

# A Física do Velejar

Philippe Gouffon

Instituto de Física – USP

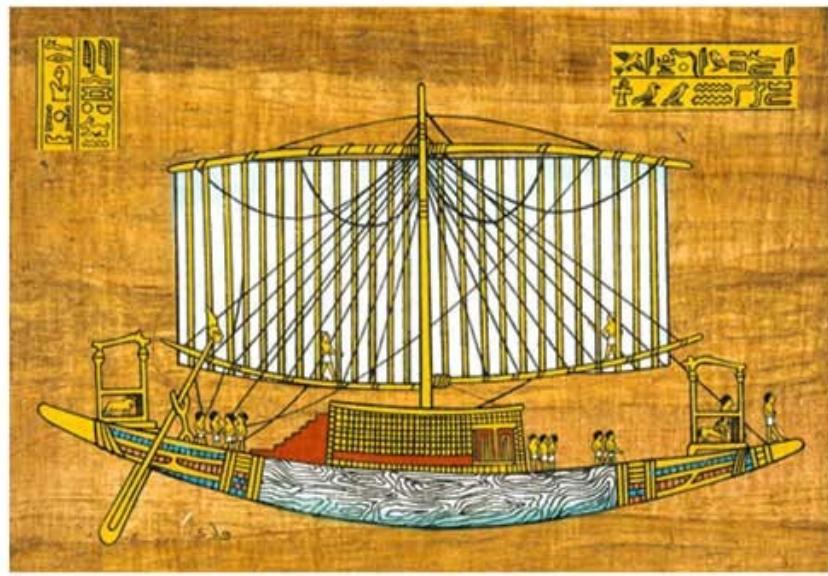
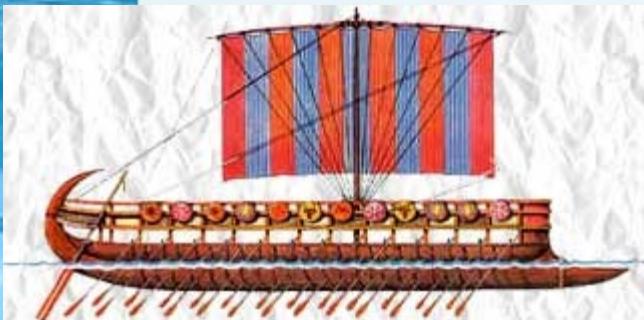
*pgouffon@if.usp.br*

# Programa

- Transporte e esporte com vento: soluções
- O veleiro recente
- Física do velejar
  - Empopada
  - Través
  - Orça
  - Estabilidade (lateral)
- Física, computação e realidade
- Conclusão

# História em imagens

Fenícios ...

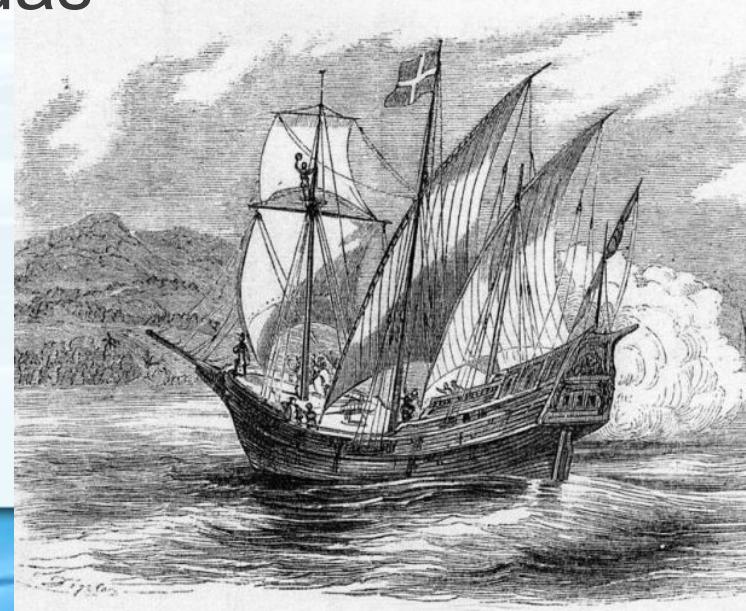


... e Egípcios velejavam  
em 4000AC

- Até 900 DC, usavam velas quadradas
  - ✓ Seguiam os ventos e correntezas
  - ✓ Podiam seguir um pouco além de 90 do vento
  - ✓ Fenícios chegaram(?) até a América
- Em 900 DC foi inventado a vela latina
  - ✓ Ela permite subir contra o vento e manobras rápidas



Dohw (arabia)



Caravela Nina



Sunfish (XX sec.)

# A vela latina evoluiu para o velame com carangueja



Gaff rigged schooner.

Her sails, from left to right:

- Jib,
- staysail,
- gaff foresail,
- gaff mainsail
- Main gaff topsail

A vela latina evoluiu também para o velame tipo Bermuda (ou Marconi)



# Evolução da orça

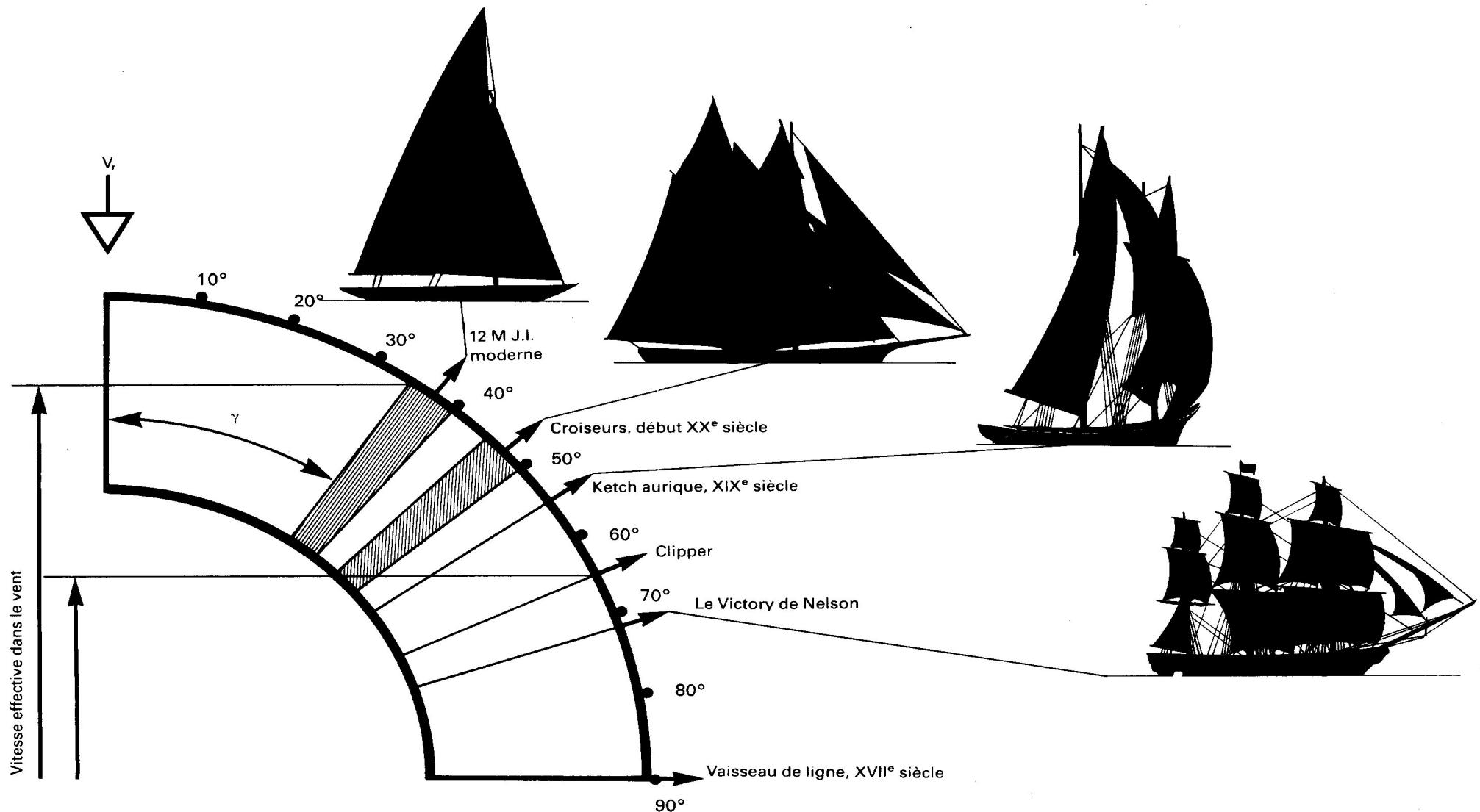


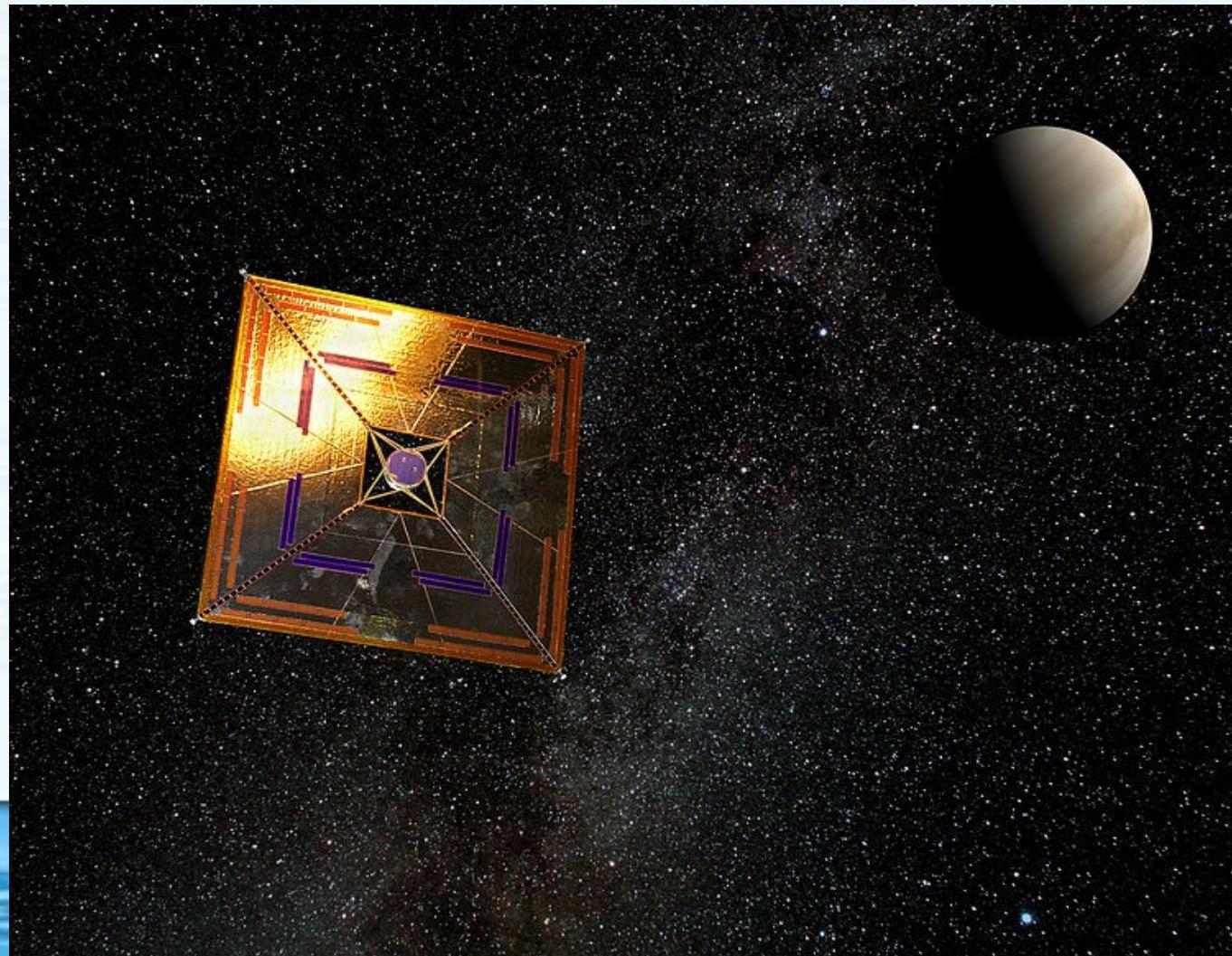
Fig. 17. Rapport entre les qualités de navigation de différents voiliers, d'après la route suivie  $\gamma$ , et leur potentiel de vitesse effective dans le vent.

# Modernos clássicos



# Vela só em barco?

Vento solar... IKAROS, 2010



# Em terra



Rio Grande: vagonetas

Recorde: 204 km/h

# Sobre gelo



**Recorde de velocidade: 230km/h**

# Cargueiro com “kite sail”



Economiza de 30% a 40% de combustível

# Cargueiro sem vela movido a vento



E-SHIP 1 no porto de Rio Grande, 01/2011

# A vela em números

*Velocidade é dada em nós (kts ou kn), 1M/h (ou 1MN/h) = 1852m/h*

**Uma evolução vertiginosa estes últimos anos:**

- Travessia do Atlântico – leste-oeste – **2900M (5370km):**
  - 1905: Charles Barr: 12d 4h, 10,02 kts (monocasco)
  - 1980: Eric Tabarly: 10d 5h, 11,93 kts (trimaran)
  - 2009: Pascal Bidegorry: 3d 15h, 32,94 kts (61km/h) (trimaran)
- Volta ao mundo – **21760M (40300km):**
  - Groupama 3: 48d 7h (18.76kts)
  - IDEC (**solitário**): 57d 13h (15,84 kts)
  - (lancha: 61 dias, por Suez e Panamá)

# Velocidade à vela

- Distância em 24h:
  - Banque Populaire V (P.Bidegorry), 908,2 nm (37.84kts)
  - Ericsson 4 (**Torben Grael**), 596,6nm (24.85kts)
- 1 milha náutica:
  - Hydroptère, 50,17 kts
- 500m:
  - Hydroptère, 51,36 kts
  - Kite Board, 55,65 kts
- O Hydroptère chegou a **61 kts (113km/h)** ... e quebrou

# Evolução recente

- Ao que se deve esta evolução?
  - A Física não mudou
  - Os materiais mudaram muito
    - Rigidez maior
    - Densidade menor
    - Monitoramento durante o uso
  - Simulação numérica
  - Poucas idéias novas

# Um exemplo de evolução no topo da cadeia alimentar: America's Cup



**SUI 91 e SUI 100 (Alinghi), 32<sup>a</sup> AC 2007**

L.O.A. 24m

Deslocamento: 24 ton.

Área vélica: 325/750 m<sup>2</sup>

Boca: 5.50m

Mastro: 35m



**Shamrock V, 14<sup>a</sup>AC, 1930**

L.O.A.: 36.52 m.

L.W.L.: 24.68 m.

Boca: 6.04 m.

Deslocamento: 134 tons.

Área vélica: 700.48 m<sup>2</sup>

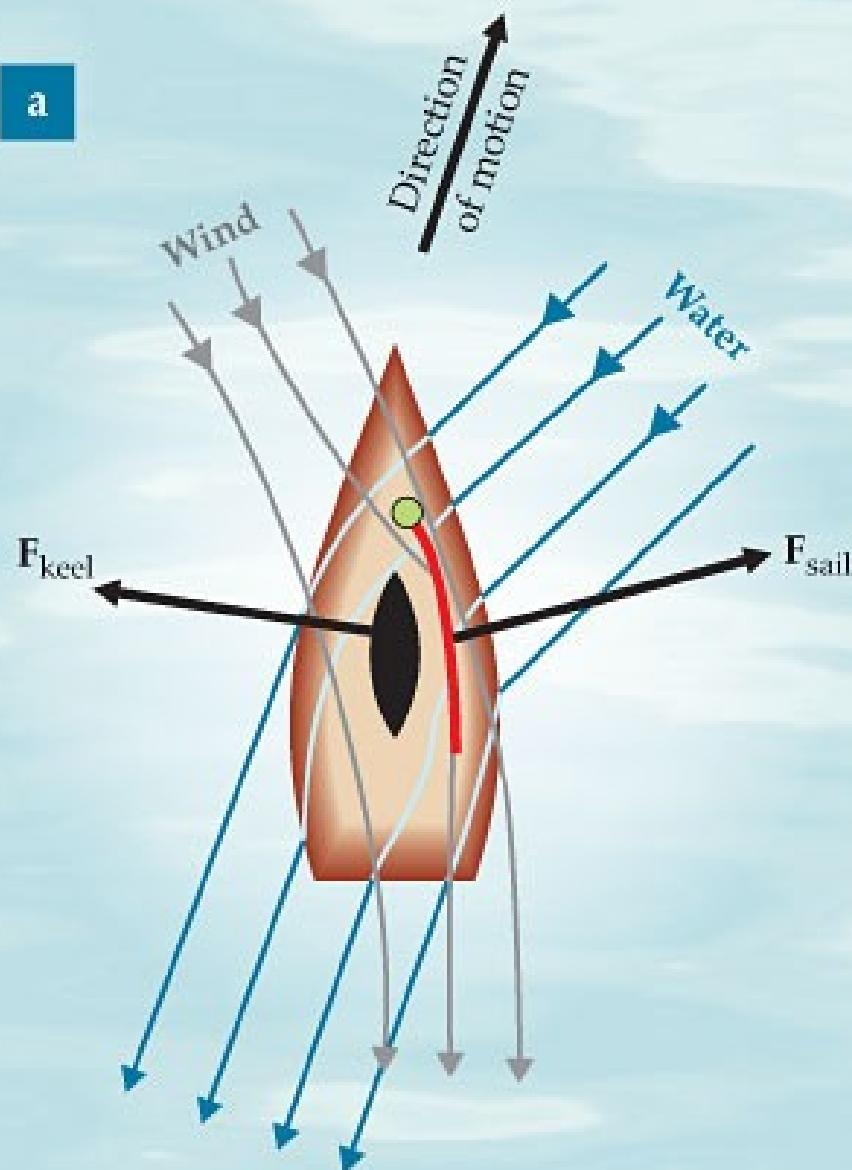
Mastro: 46.63 m.

# A física da vela

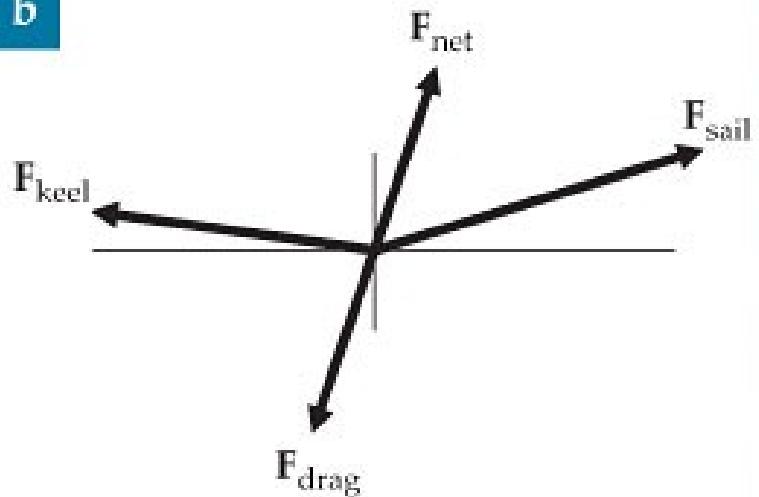
- O que os exemplos de veículo a vela tem em comum (excetuando o IKAROS)?
- Vela com vento propulsor
- Meio distinto do ar que define a direção do movimento (água, gelo, terra,...) - o veículo se “apoia” neste meio.
- Veículo se desloca na **interface** dos meios
- **É a existência desta interface que permite o velejar.**

# Vento + água + veleiro = velejar

a



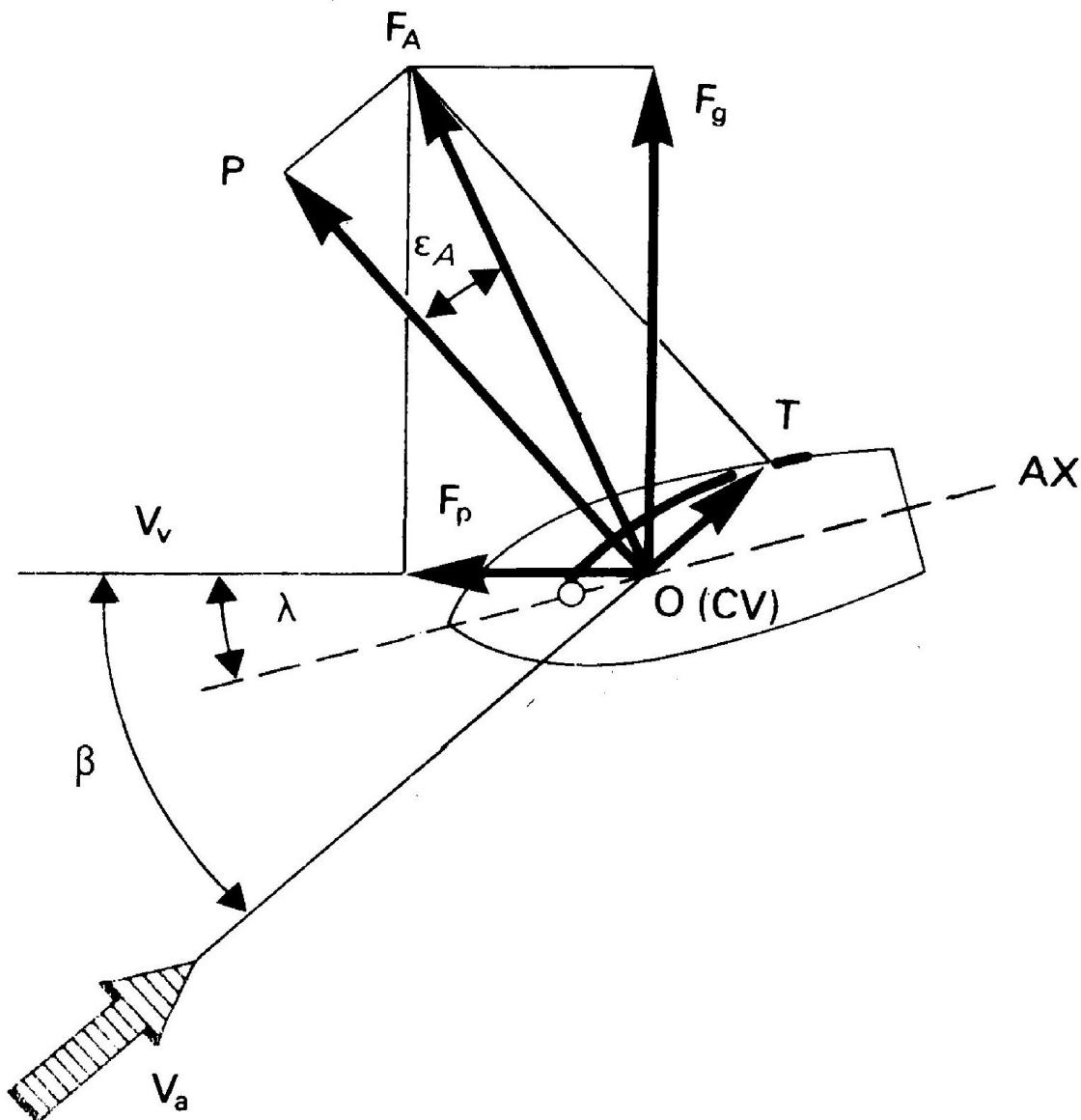
b



# Forças que atuam num veleiro

- Forças (a soma deve ser nula):
  - Vento na vela – depende da direção relativa do vento em relação ao movimento do barco. Há o **vento real** e o **vento aparente**
  - Força de empuxo da água cancela o peso
  - Atrito do casco na água e atrito das superestruturas no ar
- Torques (a soma deve ser nula):
  - Força do vento na vela – torque do mastro
  - Força lateral da água no casco e quilha.
  - 2 torques: um aderna o barco, o outro tende a orçar ou arribar

# Forças que atuam no velame



AX – eixo do veleiro

$\lambda$  – ângulo de deriva

$V_v$  – velocidade do veleiro

$F_A$  – força aerodinâmica total

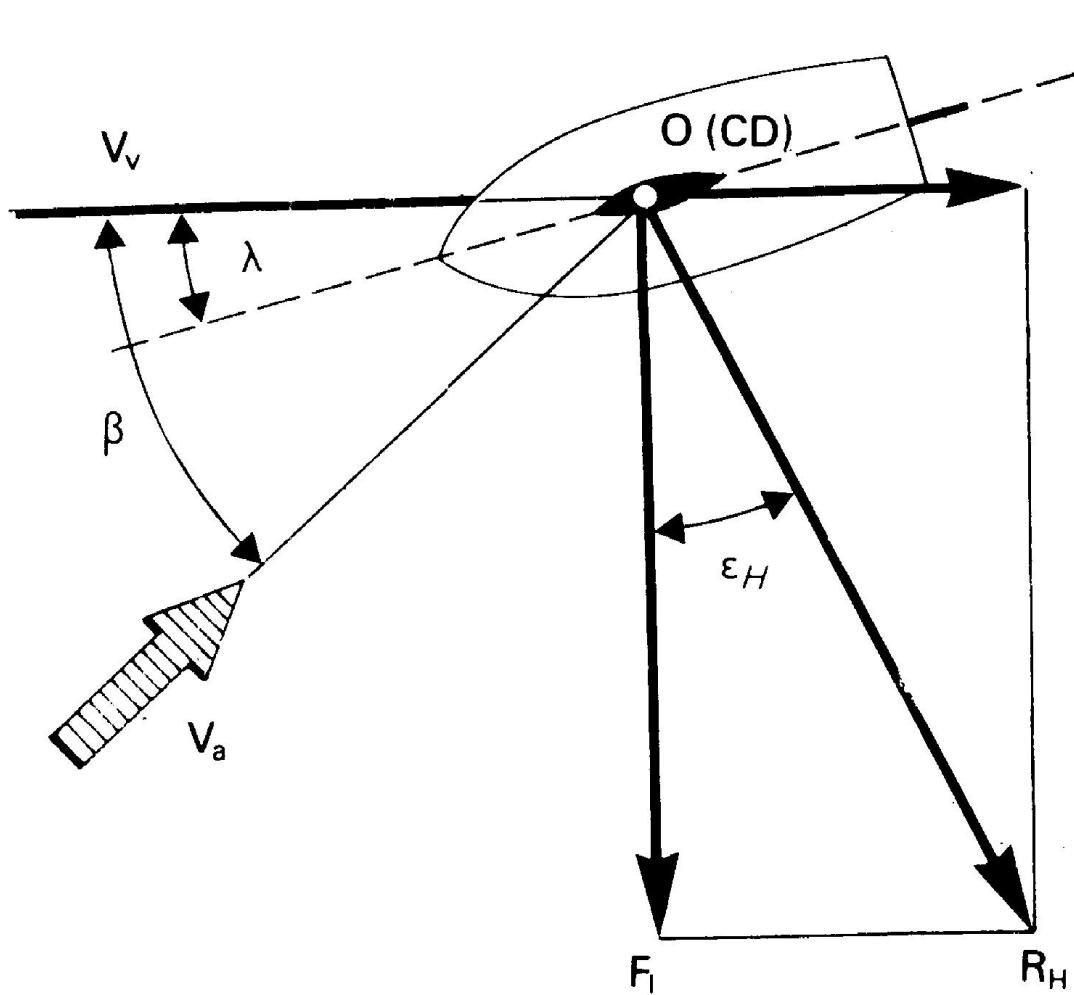
$F_p$  – força propulsora

$F_g$  – força geradora do torque

$T$  – arrasto do velame

$V_a$  – vento **aparente**

# Forças que atuam na quilha

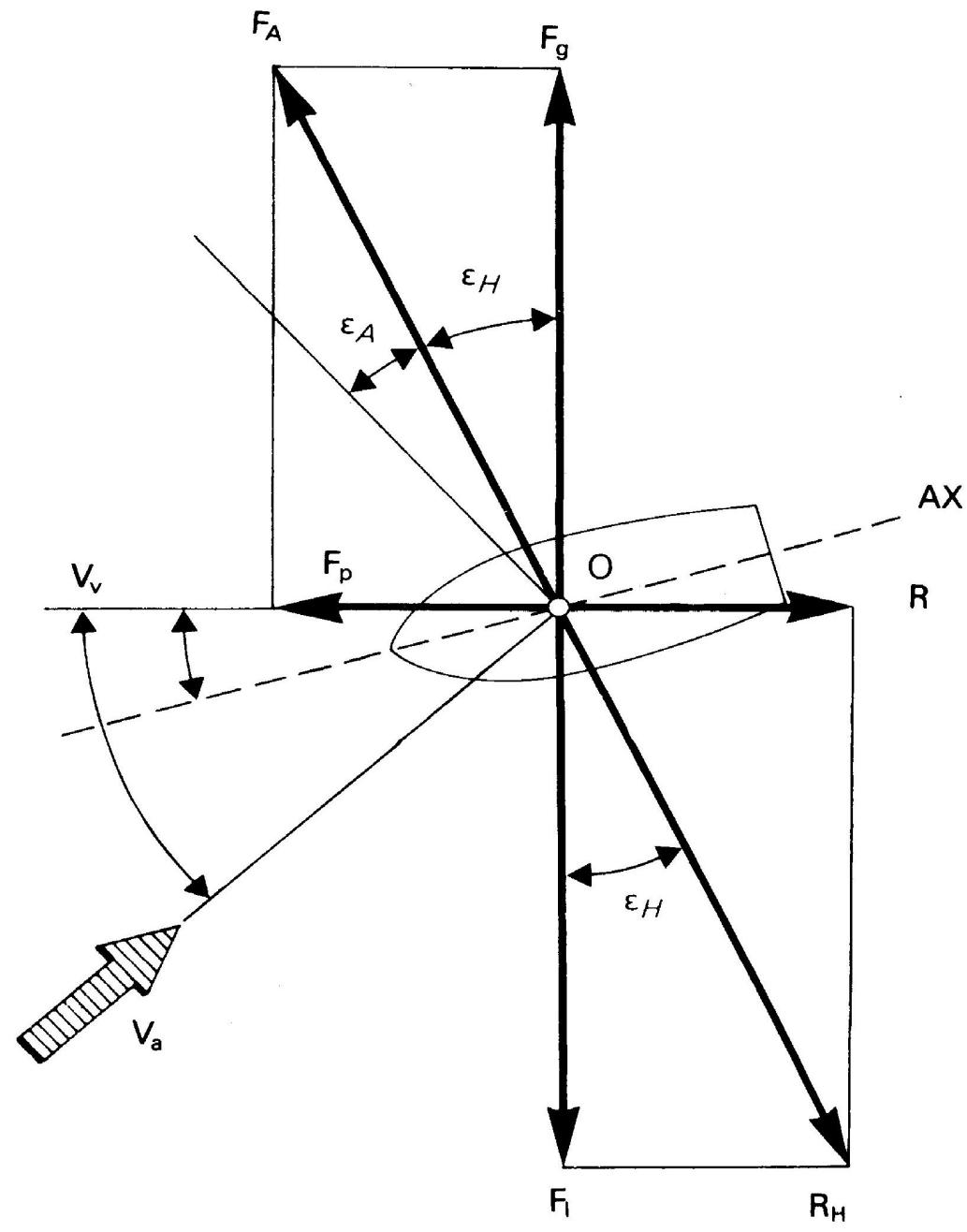


AX – eixo do veleiro  
 $\lambda$  – ângulo de deriva  
 $V_v$  – velocidade do veleiro

$R_H$  – força hidrodinâmica total  
 $F_p$  – força propulsora  
 $F_I$  – força lateral (torque)

$R$  – arrasto do casco e quilha  
 $V_a$  – vento **aparente**

# Equilibrio de forças e torques

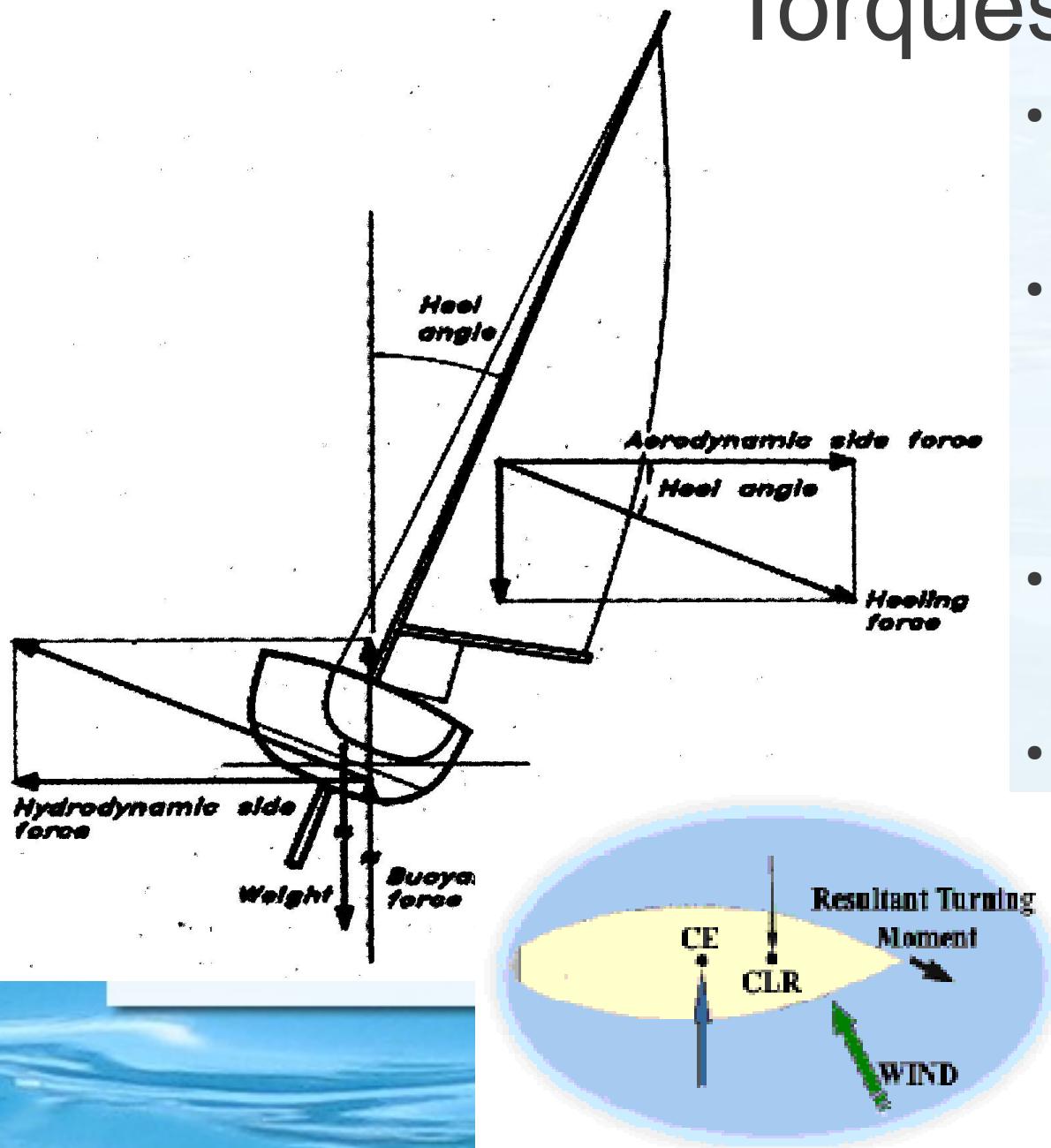


$F_A + R_H = 0$  - equilibrio das forças

$F_p + R = 0$  – barco em velocidade Constante

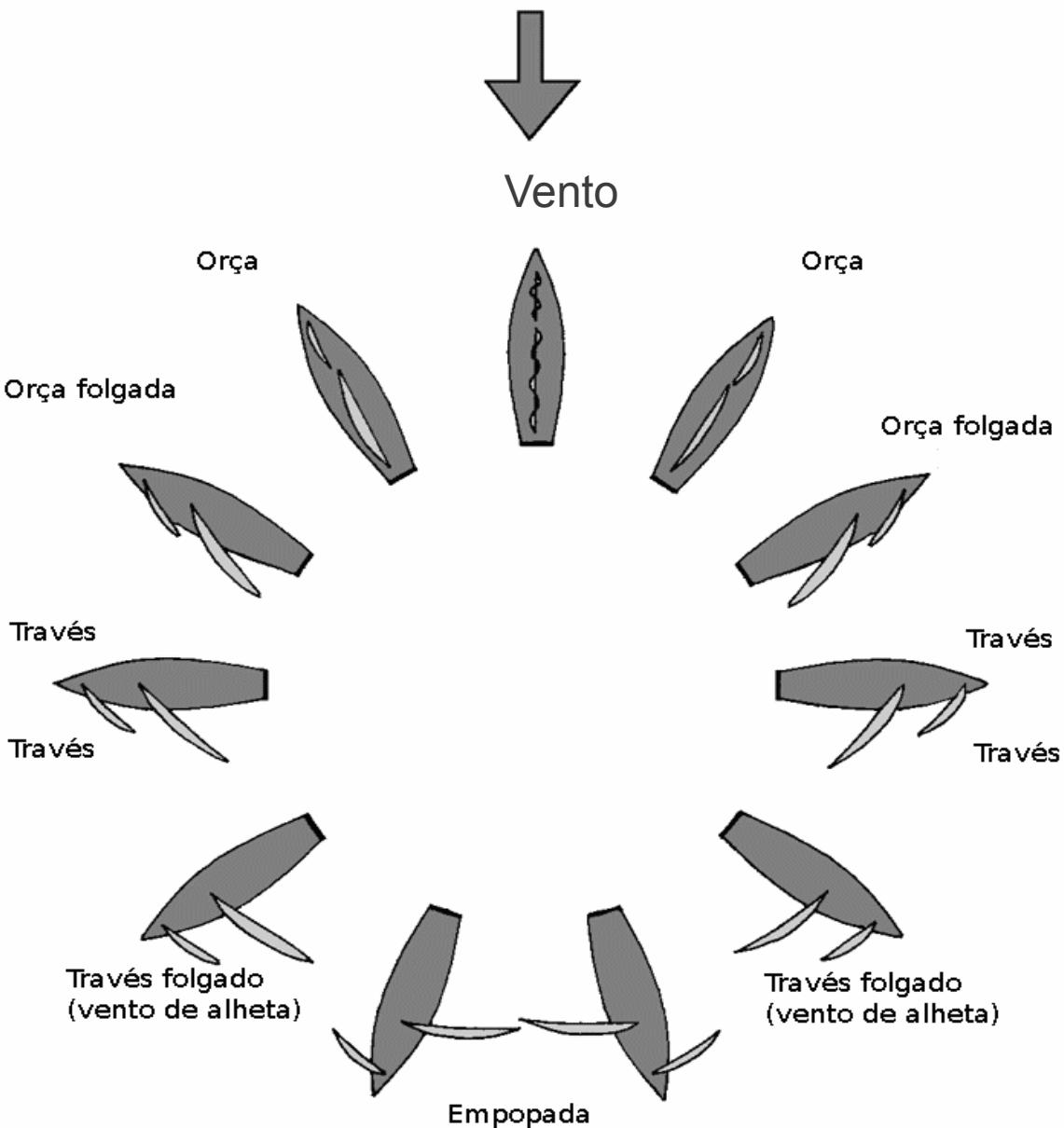
$F_g$  e  $F_I$  geram torques que se cancelam

# Torques



- O torque da vela tende a adernar o barco
- O torque do peso do barco (quilha, etc) em relação ao centro de rotação tende a endireitar o barco
- O torque do empuxo tende a endireitar.
- Isto gera a curva de estabilidade (adiante)
- Torque na horizontal

# Alguns termos



- Há um **termo exato** para cada objeto e ato num veleiro
- A cada faixa de ângulo em relação ao vento há um nome associado
- Numa faixa em torno da direção de onde vem o vento é impossível velejar. Esta faixa depende do veleiro, do velame e da força do vento
- Cada faixa corresponde a um tipo escoamento de fluxo de vento e água na quilha, portanto de tratamento físico

# Empopada

Na empopada,

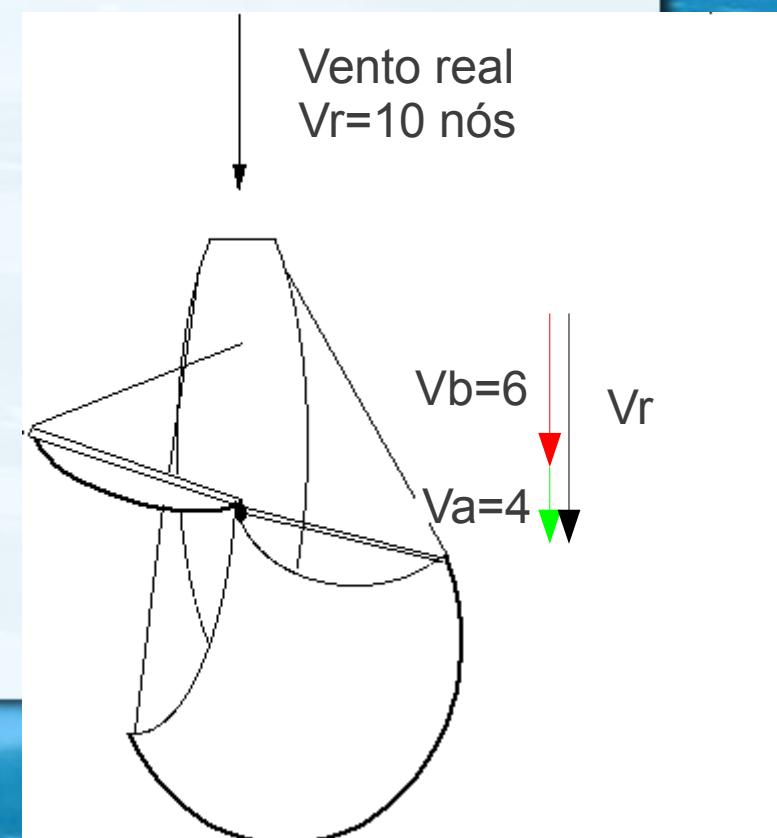
- O **vento real  $V_r$**  vem pela popa.
- O vento empurra a vela (e o barco)
- A **velocidade do barco  $V_b$**  é sempre inferior à do vento
- O **vento aparente  $V_a$**  vem pela popa, fraco
- O escoamento é **turbulento**

$$V_r = V_b + V_a$$

Exemplo:

Se  $V_r=10$  kts,  $V_b=6$  kts,  $V_a=4$  kts

Obs: Muitos evitam velejar empopados



# Través

- Vento real de 60 a 120 em relação ao barco, variando de través orçado a través folgado
- É o mais rápido e eficiente
- Barcos conseguem ir mais rápido que o vento
- Há grande escolha de velas
- O fluxo de ar é laminar
- A força é praticamente na direção do movimento (em barcos “normais”), portanto a quilha trabalha pouco (barco horizontal)

# Orça

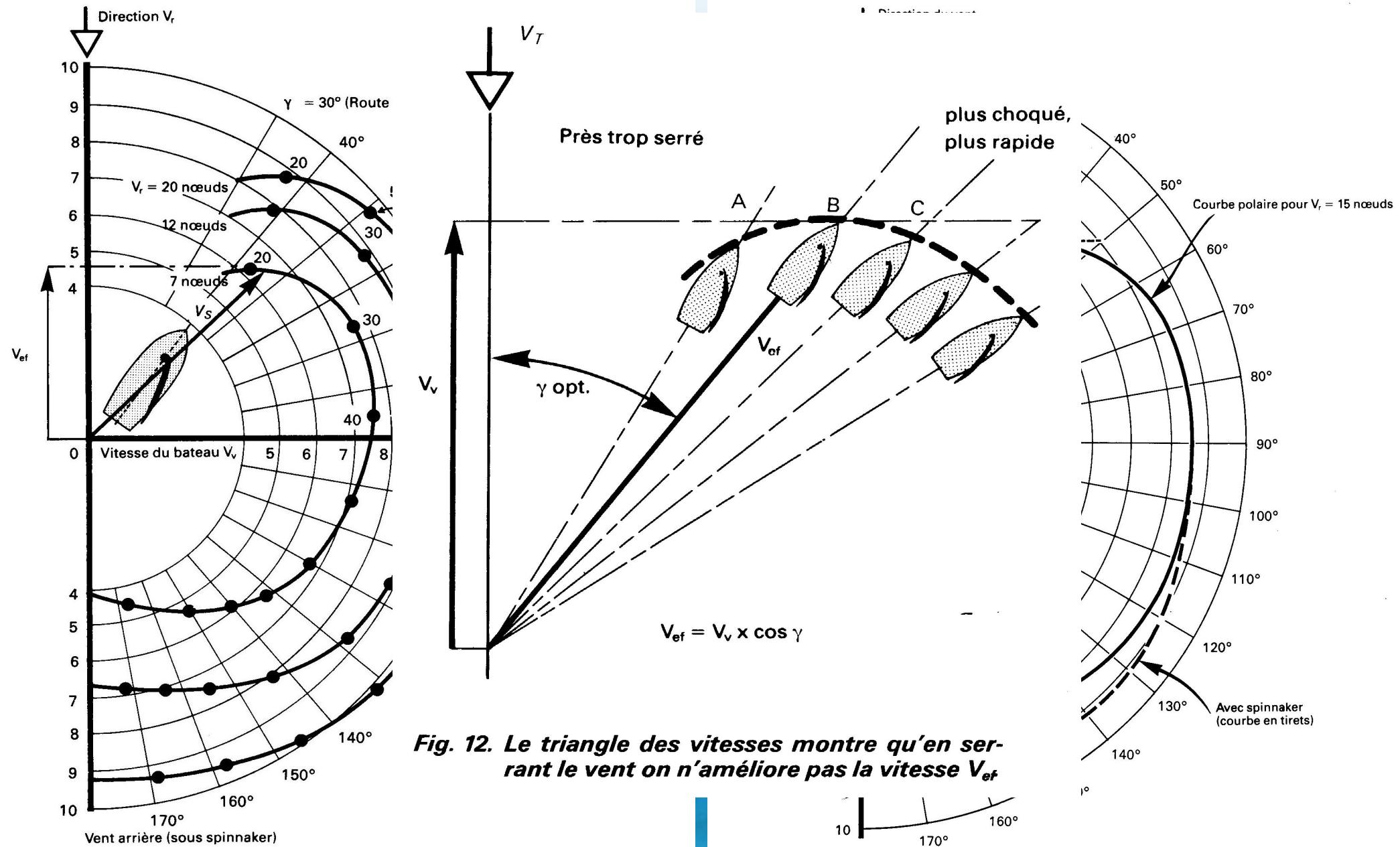
Ao lado, 2 veleiros da America's Cup (2000). Ambos estão orçando  
O vento deve vir de cima da imagem, verticalmente

- 
- The diagram illustrates the components of velocity for a sailboat on a reach. A vertical grey line represents the wind direction ( $V_r$ ). A red arrow points diagonally upwards and to the right, representing the boat's velocity relative to the water ( $V_b$ ). A green arrow points diagonally upwards and to the left, representing the apparent wind velocity ( $V_a$ ).
- Poucos barcos conseguem orçar desta forma
  - Ângulo típico: 40° em relação ao vento real, 30° em relação ao vento aparente.
  - O vento aparente na orça é quase a soma do vento real e da velocidade do barco

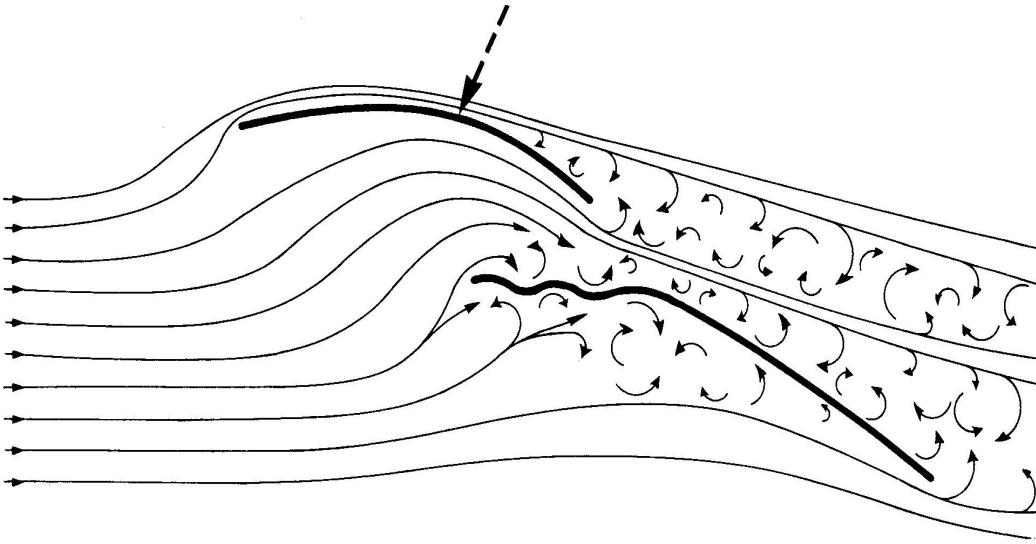
$$V_r = 10 \text{ kts} \quad V_b = 12 \text{ kts} \Rightarrow V_a = 20 \text{ kts}$$



# Curvas polares

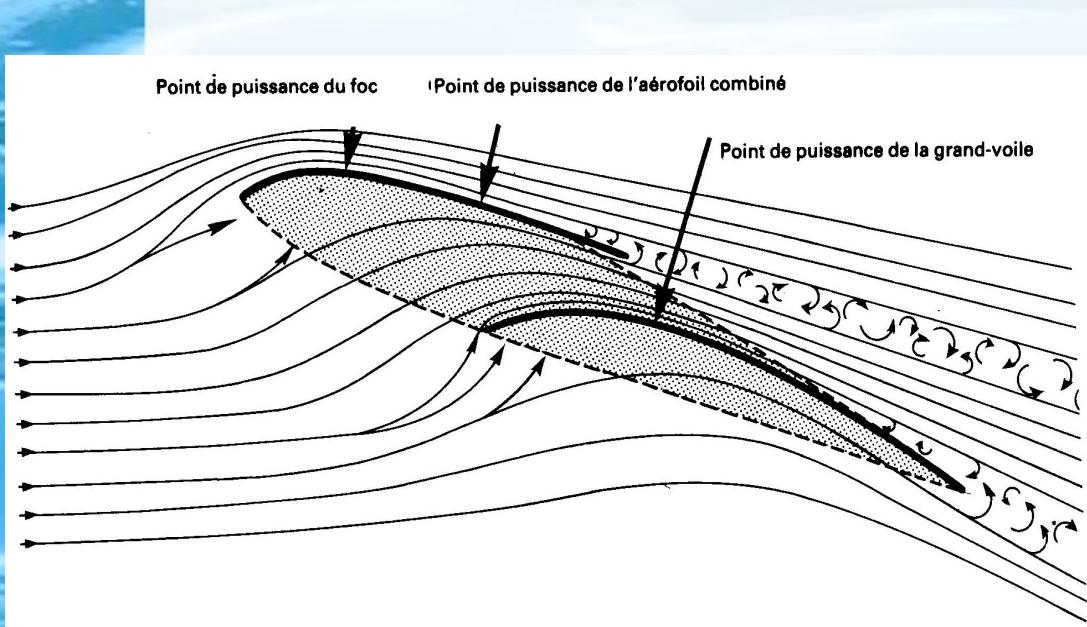


# Tipo de fluxo



## Vela mal regulada:

- Fluxo turbulento
- o vento decola a sotavento
- A força resultante diminui
- O barco não anda



## Vela bem regulada

- Fluxo laminar
- O vento é acelerado entre a buja e a mestre
- A força é maior e melhor direcionada
- O vento sai para trás paralelo à direção do deslocamento

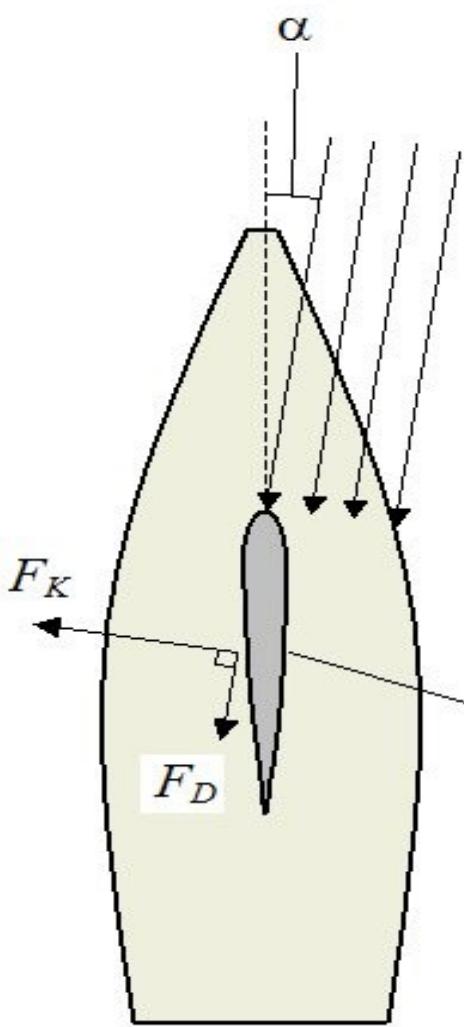
# Observando o fluxo



# Turbulência nas pontas



**Topo do mastro dos veleiros da Volvo Ocean Race 2001-2002 gerando turbulência**



# A quilha (e leme)

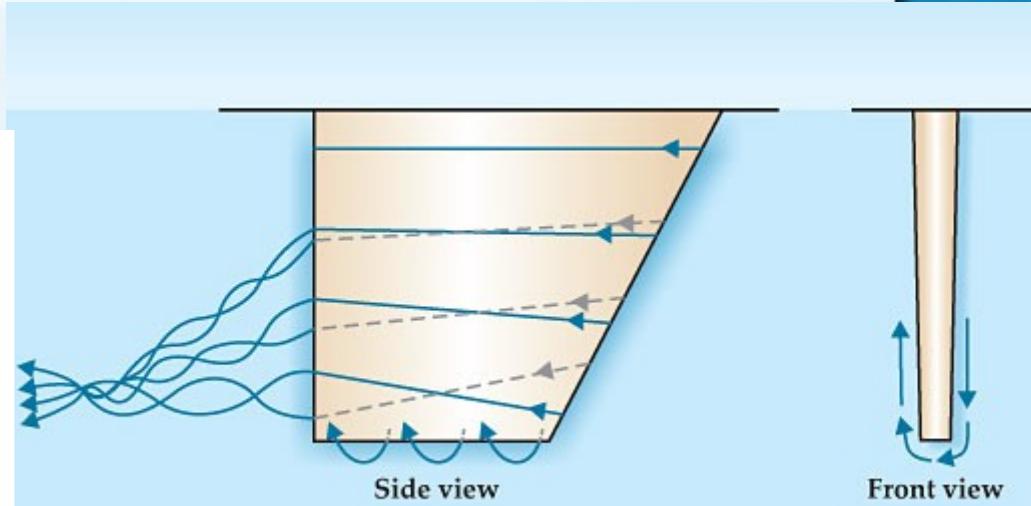
## Dupla função:

- Gera uma força hidrodinâmica que se opõe ao deslocamento lateral
- Baixa o centro de gravidade e gera toque de restauração

## Perfil de asa:

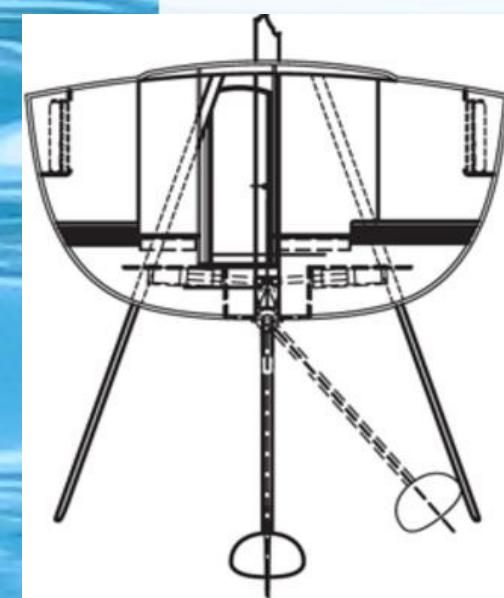
O barco se desloca com ângulo  $\alpha$  em relação à água  
Água desviada, fluxo laminar geram uma força decomposta em arrasto e resistência da quilha

- Com o deslocamento lateral, a água quer passar por baixo e em volta da quilha, gerando vórtices, com custo alto em energia.
- A solução é uma quilha longa e fina, como a asa do planador.
- Uma solução muito comum é uma quilha mais curta com uma asa embaixo

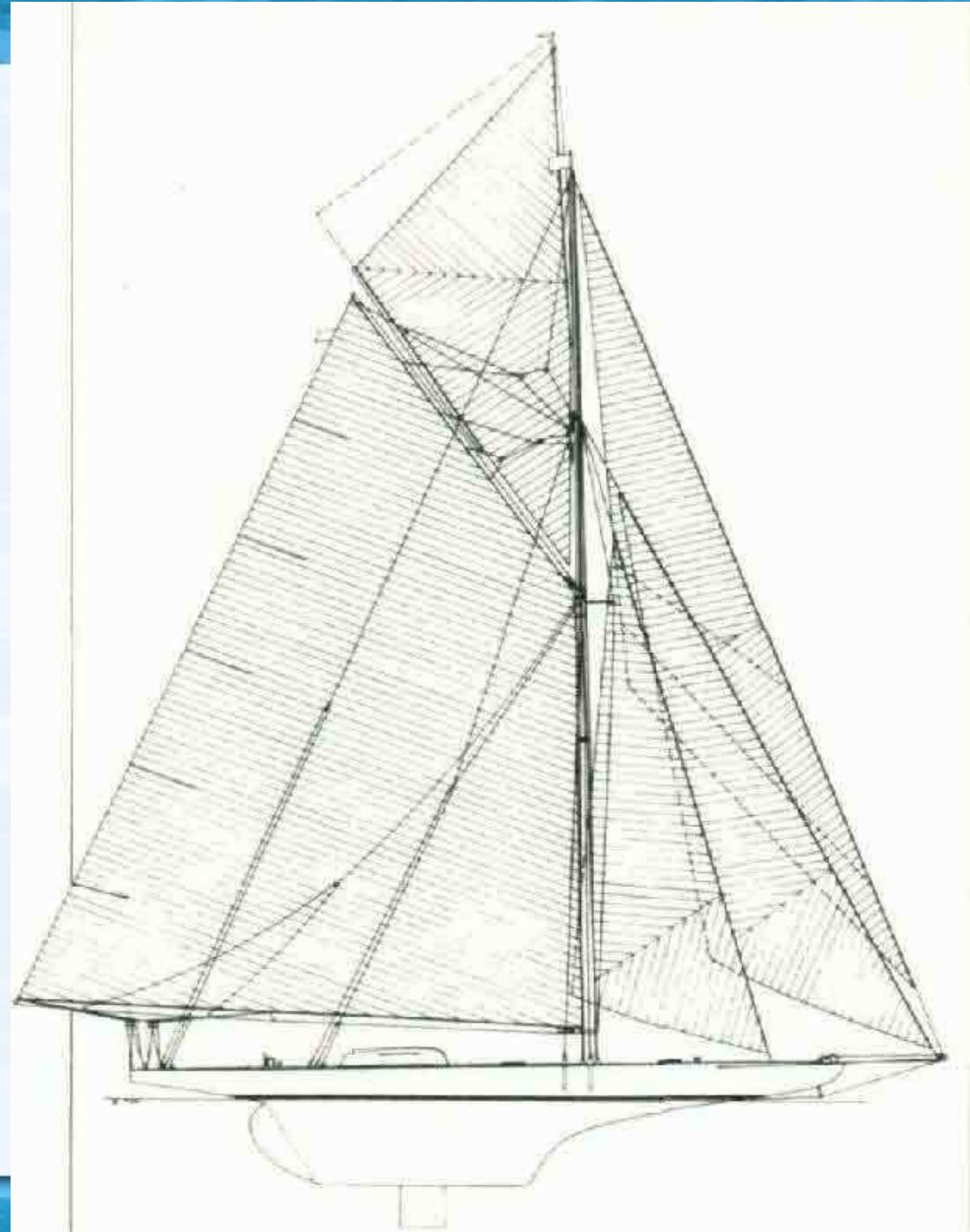


# Alguns perfis

Quilha asa



e quilha  
basculante



J-boat Shamrock V

e soluções:

quilha basculante  
Veleiro classe IMOCA

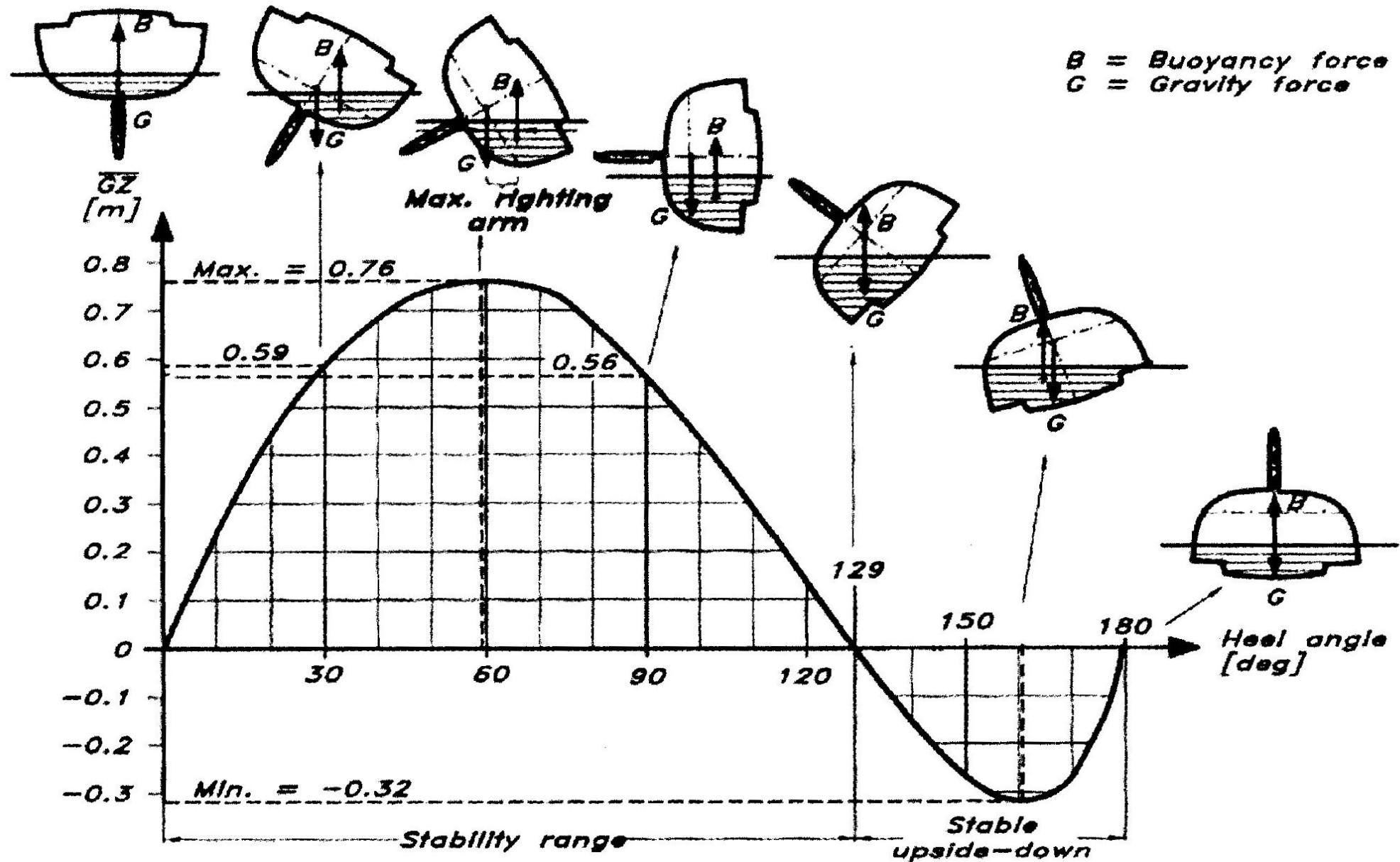


e soluções:

Multicasco:  
catamaran e trimaran



# Curva de estabilidad



# Física, simulação e realidade

- A física básica do velejar não mudou
- Ela permitiu definir limites e identificar o que impede aumento de desempenho
- A tecnologia fornece materiais melhores
- A simulação permite testar idéias, que depois irão para um teste em tanque e virar uma realidade

**Aonde vamos hoje?**

# Eliminando restrições

- Arrasto:
  - Um **casco deslocante** tem um limite de velocidade proporcional à raiz quadrada do comprimento
  - Se **planar**, vai muito mais rápido mas ainda tem arrasto
  - Solução: **hidrofólios**, usados em barcos pequenos (*Moth*) e grande (*Hydroptère*)
- Vela:
  - Tecido se deforma com vento e movimento
  - Melhor forma é vela com base curta e mastro alto
  - Solução: **asa rígida** com controle de forma

# Exemplo: catamaran Class C



Tem vela rígida e hidrofoil



# PAUSA para FILMES

| Característica | Hydroptere<br>Vitesse | Hydroptère<br>Hauturier | Banque Populaire V |
|----------------|-----------------------|-------------------------|--------------------|
| LOA (m)        | 18.28                 | 18.28                   | 40                 |
| Boca (m)       | 24                    | 23                      | 23                 |
| Foils (m)      | 6.7                   | 6.7                     |                    |
| Peso (ton)     | 6.5                   | 7.5                     | 23                 |
| Mastro (m)     | 23                    | 28                      | 47                 |
| Vela Grande    | 135                   | 195                     | 450                |
| Solent         | 90                    | 105                     |                    |
| Trinqueta      | 60                    | 65                      |                    |
| Gennaker       |                       |                         | 610                |
|                |                       |                         |                    |

# O Físico do velejar

Como estas palestras estão ligadas à interacão entre esporte, biofísica e física, seguem algumas areas em que o velejar interage com o físico

## Velejar em barcos pequenos:

- Expõe o velejador aos elementos, principalmente em regatas
- Muitos abdominais,
- muito trabalho de braços e equilibrio

## Velejar em barcos grandes (oceano) é mais protegido mas em percursos longos requer:

- Controle do sono (sistema de turnos)  
velejadores solitários aprendem a dormir profundamente por 30 minutos.
- Controle psicológico (convivência em local pequeno)
- Consumo alto de calorias (**5000 a 6000 por dia**): *micromovimentos geram um consumo muito elevado de energia*

# Conclusão

- A Física consegue explicar o velejar
- Porém, as inovações vêm das pessoas

*INASMUCH as three quarters of the earth's surface is water and only one fourth is land the good Lord's Intentions are very clear:*

*A man's time should be divided:*

*three fourths for sailing  
and one fourth for work.*