

# Ação do vento

Em estruturas esbeltas com efeito geométrico

tese de **Alexandre de Macêdo Wahrhaftig**

2ª edição

Patrocínio:



Ação do vento em estruturas esbeltas com efeito geométrico  
© 2013 Alexandre de Macêdo Wahrhaftig  
1ª edição – 2013  
2ª edição – 2017  
Editora Edgard Blücher Ltda.

Segundo o Novo Acordo Ortográfico, conforme 5. ed.  
do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*,  
Academia Brasileira de Letras, março de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial por  
qualquer meios sem autorização escrita da editora

Todos os direitos reservados pela Editora Edgard  
Blücher Ltda.

# Blucher

---

Rua Pedrosa Alvarenga, 1245, 4º andar  
04531-934 – São Paulo, SP – Brasil  
Tel.: 55 11 3078-5366  
editora@blucher.com.br  
www.blucher.com.br

---

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Angélica Ilacqua CRB-8/7057

---

Wahrhaftig, Alexandre de Macêdo

Ação do vento em estruturas esbeltas com efeito geométrico/  
[livro eletrônico] / Alexandre de Macêdo Wahrhaftig – 2. ed. São  
Paulo : Blucher, 2017.

#### Bibliografia

ISBN 978-85-8039-158-9 (e-book)

1. Ação do vento nas estruturas 2. Análise experimental de  
estruturas 3. Análise numérica 4. Dinâmica das estruturas  
I. Título.

---

16-0346

CDD – 624.17

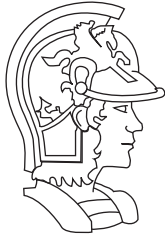
---

Índice para catálogo sistemático:

1. Ação do vento em estruturas esbeltas com efeito geométrico:  
Engenharia de estruturas

**Blucher**





Escola Politécnica –  
Universidade de São  
Paulo

2008

Tese  
de doutorado

TÍTULO ORIGINAL DA PESQUISA

# **Uma avaliação experimental e numérica do efeito da rigidez geométrica na resposta dinâmica de estruturas esbeltas sujeitas à excitação de vento**

Alexandre de Macêdo Wahrhaftig

ORIENTAÇÃO

Prof. Reyolando Manoel Lopes Rebello da  
Fonseca Brasil

BANCA EXAMINADORA

Prof. Reyolando Manoel Lopes Rebello da  
Fonseca Brasil

Professor titular da Universidade Federal do ABC

Prof. Miguel Angel Buelta Martinez

Professor titular da Universidade de São Paulo

Prof. Marcelo Araujo da Silva

Professor da Universidade de São Paulo

Prof. Roberto Katumi Nakaguma

Pesquisador IV do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do  
Estado de São Paulo

Prof. Acir Mercio Loredo Souza

Professor associado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul



## **Alexandre de Macêdo**

**Wahrhaftig** possui graduação

em Engenharia Civil pela Universidade Católica do Salvador (1991), mestrado em Rehabilitación del Patrimonio Edificado - Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (1995) e doutorado em Engenharia de Estruturas pela Universidade de São Paulo - USP (2008).

Tem experiência na área de Engenharia Civil, atuando principalmente nos seguintes temas: ensino, análise dinâmica e experimental de estruturas, estruturas de madeira e restauração.





# Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
<b>2. TEMA E RELEVÂNCIA</b>	<b>27</b>
<b>3. RIGIDEZ GEOMÉTRICA E ASPECTOS DA ESTABILIDADE ESTRUTURAL</b>	<b>37</b>
<b>4. PROPOSTA PARA O CÁLCULO DA FREQUÊNCIA NATURAL DE VIBRAÇÃO SOB NÃO-LINEARIDADE GEOMÉTRICA</b>	<b>63</b>
<b>5. INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL EM MODELOS</b>	<b>77</b>
5.1 Instrumentos e sistemas empregados	78
5.2 Características dos sensores	79
5.3 O sistema de aquisição de dados	79
5.4 Esquema estrutural	80
5.5 Corpos-de-prova	80
5.6 Descrição dos ensaios	81
5.7 Análise dos resultados	85
5.7.1 Análise dos ensaios para o esforço de compressão	90
5.7.2 Análise dos ensaios para o esforço de tração	131
5.7.3 Análise dos ensaios para a ausência do esforço axial	137

5.7.4	Análise dos ensaios exclusivamente com o peso próprio	143
5.8	Resumo	160
<b>6.</b>	<b>AÇÃO DO VENTO SEGUNDO A NBR 6123/88</b>	<b>163</b>
6.1	Forças estáticas devidas ao vento	165
6.2	Resposta dinâmica pelo modelo contínuo simplificado	174
6.3	Modelo discreto	176
<b>7.</b>	<b>INVESTIGAÇÃO EM ESTRUTURAS REAIS</b>	<b>185</b>
7.1	Estrutura 1 – Poste metálico de 48 m	188
7.1.1	Dados e geometria	188
7.1.2	Modelagem por Elementos Finitos	192
7.1.3	Aplicação do método proposto	193
7.1.3.1	Definição dos parâmetros	193
7.1.3.2	Cálculo da massa generalizada	195
7.1.3.3	Cálculo da rigidez generalizada	195
7.1.4	Cálculo da frequência	198
7.1.5	Ação do vento	198
7.1.5.1	Forças estáticas devidas ao vento	198
7.1.5.2	Resposta dinâmica pelo modelo simplificado da NBR 6123/88	198
7.1.5.3	Resposta dinâmica pelo modelo discreto da NBR 6123/88	199
7.1.6	Análise dos resultados	200
7.2	Estrutura 2 – Poste metálico de 60,80 m	213
7.2.1	Dados e geometria	213
7.2.2	Modelagem por Elementos Finitos	217

7.2.3	Aplicação do método proposto	218
7.2.3.1	Definição dos dados parâmetros	218
7.2.3.2	Cálculo da massa generalizada	219
7.2.3.3	Cálculo da rigidez generalizada	220
7.2.3.4	Cálculo da frequência	221
7.2.4	Ação do vento	222
7.2.4.1	Forças estáticas devidas ao vento	222
7.2.4.2	Resposta dinâmica pelo modelo simplificado da NBR 6123/88	222
7.2.4.3	Resposta dinâmica pelo modelo discreto da NBR 6123/88	223
7.2.5	Análise dos resultados	223
7.3	Estrutura 3 – Poste de concreto armado de 40 m	236
7.3.1	Dados e geometria	236
7.3.2	Modelagem por Elementos Finitos	244
7.3.3	Aplicação do método proposto	245
7.3.3.1	Definição dos parâmetros	245
7.3.3.2	Cálculo da massa generalizada	246
7.3.3.3	Cálculo da rigidez generalizada	246
7.3.4	Cálculo da frequência	247
7.3.5	Ação do vento	247
7.3.5.1	Forças estáticas devidas ao vento	247
7.3.5.2	Resposta dinâmica pelo modelo simplificado da NBR 6123/88	248
7.3.5.3	Resposta dinâmica pelo modelo discreto da NBR 6123/88	248
7.3.6	Análise dos resultados	248
7.4	Estrutura 4 – poste de concreto armado de 46 m	264
7.4.1	Dados e geometria	264
7.4.2	Modelagem por Elementos Finitos	268

7.4.3	Aplicação do método proposto	271
7.4.3.1	Definição dos parâmetros	273
7.4.3.2	Cálculo da massa generalizada	274
7.4.3.3	Cálculo da rigidez generalizada	274
7.4.3.4	Rigidez geométrica generalizada	274
7.4.3.5	Rigidez elástica generalizada	275
7.4.3.6	Rigidez das molas generalizada	276
7.4.3.7	Cálculo da frequência	277
7.4.4	Ação do vento	277
7.4.4.1	Forças estáticas devidas ao vento	277
7.4.4.2	Resposta dinâmica pelo modelo simplificado da NBR 6123/88	277
7.4.4.3	Resposta dinâmica pelo modelo discreto da NBR 6123/88	278
7.4.5	Análise dos resultados	278
7.5	Estrutura 5 – Poste metálico de 30 m	302
7.5.1	Dados e geometria	302
7.5.2	Investigação experimental da frequência natural de vibração da estrutura	310
7.5.3	Modelagem por Elementos Finitos	313
7.5.4	Aplicação do método proposto	314
7.5.4.1	Definição dos parâmetros	314
7.5.4.2	Cálculo da massa generalizada	316
7.5.4.3	Cálculo da rigidez generalizada	317
7.5.5	Cálculo da frequência	318
7.5.6	Ação do vento	318
7.5.6.1	Forças estáticas devidas ao vento	318
7.5.6.2	Resposta dinâmica pelo modelo simplificado da NBR 6123/88	319

7.5.6.3 Resposta dinâmica pelo modelo discreto da NBR 6123/88	319
7.5.7 Análise dos resultados	320
7.6 Resumo	331
<b>CONCLUSÕES</b>	<b>337</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>343</b>
<b>ANEXO A</b>	<b>351</b>



*O que mais me preocupa não é o grito dos violentos, nem dos corruptos, nem dos desonestos, nem dos sem caráter, nem dos sem ética, o que mais preocupa é o silêncio dos bons.*

Martin Luther King





# Agradecimentos

Ao professor Reyolando Manoel Lopes Rebello da Fonseca Brasil pela competente e cuidadosa orientação, tornando-se personalidade admirada e exemplo de caráter a ser seguido.



# Resumo

Por uma escolha política e economicamente pragmática, o Brasil optou por desenvolver a telefonia celular, com intenção de abreviar uma etapa de desenvolvimento. Tomada a decisão, a implantação foi feita num ritmo explosivo a partir da década de 1990, com instalação de dezenas de milhares de estações. Apesar da disparidade de custo entre os sistemas eletrônicos e as obras civis, pouco se investiu na engenharia estrutural envolvida, resultando em projetos e construções realizados com metodologia duvidosa e na herança de uma grande quantidade de problemas estruturais. Represada por considerações de ordem ambiental e estética, a instalação indiscriminada de torres, vive-se uma nova demanda para a engenharia estrutural na análise do aproveitamento dos locais existentes para suporte de novas cargas. Nesse sentido, o que se observa, via de regra, são estruturas compostas apenas de um poste em balanço de análise enganosamente simples. O que se esquece, quase sempre, é a extraordinária esbelteza desses elementos, que ao engenheiro deveria sugerir a imediata necessidade de considerar a não-linearidade geométrica forçosamente existente. Além disso, o carregamento mais importante e dominante

é o do vento, de características eminentemente dinâmicas e aleatórias, desaconselhando análises estáticas ou dinâmicas determinísticas, preconizadas em Normas. Assim que, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência da rigidez geométrica na resposta dinâmica de estruturas esbeltas sujeitas à excitação de vento. Para tanto, foi desenvolvido um modelo matemático simplificado, com características dinâmicas estabelecidas por uma técnica tipo Rayleigh, que evidencia a presença significativa da não-linearidade geométrica devida à esbelteza das peças. Para a validação dos resultados teóricos foi realizado um conjunto de ensaios dinâmicos em laboratório com modelos de barras e monitorada uma estrutura real em campo. A formulação proposta também foi aferida por métodos analíticos e numéricos como a solução de Euler para a carga crítica de flambagem e o Método dos Elementos Finitos. Os resultados obtidos validaram a proposta para o cálculo da frequência fundamental de vibração de estruturas em balanço. A influência da rigidez geométrica na resposta das estruturas sob ação de vento foi também avaliada por meio de cálculos comparativos utilizando os modelos preconizados pela norma brasileira. Verificou-se que, dependendo das cargas existentes, a consideração da rigidez geométrica pode ter significativo efeito redutor na capacidade de os postes de telecomunicações possuírem área de exposição ao vento para a instalação de antenas.

Palavras-chave: Dinâmica das estruturas. Análise experimental de estruturas. Análise numérica. Rigidez geométrica. Ação do vento nas estruturas. Método de Rayleigh.

# Abstract

Due to a politically and economically pragmatic decision, Brazil has chosen to intensely develop its cellular phone system, in order to bypass a stage of development. Once the decision has been taken, implementation was set in an explosive pace in the 1990's decade by installing tens of thousands of stations. As the electronic systems are usually more expensive than the civil constructions, very little has been invested on the involved structural engineering, resulting in designs and constructions done with doubtful methodologies and in the heritage of great amounts of structural problems. Impounded by esthetical and environmental considerations, the indiscriminate installation of towers occurs. Thus, there is a new demand for the structural engineering in the analysis of the utilization of existing installation sites for bearing new loads. In this manner, what it can usually be observed are structures composed of just one cantilever pole of misleading simple analysis. What it is quite often ignored is the extraordinary slenderness of these elements, which should suggest to the designer the immediately necessity to consider the intrinsic existing geometric nonlinearity. Moreover, the wind is the most important

and dominant load, of dynamic and random nature, misadvising either static or deterministic dynamic analysis, usually recommended by Codes and Standards. In doing so, the objective of this thesis is to evaluate the influence of the geometric stiffness on the dynamic response of slender structures subjected to wind excitation. As a first step, a simplified analytical model was developed, with dynamic characteristics established by a Rayleigh type technique, which enhances the intrinsic existing geometric nonlinearity due to the slenderness of the elements. As a second step, for validating the theoretically obtained results, a series of dynamic tests was carried out in laboratory, using models of cantilever bars, and a real structure was monitored in the field. The proposed analytical model was also checked by other analytical and numerical methods, such as the Euler's solution for the critical buckling load and the Finite Element Method. The influence of the geometric stiffness in the structure response to wind loads was also evaluated by comparative calculations among the different models recommended by the Brazilian Wind Code. It was verified that, depending on the existing loads, the consideration of geometric stiffness can have significant reductive effect on the capacity of the telecommunication poles have exposition area to wind for installation of antennas.

Keywords: Structural dynamics. Experimental analysis of structures. Numerical analysis. Geometric stiffness. Wind action on the structures. Rayleigh's Method.