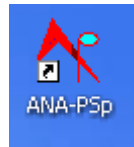


ERI SATO KREIS

ANA-PSp
**UM SISTEMA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE AEROELÁSTICA
DE PONTES SUSPENSAS POR MODELOS MATEMÁTICOS
REDUZIDOS**

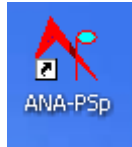


**Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Doutor em Engenharia**

**São Paulo
2008**

ERI SATO KREIS

ANA-PSp
**UM SISTEMA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE AEROELÁSTICA
DE PONTES SUSPENSAS POR MODELOS MATEMÁTICOS
REDUZIDOS**



**Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Doutor em Engenharia**

**Área de Concentração:
Engenharia de Estruturas**

**Orientador:
Prof. Dr. João Cyro André**

**São Paulo
2008**

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 08 de janeiro de 2008.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Kreis, Eri Sato

**ANA-PSp : um sistema computacional para análise aeroelástica de pontes suspensas por modelos matemáticos reduzidos / E.S. Kreis. -- ed.rev. -- São Paulo, 2008.
p 280.**

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

1. Pontes estaiadas 2. Pontes pênses 3. Drapejamento 4. Aerodinâmica 5. Desenvolvimento de software (Sistema computacional) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica II. t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho
ao meu esposo, Ricardo
e a minha filha, Nina

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor que me guiou e me proporcionou vivenciar esta fabulosa experiência.

Ao professor João Cyro André, pela orientação, amizade e apoio verdadeiros e pelo estímulo constante durante todo desenvolvimento do trabalho.

Ao Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica da EPUSP e ao CNPq pelo apoio e pelo suporte financeiro.

A todos os companheiros do LMC e aos amigos que me apoiaram e ajudaram nesta empreitada.

RESUMO

As características arquitetônicas e o desempenho estrutural de pontes suspensas, estaiadas ou pênséis, têm determinado a sua crescente utilização em obras de arte destinadas a vencer grandes vãos. Essa utilização crescente que ocorreu no mundo nas últimas décadas se repete agora nos últimos anos no país. Várias dessas obras estão em execução e em projeto. Um dos aspectos relevantes na análise estrutural das pontes suspensas é o de seu comportamento quando submetidas à ação do vento. Apresenta-se o sistema computacional ANA-PSp desenvolvido especialmente para o estudo do movimento de tabuleiros de pontes suspensas sujeitas a esforços aeroelásticos e aerodinâmicos. Esse sistema computacional formado por um conjunto de subsistemas, é elaborado para a análise aeroelástica de pontes suspensas sob a ação de vento e permite análises paramétricas extensas dos fenômenos de drapejamento (*flutter*) e de martelamento (*buffeting*). A discretização da estrutura é efetuada pelo método dos elementos finitos e a redução dos graus de liberdade é realizada por superposição modal com modos selecionados que melhor descrevem os movimentos do tabuleiro. Utiliza-se modelo matemático reduzido para a análise multimodal no domínio do tempo e da frequência. A velocidade crítica ou velocidade de drapejamento é determinada por procedimento de autovalores complexos com a obtenção de frequências e taxas de amortecimentos modais para várias velocidades do vento. Adicionalmente, o fenômeno do drapejamento é estudado por séries temporais de respostas de coordenadas generalizadas e de deslocamentos selecionados e por análise espectral dessas séries temporais, que permitem a verificação das características de vibração do tabuleiro da ponte no domínio da frequência. O estudo do fenômeno de martelamento considera esforços aeroelásticos determinísticos e esforços aerodinâmicos estocásticos e apresentam-se resultados em espectros de potência de deslocamentos e em desvios padrão de deslocamentos ao longo do tabuleiro. Para validar o sistema ANA-PSp, apresentam-se estudos de caso para a ponte estaiada da Normandia, para a ponte pênsil colapsada de Tacoma Narrows e para a ponte estaiada projetada, mas não executada, sobre o Rio Tietê e localizada na extremidade do complexo viário Jacu-Pêssego.

Palavras-chave: Sistema computacional, drapejamento, martelamento, ponte suspensa, ponte estaiada, ponte pênsil, modelos matemáticos reduzidos, superposição modal, teoria das estruturas, dinâmica e estabilidade das estruturas, estabilidade aeroelástica.

ABSTRACT

The architectonic characteristics and the structural performance of suspension bridges and cable-stayed bridges have determined their growing use on large span bridges. This growing usage, which has occurred world-wide during the last decades, is now being repeated in Brazil during the last few years. Several such bridges are presently either undergoing construction or being designed. One of the outstanding aspects in the structural analysis of suspension bridges is their behavior under wind action. This paper presents the computer system ANA-PSp, specially developed for studying the movement of suspended bridge decks under aeroelastic and aerodynamic forces. This computer system is formed by a group of subsystems and is created for aeroelastic analysis of suspended bridges under wind action. It allows extended parametric analyses of the flutter and the buffeting phenomena. Structural discretization is done by the finite element method and the reduction of degrees of freedom is obtained by modal superposition of the selected modes which best describe the deck movements. A reduced mathematical model is used for the multimodal analysis in the time and frequency domains. Critical velocity or flutter velocity is determined by a procedure of complex eigenvalues which obtains frequencies and damping ratios for different wind speeds. Additionally, the flutter phenomenon is studied by temporal series of answers to generalized coordinate responses and of selected displacements by spectral analysis of such temporal series, which allow us to verify the characteristics of the vibrations of the bridge deck in the frequency domain. The study of the buffeting phenomenon considers deterministic aeroelastic and stochastic aerodynamic forces. The paper presents results in displacement power spectra and in the standard deviation of displacements along the deck. In order to validate system ANA-PSp, case studies are presented for the cable-stayed Ponte de Normandie in Le Havre (France), for the collapsed suspension bridge on Tacoma Narrows and for the cable-stayed bridge, already designed but not built, on Tietê River, located at one end of the highway complex Jacu-Pêssego (São Paulo, SP, Brazil).

Keywords: Computational system, flutter, buffeting, suspended-span bridge, cable-stayed bridge, suspension bridge, reduced mathematical model, modal superposition, theory of structures, dynamic and stability of structures, aeroelastic stability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1 INTRODUÇÃO

Figura 1.1 – Ponte Pênsil com cabos ancorados nas duas extremidades, Mathivat (1994, p. 4).	26
Figura 1.2 - Ponte Verrazano Narrows	27
Figura 1.3 - Ponte Humber.	28
Figura 1.4 - Ponte Great Belt East.	28
Figura 1.5 - Ponte Akashi-Kaikyo.	29
Figura 1.6 - Ponte Estaiada, Mathivat (1994, p.5).	30
Figura 1.7 - Ponte da Normandia.	30
Figura 1.8 - Ponte de Tatara.	31
Figura 1.9 - Ponte Estação Santo Amaro.	32
Figura 1.10 - Ponte sobre o Rio Guamá.	33
Figura 1.11 - Ponte de Tacoma Narrows.	34
Figura 1.12 - Desprendimento de vórtice, Dyrbye e Hansen (1997, p.110).	37
Figura 1.13 – Frequência de desprendimento de vórtices e o a frequência natural da estrutura, Simiu e Scanlan (1996).	37
Figura 1.14 - Velocidades de vento, ângulo de rotação e rigidez de torção para uma seção genérica de uma ponte, Simiu e Scanlan (1996).	39
Figura 1.15 – Seção transversal de uma estrutura prismática (Dyrbye e Hansen (1997)).	39
Figura 1.16 – Foto do ensaio em túnel de vento, Simiu e Scanlan (1996, pág. 450).	40
Figura 1.17 - Trabalho da força de vento induzindo drapejamento em modo de torção e flexão.	41
Figura 1.18 – Coeficientes fictícios de arrasto C_L e de momento C_M em (1) e (2), respectivamente, para ângulos de ataque α	42
Figura 1.19 – Velocidades de vento medidas em tres diferentes alturas, Sigbjornsson (1974) apub Dyrbye e Hansen (1997).	45
Figura 1.20 - Estruturas de controle.	52
Figura 1.21 - Exemplo de um fluxograma composto por várias estruturas de controle.	53
Figura 1.22 – Pacote.	57
Figura 1.23 – Atributos e métodos	58

Figura 1.24 - Dependência entre sistemas.	58
Figura 1.25 - Relações funcionais	59
Figura 1.26 - Diagrama de atividades.	59
Figura 1.27 - Procedimento de desenvolvimento do software.	62

2 FORMULAÇÃO GERAL DOS PROBLEMAS AEROELÁSTICOS ACOPLADOS DE DRAPEJAMENTO E DE MARTELAMENTO EM PONTES SUSPENSAS

Figura 2.1 – Sistema de coordenadas adotadas para o desenvolvimento teórico (modelo matemático discreto da ponte da Normandia, Nicoló,2002).	68
Figura 2.2 – Seção transversal do tabuleiro com os esforços aerodinâmicos e deslocamentos correspondentes.	68
Figura 2.3 – Vento U na seção transversal do tabuleiro.	70
Figura 2.4 – Função de circulação de Theodorsen $C(k) = F(k) + iG(k)$	73
Figura 2.5 - Coeficientes de drapejamento por Walther (1994) apud Dyrbye e Hansen (1997).	75
Figura 2.6 – Coeficientes de drapejamentos de torção e vertical (A_i^* e H_i^* com $i = 1,3$) para seção rombuda, Scanlan e Tomko (1971).	76
Figura 2.7 – Coeficientes de drapejamentos de torção e vertical (A_i^* e H_i^* com $i = 1,3$) para seções aerodinâmicas, Scanlan e Tomko (1971).	77
Figura 2.8 – Coeficientes de drapejamentos de torção e vertical (A_i^* e H_i^* com $i = 1,4$), Sarkar (1992) apud Simiu e Scanlan (1996).	78
Figura 2.9 – Coeficientes de drapejamentos verticais (H_i^* , $i = 1,6$), Chowdhury e Sarkar (2003).	80
Figura 2.10 – Coeficientes de drapejamentos de torção (A_i^* , $i = 1,6$), Chowdhury e Sarkar (2003).	81
Figura 2.11 – Coeficientes de drapejamentos laterais (H_i^* , $i = 1,6$), Chowdhury e Sarkar (2003).	82
Figura 2.12 – Geometria das seções de pontes no presente estudo (a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, Jeong e Kwon (2003).	83
Figura 2.13 – Coeficientes de drapejamento de seção S1, Jeong e Kwon (2003), onde símbolo cheio é experimental, símbolo sem preenchimento é CFD.	83
Figura 2.14 – Coeficientes de drapejamento de seção S2, Jeong e Kwon (2003), onde símbolo cheio é experimental, símbolo sem preenchimento é CFD.	83
Figura 2.15 – Coeficientes de drapejamento de seção S3, Jeong e Kwon (2003), onde símbolo cheio é experimental, símbolo sem preenchimento é CFD.	84
Figura 2.16 – Coeficientes de drapejamento de seção S4, Jeong e Kwon (2003),	85

Figura 2.17 – Coeficientes de arrasto, sustentação e momento, para seções transversais de pontes: (1) ponte Severn Bridge, (2) ponte Saint-Nazaire e (3) ponte Normandy Bridge, Virlogeux (1992).	86
Figura 2.18 – Deslocamentos do nó de uma barra.	87
Figura 2.19 – Nó R e o comprimento ℓ_R associado.	88

3 ORGANIZAÇÃO DO SISTEMA ANA-PSp

Figura 3.1 – Fluxograma geral dos requisitos do sistema ANA-PSp.	93
Figura 3.2 - Casos de uso no processo de análise.	95
Figura 3.3 - Casos de uso para análise de resultados.	96
Figura 3.4 – Pré-processamento do sistema ANA-PSp.	97
Figura 3.5 – Dependência entre subsistemas para determinação de parâmetros modais.	98
Figura 3.6 – Dependência entre subsistemas para análise aeroelástica propriamente dita.	99
Figura 3.7 – Procedimentos de análise pelo GERENCIADOR.	100
Figura 3.8 – Tela principal do gerenciador do sistema*	102
Figura 3.9 – Tela do gerenciador do sistema para projeto existente.	103
Figura 3.10 – Tela do gerenciador do sistema para pré-análise.	103
Figura 3.11 – Tela do gerenciador do sistema para análise aerodinâmica.	104
Figura 3.12 – Tela do gerenciador do sistema para eliminar projeto.	105
Figura 3.13 – Diagrama de interação dos subsistemas para um caso de uso.	106
Figura 3.14 – Classes do GERENCIADOR com seus principais atributos, 1ª parte.	108
Figura 3.15 – Classes do GERENCIADOR com seus principais atributos, 2ª parte.	109
Figura 3.16 – Classes com seus principais métodos, 1ª parte.	110
Figura 3.17 – Classes com seus principais métodos, 2ª parte.	111
Figura 3.18 – Fluxograma geral no subsistema CoDCOM.	112
Figura 3.19 – Dados de utilização no sistema CoDCOM.	113
Figura 3.20 – Diagrama de atividade do CoDCOM.	113
Figura 3.21 – Fluxograma geral do subsistema PARMAS.	114
Figura 3.22 – Dados de utilização no subsistema PARMAS.	115
Figura 3.23 – Fluxograma com formulação do subsistema PARMAS.	115
Figura 3.24 – Diagrama de procedimento para uma direção de um modo.	116
Figura 3.25 – Montagem de uma linha da matriz de massa global M.	117
Figura 3.26 – Menu principal do subsistema EDIÇÃO (Pré Análise)*	118
Figura 3.27 – Pasta do processamento ADINA.	118
Figura 3.28 – Integração com os dados do pré-processamento ADINA.	119
Figura 3.29 – Dados gerais do sistema ANA-PSp.	120
Figura 3.30 – Dados dos coeficientes de drapejamento.	120

Figura 3.31 – Dados dos coeficientes de martelamento.	121
Figura 3.32 – Tela principal do subsistema VISUALIZAÇÃO.	124
Figura 3.33 – Visualização do coeficiente de drapejamento.	125
Figura 3.34 – Menu de digitalização.	125
Figura 3.35 – Visualização da tabela dos parâmetros modais.	126

4 DRAPEJAMENTO – ANÁLISE MULTIMODAL

Figura 4.1 – Diagrama geral do subsistema DreaMT3.	137
Figura 4.2 – Dados de utilização do subsistema DreaMT3.	137
Figura 4.3 – Determinação de frequência modal e taxa de amortecimento modal em função de velocidades de vento para uma combinação de modos denominados aqui como “multimodo”.	138
Figura 4.4 – Iteração para obtenção das soluções pelo procedimento de valores próprios complexos	139
Figura 4.5 – Dados de utilização no subsistema DoFETE.	146
Figura 4.6 – Diagrama geral do subsistema DoFETE no domínio do tempo e no domínio da frequência.	147
Figura 4.7 – Edição de dados do subsistema DreaMT3.	148
Figura 4.8 – Edição de dados do subsistema DoFETE.	148
Figura 4.9 – Visualização de variação da taxa de amortecimento com velocidade.	149
Figura 4.10 – Visualização de variação da frequência com velocidade.	149
Figura 4.11 – Tabela de velocidades críticas por multimodal analisados*	150
Figura 4.12 – Série temporal da coordenada generalizada correspondente ao modo 3.	150
Figura 4.13 – Série temporal do deslocamento vertical correspondente ao nó extremo.	151
Figura 4.14 – Espectro de potência do deslocamento vertical correspondente ao nó extremo.	151

5 MARTELAMENTO – ANÁLISE MULTIMODAL PELO MÉTODO ESPECTRAL

Figura 5.1 - Diagrama de atividade do subsistema ESPEM.	158
Figura 5.2 – Dados de utilização do subsistema ESPEM.	159
Figura 5.3 – Diagrama geral do subsistema ESPEM.	161
Figura 5.4 – Dados do subsistema.	162
Figura 5.5 – Espectro de potência de deslocamentos verticais.	163
Figura 5.6 – Desvio padrão de deslocamentos angulares.	163
Figura 5.7 – Desvio padrão de deslocamentos verticais.	164
Figura 5.8 – Espectro de potência de deslocamentos verticais multiplicado pelo fator $\left(\frac{\eta}{U^2}\right)$	164

6 SIMULAÇÃO DE ESTUDO DE CASO

Figura 6.1 - Vista Lateral da Ponte da Normandia [Virlogeux et al., 1994]	165
Figura 6.2 - Seções transversais típicas: em concreto nos vãos de acesso (em cima) e parte em aço do vão principal (embaixo) com todas as dimensões em m [Virlogeux et al., 1994]	166
Figura 6.3 – Modelo da estrutura de ponte estaiada	168
Figura 6.4 – Gráfico criado para verificação	169
Figura 6.5 – Iniciando um novo projeto	170
Figura 6.6 – Pasta de processamento do <ADINA>	171
Figura 6.7 – Arquivos de integração usados no exemplo	172
Figura 6.8 – Arquivos de integração usados no exemplo	174
Figura 6.9 – Coeficientes de drapejamento	175
Figura 6.10 – Coeficientes de Martelamento	175
Figura 6.11 – Escolha da direção	176
Figura 6.12 – Escolha do modo	176
Figura 6.13 – Tabela de parâmetros modais	177
Figura 6.14 – Dados para análise de drapejamento	178
Figura 6.15 – Dados para análise de drapejamento no tempo e na frequência	180
Figura 6.16 – Executando DreaMT3 e DoFETE	182
Figura 6.17 – Intervalos de velocidades críticas para diversos multimodos.	182
Figura 6.18 – Variação da taxa de amortecimento modal com a velocidade de vento	183
Figura 6.19 – Variação da frequência modal com a velocidade de vento	183
Figura 6.20 – Resposta de coordenada generalizada no domínio do tempo para o modo de torção, Modo14, nas velocidades de 58 m/s e de 62 m/s.	184
Figura 6.21 – Espectro de potência da coordenada generalizada no domínio da frequência para o modo predominantemente vertical, Modo2, na velocidade de 42 e de 62 m/s.	184
Figura 6.22 – Dados para análise de martelamento	185
Figura 6.23 – Processamento da análise aeroelástica de martelamento	187
Figura 6.24 – Seleciona velocidades para finalidade de visualização	188
Figura 6.25 – Desvio padrão e espectro de potência na direção vertical	188

7 ESTUDO DE CASO1: PONTE ESTAIADA DA NORMANDIA

Figura 7.1 - Intervalos de velocidades críticas para multimodos do conjunto I	192
Figura 7.2a – Variação da taxa de amortecimento modal com a velocidade de vento para o multimodo M2M5M12M14M16M18	193
Figura 7.2b – Variação da frequência modal com a velocidade de vento para o	

multimodo M2M5M12M14M16M18.	193
Figura 7.3 – Respostas no tempo de deslocamento vertical e angular no centro do vão para velocidades de 40.0, 52.0, 56.5 e 59.0 m/s para o multimodo M2M5M12M14M16M18.	195
Figura 7.4 – Espectros de deslocamento vertical e angular para velocidade de 40.0, 52, 56.5 e 59.0 m/s para o multimodo M2M5M12M14M16M18.	196
Figura 7.5 – Variação da taxa de amortecimento modal com a velocidade de vento para o multimodo M2M14.	197
Figura 7.6 – Respostas no tempo de deslocamento vertical e angular no centro do vão para vento de 59.0 m/s.	197
Figura 7.7a – Variação da taxa de amortecimento modal com a velocidade do vento para o multimodo M9M14.	198
Figura 7.7b – Variação da frequência modal com a velocidade do vento para o multimodo M9M14.	198
Figura 7.8 – Respostas no tempo de deslocamento vertical e deslocamento angular no centro do vão para velocidades do vento de 61.0, 65.5 e 66.0 m/s para o multimodo M9M14.	199
Figura 7.9 – Espectros de deslocamento vertical e deslocamento angular para velocidades do vento de 61.0, 65.5 e 66.0 m/s para o multimodo M9M14.	200
Figura 7.10 - Intervalos de velocidades críticas para multimodos do conjunto II.	201
Figura 7.11a – Variação da taxa de amortecimento modal e frequência modal com a velocidade do vento para o multimodo M1M2M12M14M16M18	201
Figura 7.11b – Variação da frequência modal com a velocidade do vento para o multimodo M1M2M12M14M16M18	202
Figura 7.12 – Respostas no tempo e espectro para deslocamento vertical e deslocamento angular no centro do vão para velocidades do vento de 50.0 e 59.0 m/s para o multimodo M1M2M12M14M16M18.	203
Figura 7.13 – Variação da taxa de amortecimento modal com a velocidade do vento para multimodo M2M10M14.	204
Figura 7.14 – Respostas no tempo e espectros para velocidade do vento de 30.0 m/s correspondendo a deslocamento vertical e para deslocamento angular no centro do vão para o multimodo M2M10M14.	205
Figura 7.15 – Respostas no tempo e espectros para velocidade do vento de 52.0 m/s correspondendo a deslocamento vertical e para deslocamento angular no centro do vão para o multimodo M2M10M14.	205
Figura 7.16 – Intervalos de velocidades críticas para multimodos do conjunto III.	206
Figura 7.17 – Intervalos de velocidades críticas para multimodos do conjunto IV.	206
Figura 7.18 – Intervalos de velocidades críticas para multimodos do conjunto V.	207

Figura 7.19 – Coeficiente de drapejamento A_1^* dos coeficientes de drapejamento CDra96-S1-123Ny (à esquerda) e A_1^* suavizado encontrado em coeficientes CoDra96p-Ny (à direita).	208
Figura 7.20 – Intervalos de velocidades críticas.	209
Figura 7.21 – Variação da taxa de amortecimento com a velocidade do vento para o multimodo M2M12M14M16M18	210
Figura 7.22 – Resposta no tempo do deslocamento vertical no centro do vão para velocidade de 58.0 m/s para o multimodo M2M14.	210
Figura 7.23 – Intervalos de velocidades críticas.	211
Figura 7.24 – Variação da taxa de amortecimento com a velocidade do vento para o multimodo M2M10M14.	211
Figura 7.25 – Resposta no tempo do deslocamento vertical no centro do vão para velocidade de 58.0 m/s para o multimodo M2M12M14M16M18.	212
Figura 7.26 – Desvio padrão do deslocamento vertical ao longo do tabuleiro.	215
Figura 7.27 – Desvio padrão de deslocamento angular ao longo do tabuleiro.	215
Figura 7.28 – Espectro de potência do deslocamento vertical.	216
Figura 7.29 – Espectro de potência do deslocamento angular.	216
Figura 7.30 – Desvio padrão do deslocamento vertical ao longo do tabuleiro.	217
Figura 7.31 – Desvio padrão de deslocamento angular ao longo do tabuleiro.	217
Figura 7.32 – Espectro de potência do deslocamento vertical.	218
Figura 7.33 – Espectro de potência do deslocamento angular.	218
Figura 7.34 – Desvio padrão do deslocamento vertical ao longo do tabuleiro.	219
Figura 7.35 – Desvio padrão de deslocamento angular ao longo do tabuleiro.	219
Figura 7.36 – Espectro de potência do deslocamento vertical.	220
Figura 7.37 – Espectro de potência do deslocamento angular.	220

8 ESTUDO DE CASO2: PONTE PÊNSIL DE TACOMA NARROWS

Figura 8.1 – Modelo de Elementos Finitos	222
Figura 8.2 – Integração do sistema ANA-PSP com ADINA, através dos arquivos de dados do modelo estrutural, lista de nós e vetores modais.	222

Figura 8.3 – Intervalo de velocidades críticas para o modo M7.	225
Figura 8.4 – Intervalos de velocidades críticas para multimodos do conjunto I.	226
Figura 8.5 – Variação da taxa de amortecimento modal com a velocidade de vento para o multimodo M7.	227
Figura 8.6 – Variação da taxa de amortecimento modal com a velocidade de vento para o multimodo M2M5M7M10M13.	227
Figura 8.7 – Resposta no tempo e espectro para velocidade do vento de 5.0, 6.0 e 7.0 m/s correspondendo a deslocamento vertical de coordenada generalizada para o multimodo M7.	228
Figura 8.8 – Resposta no tempo e espectro para velocidade do vento de 5.0, 6.0 e 7.0 m/s correspondendo a deslocamento angular de coordenada generalizada para o multimodo M2M5M7M10M13.	229
Figura 8.9 - Intervalos de velocidades críticas para multimodos do conjunto II.	230
Figura 8.10 – Variação da taxa de amortecimento modal com a velocidade de vento para o multimodo M11.	230
Figura 8.11 - Intervalos de velocidades críticas para o multimodo M7M11M17.	231
Figura 8.12 – Variação da taxa de amortecimento modal com a velocidade de vento para o multimodo M2M5M12M14M16M18.	231
Figura 8.13 – Desvio padrão do deslocamento vertical ao longo do tabuleiro.	232
Figura 8.14 – Desvio padrão do deslocamento angular ao longo do tabuleiro.	233
Figura 8.15 – Espectro de potência do deslocamento vertical.	233
Figura 8.16 – Espectro de potência do deslocamento angular.	234
Figura 8.17 – Desvios padrão de deslocamentos verticais e de deslocamentos angulares ao longo do tabuleiro para os multimodos M7, M2M7, M2M5M7 e M2M5M7M13.	235

9 ESTUDO DE CASO 3: PONTE ESTAIADA SOBRE O RIO TIETÊ

Figura 9.1 – Fase provisória executada sobre cimbramento.	237
Figura 9.2 – Fase provisória correspondente ao giro da superestrutura.	237
Figura 9.3 – Seção transversal típica.	238
Figura 9.4 – Modelo numérico com discretização da super, meso e infraestrutura.	239
Figura 9.5 – Arquivos de integração com ADINA.	239

Figura 9.6 - Intervalos de velocidades críticas para modos simétricos e modos assimétricos. . . .	242
Figura 9.7 – Variação da taxa de amortecimento modal com a velocidade de vento para o multimodo M7.	243
Figura 9.8 – Variação da taxa de amortecimento modal com a velocidade de vento para o multimodo M3M7.	243
Figura 9.9 – Respostas no tempo e espectros da coordenada generalizada de deslocamentos verticais na extremidade esquerda do balanço para velocidades de 180.0, 200.0 e 220.0 m/s para o multimodo M7.	244
Figura 9.10 – Respostas no tempo e espectros da coordenada generalizada de deslocamentos angulares na extremidade esquerda do balanço para velocidades de 180.0, 200.0 e 220.0 m/s para o multimodo M7.	245
Figura 9.11 – Resposta no tempo e espectro de deslocamentos verticais na extremidade esquerda do balanço para velocidade de 100.0 m/s para o multimodo M3M7.	245
Figura 9.12 – Respostas no tempo e espectros de deslocamentos verticais na extremidade esquerda do balanço para velocidades de 150 e 176.0 m/s para o multimodo M3M7.	246
Figura 9.13 – Respostas no tempo e espectros de deslocamentos angulares na extremidade esquerda do balanço para velocidades de 100, 150 e 176.0 m/s para o multimodo M3M7.	246
Figura 9.14 - Intervalos de velocidades críticas para modos simétricos e modos assimétricos. . . .	247
Figura 9.15 – Variação da taxa de amortecimento modal com a velocidade de vento para o multimodo M1M3M4M5M6M7.	248
Figura 9.16 – Variação da frequência modal com a velocidade de vento para o multimodo M1M3M4M5M6M7.	248
Figura 9.17 – Respostas no tempo e espectros de deslocamentos verticais na extremidade esquerda do balanço para velocidades de 100, 150 e 176.0 m/s para o multimodo M1M3M4M5M6M7.	249
Figura 9.18 – Respostas no tempo e espectros de deslocamentos angulares na extremidade esquerda do balanço para velocidades de 100, 150 e 176.0 m/s para o multimodo M1M3M4M5M6M7. . . .	250
Figura 9.19 – Desvio padrão do deslocamento vertical ao longo do tabuleiro.	251
Figura 9.20 – Desvio padrão de deslocamento angular ao longo do tabuleiro.	251
Figura 9.21 – Espectro de potência do deslocamento vertical.	252
Figura 9.22 – Espectro de potência do deslocamento angular.	252

LISTA DE TABELAS

1 INTRODUÇÃO

Tabela 1.1 - Sinal de Forças de sustentação e de variações de deslocamentos em um ciclo, para $\theta = 0^0$..	42
Tabela 1.2 – Sinal de Forças de sustentação e de variações de deslocamentos em um ciclo, para $\theta = 90^0$..	43
Tabela 1.3 - Sinal de momentos M e de variações de rotação em um ciclo, para $\theta = 90^0$. . .	43
Tabela 1.4 - Padrões de Projeto	54
Tabela 1.5 - Tipos de Modelos no Desenvolvimento de Software	63

2 FORMULAÇÃO GERAL DOS PROBLEMAS AEROELÁSTICOS ACOPLADOS DE DRAPEJAMENTO E DE MARTELAMENTO EM PONTES SUSPENSAS

Tabela 2.1 – Graus de liberdade e correspondentes coeficientes obtidos,Chowdhury e Sarkar (2003)	80
---	----

3 ORGANIZAÇÃO DO SISTEMA ANA-PSp

Tabela 3.1 – Subsistemas que compõem o sistema.	98
Tabela 3.2 – Descrição das classes do subsistema GERENCIADOR.	107
Tabela 3.3 – Pacote AcessaProjeto com as classes e suas descrições.	122
Tabela 3.4 – Subsistema EDIÇÃO com as classes e suas descrições.	123
Tabela 3.5 – Subsistema VISUALIZAÇÃO com as classes e suas descrições.	127

4 DRAPEJAMENTO – ANÁLISE MULTIMODAL

5 MARTELAMENTO – ANÁLISE MULTIMODAL PELO MÉTODO ESPECTRAL

6 SIMULAÇÃO DE ESTUDO DE CASO

Tabela 6.1 – Descrição dos elementos 166

Tabela 6.2 – Características geométricas e mecânicas do modelo 167

Tabela 6.3 – Cabos e os respectivos comprimentos, com Cabo E para cabos externos e Cabo I para cabos internos ao vão principal. 167

Tabela 6.4 – Características geométricas e mecânicas dos cabos 167

7 ESTUDO DE CASO1: PONTE ESTAIADA DA NORMANDIA

Tabela 7.1: Tipos dos Modos 189

Tabela 7.2a: Parâmetros e formas modais de alguns modos relevantes. 190

Tabela 7.2b: Parâmetros e formas modais de alguns modos relevantes. 191

Tabela 7.3: Velocidades críticas determinadas com coeficientes de drapejamentos catalogados. 213

8 ESTUDO DE CASO2: PONTE PÊNSIL DE TACOMA NARROWS

Tabela 8.1 – Descrição dos elementos 221

Tabela 8.2 – Elementos que compõem o modelo 221

Tabela 8.3: Tipos dos Modos 223

Tabela 8.4a: Parâmetros e formas modais de alguns modos relevantes 223

Tabela 8.4b: Parâmetros e formas modais de alguns modos relevantes (continuação) 224

9 ESTUDO DE CASO 3: PONTE ESTAIADA SOBRE O RIO TIETÊ

Tabela 9.1: Tipos dos Modos 240

Tabela 9.2a: Parâmetros e formas modais de alguns modos relevantes 240

Tabela 9.2b: Parâmetros e formas modais de alguns modos relevantes 241

LISTA DE PRINCIPAIS SÍMBOLOS

Letras romanas

A_i^*	Coefficientes de drapejamento adimensionais associados ao esforço M_{ae}
B	Largura do tabuleiro
C_0	Matriz de amortecimento
C_A	Matriz de amortecimento aerodinâmico
C_D	Coefficiente de arrasto
C_L	Coefficiente de sustentação
C_M	Coefficiente de momento
C'_D	Derivada do coeficiente de arrasto em relação ao ângulo de ataque α
C'_L	Derivada do coeficiente de sustentação em relação ao ângulo de ataque α
C'_M	Derivada do coeficiente de momento em relação ao ângulo de ataque α
D	Força de arrasto aerodinâmica por unidade de comprimento
D_{ae}	Força de arrasto aeroelástica ou auto-excitante por unidade de comprimento
D_b	Força de arrasto aerodinâmico de martelamento por unidade de comprimento
$F_{s.1}, F_{s.2}$	Forças perpendiculares ao vento U , e de direções opostas
H_i^*	Coefficientes de drapejamento adimensionais associados ao esforço L_{ae}
k_α	Rigidez de torção
K	Frequência reduzida
K_0	Matriz de rigidez
K_A	Matriz de rigidez aerodinâmica
L	Força de sustentação aerodinâmica por unidade de comprimento
L_{ae}	Força de sustentação aeroelástica ou auto-excitante por unidade de comprimento
L_b	Força de sustentação aerodinâmica de martelamento por unidade de comprimento
M	Momento aerodinâmico por unidade de comprimento
M_0	Matriz massa
M_{ae}	Momento aeroelástico ou auto-excitante por unidade de comprimento
M_b	Momento aerodinâmico de martelamento por unidade de comprimento
$Oxyz$	Sistema de coordenadas cartesianas
P	Vetor de forças nodais equivalentes aos esforços aeroelásticos
P_i^*	Coefficientes de drapejamento adimensionais associados ao esforço D_{ae}
Q	Vetor de forças nodais equivalentes às forças de martelamento
F_b	Matriz de componentes de forças de martelamento por unidade de velocidade

S_{YY}	Densidade espectral de potência de coordenadas generalizadas
S_{uv}	Densidade espectral de potência de componentes de vento normalizado
$u(x, y, z, t)$	Deslocamento linear longitudinal
u_*	Velocidade de fricção
U	Velocidade média do vento
$v(x, y, z, t)$	Deslocamento linear vertical
$w(x, y, z, t)$	Deslocamento linear horizontal
\mathbf{Y}	Vetor de coordenadas generalizadas
$\bar{\mathbf{Y}}$	Vetor da transformada de Fourier de \mathbf{Y}
$\bar{\bar{\mathbf{Y}}}$	Vetor do conjugado de $\bar{\mathbf{Y}}$

Letras gregas

α	Ângulo de ataque
$\alpha(x, y, z, t)$	Deslocamento angular da seção transversal em torno do eixo x
$\beta(x, y, z, t)$	Deslocamento angular da seção transversal em y
$\Delta \mathbf{p}$	Vetor de deslocamentos dinâmicos nodais
$\varepsilon_r(U)$	Taxa de amortecimento modal, do modo r , função da velocidade U
$\gamma(x, y, z, t)$	Deslocamento angular da seção transversal em z
η	Frequência de oscilação (Hz)
ρ	Densidade do ar
ζ	Taxa de amortecimento estrutural
σ_v	Desvio padrão de deslocamento vertical
σ_α	Desvio padrão de deslocamento angular
σ_w	Desvio padrão de deslocamento transversal
\mathbf{v}	Vetor de componentes de flutuações de vento
$\bar{\mathbf{v}}$	Vetor de transformada de Fourier de \mathbf{v}
$\bar{\bar{\mathbf{v}}}$	Vetor do conjugado de $\bar{\mathbf{v}}$
v_z	Flutuação do vento, componente na direção z
v_y	Flutuação do vento, componente na direção y
\dot{v}	Velocidade da estrutura
ω	Frequência circular de oscilação da estrutura
ω_r	Frequência circular natural do modo r da estrutura
$\Omega_r(U)$	Frequência circular modal do modo r do sistema aeroelástico
Ω_{rk}	Frequência circular modal do sistema aeroelástico na iteração k
Φ	Matriz modal

LISTA DE PRINCIPAIS SIGLAS

UML	<i>Unified Modeling Language</i>
ANA-PSp	Nome do Sistema de <u>AN</u> álise <u>A</u> eroelástico de <u>P</u> ontes <u>S</u> uspensas
FORTRAN [®]	Linguagem de programação, <i>FOR</i> mula <i>TRAN</i> slator desenvolvida pela IBM
JAVA [™]	Linguagem de programação desenvolvida pela <i>Sun Microsystems</i>
API	<i>Applications Programming Interfaces</i>
ADINA [®]	<i>Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis</i>
CFD	<i>Computacional Fluid Dynamics</i>
FFT	Transformada rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
GERENCIADOR	Nome do Subsistema <u>GERENCIADOR</u> do sistema ANA-PSp
CoDCOM	Nome do Subsistema para dados dos <u>C</u> oeficientes para esforços aerodinâmicos e <u>D</u> ados <u>C</u> OMplementares
PARMAS	Nome do Subsistema de <u>PAR</u> âmetros <u>M</u> odais <u>A</u> erodinâmicos
EDIÇÃO-Pré Análise	Nome do Subsistema de <u>EDIÇÃO</u> de dados na <u>Pré-Análise</u>
EDIÇÃO-Análise	Nome do Subsistema de <u>EDIÇÃO</u> de dados na <u>Análise</u>
DreaMT3	Nome do Subsistema de <u>D</u> rapejamento <u>r</u> igidez e <u>a</u> mortecimento Aeroelástico <u>M</u> ulTImodal <u>3</u> DOF
DoFETE	Nome do Subsistema de análise no <u>D</u> omínio da <u>F</u> requencia <u>E</u> do <u>T</u> empo
ESPEM	Nome do Subsistema de análise <u>ESPE</u> ctral de <u>M</u> artelamento
VISUALIZAÇÃO- Pré Análise	Nome do Subsistema de <u>VISUALIZAÇÃO</u> de resultados aeroelásticos na <u>Pré-Análise</u>
VISUALIZAÇÃO- Análise	Nome do Subsistema de <u>VISUALIZAÇÃO</u> de resultados aeroelásticos na <u>Análise</u>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO

1.1	PONTES SUSPENSAS	26
1.2	ESTUDO DOS FENÔMENOS AEROELÁSTICOS	35
1.3	ALGUMAS CITAÇÕES ADICIONAIS	46
1.4	OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES	48
1.5	SISTEMA COMPUTACIONAL ANA-PSp	49
1.5.1	Programação Estruturada	51
1.5.2	Padrões de Projeto (design patterns)	53
1.5.3	Modelagem UML	55
1.6	FASES DE DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE	60
1.7	MODELOS UTILIZADOS NO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA	62
1.8	ORGANIZAÇÃO DA TESE	64
2	FORMULAÇÃO GERAL DOS PROBLEMAS AEROELÁSTICOS ACOPLADOS DE DRAPEJAMENTO E DE MARTELAMENTO EM PONTES SUSPENSAS	
2.1	DESLOCAMENTOS NO EIXO DO TABULEIRO	67
2.2	ESFORÇOS AERODINÂMICOS	68
2.2.1	Coefficientes utilizados na determinação dos esforços de drapejamento .	72

2.2.2	Coefficientes utilizados na determinação dos esforços de martelamento	85
2.3	EQUAÇÕES DE MOVIMENTO DO SISTEMA DISCRETIZADO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS EM TORNO DA CONFIGURAÇÃO DEFORMADA DE EQUILÍBRIO	86
2.4	EQUAÇÕES DE MOVIMENTO PARA O MODELO MATEMÁTICO REDUZIDO	89
3	ORGANIZAÇÃO DO SISTEMA ANA-PSp	
3.1	FLUXOGRAMA GERAL DO SISTEMA	92
3.2	RELAÇÃO FUNCIONAL ENTRE SUBSISTEMAS	96
3.3	DIAGRAMAS DOS SUBSISTEMAS QUE COMPÕEM O SISTEMA ANA-PSp	100
3.3.1	Gerenciador do sistema	100
3.3.2	Subsistema CoDCOM	111
3.3.3	Subsistema PARMAS	114
3.3.4	Subsistema EDIÇÃO	117
3.3.5	Subsistema VISUALIZAÇÃO	123
4	DRAPEJAMENTO – ANÁLISE MULTIMODAL	
4.1	ESFORÇOS AUTO-EXCITANTES OU AEROELÁSTICOS NA ANÁLISE MULTIMODAL DE DRAPEJAMENTO	128
4.2	EQUAÇÃO CARACTERÍSTICA DO FENÔMENO DE DRAPEJAMENTO ...	130
4.3	DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE CRÍTICA DE DRAPEJAMENTO POR VALORES PRÓPRIOS COMPLEXOS	132
4.3.1	Avaliação da matriz M^*	133
4.3.2	Associação entre a solução e a forma modal	135
4.3.3	Subsistema DreaMT3	136
4.4	DETERMINAÇÃO DE VELOCIDADE CRÍTICA NO DOMÍNIO DO TEMPO	140
4.4.2	Resposta em coordenadas generalizadas e em deslocamentos	141
4.4.3	Velocidade crítica	143

4.5	DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE CRÍTICA DE DRAPEJAMENTO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	143
4.6	SUBSISTEMA DoFETE	145
4.7	EDIÇÃO DE DADOS E VISUALIZAÇÃO DOS SUBSISTEMAS DreaMT3 E DoFETE	148
5	MARTELAMENTO – ANÁLISE MULTIMODAL PELO MÉTODO ESPECTRAL	
5.1	FORMULAÇÃO GERAL	152
5.2	SUBSISTEMA ESPEM	157
5.3	EDIÇÃO DE DADOS E VISUALIZAÇÃO DO SUBSISTEMA ESPEM	162
6	SIMULAÇÃO DE ESTUDO DE CASO	
6.1	MODELAGEM DA PONTE ESTAIADA DA NORMANDIA	165
6.2	PROCESSAMENTO ADINA	168
6.3	GERENCIADOR ANA-PSp	169
6.4	PRÉ-ANÁLISE	170
6.5	ANÁLISE AEROELÁSTICA DE DRAPEJAMENTO	177
6.5.1	Entrada de dados para procedimento de autovalores complexos	178
6.5.2	Edição de dados para análise no domínio do tempo e no domínio da frequência	180
6.5.3	Visualização de resultados de análise de drapejamento	181
6.6	ANÁLISE AEROELÁSTICA DE MARTELAMENTO	185
7	ESTUDO DE CASO1: PONTE ESTAIADA DA NORMANDIA	
7.1	ANÁLISE MULTIMODAL DE DRAPEJAMENTO	189
7.1.1	Análise de drapejamento para modos de flexão no plano vertical (Vs) e de torção	192
7.1.2	Análise de drapejamento para modos de flexão no plano vertical (Vs), no plano horizontal (Hs) e de torção.	200
7.1.3	Análise de drapejamento para outros conjuntos	206
7.1.4	Observações de resultados de análise	207

7.1.5	Coefficientes de drapejamento suavizados	208
7.1.6	Sensibilidade da resposta do sistema aeroelástico aos coeficientes de drapejamento	212
7.2	ANÁLISE MULTIMODAL DE MARTELAMENTO	213
7.2.1	Análise de martelamento condição 1	214
7.2.2	Análise de martelamento condição 2	216
7.2.3	Análise de martelamento condição 3	218
8	ESTUDO DE CASO2: PONTE PÊNSIL DE TACOMA NARROWS	
8.1	MODELAGEM DA PONTE	221
8.2	ESTUDO DOS PARÂMETROS MODAIS	223
8.3	ANÁLISE MULTIMODAL DE DRAPEJAMENTO	225
8.3.1	Análise de drapejamento para multimodos simétricos – Conjunto I	226
8.3.2	Análise de drapejamento para multimodos assimétricos	229
8.3.3	Análise de drapejamento para modos de torção	230
8.4	ANÁLISE MULTIMODAL DE MARTELAMENTO	231
9	ESTUDO DE CASO 3: PONTE ESTAIADA SOBRE O RIO TIETÊ	
9.1	DESCRIÇÃO DA PONTE	236
9.2	MODELO MATEMÁTICO DA PONTE ESTAIADA	238
9.3	ESTUDO DOS PARÂMETROS MODAIS	239
9.4	ANÁLISE MULTIMODAL DE DRAPEJAMENTO	242
9.4.1	Drapejamento para multimodos simétricos e assimétricos analisados separadamente	242
9.4.2	Análise de drapejamento para multimodos com modos simétricos e com modos assimétricos	247
9.5	ANÁLISE MULTIMODAL DE MARTELAMENTO	250
10	CONCLUSÕES	253
	REFERÊNCIAS	255

ANEXO A -	O Vento e Algumas de suas Características Randômicas. . . .	259
ANEXO B -	Arquivos de Integração entre Sistemas ADINA® e ANA-PSp.	265
ANEXO C -	Coefficientes de Drapejamento e Coefficientes para Esforços de Martelamento Catalogados	272