

Ordem dos Engenheiros



EXPOSIÇÃO DE MAQUETES

PONTE DOS SOCORRIDOS , ENSAIO EM TUNEL DE VENTO

25.05.23

CONFERÊNCIA

# TUNEL DE VENTO E AERODINÂMICA DE PONTES

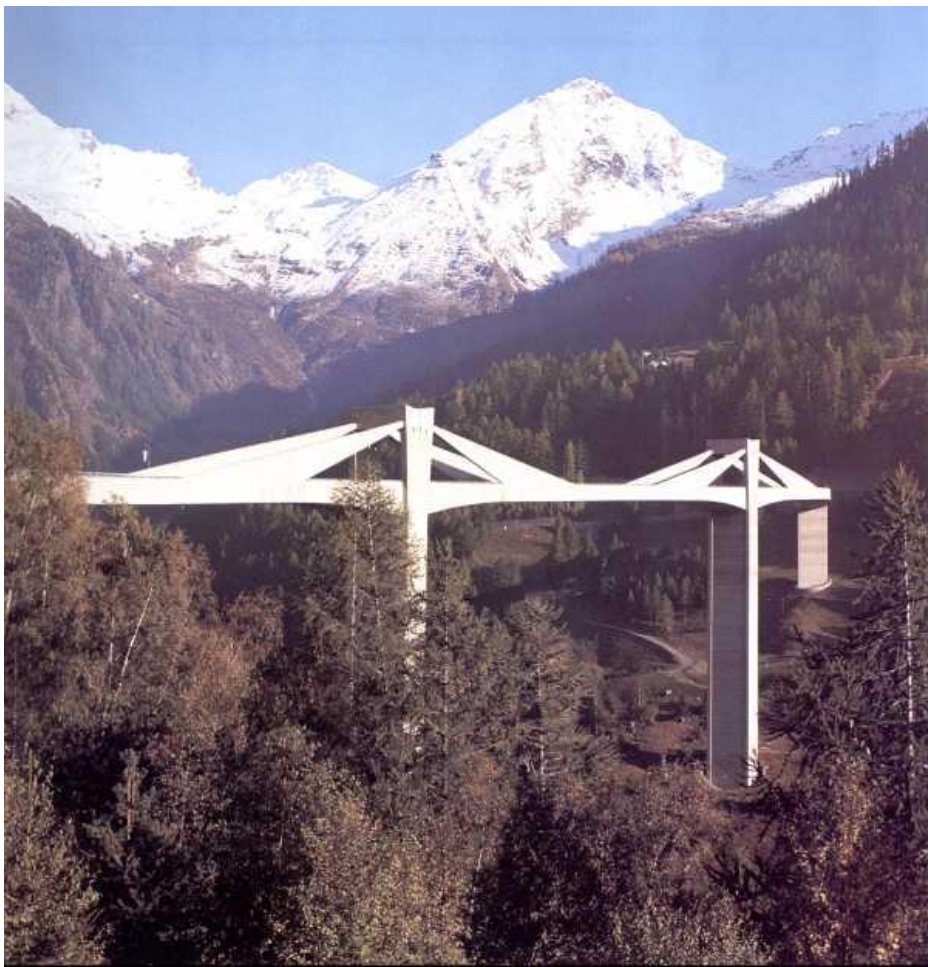
ANTÓNIO REIS





PONTE DOS SOCORRIDOS, FUNCHAL

*PRE-ESFORÇO EXTRADORSAL  
SUSPENSÃO AXIAL DOS TABULEIROS*



*Algumas pontes de Christian Menn*

***Gunter Bridge, Extradosed,  
2 planos de cabos envolvidos numa lâmina de betão***



***Sunniberg Bridge,  
Extradosed Cable stayed bridge***



## Bokokotorian Bay , Montenegro, Concurso

Ponte de tirantes , suspensão axial  
Tabuleiro caixão BAP : Solução Sul



**Ponte atirantada , com pré-esforço  
extradorsal e suspensão axial ,  
Solução Norte**





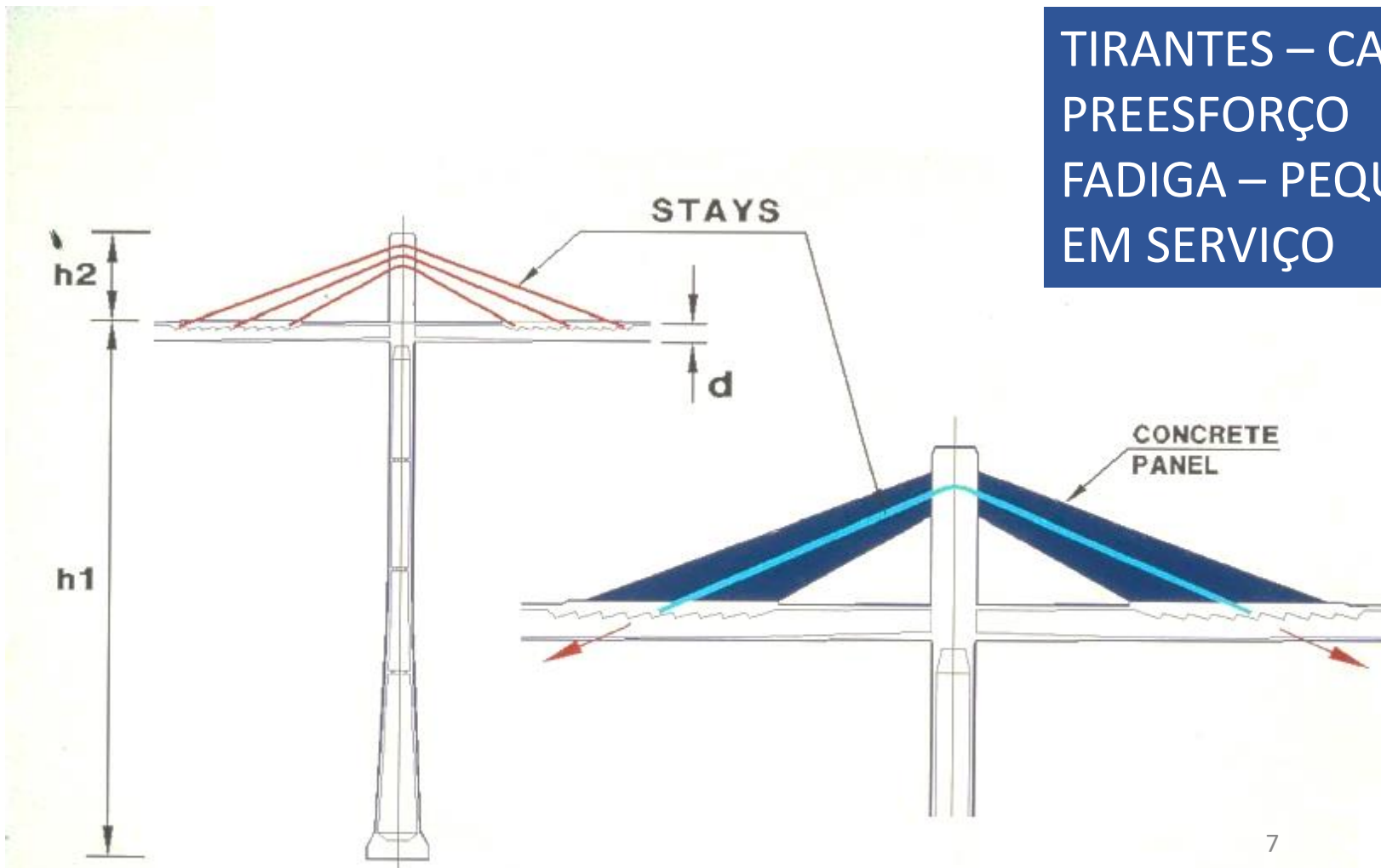
*Fase Construtiva - Ponte de tirantes*  
*Fase Final - Tirantes numa lamina de betão –“VELAS”*

*No início da década de 90 , ...*  
*PONTE DOS SOCORRIDOS , MADEIRA*  
*1ª ponte em Portugal com suspensão axial ,*

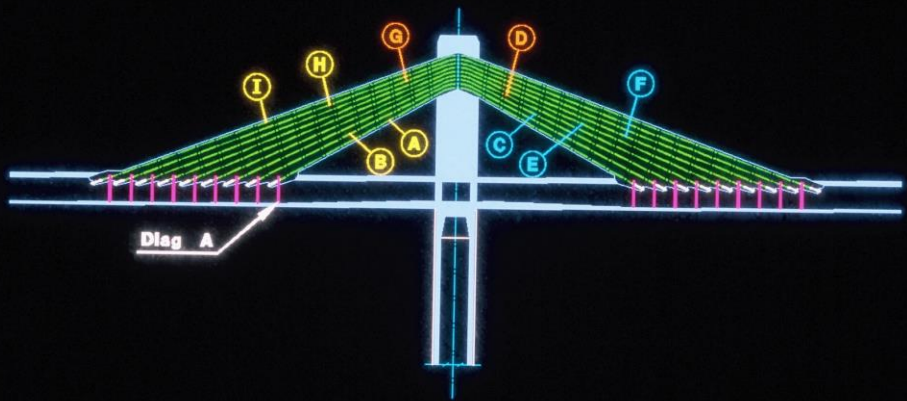
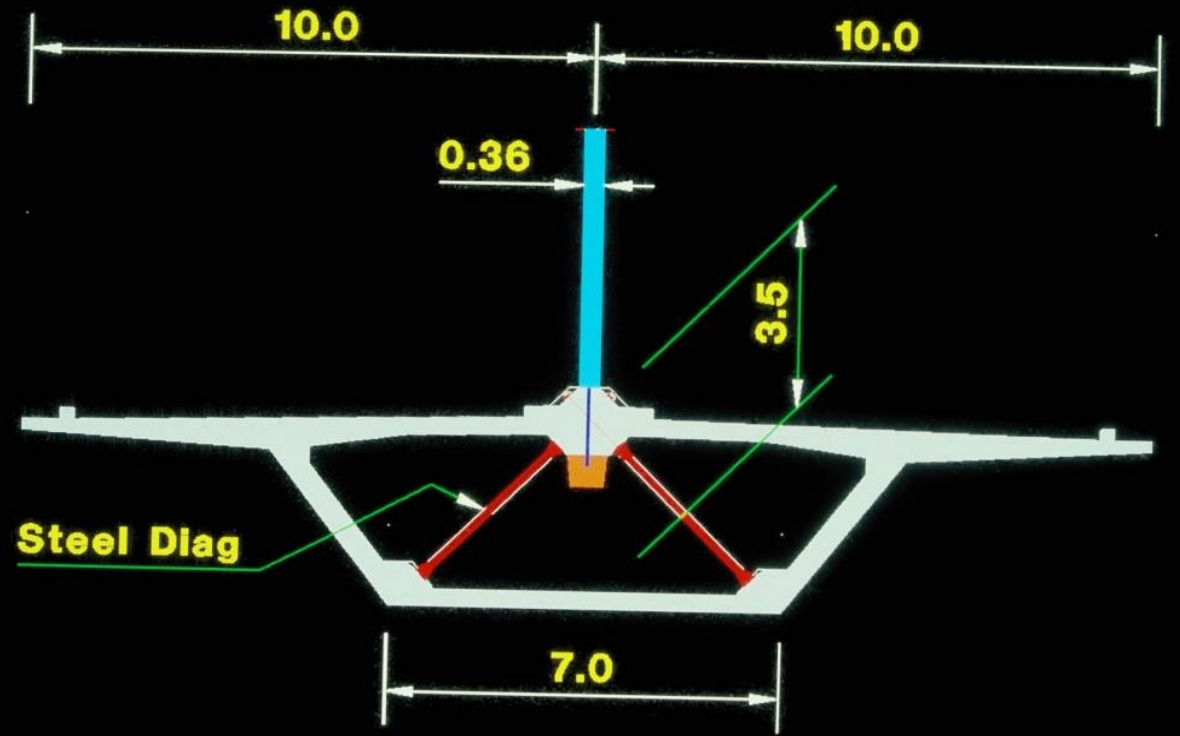
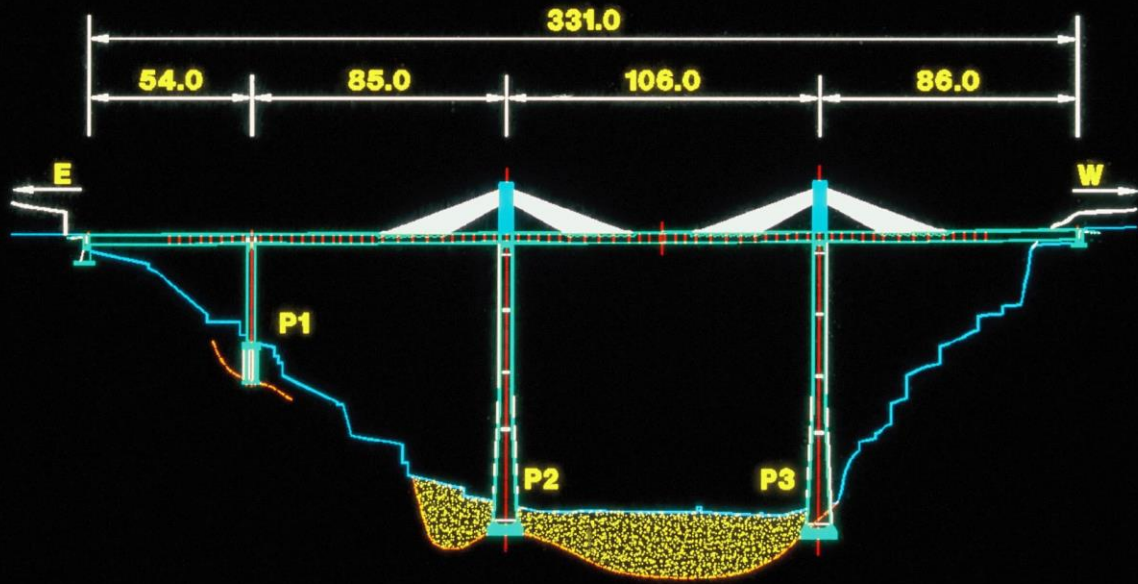


# CONCEITO

# PONTE DOS SOCORRIDOS



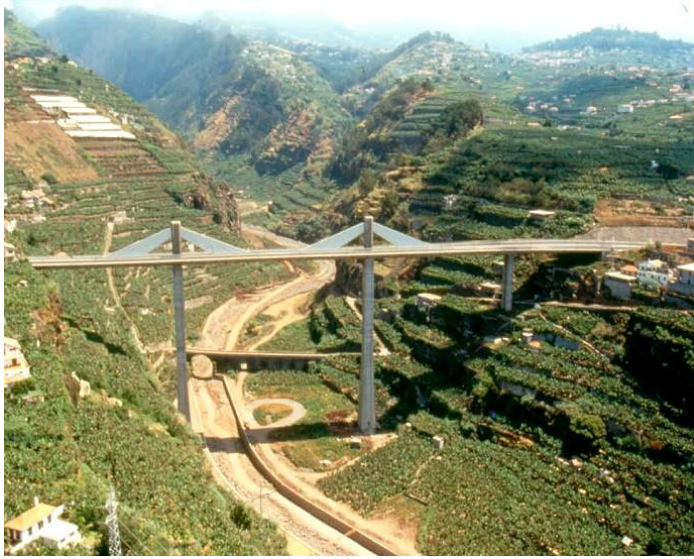
TIRANTES – CABOS CORRENTES DE PREENFORÇO  
FADIGA – PEQUENA VARIAÇÃO DE  $\Delta\sigma$  EM SERVIÇO



# PONTE DOS SOCORRIDOS



# *EFEITO DO VENTO SOBRE OS VEICULOS*

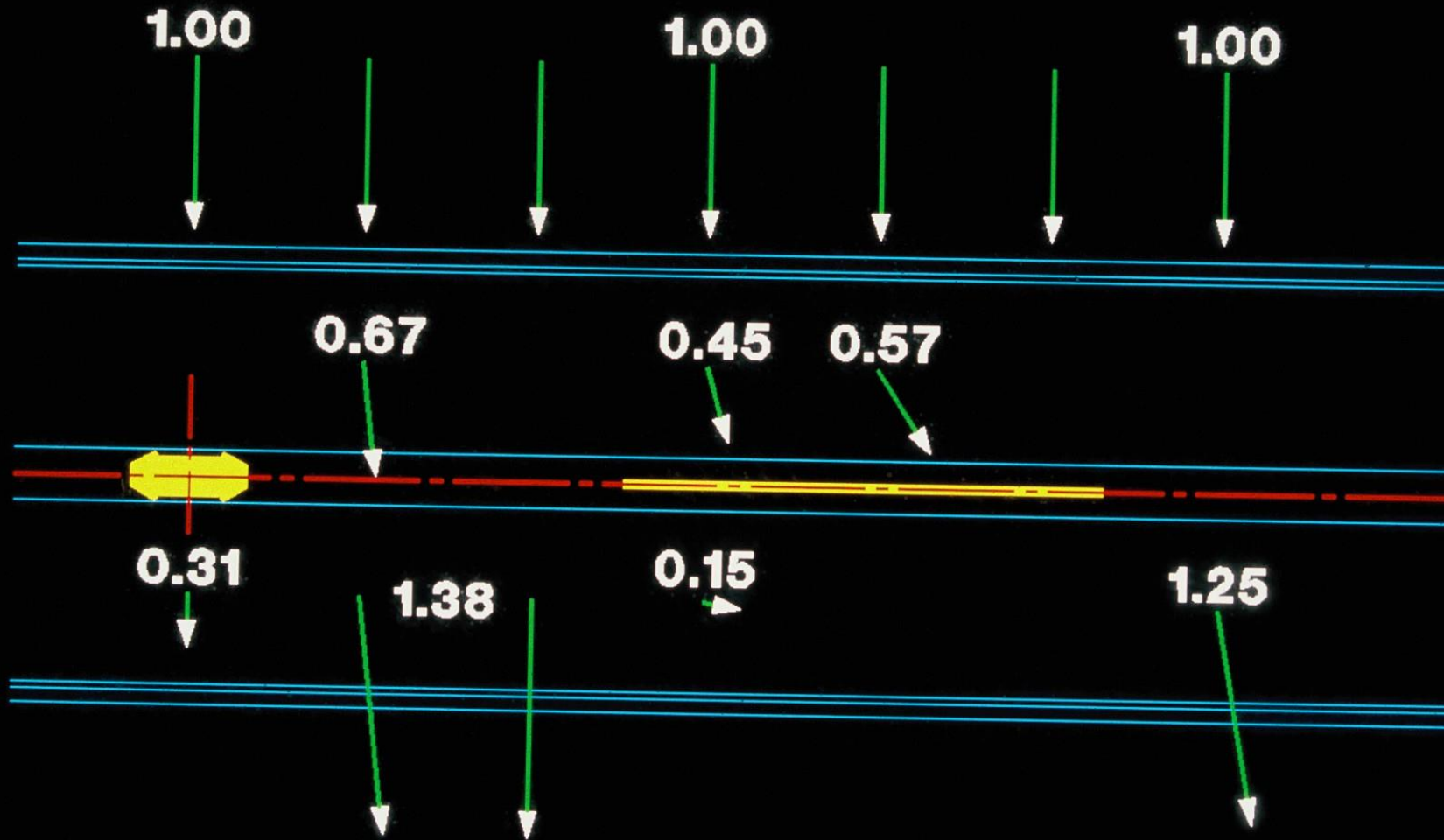


**ACÇÃO DO VENTO  
SOBRE OS VEICULOS  
TUNEL DE VENTO UNL**

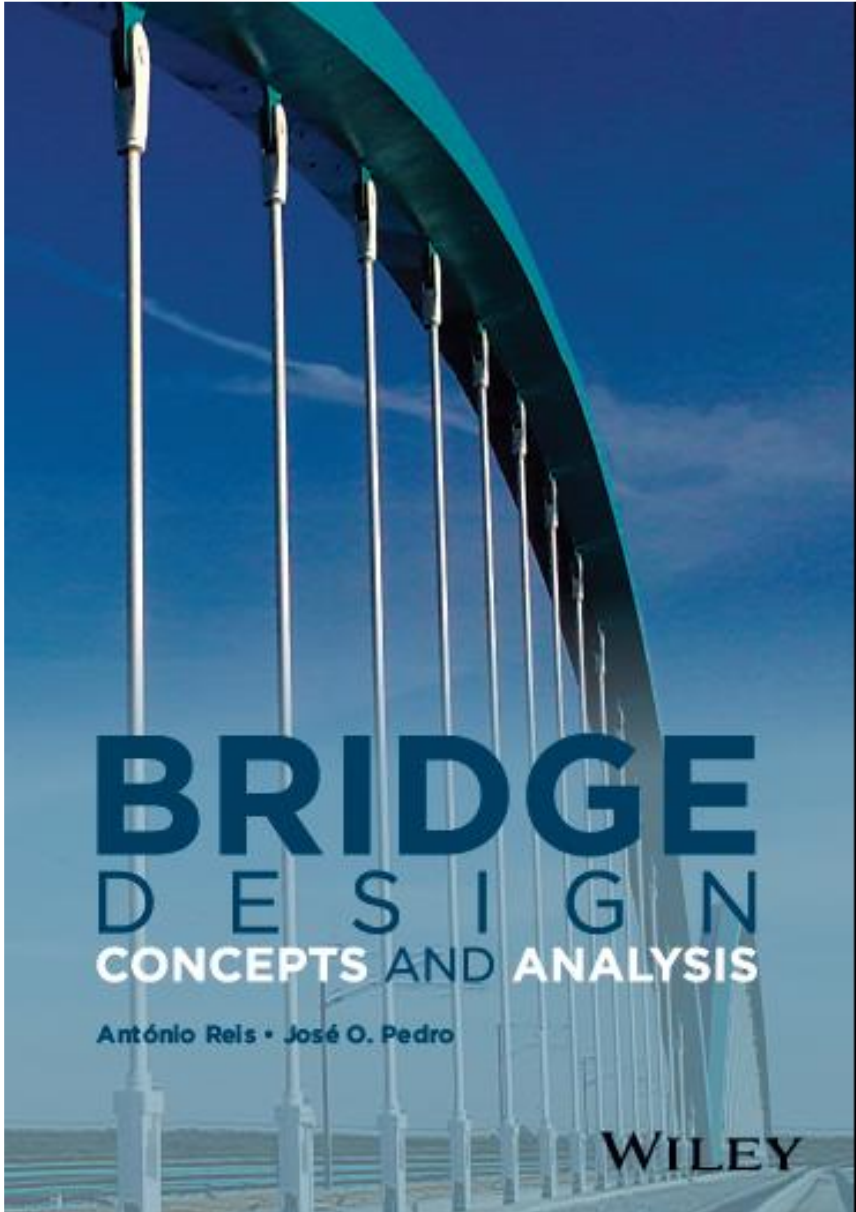


$U/U_0$

# ACÇÃO DO VENTO SOBRE OS VEICULOS



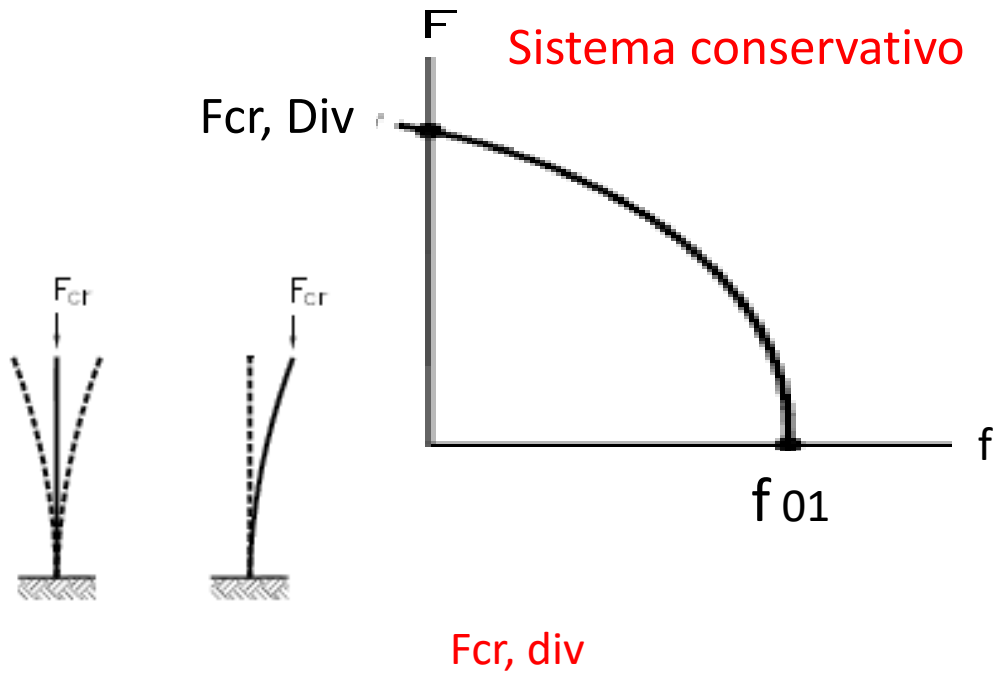
Velocidade Relativa do Vento , 2m acima do tabuleiro



*ESTABILIDADE  
AERODINAMICA  
DOS TABULEIROS*

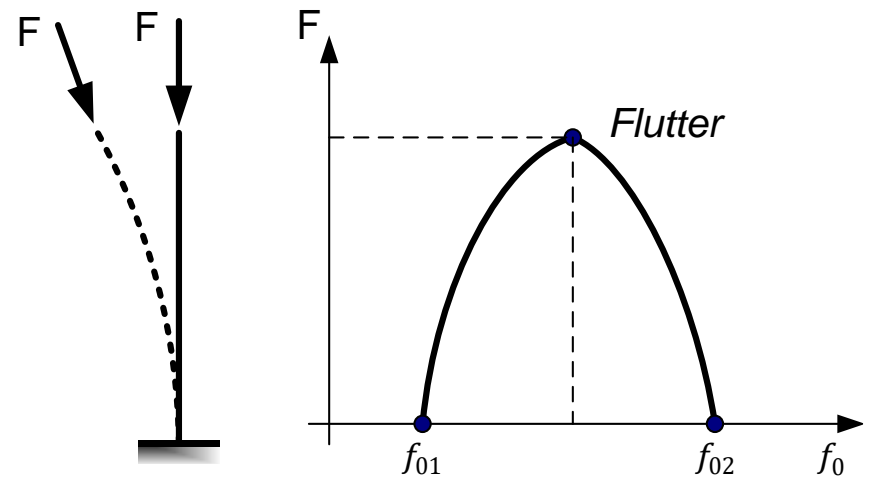
---

# Da instabilidade estática à instabilidade dinâmica



Instabilidade estática é uma vibração com frequência 0  
**DIVERGÊNCIA**

Instabilidade dinâmica  
Sistema não conservativo : "Follower Force"  
**FLUTTER**



## DEFINIÇÃO DAS FORÇAS AERODINAMICAS



*Vel. Vento  $U$  (m/s)*

*Angulo de ataque,  $\alpha$*

*Pressão dinâmica  $p = \frac{1}{2} \rho U^2$*

$\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$

$l$  – comprimento ;  $B$  – largura

“Drag”

$$D = C_D \rho h l$$

“Lift”

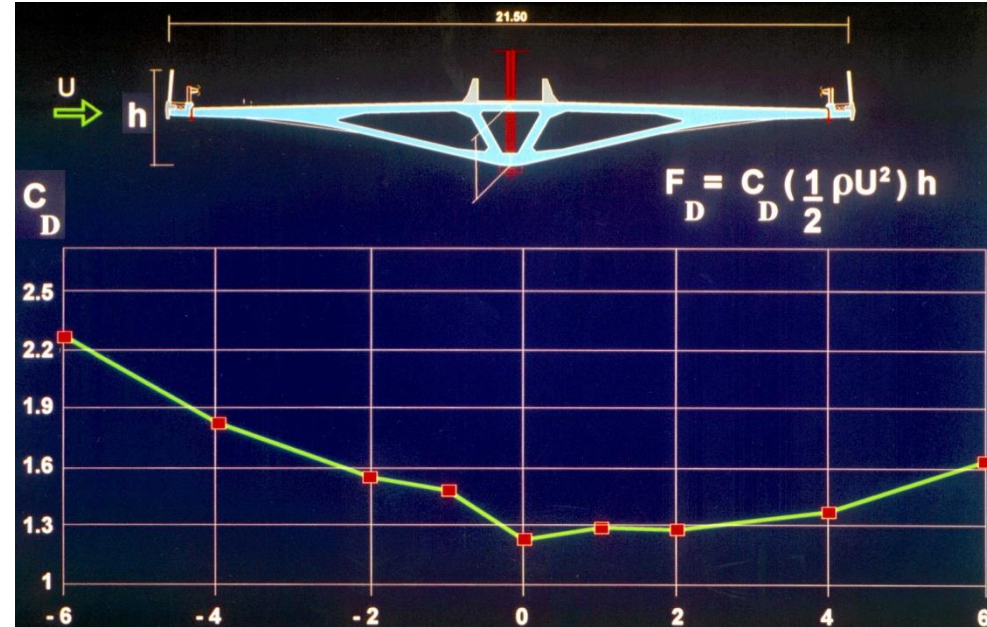
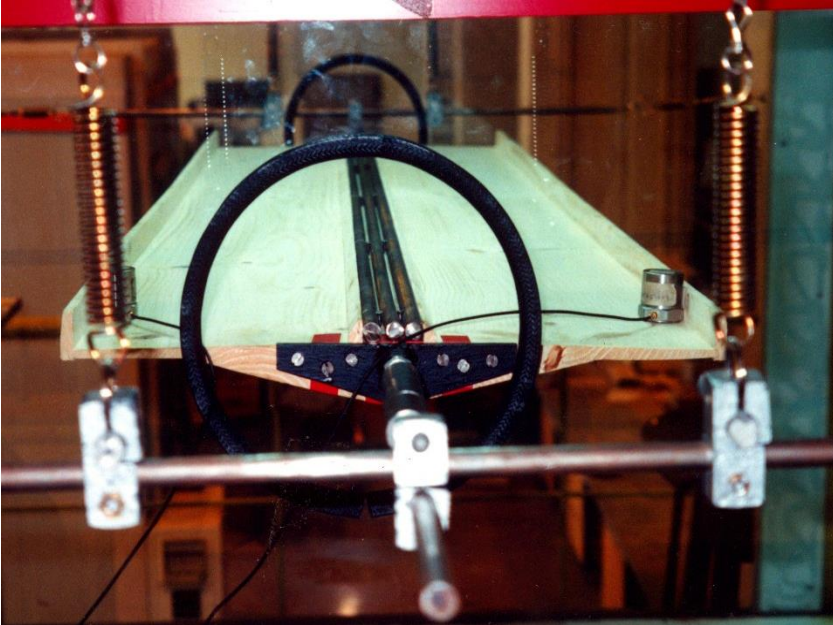
$$L = C_L \rho h l$$

“Moment”

$$M = C_M \rho h l B$$

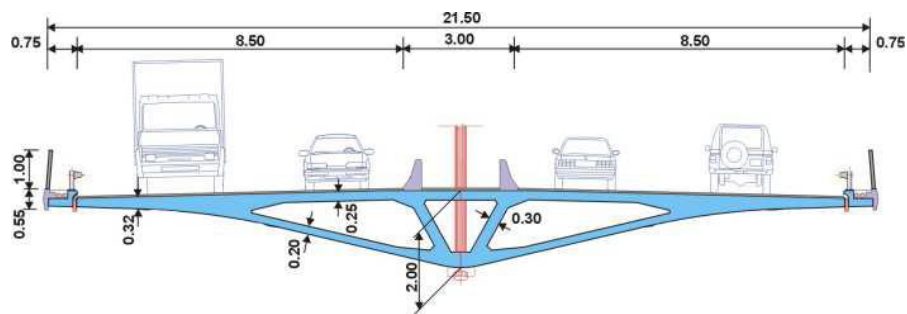
# TUNEL DE VENTO . MODELOS SECCIONAIS

Coeficientes aerodinamicos Drag  $C_D$ , Lift  $C_L$ , Moment  $C_M$



	$C_D$	$C_L$	$C_M$
$\alpha = 0^\circ$	1.17	-0.494	-0.0058

# TUNEL DE VENTO . MODELOS SECCIONAIS



Viaduto atirantado "Cota 200", Funchal

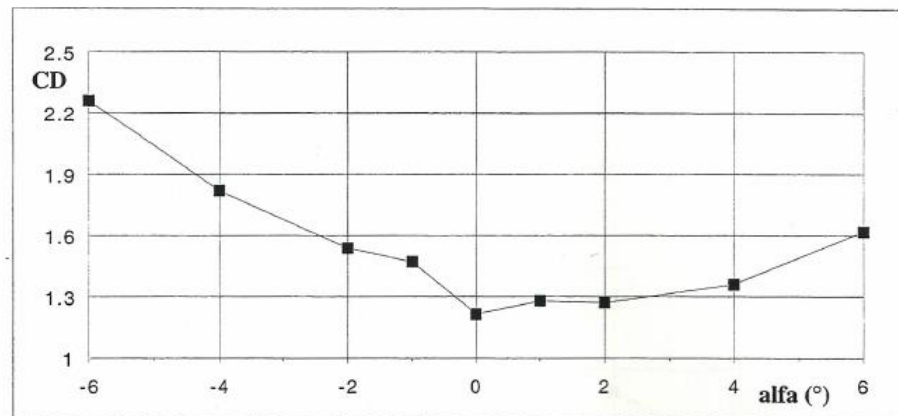


Figura 6.10 - Coeficiente de arrastamento (ângulo de ataque variável).

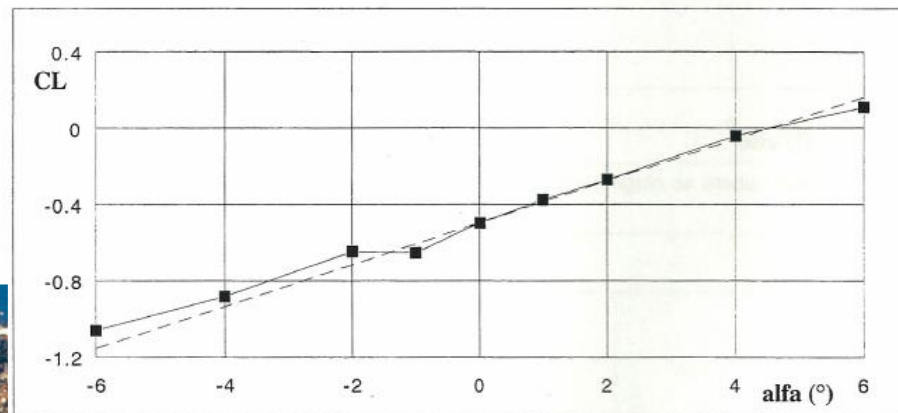


Figura 6.11 - Coeficiente de sustentação (ângulo de ataque variável).

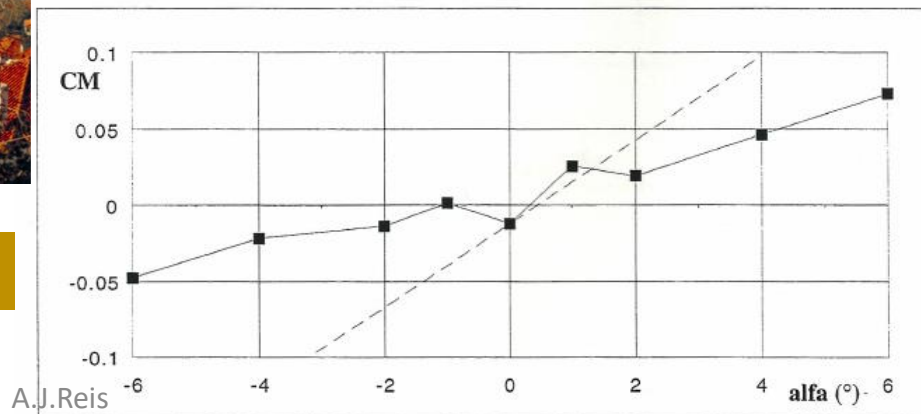
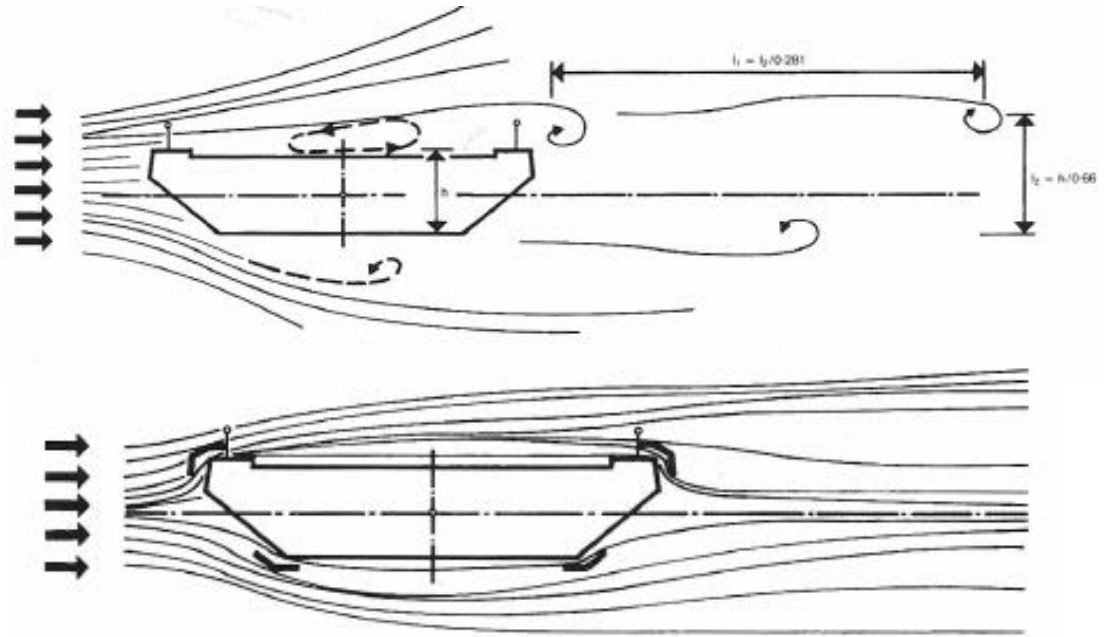
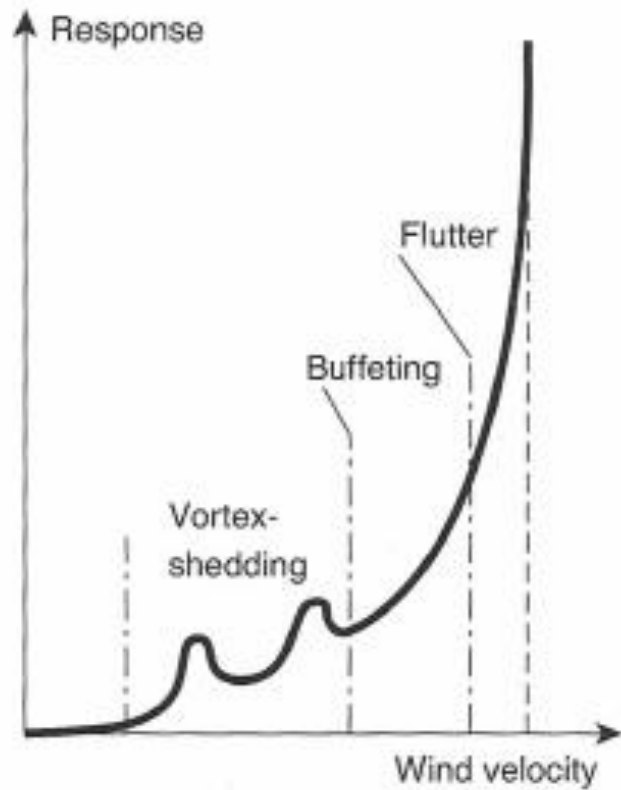


Figura 6.12 - Coeficiente de momento torsor (ângulo de ataque variável).



# Resposta aerodinâmica

## Despreendimento de vórtices



## Instabilidades aerodinâmicas

# INSTABILIDADES AERODINAMICAS

- 1) Instabilidade em torção pura – DIVERGÊNCIA TORSIONAL
- 2) Instabilidade em flexão pura – GALOPE
- 3) Instabilidade por flutter num modo simples - FLUTTER TORSIONAL
- 4) Instabilidade interactiva em torção e flexão – FLUTTER CLASSICO

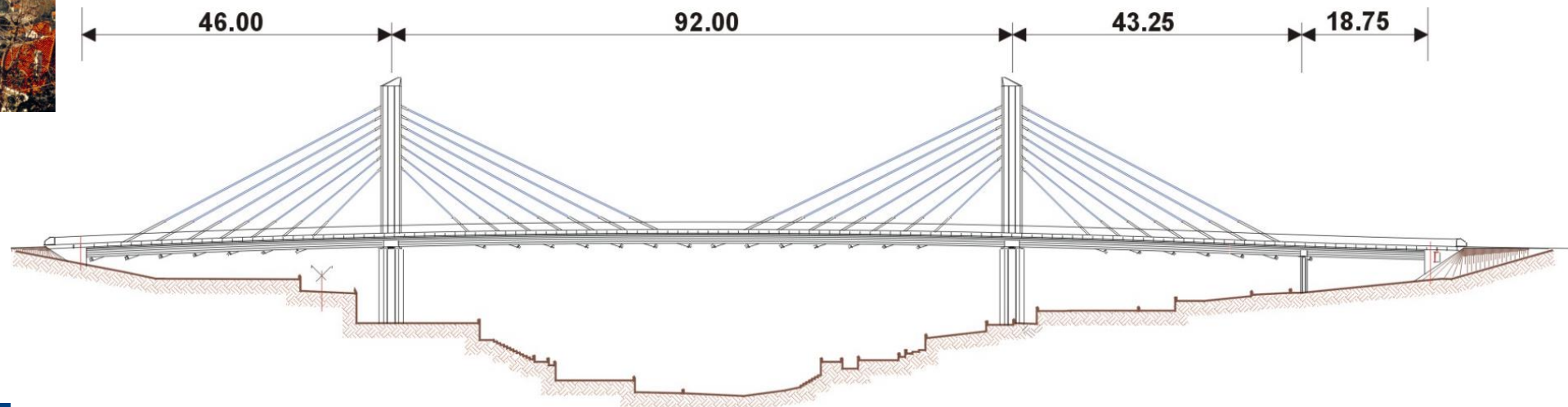
*Critérios indicativos , para PREDIMENSIONAMENTO*

*Galope : Critério Den Hartog*

$C_D + (\partial C_L / \partial \alpha) < 0$  , cond necessária para galope

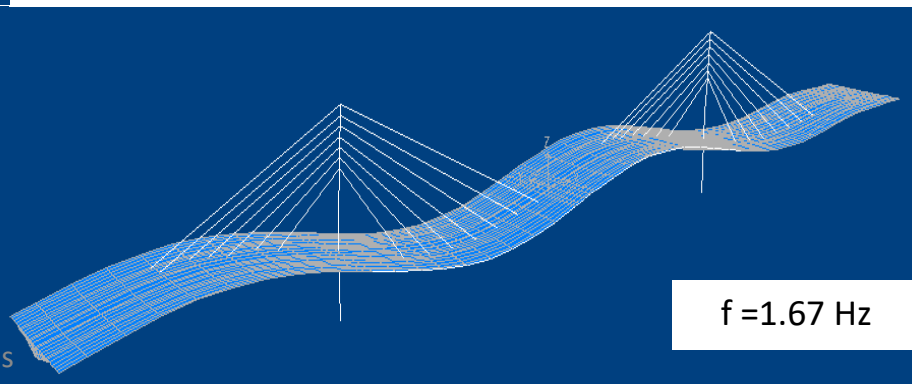
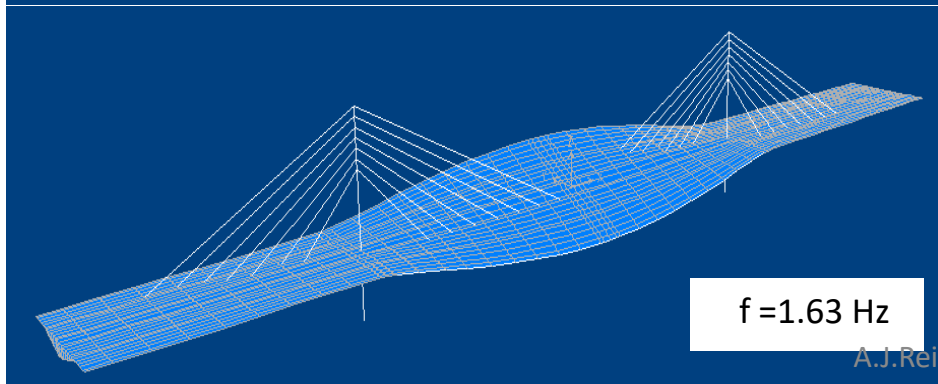
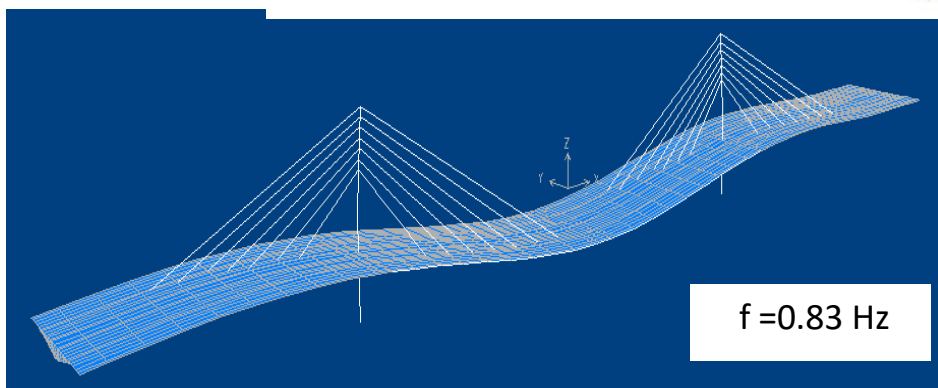
*Flutter classico*

$f_t / f_b > 3$ , estabilidade por flutter clássico



## MODOS DE VIBRAÇÃO E FERQUENCIAS PROPRIAS

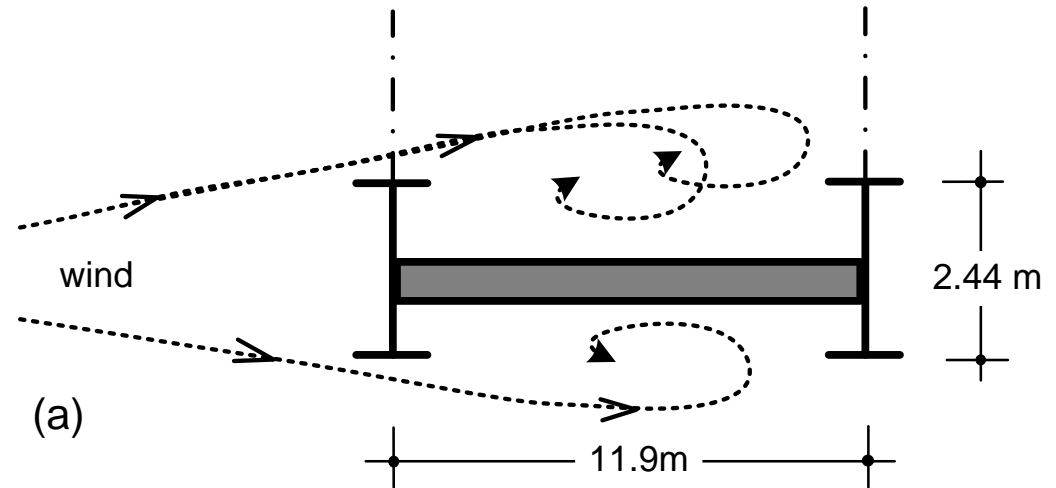
$$f_{\text{torsion}} > 3 f_{\text{bending}}$$



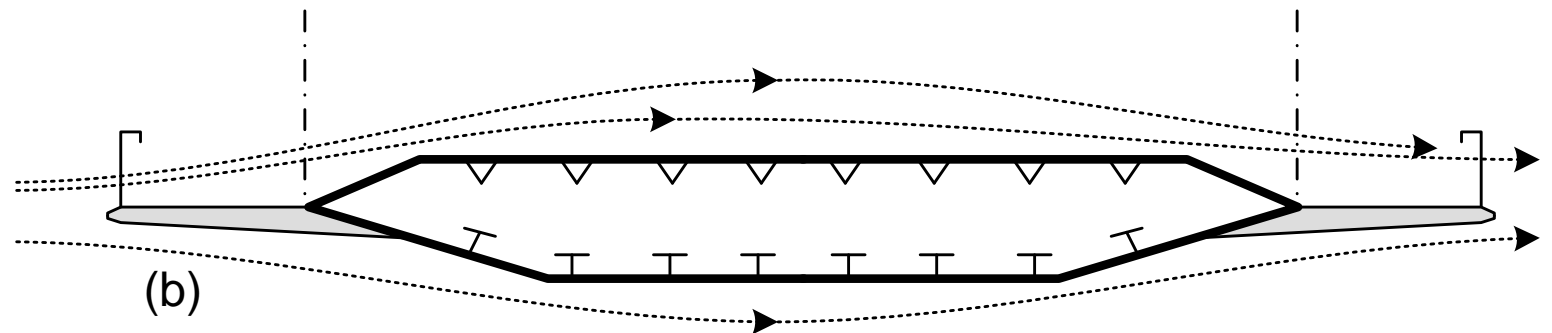


## TACOMA – SECÇÃO TRANSVERSAL DO TABULEIRO

**TACOMA – O MAIS  
CONHECIDO ACIDENTE  
NA HISTÓRIA DA  
AERODINÂMICA DE  
PONTES**



## SECÇÃO TRANSVERSAL DE UMA PONTE SUSPensa MODERNA



# 3ª Travessia do Bósforo, 2016



projecto



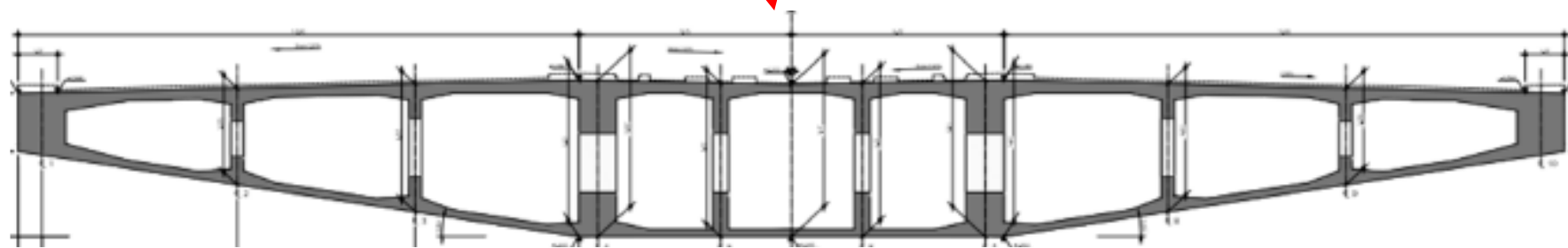
engineering



greisch

**GRID**  
INTERNATIONAL CONSULTING ENGINEERS

*Projecto tramos laterais  
BAP estruturas metálicas  
nas torres e estudos de  
fixação da via férrea*



Largura tabuleiro 59 m

Ponte sobre Sado, “*bowstring*”, vãos de 160 m.

Freq. Vert. = 0,55 Hz Freq. Torção 0,44 Hz

*Estabilidade aerodinamica – stall flutter , classical flutter*

$$U_{cr} = \Gamma B f_T$$

$$\Gamma > 9,0$$

$$B = 15M$$

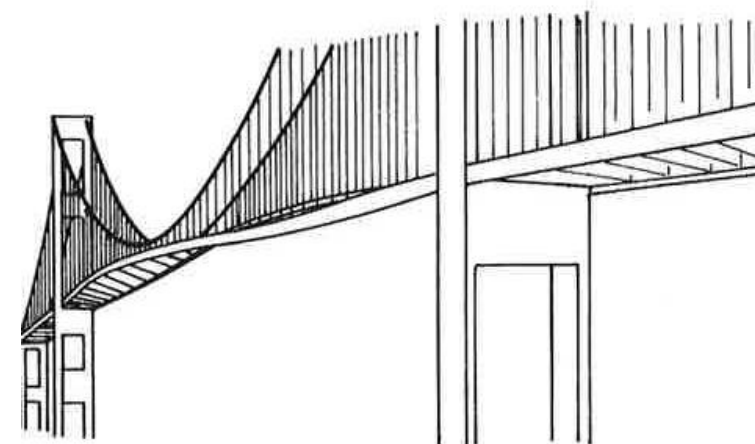
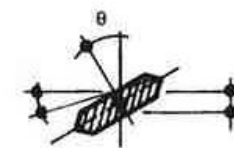
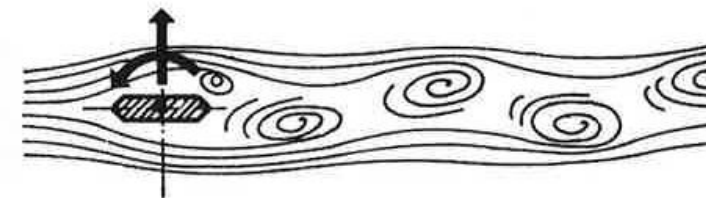
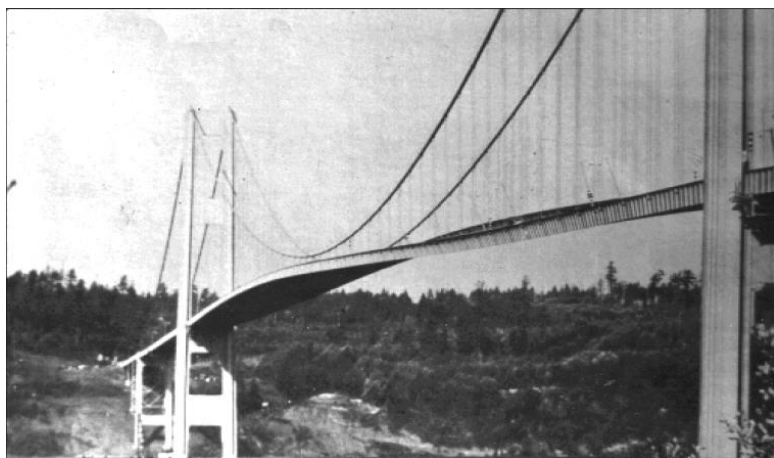
$$U_{m, cr} = 9 \times 15,0,44 = 60 \text{ m/s} = 214 \text{ km/h}$$

(Velocidade media do vento no local )



## 4) Instabilidade com interacção dos modos de flexão e torção Flutter Clássico

- Métodos analíticos simples Selberg, Kloopel diagrams, -
- CECM tabelas, Scanlan, etc
- Métodos numericos
- Ensaios em tunel de vento

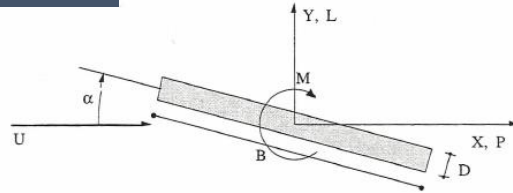




#### 4) Instabilidade aerodinâmica com interação dos modos de flexão e torção – Flutter Clássico

*Selberg Formula pra um a placa fina*

$$V_{cr,F} = 3,7 B f_T \sqrt{\frac{mr}{\rho B^3} \left[ 1 - \left( \frac{f_F}{f_T} \right)^2 \right]}$$



$r = \sqrt{I_p/m}$  – raio polar de giração mássico  
 $f_T$  e  $f_F$  – frequências dos modos de torção e flexão  
 $m$  – massa / unid. De comprimento do tabuleiro  
 $B$  – largura do tabuleiro

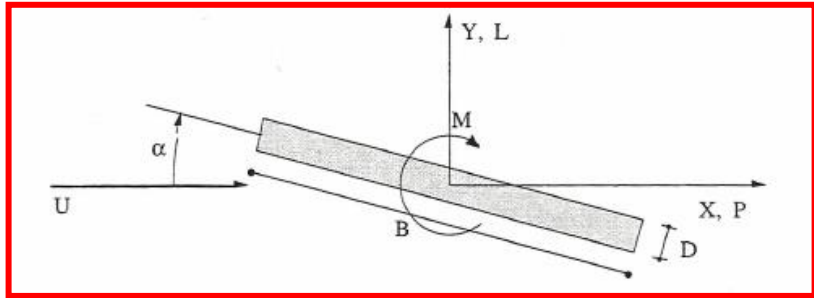
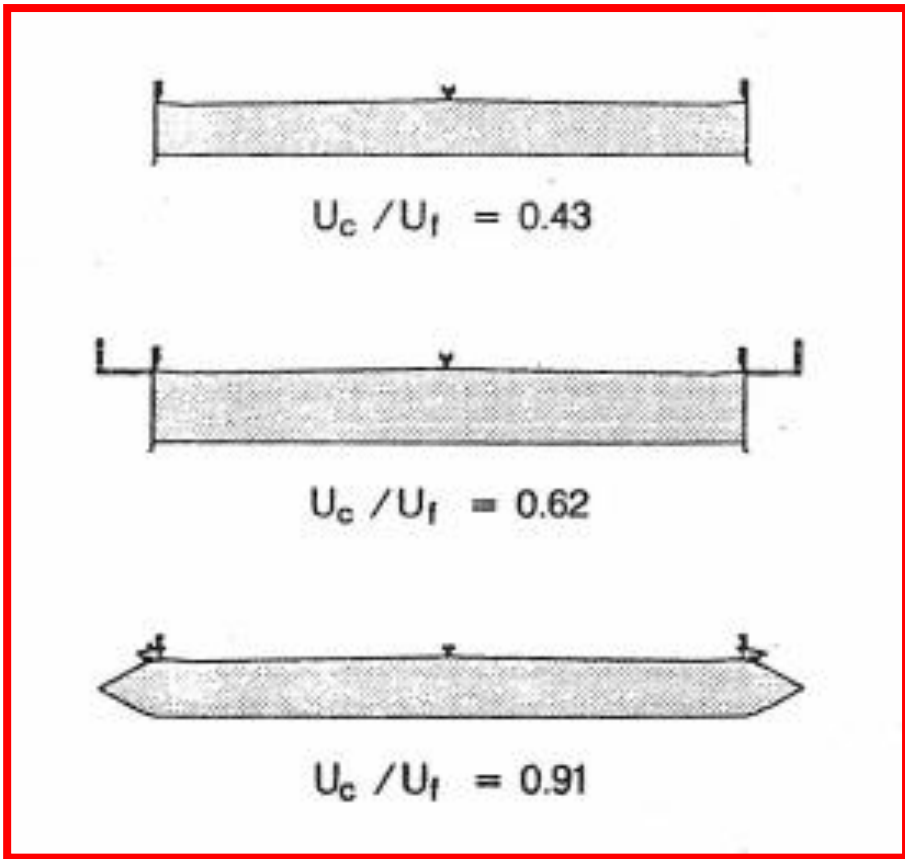
*The classical formula of Selberg, gives good results if:*

*-if  $d$  (logarithmic decrement of structural damping) is about 5%*

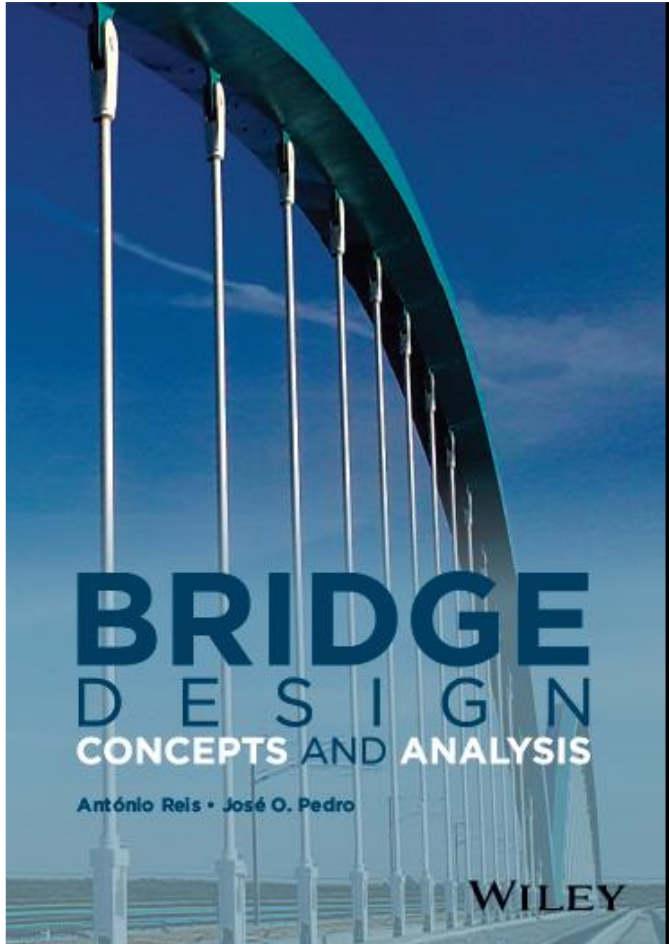
*-if  $f_T/f_F > 1,5$*

*Tabuleiros de pontes*

$$V_{cr,F} = h V_{cr, thin plate}$$



*Comparação entre  $U_{cr,deck}$  e  $U_{cr,placa fina}$*



*TTT: projecto de referência*



*TTT: TERCEIRA TRAVESSIA DO TEJO projecto de referência*

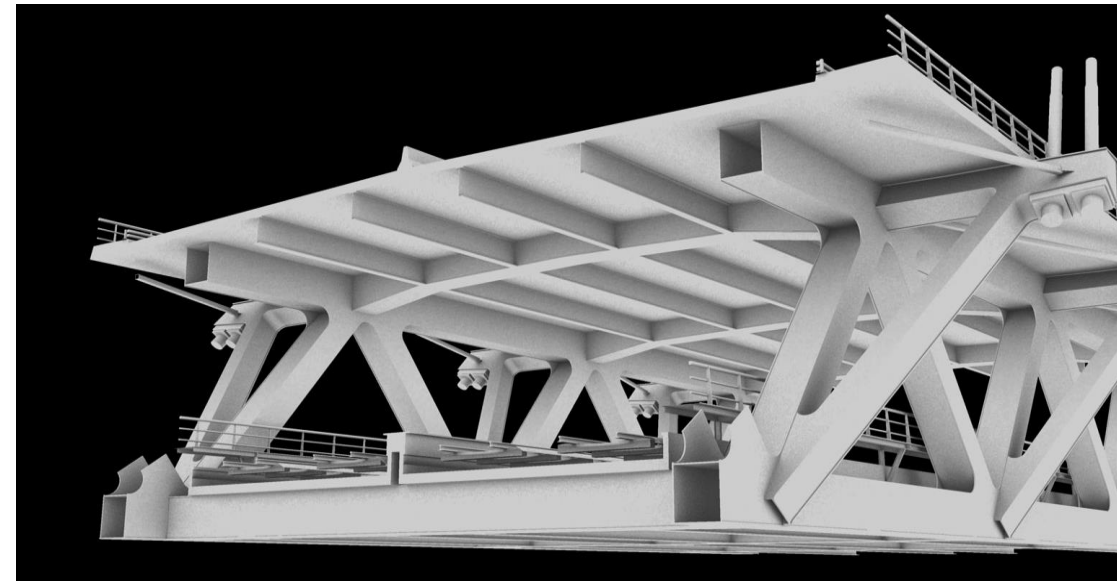


Comprimento total da ponte, 7143 m

Ponte tirantes 1140m , vão 540 m

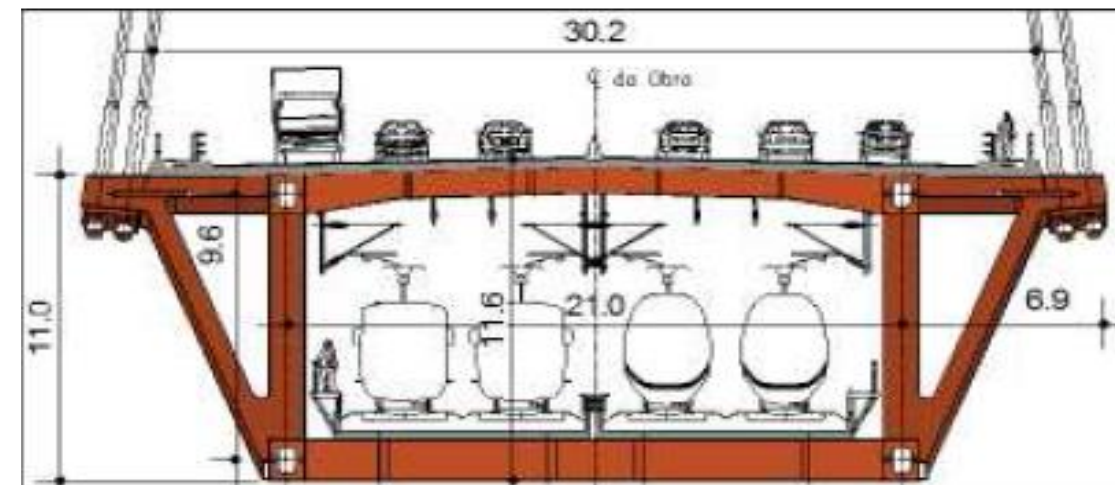
# GRID

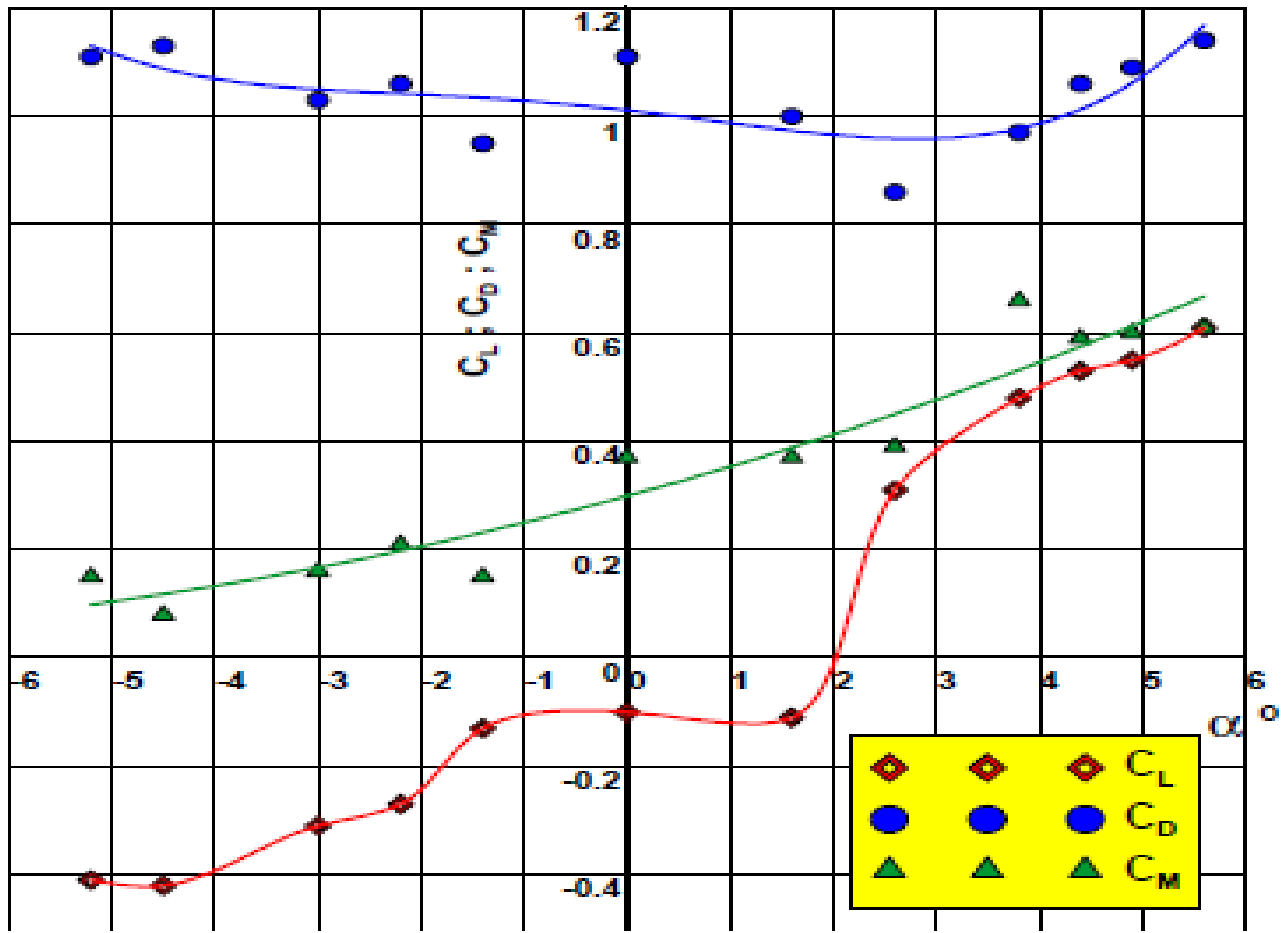
INTERNATIONAL | CONSULTING ENGINEERS



*TTT: projecto de referência*

Superestrutura - largura 34,76 m ,  
2 vias AV + 2 vias CV 6 vias rodoviárias





TUNEL DE VENTO  
 MODELO SECCIONAL 1:70

*TTT: Modelo Reduzido da ponte sobre o canal de Cabo Ruivo*



# Conclusões

1. Pontes com Tirantes permanentes ou envolvidos numa lamina de betão , com pré-esforço extradorsal,
2. Efeito do vento sobre os veiculos : Analise em Túnel de Vento
3. Conceitos Básicos sobre estabilidade aerodinamica de Pontes :  
Formulas de Predimensionamento e Utilização do Tunel de Vento