



Instabilidade aerodinâmica por *flutter* em estruturas prismáticas de secção retangular



M. Tavares, A. Pinto da Costa* e F.M.F. Simões

Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georecursos and ICIST, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Avenida Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

INFORMAÇÃO SOBRE O ARTIGO

Historial do artigo:

Recebido a 26 de abril de 2013
Aceite a 2 de dezembro de 2013
On-line a 13 de abril de 2014

Palavras-chave:

Instabilidade aerodinâmica
flutter
Secções retangulares
Derivadas seccionais de *flutter*

Keywords:

Aerodynamic instability
flutter
Rectangular cross sections
flutter derivatives

R E S U M O

Neste artigo estuda-se a ocorrência de instabilidade aerodinâmica por *flutter* em estruturas prismáticas esbeltas de secção retangular. Considera-se um modelo com 2 graus de liberdade e obtém-se a sua formulação adimensional identificando-se um número mínimo de parâmetros adimensionais que regem a ocorrência de instabilidade por *flutter*. Obtém-se uma muito boa concordância entre os resultados do modelo de 2 graus de liberdade e os resultados existentes na literatura. Este artigo tem 2 objetivos: (i) definir as condições para as quais estruturas esbeltas com secções retangulares podem instabilizar por *flutter* sob a ação do vento e (ii) fornecer uma coleção alargada de resultados sob a forma de tabelas ou gráficos prontos a usar, cobrindo um largo número de casos, que proporciona aos projetistas de estruturas uma ferramenta que estes podem utilizar, a nível de pré-dimensionamento, para prever as velocidades críticas do vento que provocam a instabilidade por *flutter*.

© 2013 CIMNE (Universitat Politècnica de Catalunya). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos os direitos reservados.

Assessing aerodynamic *flutter* instability in prismatic structures with rectangular cross sections

A B S T R A C T

This paper is dedicated to the study of the occurrence of *flutter* instability in slender prismatic structures of rectangular cross section. A two degree of freedom model is considered and its non dimensional formulation is derived so that a minimum number of non dimensional parameters governing the occurrence of *flutter* instability are put in evidence. A very good agreement has been obtained by comparing the results of the two degree of freedom model with the results available in the literature. The goal of this document is twofold: (i) to summarize the conditions for which slender structures with rectangular cross sections may get unstable by *flutter* under the action of steady wind conditions and (ii) to supply a broad collection of data in the form of ready-to-use tables or graphics covering a wide range of cases, that provide a basis for designers to predict the critical wind velocities at the onset of *flutter* instability.

© 2013 CIMNE (Universitat Politècnica de Catalunya). Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

1. Introdução

A necessidade e a vontade de vencer grandes vãos tem levado ao projeto e construção de pontes cada vez mais leves e esbeltas. Este facto também tem sido encorajado pelo uso de novos materiais e de novas técnicas computacionais de cálculo. Neste tipo de estruturas o vento tem uma ação dominante: a grande flexibilidade de algumas pontes, especialmente as suspensas, tem levado à crescente

preocupação dos projetistas com os fenómenos de instabilidade causados pelo vento. Pontes atirantadas são também particularmente vulneráveis à ação do vento, especialmente durante a fase construtiva [1]. Apesar dos grandes avanços feitos nas últimas décadas na compreensão da interação vento-estrutura, este assunto continua na ordem do dia.

Foi em 1940, com o colapso da ponte de Tacoma, que surgiram as primeiras preocupações com o potencial efeito instabilizante do vento. Inicialmente alguns investigadores pensaram que as causas do acidente tinham sido as grandes amplitudes do movimento geradas por ressonância: defendiam que o vento tinha produzido uma ação externa (excitação externa por «destacamento de vórtices»)

* Autor para correspondência.

Correio eletrónico: apcosta@civil.ist.utl.pt (A. Pinto da Costa).

com uma frequência semelhante a uma das frequências naturais da estrutura. Na realidade o que aconteceu *não foi* um fenómeno de ressonância, de facto os registos indicam que, na altura do colapso da estrutura, o vento atuava com uma velocidade constante (68 km/h) e a frequência de destacamento de vórtices era 1 Hz enquanto a frequência de oscilação era 0,2 Hz (5 vezes menor) [2]. O fenómeno que originou o colapso da ponte de Tacoma foi uma autoexcitação aerodinâmica, usualmente designada como *flutter*, que pode ser interpretada como devida a um «amortecimento efectivo negativo» (no grau de liberdade de torção).

O cálculo das condições que definem a ocorrência de instabilidade por *flutter* em estruturas (tridimensionais) elásticas, prismáticas e esbeltas tem sido objeto de vários estudos, alguns deles baseados (parcialmente) em cálculos analíticos e outros completamente baseados no método dos elementos finitos.

Nos estudos semianalíticos admite-se que o movimento do tabuleiro pode ser decomposto numa soma finita de modos. As equações que regem o movimento podem ser escritas em função das coordenadas modais generalizadas. As forças aerodinâmicas generalizadas são definidas por integrais ao longo do vão das forças aerodinâmicas seccionais que se admite dependerem linearmente do estado (posição e velocidade) de cada secção transversal; os coeficientes destas funções lineares são as derivadas seccionais de *flutter*, determinadas experimentalmente, que caracterizam as propriedades de rigidez e de amortecimento da interação vento-estrutura. Investiga-se a ocorrência de instabilidade por *flutter* num único modo ou por coalescência de 2 modos de vibração (ambos os casos conduzem a um movimento oscilatório de amplitude crescente fisicamente associado à ocorrência de um amortecimento modal efetivo negativo). Os trabalhos [1,3-8] seguem esta orientação analítica.

Um método alternativo consiste na análise de um modelo simplificado (com 2 graus de liberdade) que se pode considerar um caso particular do método referido no parágrafo anterior [8]. Estes modelos simplificados permitem obter boas aproximações para as velocidades críticas do vento, como também se conclui no presente artigo, e têm sido utilizados em variados estudos [9-14].

Outros autores preferem resolver um problema de valores e vetores próprios baseado num modelo de elementos finitos 3D da estrutura. O tabuleiro da ponte é discretizado em elementos finitos e as forças aerodinâmicas nodais são calculadas da forma usual. As forças aerodinâmicas dependem linearmente dos deslocamentos e velocidades generalizados, pelo que contribuem com matrizes aerodinâmicas de rigidez e de amortecimento (dependentes da velocidade do vento e da frequência de oscilação através das derivadas seccionais de *flutter*) que se subtraem às suas homólogas estruturais. Admitindo pequenas amplitudes das oscilações dinâmicas no início da ocorrência da instabilidade por *flutter*, obtém-se um problema de valores e vetores próprios simétrico, mas que é não linear uma vez que os operadores matriciais dependem não linearmente dos valores próprios (frequências de oscilação). Agar [15] estudou o efeito do refinamento da malha de elementos finitos no valor da velocidade crítica do vento. Namibi et al. [16] mostraram que as menores velocidades críticas podem ser obtidas para valores não nulos do ângulo de incidência do vento e compararam a aproximação obtida pelo método dos elementos finitos com a obtida pelo método semianalítico [1]. Em [17] fez-se uma descrição pormenorizada e analisaram-se várias pontes atirantadas ou suspensas. Ge e Xiang [18] prestaram especial atenção às várias maneiras possíveis de obter as derivadas seccionais de *flutter*. Mendes e Semão [19,20] calcularam a velocidade crítica do vento para vários modelos de elementos finitos de pontes e compararam os resultados com os obtidos por meio de fórmulas simplificadas.

Vários autores têm continuado a dedicar-se à simulação numérica da aerodinâmica de pontes. Entre outros referem-se (i) os trabalhos de Fouresey e Piperno [21] e de Patro et al. [22] que resol-

vem numericamente as equações de Navier-Stokes para estudar o escoamento em torno de secções transversais de pontes, (ii) o trabalho de Lazzari [23] que analisa modelos de 2 ou 3 graus de liberdade de secções transversais de pontes no domínio do tempo e (iii) o de Diana et al. [24] que analisa numericamente modelos tridimensionais de uma ponte pelo método dos elementos finitos em que as forças aerodinâmicas atuantes no modelo se obtêm mediante testes apropriados realizados em túnel de vento.

O objetivo deste artigo é o de apresentar e discutir os resultados numéricos de um algoritmo [17] que permite obter as condições para a ocorrência de instabilidade aerodinâmica por *flutter* em estruturas esbeltas. Implementa-se o algoritmo num modelo com 2 graus de liberdade. Utilizando o respetivo programa, constroem-se ábacos que permitem avaliar a suscetibilidade à instabilidade por *flutter* de estruturas prismáticas com secções retangulares. Os resultados obtidos com o presente modelo de 2 graus de liberdade são comparados com os existentes na literatura obtidos em modelos com 2 ou 3 graus de liberdade. Uma das conclusões deste estudo é a consistência de resultados entre os modelos bi e tridimensionais existentes na literatura e o presente modelo simplificado de 2 graus de liberdade que permite validar os resultados numéricos obtidos para utilização no pré-dimensionamento de estruturas prismáticas esbeltas com secções retangulares.

Tanto quanto é do conhecimento dos autores, este estudo é o primeiro estudo numérico sistemático sobre a ocorrência de instabilidade por *flutter* em estruturas esbeltas com secções retangulares sob a ação do vento. Determina-se a dependência da velocidade crítica do vento com (i) a esbelteza, (ii) o amortecimento estrutural, (iii) a razão entre as frequências naturais relevantes, (iv) o momento polar de inércia da secção transversal e (v) a massa da estrutura por unidade de comprimento. Este artigo oferece um conjunto de ábacos e tabelas que permitem determinar a velocidade crítica do vento que conduz à instabilidade por *flutter* e que são úteis para o pré-dimensionamento deste tipo de estruturas.

Este artigo está organizado do seguinte modo: na Secção 2 apresenta-se a formulação adimensional de um modelo aeroelástico 2D identificando-se um conjunto de parâmetros adimensionais que controlam a ocorrência da instabilidade por *flutter* e comparam-se as velocidades críticas obtidas com o algoritmo implementado com as existentes na literatura obtidas para o aerofólio de Theodorsen [25] e para pontes reais ou projetadas. Na Secção 3 apresentam-se os resultados de um grande número de simulações numéricas realizadas com valores dos parâmetros adimensionais na gama de valores correspondentes a pontes reais ou projetadas. Na Secção 4 trata-se da adequação dos modelos 2D para análise de *flutter* em estruturas reais e sobre a influência dos vários parâmetros adimensionais relevantes no valor das velocidades críticas.

2. Modelos aeroelásticos 2D de prismas 3D

2.1. Formulação

Numa análise bidimensional (fig. 1) consideram-se 2 graus de liberdade parametrizados pelo deslocamento vertical h e pela rotação α . Neste caso particular a equação que rege o movimento do modelo pode ser escrita na forma

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I_g \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{h} \\ \ddot{\alpha} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_h & 0 \\ 0 & c_\alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{h} \\ \dot{\alpha} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_h & 0 \\ 0 & k_\alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h \\ \alpha \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} L_h \\ M_\alpha \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

em que m e I_g são, respetivamente, a massa e o momento polar de inércia por unidade de comprimento, k_h e k_α são, respetivamente, os coeficientes de rigidez linear e angular por unidade de comprimento, c_h e c_α são, respetivamente, os coeficientes de amortecimento linear e angular por unidade de comprimento e $(\dot{\quad})$, $(\ddot{\quad})$ designam, respetivamente, as primeira e segunda derivadas

Download English Version:

<https://daneshyari.com/en/article/1702483>

Download Persian Version:

<https://daneshyari.com/article/1702483>

[Daneshyari.com](https://daneshyari.com)