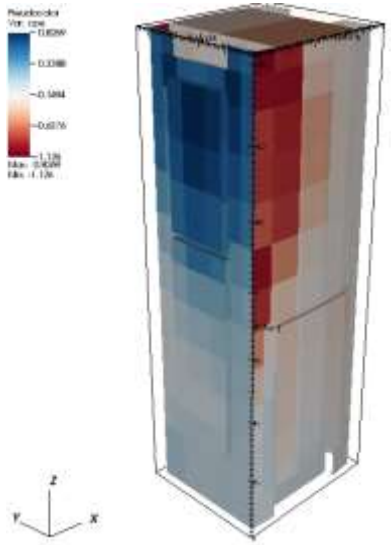
Madeira mdf (cortada a laser)

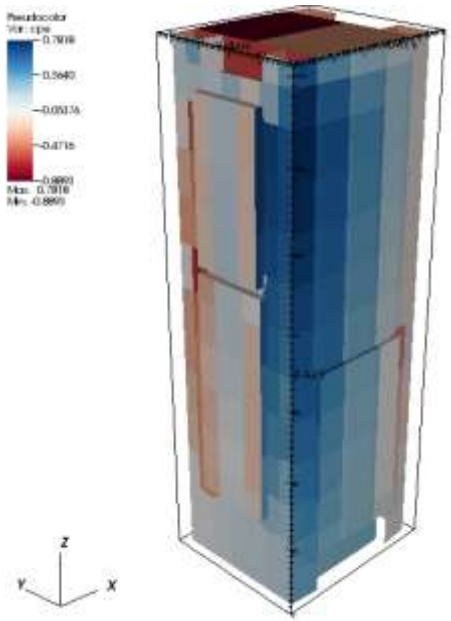
Túnel de vento (Edifícios Altos)

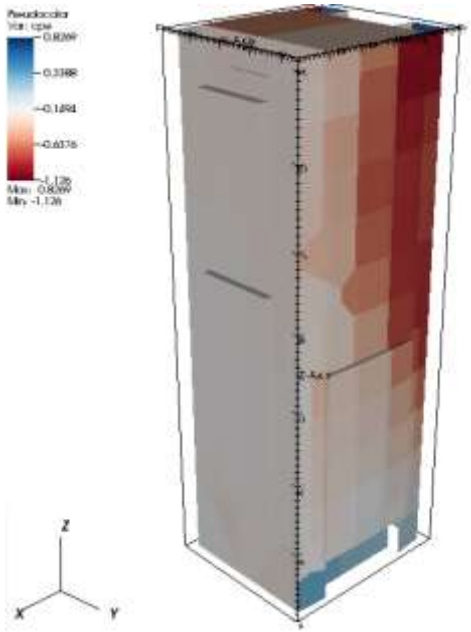




➢ Túnel de Vento e CFD







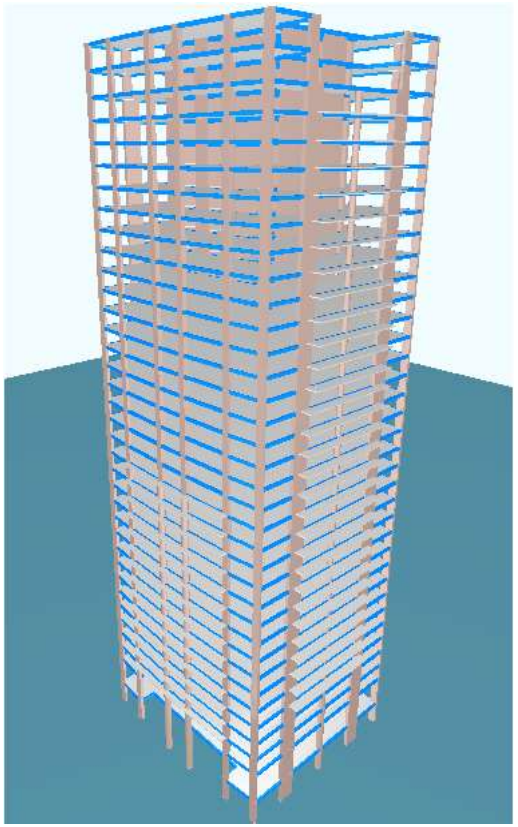


Tabela 7 - Modos de vibração da estrutura

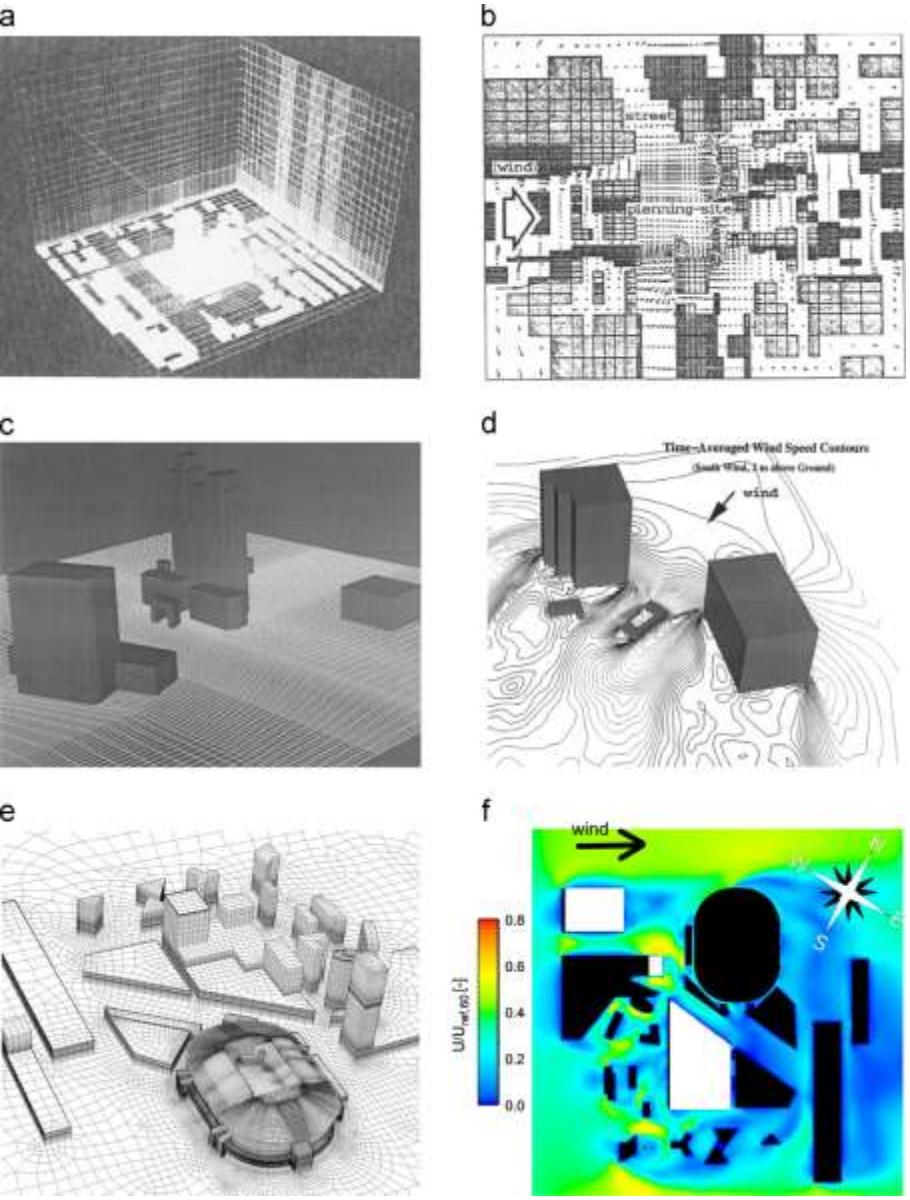
Modal	Período (s)	Frequência (Hz)	Descrição
1	4,749	0,211	*torção*
2	4,517	0,221	*flexão em y*
3	4,335	0,231	*flexão em x*
4	1,491	0,671	*torção*
5	1,374	0,728	*flexão em y*
6	1,087	0,920	*flexão em x*
7	0,787	1,271	*torção*

Tabela 9 – Deslocamentos horizontais máximos observados

Deslocamento	Vento de Norma			Túnel de Vento (caso 1 / 2)			Referência		Conclusão
	Valor máximo	Comb.	Descrição	Valor máximo	Comb.	Descrição			
Topo do edifício	**2,49 cm**	**27**	**Vento (22) 315°**	**5,79 cm / 6,10 cm**	**26 / 27**	Vento (21) 300° / (22) 315°	H/1700 H=14250 cm	8,38 cm	**ok**
Entre pisos	**0,08 cm**	**15**	**Vento (10) 135°**	**0,21 cm / 0,22 cm**	**26/ 27**	Vento (21) 300° / (22) 315°	Hi/850	0,45 cm	**ok**

Fonte: Adaptado do TQS®

➢ Pesquisa



Application: CFD simulation of pedestrian-level wind conditions around buildings

High-rise buildings can introduce high wind speed at pedestrian level, which can lead to uncomfortable or even dangerous conditions. Wind discomfort and wind danger can be detrimental to the success of new buildings. Wise (1970) reports about shops that are left untenanted because of the windy environment that discouraged shoppers. Lawson and Penwarden (1975) report the death of two old ladies due to an unfortunate fall caused by high wind speed at the base of a tall building. Today, many urban authorities only grant a building permit for a new highrise building after a wind comfort study has indicated that the negative consequences for the pedestrian wind environment remain limited. Note that a wind comfort study is generally performed by a combination of three types of information/data: (1) statistical meteorological information; (2) aerodynamic information; and (3) a comfort criterion. CFD or wind-tunnel measurement data can be used to provide part of the aerodynamic information.

➢ Cinemática do Escoameno de um Fluido

$$p = p(x, y, z, t)$$

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

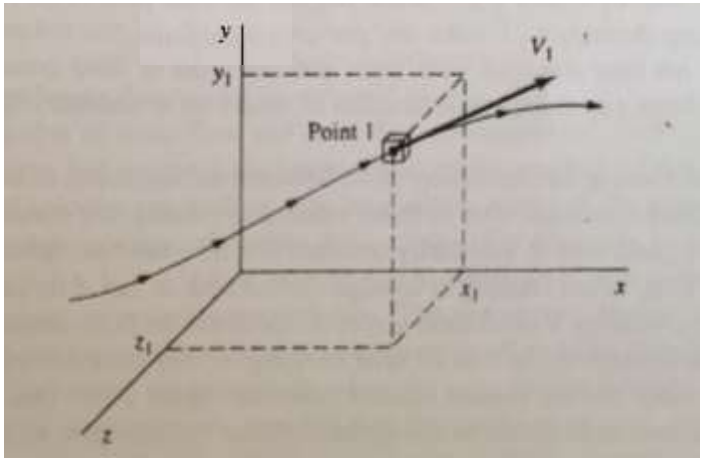
$$T = T(x, y, z, t)$$

$$\boldsymbol{v} = u\boldsymbol{i} + v\boldsymbol{j} + w\boldsymbol{k}$$ (Vetor velocidade)

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

$$v = v(x, y, z, t)$$

$$w = w(x, y, z, t)$$



Escoaento Permanente (estacionário):

As grandezas características do escoamento, em cada ponto do espaço, permanecem invariantes com o tempo:

$$\boldsymbol{v} = \hat{\boldsymbol{v}}(x, y, z)$$

Escoaento Variável (transiente):

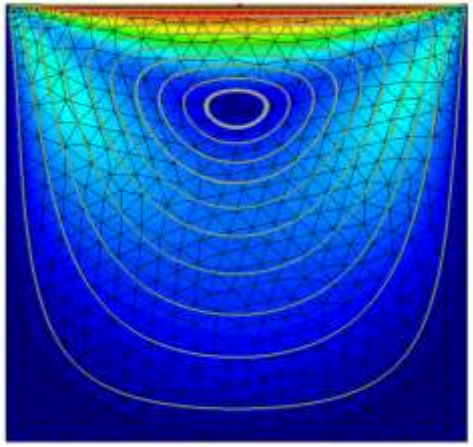
As grandezas características do escoamento são também função do tempo:

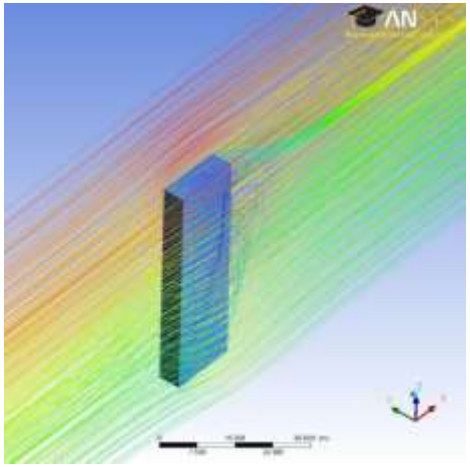
$$\boldsymbol{v} = \hat{\boldsymbol{v}}(x, y, z, t)$$

➢ Cinemática do Escoameno de um Fluido

Linha de Corrente:

É uma linha tangente ao vetor velocidade em cada ponto correspondente, em dado instante:

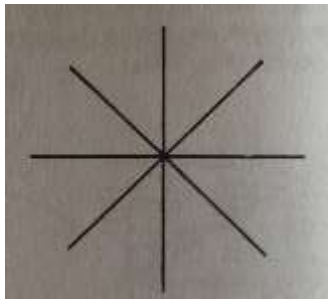




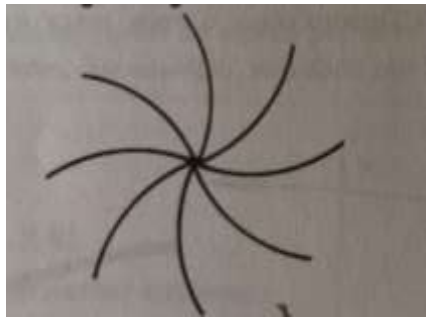
Trajetória:

É o lugar geométrico dos pontos ocupados por uma mesma partícula no decorrer do tempo.

Ex: Esguicho giratório de jardim.



Trajetória



Linhas de Corrente

➢ Turbulência

Conceito:

A turbulência é um fenômeno de difícil modelagem matemática, tendo sido tratada durante muito tempo apenas empiricamente em razão do seu caráter aleatório. Theodore von Kármán foi um dos primeiros a estudar o assunto com enfoque mais matemático, definindo a turbulência como

"Flutuações irregulares da velocidade governadas por equilíbrio estatístico"

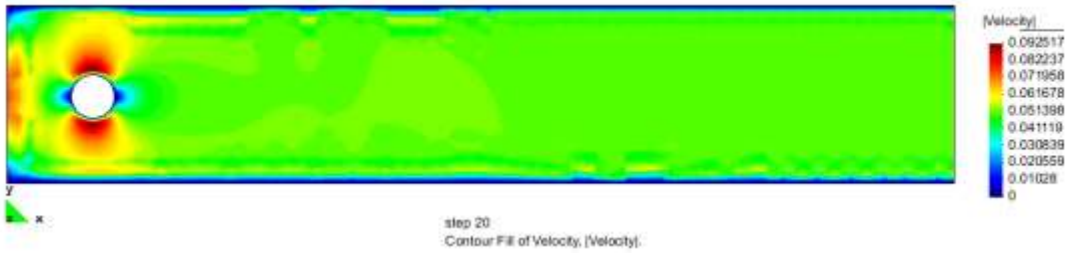
As camadas de fluido, que antes deslizavam suavemente umas sobre as outras no escoamento laminar, agora trocam não só moléculas individuais, mas grupos inteiros de moléculas. Segundo Rebuffet:

"Partículas fluidas que se deslocam em todas as direções de um modo desordenado e caótico"

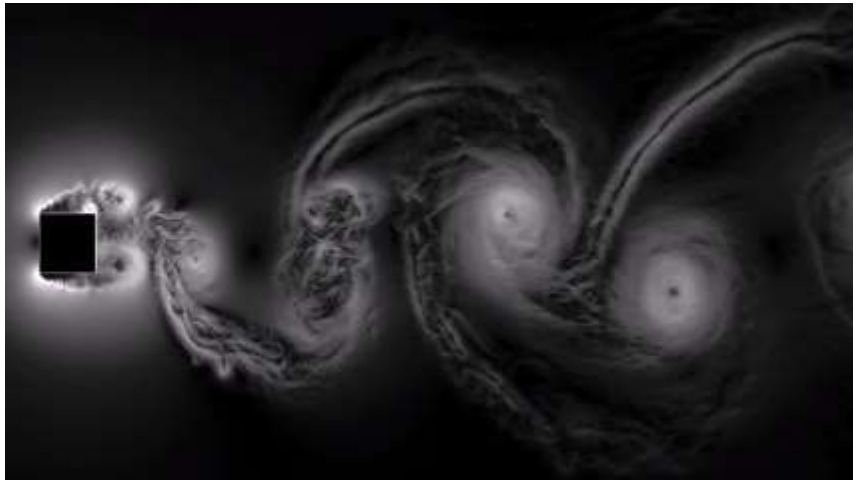
Entre estas partículas, teremos fortes gradientes de velocidade, com formação de redemoinhos intensos, que giram e perambulam pelo fluido. A passagem das partículas e dos redemoinhos origina flutuações da velocidade nos diferentes pontos da corrente. Não podemos mais imaginar o escoamento como laminar. Ele agora é chamado de TURBULENTO.

➢ Turbulência

NOTA: Não confundir escoamento turbulento com escoamento turbilhonar. Neste último, há formação de grandes redemoinhos, chamados também de turbilhões, que não têm caráter aleatório, mas se formam sempre no mesmo local e normalmente de forma periódica.



Re=100
(escoamento laminar)



Re=2200
(escoamento turbulento)

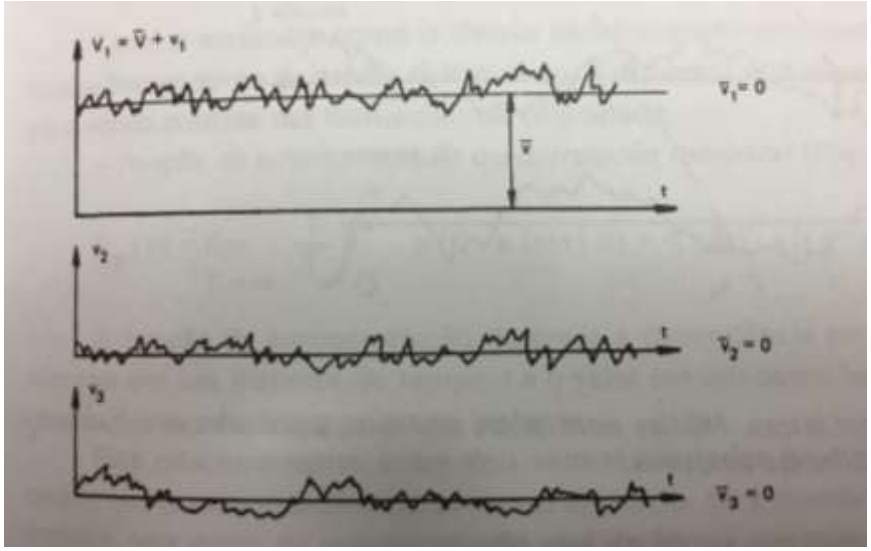
➢ Turbulência

Matematicamente:

$$v(x,t) = v_m(x) + v_{bar}(x,t)$$

Vel. média

Vetor flutuação de velocidade (vetor rajada)



A viscosidade do fluido promove um efeito atenuante na flutuação das velocidades, amortecendo-as e dissipando energia.

Quando as forças viscosas são preponderantes comparadas às forças de inércia, as flutuações de velocidade são atenuadas até desaparecerem, caracterizando um escoamento laminar.

➢ Turbulência (Experiência de Reynolds)

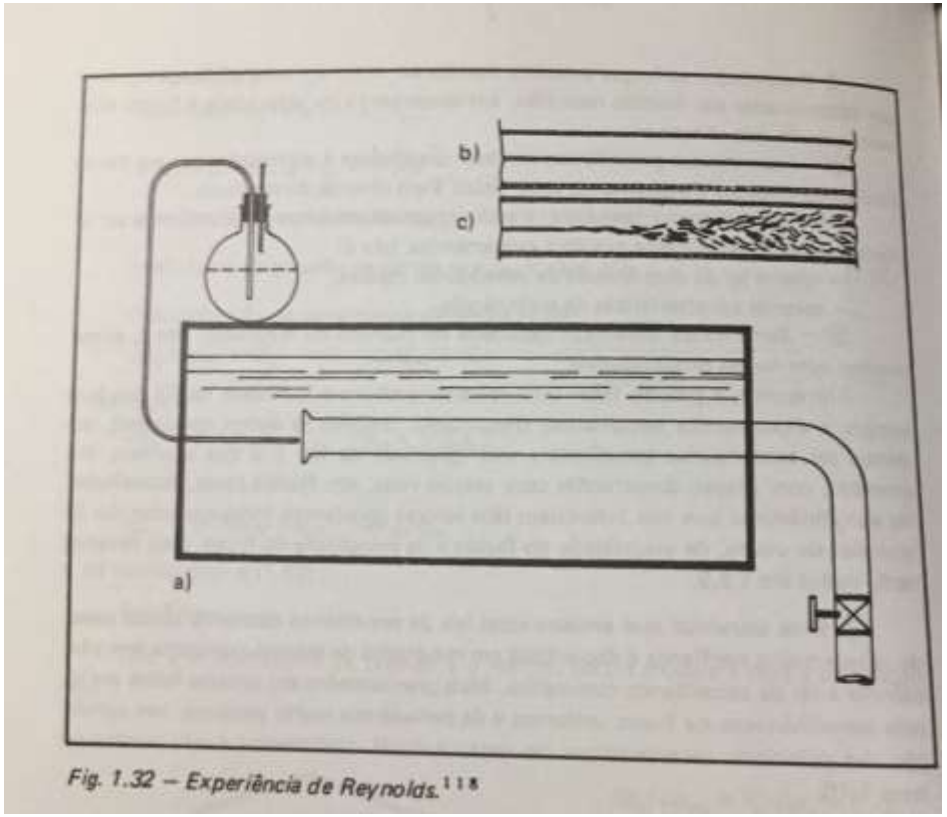
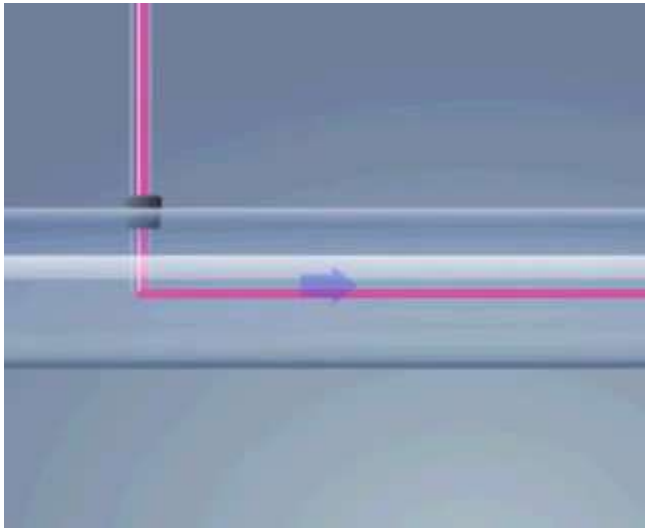


Fig. 1.32 – Experiência de Reynolds.[118]

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}$$

$Re_{crít}$ = 2000