

# ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO DO TABULEIRO DO VIADUTO SOBRE O CAMINHO DO COMBOIO

João Ferreira <sup>(1)</sup>, Pedro Mendes <sup>(2)</sup>, Fernando Branco <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>Prof. Auxiliar – IST, <sup>(2)</sup>Prof. Associado – IST, <sup>(3)</sup>Prof. Catedrático – IST

## RESUMO

O presente artigo apresenta o estudo experimental do comportamento aerodinâmico do tabuleiro do Viaduto Sobre o Caminho do Comboio, na ilha da Madeira, cujo projecto é da autoria do Prof. António Reis. Os ensaios do modelo seccional do referido tabuleiro foram realizados no túnel de vento do Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais (LERM) do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico. *Os objectivos dos ensaios foram fundamentalmente a determinação dos coeficientes de forma do tabuleiro e a verificação das respectivas condições de estabilidade aerodinâmica.*

## 1. INTRODUÇÃO

A acção do vento é uma das mais importantes a que estão sujeitos os tabuleiros de pontes, não só pelo valor das pressões envolvidas, como pela possibilidade de indução de fenómenos de instabilidade aerodinâmica.

Os modelos numéricos e as regras de dimensionamento habituais são ferramentas fundamentais na análise da acção do vento sobre este tipo de estruturas mas têm, no entanto, algumas limitações. De facto, a acção do vento sobre as estruturas depende muito da forma destas, podendo variar substancialmente em função de ligeiras alterações, o que não é possível contabilizar com rigor nos modelos habitualmente disponíveis.

Neste contexto toma particular relevância a análise experimental em túnel de vento sobre os modelos seccionais de pontes. Neste tipo de modelo as frequências dos modos fundamentais de

flexão longitudinal e de torção do tabuleiro são reproduzidas à escala através do respectivo sistema de suspensão. Desta forma é possível quantificar ou verificar os coeficientes de forma a adoptar para as secções dos tabuleiros, bem como avaliar a possibilidade de ocorrência de fenómenos de instabilidade aerodinâmica.

No presente artigo apresenta-se um estudo deste tipo que foi realizado no túnel de vento do Laboratório de Estruturas e Resistência de Materiais do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do IST.

## 2. CARACTERÍSTICAS DA OBRA-DE-ARTE

O tabuleiro do Viaduto Sobre o Caminho do Comboio é atirantado, tendo um vão central de 92 metros e vãos adjacentes com 41 e 43 metros. A suspensão do tabuleiro é do tipo central, sendo realizada através de um conjunto de

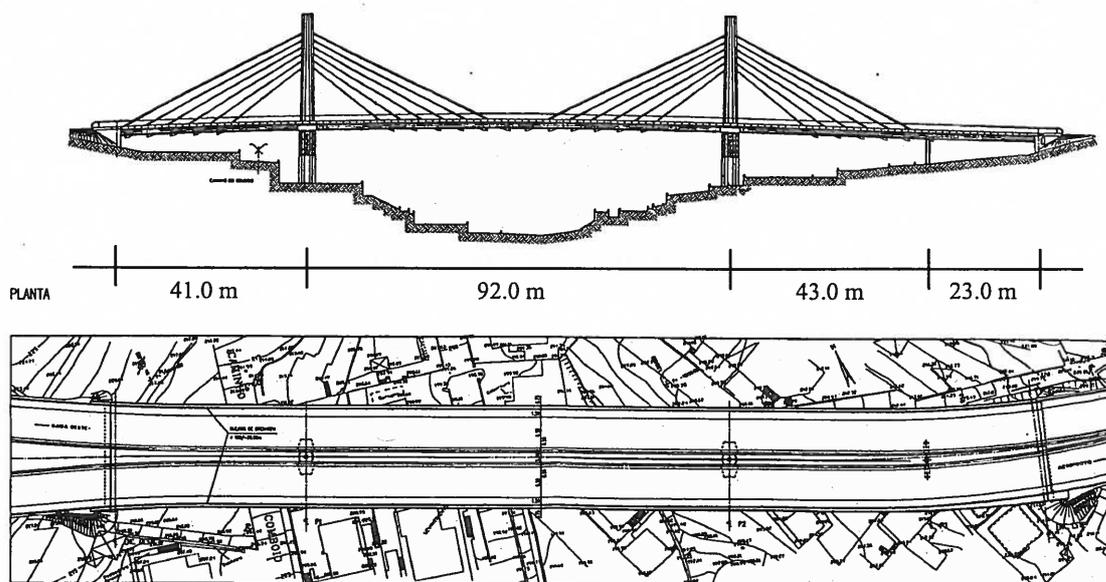


Fig. 1 – Alçado e planta do Viaduto Sobre o Caminho do Comboio

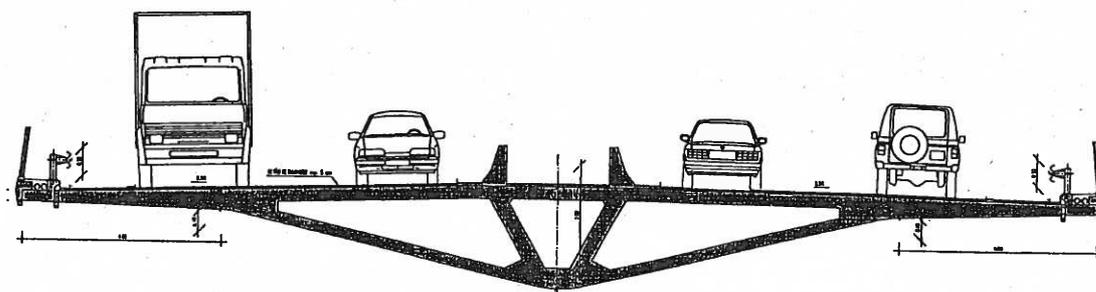


Fig. 2 – Corte do tabuleiro do Viaduto Sobre o Caminho do Comboio

tirantes em semi-harpa contidos no plano vertical médio do tabuleiro. Na figura 1 apresenta-se um alçado e a planta desta obra-de-arte. Na figura 2 apresenta-se um corte do tabuleiro.

O valor médio da massa total do tabuleiro é de 31 ton/m. Os valores fornecidos pelo projectista para as frequências dos modos fundamentais de oscilação vertical e de torção do tabuleiro são de, respectivamente,  $f_z = 0,87$  Hz e  $f_\theta = 1,58$  Hz.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO ESTUDO REALIZADO

#### 3.1 Teoria de Semelhança

A Teoria da Semelhança estabelece as condições a que devem satisfazer os

modelos reduzidos de modo a que sejam simulados os efeitos em estudo, permitindo assim transpor para o protótipo os resultados obtidos experimentalmente com esses modelos. Estas condições são expressas através de relações de proporcionalidade entre os valores tomados por cada grandeza no modelo e no protótipo, as quais são designadas por escalas.

A análise experimental com modelos reduzidos recorre ao Teorema de Buckingham, o qual pode ser enunciado do seguinte modo:

*Se um fenómeno físico envolve  $n$  grandezas, indicadas genericamente por  $A_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ), a relação funcional que rege o fenómeno,  $F(A_1, A_2, \dots, A_n) = 0$ , pode ser expressa por uma relação entre  $(n-q)$*

parâmetros adimensionais,  $\Phi(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-q}) = 0$ , em que  $q$  é o número de grandezas dimensionalmente independentes entre si que intervêm no fenómeno ( $q = 3$  em fenómenos dinâmicos).

Se o conjunto das grandezas  $A_i$  for reordenado de tal modo que as grandezas fundamentais (indicadas por  $X, Y, Z$ ) sejam identificadas com  $(A_{n-2}, A_{n-1}, A_n)$ , então os parâmetros adimensionais  $\Pi_i$  são da forma

$$\Pi_i = \frac{A}{X^{\alpha_i} Y^{\beta_i} Z^{\gamma_i}} \quad (3.1)$$

A semelhança entre um protótipo e o respectivo modelo, relativamente a um conjunto de grandezas ( $A_i$ ) intervenientes no fenómeno em causa, implica que se registre a seguinte igualdade em relação a qualquer uma dessas grandezas,

$$(\Pi_i)_m = (\Pi_i)_p \quad (3.2)$$

em que os índices  $m$  e  $p$  se referem ao modelo e ao protótipo, respectivamente.

A aplicação do Teorema de Buckingham não só conduz a uma relação entre parâmetros adimensionais e, como tal, independente do sistema de unidades escolhido, como permite que a lei de dependência de um fenómeno físico em relação a uma grandeza  $A_i$  possa ser avaliada fazendo variar qualquer outra das grandezas englobadas no parâmetro  $\Pi_i$  correspondente e cuja variação seja mais fácil de concretizar experimentalmente.

Os fenómenos dinâmicos são governados por relações entre grandezas cujas dimensões fundamentais podem ser identificadas com o comprimento ( $L$ ), a massa ( $M$ ) e o tempo ( $t$ ). As escalas correspondentes são definidas por

$$\lambda_L = \frac{L_m}{L_p} \quad \lambda_M = \frac{M_m}{M_p} \quad \lambda_t = \frac{t_m}{t_p} \quad (3.3)$$

A escala de qualquer grandeza derivada pode ser obtida directamente a partir das escalas das grandezas fundamentais com base em exigências de homogeneidade dimensional.

No caso de ensaios em túnel de vento, a escala geométrica é limitada pelas restrições impostas pela fabricação do próprio modelo e pelas dimensões da câmara de ensaios.

A escala de massas não é independente da geométrica, uma vez que a escala da massa volúmica do fluido é a mesma (o ar em ambos os casos) e esta grandeza é certamente interveniente no fenómeno (basta constatar que as forças aerodinâmicas lhe são proporcionais). Deste modo, e designando por  $\lambda_\rho$  a escala de massas volúmicas, regista-se a seguinte relação

$$\lambda_\rho = \lambda_M \lambda_L^{-3} = 1 \Rightarrow \lambda_M = \lambda_L^3 \quad (3.4)$$

Uma vez definidas as escalas geométrica e de massas, a terceira escala "fundamental" (a escala de tempos ou de velocidades, por exemplo) pode ser definida por condições particulares de semelhança desejadas para a realização do ensaio (tais como as semelhanças de Reynolds ou de Froude, por exemplo) ou então ser arbitrada com base em considerações de ordem prática associadas, por exemplo, à gama de velocidades do vento praticável no túnel em causa.

Esta última situação é referida por semelhança GV, em virtude de as escalas geométrica ( $G$ ) e de velocidades ( $V$ ) serem independentes entre si e constituírem as escalas básicas da relação de semelhança.

Nestas condições, a escala de frequências,  $f$ , (ou, alternativamente, a de tempos, já que  $\lambda_T = \lambda_f^{-1}$ ) pode ser obtida com base na semelhança ao nível das forças elásticas, a chamada "semelhança de Cauchy". O parâmetro adimensional  $\Pi_f = (f \cdot D)/U$ , em que  $f$  representa a frequência, e os parâmetros  $D$  e  $U$  são uma dimensão e uma velocidade características,

deve então ser reproduzido no modelo, ou seja,

$$\left(\frac{fD}{U}\right)_m = \left(\frac{fD}{U}\right)_p \Rightarrow \lambda_f = \lambda_L^{-1} \lambda_V \quad (3.5)$$

em que  $\lambda_V$  representa a escala de velocidades.

A semelhança de Froude deve ser respeitada quando os efeitos gravíticos sejam importantes no fenómeno em causa. Nestas condições, é imposto, à partida, um valor unitário para a escala da aceleração gravítica, pelo que a escala de tempos se relaciona necessariamente com a escala geométrica por meio de

$$\lambda_g = \lambda_L \lambda_t^{-2} = 1 \Rightarrow \lambda_t = \lambda_L^{1/2} \quad (3.6)$$

A adopção desta escala de tempos na realização de ensaios corresponde à chamada "semelhança de Froude". O respeito por estas condições de semelhança é importante em ensaios dinâmicos relativos a pontes suspensas, uma vez que a acção da gravidade desempenha um papel importante no seu comportamento estrutural (nomeadamente nas suas características de rigidez). Já no caso de pontes atirantadas, por exemplo, as forças elásticas são predominantes e a semelhança de Froude pode não ser respeitada.

Numa situação de escoamento em que os efeitos no protótipo das forças de natureza viscosa sejam fundamentais, os ensaios devem ser realizados com a reprodução do chamado "número de Reynolds", o qual é definido como

$$Re = \frac{U \cdot D}{\nu} \quad (3.7)$$

sendo  $\nu$  o coeficiente de viscosidade relativa do ar ( $\approx 1,45 \text{ m}^2/\text{s}$ ). A escala de velocidades correspondente a esta

condição de semelhança, considerando  $\lambda_\nu = 1$ , obtém-se por

$$(Re)_m = (Re)_p \Rightarrow \lambda_V = \lambda_L^{-1} \quad (3.8)$$

A satisfação da semelhança de Reynolds na análise do comportamento aerodinâmico de estruturas em túnel de vento é inviável, uma vez que a escala exigida para as velocidades é inversamente proporcional à geométrica (isto é, a um modelo reduzido à escala 1:50, por exemplo, corresponderia a necessidade de gerar no túnel de vento velocidades 50 vezes superiores à do vento atmosférico, o que é impraticável. Para além de dificuldades em termos de potência do motor, o escoamento no túnel seria supersónico para velocidades, à escala real, superiores a apenas 6,8 m/s  $\approx$  25 km/h).

No entanto, a violação da semelhança de Reynolds não invalida necessariamente os resultados experimentais, desde que o  $Re$  associado aos elementos estruturais mais importantes seja superior a determinados valores-limite. Como ordem de grandeza, refira-se que Borges e Saraiva indicam o valor  $Re > 10^3$  (Borges, 1980) e Scanlan refere  $Re > 300-500$  (Scanlan, 1975).

Esta propriedade é particularmente aplicável ao caso de escoamentos em torno de corpos com arestas vivas (de que os tabuleiros de pontes constituem um exemplo) uma vez que, nestes casos, os pontos de separação das camadas-limite são *a priori* bem definidos.

No quadro 3.1 apresentam-se as escalas de algumas grandezas em condições de semelhança GV e de Froude. Pressupõe-se que o fluido seja o mesmo no modelo e no protótipo, conforme ocorre nos ensaios em túnel de vento relativos ao comportamento aerodinâmico de estruturas. As dimensões L, M e T referem-se, respectivamente, a comprimento, massa e tempo.

**Quadro 3.1** - Escalas de algumas grandezas nas semelhanças GV e de Froude.

Grandeza	Dimensões (LMT)	GV	Froude
Comprimento, Deslocamento	L	$\lambda_L$	$\lambda_L$
Massa	M	$\lambda_M = \lambda_L^3$	$\lambda_L^3$
Velocidade	$L T^{-1}$	$\lambda_V$	$\lambda_L^{1/2}$
Frequência	$T^{-1}$	$\lambda_L^{-1} \lambda_V$	$\lambda_L^{-1/2}$
Tempo	T	$\lambda_T = \lambda_L \lambda_V^{-1}$	$\lambda_L^{1/2}$
Aceleração	$L T^{-2}$	$\lambda_L^{-1} \lambda_V^2$	1
Massa volúmica	$L^{-3} M$	1	1
Massa linear	$L^{-1} M$	$\lambda_L^2$	$\lambda_L^2$
Momento de inércia	$L^2 M$	$\lambda_L^5$	$\lambda_L^5$
Momento de inércia linear	$L^1 M$	$\lambda_L^4$	$\lambda_L^4$
Força	$L M T^{-2}$	$\lambda_L^2 \lambda_V^2$	$\lambda_L^3$
Momento	$L^2 M T^{-2}$	$\lambda_L^3 \lambda_V^2$	$\lambda_L^4$
Pressão	$L^{-1} M T^{-2}$	$\lambda_V^2$	$\lambda_L$

### 3.2 Modelos seccionais

Os modelos seccionais de tabuleiros de pontes são modelos rígidos com as extremidades apoiadas num sistema de suspensão elástica e que reproduzem, à escala, a geometria do contorno exterior de um troço do tabuleiro. As propriedades dinâmicas da ponte são parcialmente simuladas à custa do sistema de suspensão, o qual é dimensionado de forma a que as frequências naturais dos modos fundamentais de flexão e de torção do protótipo sejam convenientemente reproduzidas. Caso se revele conveniente, é possível incluir dispositivos de amortecimento adicional de modo a também reproduzir os coeficientes de amortecimento estrutural.

#### 3.2.1 Determinação dos coeficientes de forma

O registo das forças aerodinâmicas induzidas no modelo de um tabuleiro pode ser efectuado por meio da integração das pressões medidas no contorno do tabuleiro ou por medição directa das forças transmitidas às molas do sistema de suspensão. Esta última via foi a utilizada no presente trabalho. Os valores registados

para a força nas molas ao longo de um ensaio permitem calcular, em cada instante, as forças globais de arrastamento (força horizontal - P), de sustentação (força vertical - L) e o momento torsor (M). A partir destes valores podem ser determinados os correspondentes coeficientes de forma através de

$$C_D(t) = \frac{P(t)}{(1/2 \rho U^2) D_m L_m}$$

$$C_L(t) = \frac{L(t)}{(1/2 \rho U^2) B_m L_m}$$

$$C_M(t) = \frac{M(t)}{(1/2 \rho U^2) B_m^2 L_m}$$

em que  $\rho$  é a massa volúmica do ar,  $U$  é a velocidade livre do escoamento,  $D_m$  é a altura do modelo,  $B_m$  é a sua largura e  $L_m$  o seu comprimento. A convenção de sinais utilizada para as forças, para os deslocamentos e para o ângulo de ataque é explicitada na figura 3.1 para um tabuleiro genérico sujeito à actuação de um vento horizontal com velocidade constante  $U$ .

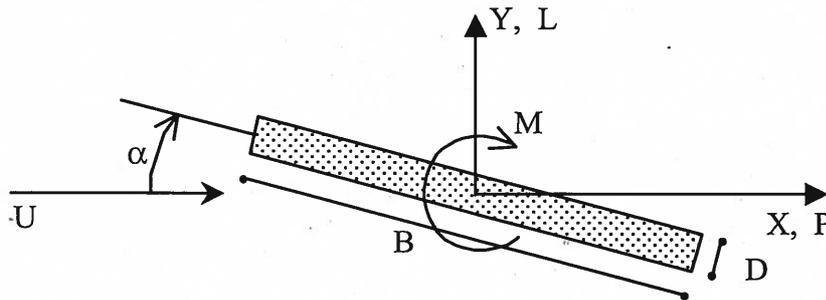


Fig. 3.1 - Convenção de sinais.

De acordo com esta convenção de sinais, os ângulos de ataque positivos correspondem às situações em que o escoamento "vê" o tabuleiro por baixo.

### 3.2.2 Análise da estabilidade aerodinâmica

Os modelos seccionais são particularmente aptos para pesquisar a estabilidade aerodinâmica de tabuleiros de pontes, uma vez que, sob determinadas hipóteses simplificativas, o modelo e o protótipo apresentam o mesmo tipo de comportamento face aos mecanismos de auto-excitação.

Admita-se que a ponte apresenta um comportamento elástico linear sob a acção do vento, e considere-se para as oscilações verticais  $Y(x,t)$  num ponto genérico ( $x$ ) do tabuleiro a seguinte decomposição

$$Y(x,t) = \sum_i \phi_i(x) q_i(t) \quad (3.9)$$

sendo  $\phi_i(x)$  a configuração do  $i$ ésimo modo de vibração e  $q_i(t)$  a correspondente amplitude modal de oscilação.

A equação de equilíbrio dinâmico correspondente a cada modo de vibração da estrutura é do tipo

$$\ddot{q}_i(t) + 2 \omega_{ip} \eta_{ip} \dot{q}_i(t) + \omega_{ip}^2 q_i(t) = \frac{F_i(t)}{M_i} \quad (3.10)$$

onde  $\omega_{ip}$  é a correspondente frequência angular e  $\eta_{ip}$  o coeficiente modal de amortecimento de natureza estrutural. A força aerodinâmica generalizada ( $F_i$ ) e a massa generalizada ( $M_i$ ) correspondentes ao modo em causa obtêm-se por meio das expressões 3.11 e 3.12. Nestas expressões  $f(x,t)$  é a força aerodinâmica actuante no instante  $t$  na secção com coordenada  $x$ ,  $m(x)$  é a massa linear da estrutura e referindo-se os índices ( $d, c, t$ ) ao tabuleiro, aos cabos e às torres, respectivamente.

Se as diversas massas lineares envolvidas na massa generalizada forem constantes e se o critério de normalização da configuração modal for  $= 1$ , em que  $L$  representa a extensão total do tabuleiro, então  $M_i$  pode ser expressa na forma indicada na expressão 3.13 (Davenport, 1969).

$$F_i(t) = \int_d f_d(x,t) \phi_{di}(x) dx +$$

$$\int_c f_c(x,t) \phi_{ci}(x) dx + \int_t f_t(x,t) \phi_{ti}(x) dx$$

$$M_i = \int_d m_d(x) \phi_{di}^2(x) dx +$$

$$\int_c m_c(x) \phi_{ci}^2(x) dx + \int_t m_t(x) \phi_{ti}^2(x) dx$$

$$M_i = m_d + v_i m_c + \epsilon_i m_t$$

Nesta última expressão, os coeficientes  $v_i$  e  $\varepsilon_i$ , que são definidos através de

$$v_i = \int_c \phi_{ci}^2(x) dx \quad \varepsilon_i = \int_t \phi_{ti}^2(x) dx$$

estão associados à contribuição da massa dos cabos e das torres para a massa modal generalizada.

Sendo  $m_c$  a massa dos cabos envolvida nas oscilações do tabuleiro, dada por unidade de comprimento deste, é possível concluir que  $v_i \approx 1$  (pois  $\phi_c \approx \phi_d$ ). Em pontes suspensas verifica-se geralmente que  $\varepsilon_i \ll 1$ , uma vez que as torres apresentam amplitudes de oscilação muito reduzidas (Davenport, 1969). Em pontes de tirantes podem registar-se valores de  $\varepsilon_i$  com algum significado, em especial no caso de torres em forma de H.

Considere-se agora um modelo seccional rígido, com comprimento  $L_m$  e massa linear  $m_m$ , sujeito a uma força aerodinâmica  $f_{dm}(x,t)$ , e indique-se por  $y_i(t)$  a amplitude da sua oscilação num modo particular com frequência própria  $\omega_{im}$  e amortecimento  $\eta_{im}$ . A equação de equilíbrio dinâmico das oscilações do modelo é

$$\ddot{y}_i(t) + 2 \omega_{im} \eta_{im} \dot{y}_i(t) + \omega_{im}^2 y_i(t) = \frac{\int_{L_m} f_{dm}(x,t) dx}{m_m L_m} \quad (3.14)$$

A massa linear do modelo é igual à soma da massa do modelo em si com uma parcela correspondente à contribuição, por unidade de comprimento do modelo, de toda a massa do sistema de suspensão envolvida nas oscilações. Em face da escala das massas lineares, a condição de semelhança das forças de inércia traduz-se por

$$m_m = \lambda_L^2 (m_d + v_i m_c + \varepsilon_i m_t) \quad (3.15)$$

Refira-se que as expressões anteriores dizem apenas respeito a modos de oscilação linear, sendo imediata a generalização a modos de torção. Para isso, em vez da massa linear  $m$  considera-se o momento mássico polar de inércia  $I_m$  e a força  $f_d$  corresponde ao momento tursor aerodinâmico por unidade de comprimento.

A equivalência ao nível das forças aerodinâmicas pode ser garantida se forem observadas as duas condições seguintes (Davenport, 1969, 1971): i) no protótipo, a parcela da força generalizada  $F_i$  associada ao efeito do vento nos cabos e nas torres é irrelevante em relação à parcela associada ao tabuleiro; ii) no modelo e no protótipo, a força aerodinâmica em cada secção do tabuleiro é uma função linear da amplitude e da velocidade de oscilação dessa secção, ou seja,

$$f_d(x,t) = 0.5 \rho B U^2 [k_y \dot{Y}(x,t) + h_y Y(x,t)] \quad (3.16a)$$

$$f_{dm}(x,t) = 0.5 \rho B_m U_m^2 [k_{ym} \dot{y}(t) + h_{ym} y(t)] \quad (3.16b)$$

Os coeficientes  $k$  e  $h$  estão associados às velocidades e às amplitudes de oscilação, respectivamente.

Nestas condições, ambos os sistemas (modelo e protótipo) obedecem à seguinte equação de equilíbrio dinâmico relativa a um modo genérico de vibração (i)

$$\ddot{\zeta}_i(t) + 2 \omega_i (\eta_i - \eta_{ai}) \dot{\zeta}_i(t) + (\omega_i^2 - \omega_{ai}^2) \zeta_i(t) = 0 \quad (3.17)$$

representando  $\zeta$  a amplitude modal de oscilação (no protótipo ou no modelo), e sendo as parcelas  $\eta_{ai}$  e  $\omega_{ai}$  equivalentes, respectivamente, a termos de amortecimento e de rigidez de natureza aerodinâmica. Assim, em termos de estabilidade, atingem-se situações limite com o anulamento da rigidez global (fenómeno usualmente designado por "divergência aerostática" e sem interesse

prático no presente caso) ou com o anulamento do amortecimento global (*flutter* num grau de liberdade).

Os ensaios de modelos seccionais são correntemente realizados sob condições de escoamento uniforme, com intensidade de turbulência reduzida. Este procedimento é geralmente tido como conservativo em relação a fenómenos de instabilidade aerodinâmica (Davenport, 1969; Scanlan, 1978), podendo ser apontadas as seguintes razões em favor desta suposição:

- A turbulência atmosférica tende a mobilizar todos os modos de vibração da ponte, pelo que é inibida a instabilidade concertada num único modo de vibração;
- Os valores típicos da escala lateral de turbulência são bastante inferiores ao comprimento total dos tabuleiros, o que conduz a uma rápida perda de correlação ao longo do vão entre as flutuações de velocidade. Este efeito inibidor da activação de fenómenos de instabilidade não é simulado nos ensaios com modelos seccionais, onde esta correlação é praticamente unitária.

#### 4. MEIOS LABORATORIAIS

##### 4.1 Túnel de vento

O túnel de vento instalado no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais (LERM) do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico é de circuito aberto e de indução (o ventilador encontra-se a sotavento da câmara de ensaios, aspirando o ar).

A entrada de ar realiza-se através de uma boca quadrada (3,5 m de lado) com uma câmara de tranquilização constituída por uma grelha de alvéolos quadrados (50x50 mm<sup>2</sup>).

Após esta câmara existe um colector com uma taxa de contracção de 5,44:1, onde o escoamento é acelerado até entrar na câmara de ensaios.

A câmara de ensaios tem uma secção transversal quadrada com 1,50 m de lado e um comprimento total de 5,00 m. As dimensões da secção crescem ligeiramente no sentido do escoamento com o objectivo de reduzir o gradiente longitudinal de pressão, contrariando o crescimento das camadas-limite ao longo das paredes.

As paredes da câmara de ensaios são em vidro e apresentam, na zona central, aberturas circulares a meia altura com diâmetro de 0,20 m. O escoamento na secção recta da câmara de ensaios é praticamente uniforme.

A sotavento da câmara encontra-se um primeiro difusor, no qual se estabelece a transição para uma conduta circular com 1,80 m de diâmetro onde se aloja o ventilador. Finalmente, existe um último difusor tronco-cónico com 2,00 m de comprimento e um diâmetro à saída de 2,25 m. Este difusor apresenta um tubo central com 0,63 m de diâmetro, o qual é uma continuação do eixo do ventilador. A razão entre a área da secção de saída do escoamento e a área da secção transversal da câmara de ensaios é igual a 1,62:1.

O motor tem uma potência de 132 kW e permite impor ao escoamento na câmara de ensaios uma velocidade máxima de cerca de 40 m/s, em vazio.

O ventilador funciona a uma velocidade constante de 1470 rpm.

A velocidade do escoamento é controlada pela abertura das pás do ventilador, a qual é comandada manualmente através de um circuito de ar comprimido.

As figuras 4.1 e 4.2 ilustram a configuração do túnel de vento.

##### 4.2 Aparelhos de medida e sistema de aquisição de dados

As grandezas físicas medidas durante a realização dos ensaios são a pressão dinâmica do vento na câmara de ensaios, a força nas molas que constituem o sistema de suspensão (verticais e horizontais) e os

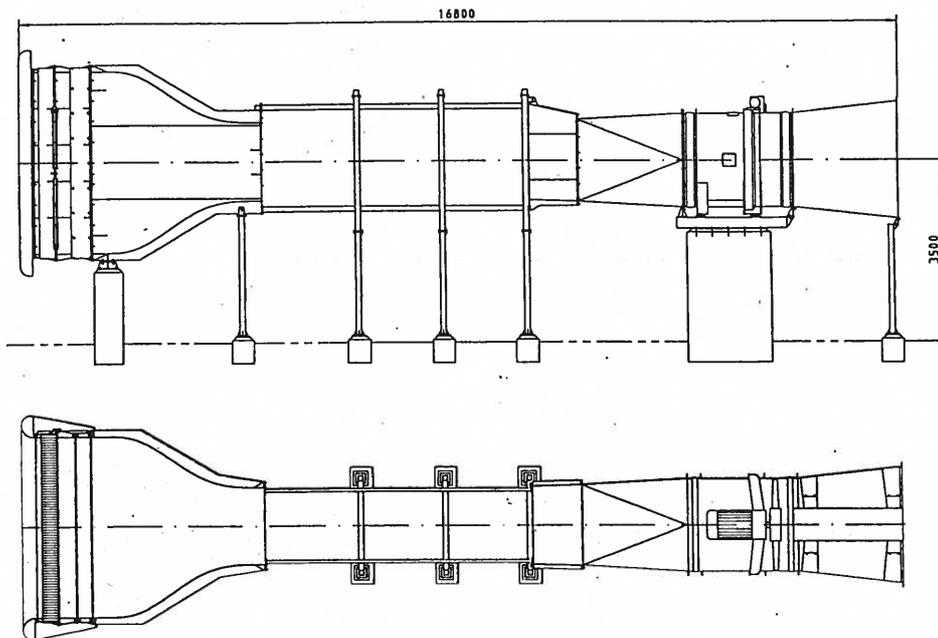


Fig. 4.1 – Vista lateral e em planta do túnel de vento (dimensões em mm)

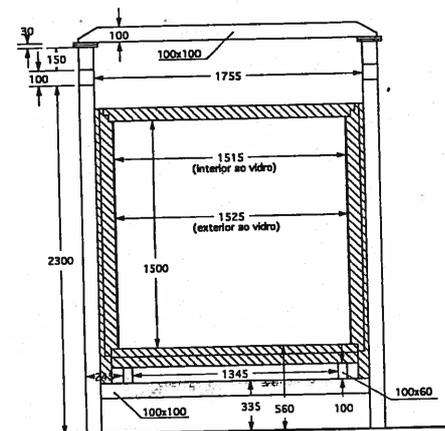


Fig. 4.2 – Corte transversal da câmara de ensaios (dimensões em mm)

deslocamentos verticais em dois pontos opostos do tabuleiro.

A pressão dinâmica do vento é medida com um tubo de Pitot-Prandtl da AIRFLOW,  $\phi = 4$  mm, colocado 1000 mm a barlavento do modelo do tabuleiro e a meia altura da câmara de ensaios. Este tubo está ligado a um transmissor de pressão MICATRONE com  $P_{\max} = 500$  Pa, o qual foi ajustado para debitar um sinal de 0 VDC a 10 VDC directamente proporcional à pressão na gama de 0 Pa a 500 Pa.

As molas do sistema de suspensão do modelo são ligadas à extremidade livre de chapas metálicas funcionando em consola, com 100 mm de comprimento e uma secção de  $30 \times 5$  mm<sup>2</sup>. As forças nas molas

são obtidas através de montagens de extensómetros TML com 10 mm de comprimento e ligados em ponte completa (flexão). Estas montagens estão situadas na secção de encastramento das consolas, permitindo registar os valores instantâneos do momento flector e, indirectamente, a força exercida por cada mola. As montagens de extensómetros são lidas através de uma ponte dinâmica da INSTRUMENTS DIVISION do tipo 2100 System. Depois de amplificado, o sinal debitado é de 1 VDC por cada 100 N de força. O conjunto consola e extensómetros, referido por célula de carga, é apoiado em elementos estruturais de suporte do túnel, suficientemente rígidos para que seja legítimo considerá-los como elementos fixos.

Os deslocamentos verticais são medidos através de acelerómetros da marca BRÜEL & KJÆR, do tipo 4379, associados a amplificadores do tipo 2635 da mesma marca. Estes amplificadores são sensíveis a oscilações com frequências superiores a 1 Hz e foram ajustados por forma a realizarem a integração directa das acelerações, debitando um sinal proporcional aos deslocamentos, com a voltagem de 1 VDC por cada milímetro de deslocamento.

Durante os ensaios é ainda utilizado um osciloscópio, o qual permite observar, em simultâneo e em tempo real, o sinal de saída de quaisquer dois dos canais utilizados (tubo de Pitot, células de carga, acelerómetros).

O armazenamento dos resultados é realizado através de uma unidade de aquisição (*data logger*) HP3852A da HEWLETT PACKARD. Este sistema permite uma velocidade de aquisição até 5500 leituras/segundo. No caso presente foram utilizados 9 canais (1 tubo de Pitot, 4 células de carga verticais, 2 células de carga horizontais e 2 acelerómetros), tendo-se adoptado uma velocidade de leitura de 370 Hz por canal (ou seja, um intervalo de tempo entre leituras do mesmo canal de  $\Delta t = 0.0027$  segundos). O sistema de aquisição de dados é comandado através de um computador pessoal munido de uma placa de comunicação HP-IB. No final de cada ensaio os dados armazenados no *data logger* são transferidos para o computador. Para efectuar o comando do *data logger* é utilizado o programa de cálculo automático TUNEL\_1 (Ferreira, 1997).

A verificação da horizontalidade do tabuleiro na sua direcção longitudinal e a medida da sua inclinação em relação ao escoamento são realizadas com um nível digital BOSCH, com uma resolução de  $0,1^\circ$ .

## 5. CARACTERÍSTICAS DO MODELO

### 5.1 Descrição do modelo rígido

O modelo do tabuleiro do Viaduto Sobre o Caminho do Comboio foi

realizado em madeira, possuindo pesos adicionais para verificação das relações de semelhança. A escala geométrica correspondente é de 1/50.

A escala geométrica adoptada corresponde a uma solução de compromisso entre as duas condições seguintes, as quais têm influências contrárias na sua escolha:

- Obtenção de um modelo esbelto para que o escoamento seja aproximadamente bidimensional e para que sejam reduzidos os efeitos associados à blocagem (definida como a percentagem da área frontal da câmara de ensaios ocupada pelo modelo);
- Escolha de uma escala suficientemente elevada para que sejam irrelevantes os efeitos decorrentes de a semelhança de Reynolds ser desrespeitada.

### 5.2 Descrição do sistema de suspensão

O sistema de suspensão é simétrico em relação ao plano vertical que contém o eixo do túnel de vento e também em relação ao plano vertical que contém o eixo de rotação do tabuleiro. Este eixo é materializado por um elemento metálico, a seguir referido como "haste A" que atravessa as aberturas circulares existentes nas paredes laterais da câmara de ensaios. Em cada extremidade, a haste A é ligada a uma outra haste metálica horizontal (indicada por "haste B"), ortogonal à primeira. Cada haste B é ligada a quatro molas helicoidais - duas molas verticais equidistantes da haste A e duas molas horizontais cujos eixos coincidem com o da próprio haste B (em condições de rotação nula do tabuleiro).

As características elásticas de cada mola foram determinadas previamente em ensaios de carga, com a aplicação de pesos calibrados e medição dos deslocamentos correspondentes através de transdutores eléctricos. Todas as molas apresentaram comportamento linear para além da ordem de grandeza das forças a que estarão sujeitas durante os ensaios. As molas de cada conjunto (molas verticais e

horizontais) têm valores idênticos de rigidez.

A posição do modelo é regulada através de esticadores de parafuso, intercalados entre as molas e as células de carga.

Num dos topos do modelo são colocados dois acelerómetros, próximo das extremidades das duas consolas da secção, estando alinhados com a direcção do vento.

Nas figuras 5.1 e 5.2 apresenta-se uma vista geral do modelo e do sistema de suspensão, respectivamente.

### 5.3 Características dinâmicas do modelo

O sistema de suspensão do tabuleiro é, como se referiu, constituído por um conjunto de elementos metálicos e de molas elásticas que permitem reproduzir, à escala, as frequências próprias dos modos de vibração mais importantes para a análise (flexão vertical e torção).

A frequência de oscilação vertical depende sobretudo da massa do modelo e da rigidez das molas verticais. A frequência de torção depende do momento polar de inércia do modelo em relação ao eixo de suspensão, da rigidez das molas verticais e do afastamento entre estas, que foi ajustado por forma a se obter a frequência desejada.

Os ensaios são realizados sob condições de semelhança referidas antes por "tipo GV", em que as escalas geométricas e de velocidades são arbitrariamente escolhidas. Neste caso a escala de frequências é dada pela razão entre a escala de velocidades e a escala geométrica.

No caso presente a escala de velocidades arbitrada foi de 1/9,2, obtendo-se uma escala de frequências de 1/0,18 (a escala geométrica, como referido, é de 1/50).

Dado que as frequências de oscilação vertical e de torção valem, respectivamente, 0,87 Hz e 1,58 Hz, obtiveram-se valores no modelo de 4,72 Hz e 8,58 Hz.

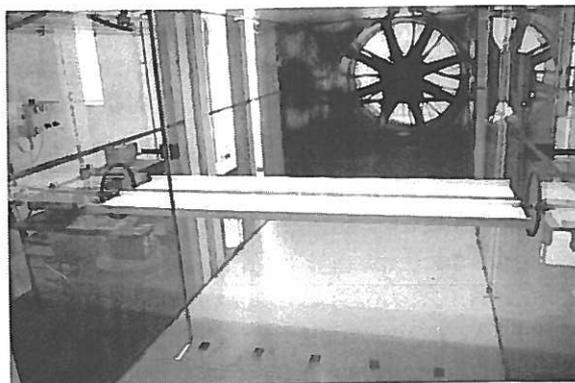


Fig. 5.1 – Vista geral do modelo do Viaduto Sobre o Caminho do Comboio

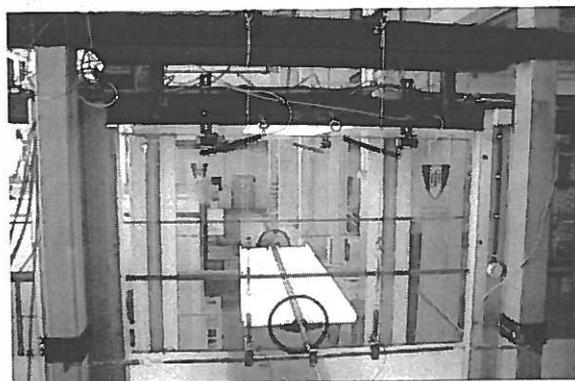


Fig. 5.2 – Sistema de suspensão do modelo do Viaduto

## 6. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Foram realizados ensaios para uma gama larga de velocidades e ângulos de ataque do vento.

Para ângulo de ataque nulo ensaiaram-se velocidades do vento de 4, 5, 6, 7 e 8 m/s, correspondentes a valores no protótipo entre 133 km/h e 266 km/h.

Os ângulos de ataque não nulos analisados foram  $-6^\circ$ ,  $-4^\circ$ ,  $-2^\circ$ ,  $-1^\circ$ ,  $1^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $4^\circ$  e  $6^\circ$ , para velocidades de 5 e 7 m/s.

Obtiveram-se os coeficientes de forma do tabuleiro – arrastamento, sustentação e momento torsor – e os desvios-padrão dos deslocamentos verticais e das rotações de torção.

Nos ensaios foram registados 8200 valores em cada um dos canais de leitura, correspondentes a uma duração total de 22.14 segundos ( $\Delta t = 0,0027$  seg./canal).

Os valores registados da força nas molas permitiram calcular, em cada

instante, as forças globais de arrastamento (força horizontal - P), de sustentação (força vertical - L) e o momento torsor (M).

Nas figuras 6.1 a 6.5 apresentam-se os resultados obtidos com valor médio nulo do ângulo de ataque, nomeadamente os valores médios dos coeficientes de forma (figuras 6.1 a 6.3) e os desvios-padrão das oscilações verticais e de rotação do tabuleiro (figuras 6.4 e 6.5).

Nas figuras 6.6 a 6.10 apresentam-se os resultados obtidos para os diversos ângulos de ataque ensaiados, registando-se a variação dos valores médios dos coeficientes de forma (figuras 6.6 a 6.8) e dos desvios-padrão das oscilações do tabuleiro (figuras 6.9 e 6.10).

As rectas indicadas a tracejado nas figuras 6.7 e 6.8 passam no ponto correspondente aos coeficientes de forma do tabuleiro para  $\alpha=0^\circ$  e têm um declive igual ao de uma placa plana idealmente fina ( $\partial C_L/\partial\alpha = 2\pi$  e  $\partial C_M/\partial\alpha = \pi/2$ , com  $\alpha$  expresso em radianos (Anderson, 1985)).

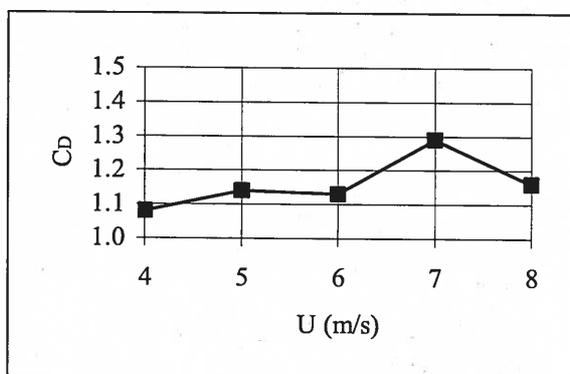


Fig. 6.1 - Coeficiente de arrastamento ( $\alpha=0^\circ$ )

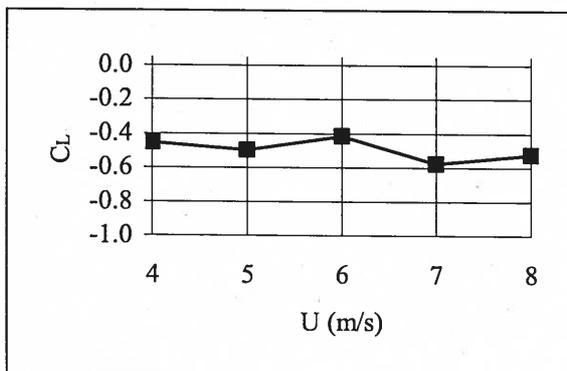


Fig. 6.2 - Coeficiente de sustentação ( $\alpha=0^\circ$ )

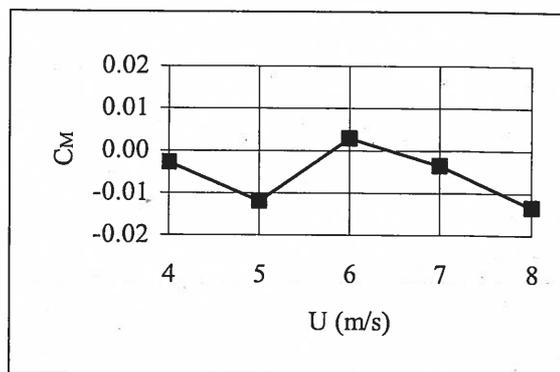


Fig. 6.3 - Coeficiente de momento torsor ( $\alpha=0^\circ$ )

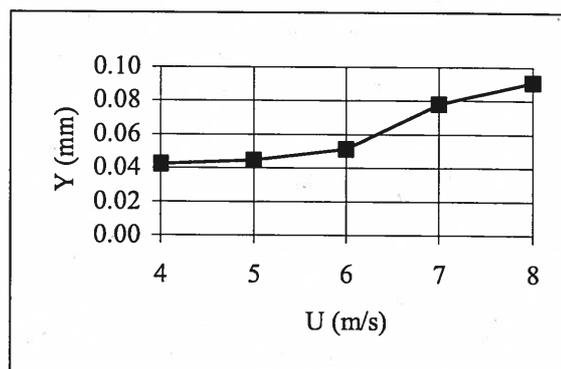


Fig. 6.4 - Desvio-padrão das oscilações verticais ( $\alpha=0^\circ$ )

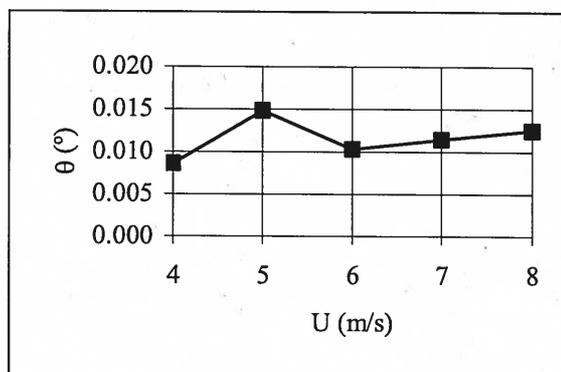


Fig. 6.5 - Desvio-padrão das rotações ( $\alpha=0^\circ$ )

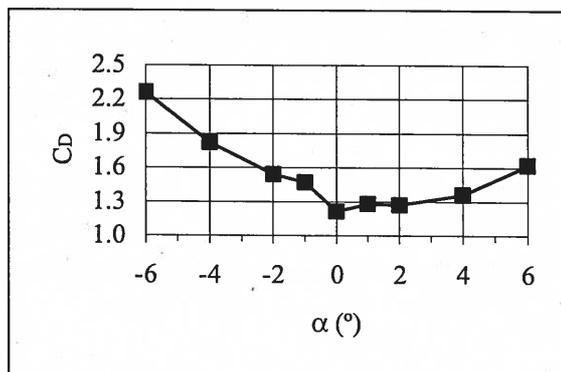


Fig. 6.6 - Coeficiente de arrastamento ( $\alpha$  variável)

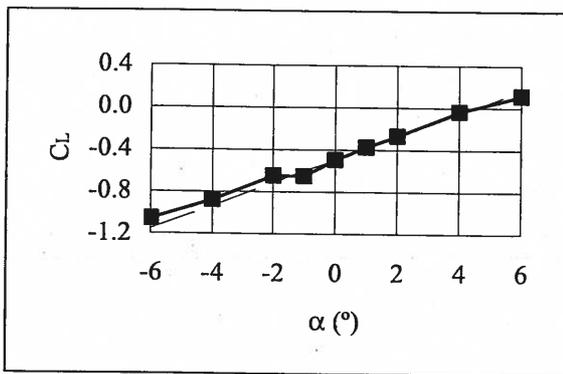


Fig. 6.7 – Coeficiente de sustentação ( $\alpha$  variável)

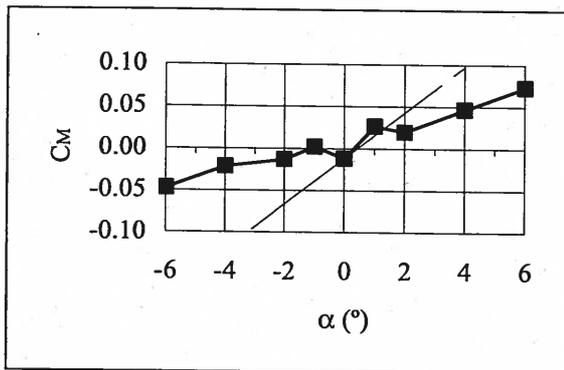


Fig. 6.8 – Coeficiente de momento torsor ( $\alpha$  variável)

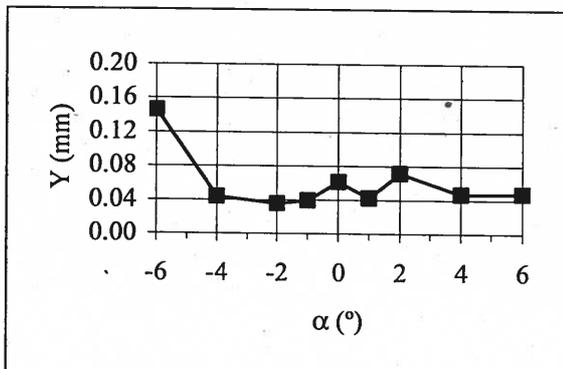


Fig. 6.9 – Desvio padrão das oscilações verticais ( $\alpha$  variável)

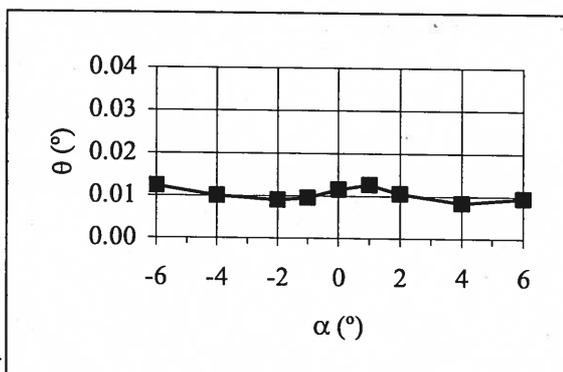


Fig. 6.10 - Desvio padrão das rotações de torção ( $\alpha$  variável)

## 7. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Dos ensaios realizados podem extrair-se as seguintes conclusões:

### 7.1 Ensaios com ângulo de ataque nulo

Os valores médios dos coeficientes de forma para  $\alpha=0^\circ$  são os seguintes:

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

- Os coeficientes de arrastamento e de sustentação têm uma dispersão reduzida para as velocidades de vento consideradas, o que revela a insensibilidade das forças globais ao número de Reynolds na gama de valores ensaiada. A dispersão verificada no coeficiente de momento é, na verdade, em torno de valores praticamente nulos, pelo que não tem relevância prática.
- O coeficiente de sustentação é negativo (ou seja, a força aerodinâmica vertical tem o sentido da força gravítica).
- Os desvios-padrão das oscilações revelam uma tendência crescente com o aumento da velocidade do vento. Não se registam picos no desvio-padrão das oscilações verticais atribuíveis a um eventual desprendimento regular de vórtices.

### 7.2 Ensaios com ângulo de ataque variável

- O valor mínimo do coeficiente de arrastamento ocorre para  $\alpha=0^\circ$ .
- Os coeficientes de sustentação e de momento têm uma variação praticamente linear com o ângulo de ataque. O declive do coeficiente de sustentação em função do ângulo de ataque tem um valor idêntico ao de uma placa plana idealmente fina. Em relação ao coeficiente de momento torsor, não se verifica tal facto.
- A derivada do coeficiente de sustentação em ordem ao ângulo de ataque é positiva, o que indicia que o tabuleiro é

estável em relação ao galope (modo de instabilidade aerodinâmica caracterizado por deslocamentos transversais ao escoamento, com grande amplitude). Com efeito, de acordo com o critério de Den Hartog, a relação

$$C_D(\alpha=0^\circ) + \frac{\partial C_L(\alpha=0^\circ)}{\partial \alpha} < 0$$

é uma condição necessária para a ocorrência de galope (Simiu, 1986).

- O desvio-padrão das rotações do tabuleiro é pouco sensível ao ângulo de ataque. Em relação às oscilações verticais, verifica-se um aumento acentuado para  $\alpha = -6^\circ$ . Este facto não é preocupante, uma vez que se trata de um ângulo de ataque suficientemente elevado para que se admita não ter contrapartida prática.

### 7.3 Estabilidade aerodinâmica

- O tabuleiro não exibiu indícios de instabilidade aerodinâmica ou de sensibilidade ao desprendimento regular de vórtices na gama ensaiada de velocidades médias do vento, correspondentes, no protótipo, a valores entre 133 km/h e 266 km/h.

### REFERÊNCIAS

- A. J. BORGES e J. G. SARAIVA, 'Comportamento sob a acção do vento da Ponte sobre o Tejo em Lisboa', *Rev. Port. Eng. Estruturas*, nº 7, 9-15, 1980.
- R. SCANLAN, *Recent methods in the application of test results to the wind design of long, suspended-span bridges*, Federal Highway Administration, Report FHWA/RD 75/115, 1975.
- A. DAVENPORT, N. ISYUMOV, D. FADER e C. BOWEN, *A study of wind action on a suspension bridge during erection and on completion: The Narrows Bridge, Halifax, Nova Scotia, Canada*, Report BLWTL-3-1969, Univ. Western Ontario, London, Canada, 1969.
- A. DAVENPORT, N. ISYUMOV e T. MIYATA, 'The experimental determination of the response of suspension bridges to turbulent wind', Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. Wind Effects Build. Stuct., Tokyo, 1971.
- R. SCANLAN, 'The action of flexible bridges under wind, II: Buffetting theory', *J. Sound Vib.*, 60, 2, 201-211, 1978.
- J. FERREIRA e P. MENDES, 'Programa TUNEL\_1 - Programa para aquisição de dados de ensaios em túnel de vento', Relatório IC-IST, DT 5/97, 1997.
- J. ANDERSON, *Fundamentals of Aerodynamics*, McGraw-Hill, 2<sup>nd</sup> edition, 1985.
- E. SIMIU e R. SCANLAN, *Wind effects on structures*, John Wiley & Sons, 2<sup>nd</sup> edition, 1986.