

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

O MÉTODO DA VORTICIDADE EM PARTÍCULAS PARA
ESTIMAR COEFICIENTES AERODINÂMICOS: UMA
VALIDAÇÃO COM TRÊS PONTES BRASILEIRAS

Marcos Hamann Beier

Porto Alegre
Dezembro de 2007

Marcos Hamann Beier

**O MÉTODO DA VORTICIDADE EM PARTÍCULAS PARA
ESTIMAR COEFICIENTES AERODINÂMICOS: UMA
VALIDAÇÃO COM TRÊS PONTES BRASILEIRAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia. Orientação: Prof. PhD. Acir Mércio Loredo-Souza e Prof. Dr.tech Marcelo Maia Rocha

Porto Alegre

Dezembro de 2007

B422m

Beier, Marcos Hamann

O método da vorticidade em partículas para estimar coeficientes aerodinâmicos : uma validação com três pontes brasileiras / Marcos Hamann Beier. – 2007.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2007.

Orientação : Prof. Dr. Acir Mércio Loredou-Souza e Prof. Dr.tech. Marcelo Maia Rocha

1. Túnel de vento. 2. Pontes (Engenharia). 3. Dinâmica de fluidos computacional. 4. Vento – Estruturas. I. Loredou-Souza, Acir Mércio, orient. II. Rocha, Marcelo Maia, orient. III. Título.

CDU-624.042.4(043)

MARCOS HAMANN BEIER

**O MÉTODO DAS PARTÍCULAS EM VÓRTICES PARA
ESTIMAR COEFICIENTES AERODINÂMICOS: UMA
VALIDAÇÃO COM TRÊS PONTES BRASILEIRAS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Estruturas, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 21 de Dezembro de 2007

Prof. Acir Mércio Loredou-Souza
PhD. pela University Western Ontario – Canadá
orientador

Prof. Marcelo Maia Rocha
Dr.tech. pela Universität Innsbruck – Áustria
orientador

Prof. Fernando Schnaid
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. José Luis Vital de Brito (UnB)
Dr. pela UFRGS

Prof. Mario José Paluch (UPF)
Dr. pela UFRGS

Prof. Ronald José Ellwanger (UFRGS)
Dr. pela UFRGS

Prof.a Ângela Borges Masuero (UFRGS)
Dr. pela UFRGS

O trabalho é dedicado à família, em especial à esposa,
minha amada companheira Vanessa.
Quem mais ajuda, sabe o esforço, compreende a realização
e é a melhor pessoa para se dividir a alegria da conquista.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Prof. Acir Mércio Loredou-Souza e Prof. Marcelo Maia Rocha, pelas sugestões, dedicação, interesse e apoio em relação ao desenvolvimento e aprofundamento do trabalho, mas também pela suas constantes demonstrações de amizade e compreensão das dificuldades encontradas no decorrer destes meses.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pela disponibilidade de transmitir e compartilhar o seu saber na análise de estruturas, aos professores da graduação em Engenharia Civil da UFRGS pela base sólida de conhecimento para a vida profissional e aos amigos do PPGEC pelo apoio nas horas de estudo e trabalhos.

Aos companheiros da *Bentley Systems, Inc.* e da *TDV Consulting – Technische DatenVerarbeiten*, principalmente ao Dr.Ing. Dorian Janjic e ao Dr.Ing. Andréas Domaingo pelas valiosas informações.

Aos colegas da Deltacon Engenharia S.S.L. e em especial ao meu pai, Martin Alfredo Beier, sempre um grande incentivador do aprimoramento técnico.

Aos meus amigos e familiares pela compreensão da minha ausência física e psicológica e a todos que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho.

À minha esposa, Maria Vanessa Seixa Stefani Beier, pelo apoio, dedicação e amor constantes, e ao novo membro da família, Lucas Stefani Beier, companhia nas madrugadas despertas.

“O engenheiro de pontes moderno tem que ser um artista e um poeta tanto quanto um matemático, cientista, administrador de finanças e fornecedor de serviços.”

D.B.Steinmann

RESUMO

BEIER, M. B. O Método da Vorticidade em Partículas para Estimar Coeficientes Aerodinâmicos: Uma Validação com Três Pontes Brasileiras. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo comparativo entre os três métodos para obtenção das características aerodinâmicas de tabuleiros de pontes: analítico, experimental e numérico. O tema é motivado pelo crescimento das necessidades de conhecimento científico e tecnológico na área de desempenho aerodinâmico de seções típicas de pontes nas etapas mais iniciais de projeto. A precisão de uma ferramenta de previsão certamente acelera a convergência ao modelo final; porém, qualquer metodologia numérica deve ser extensivamente testada antes de ser utilizada nos escritórios de cálculo. Inicialmente mostra-se a lógica da análise de instabilidades provocadas pelo vento, resume-se a modelagem de tabuleiros de pontes para ensaios em túnel de vento e descreve-se o método numérico implementado no programa comercial de análise de pontes RM. Comparam-se dados disponíveis de testes de modelos reduzidos no túnel de vento com as estimativas de aproximação do Método da Vorticidade em Partículas (MVP). Confrontam-se resultados para casos clássicos, um estudo paramétrico, dados dos relatórios de três pontes Brasileiras já ensaiadas no Túnel de Vento Joaquim Blessmann do LAC – PPGEC/UFRGS: Paulicéia, Guamá e Roberto Marinho. Finalmente, considera-se o método experimental como preciso e julga-se o método numérico comparativamente, analisando a confiabilidade dos resultados e procurando definir a sua faixa de aplicabilidade. Examinando a variabilidade dos resultados, bastante baixa, definiu-se sua faixa de aplicação considerando os resultados obtidos como satisfatórios para projetos básicos e executivos de estruturas; necessitando, porém, para os casos especiais, de comprovação experimental em túnel de vento antes da sua execução. Exemplifica-se então o uso do método para alguns problemas de análises de seções. Os resultados e comparações corroboram verificações anteriores do método dos vórtices discretos para verdadeiras seções de pontes e mostram porque o seu uso vem se tornando cada vez mais aceitável.

Palavras chave: túnel de vento; coeficientes aerodinâmicos de pontes; dinâmica dos fluidos computacional; método dos vórtices discretos; método dos vorticidade em partículas.

ABSTRACT

BEIER, M. B. The Vortex Particle Method to Estimate Aerodynamic Coefficients: A Validation with Three Brazilian Bridges. 2007. Dissertation (Master in Civil Engineering) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The work has the objective to realize a comparative study between three methods to obtain bridge aerodynamic coefficients: analytic, experimental and numerical. The theme is motivated by the increasing need of knowledge about the aerodynamic behaviour of bridge decks in the early stages of the design process. The accuracy of a predictive tool will certainly accelerate the convergence to the final design. However, any numerical methodology must be extensively tested ascertain and hence validated before it becomes of current use by designers. Collaboration is made comparing wind tunnel data of reduced models and numerical estimations by a simplified approach. After a brief overview of wind loading and wind tunnel modeling, the bridge wind resistance design in the commercially available bridge design software package RM is shown. The Discrete Vortex Method and the implementation are shortly described. Initially, classical fluid problems are indicated together with the comparison of parametric cross sectional bridge shapes. After, three Brazilian large cable-stayed bridge projects are presented as instance of analysis: Paulicéia, Guamá and Roberto Marinho. Bridges aerodynamic coefficients were experimentally obtained at the Boundary Layer Wind Tunnel *Joaquim Blessmann* at *Universidade Federal do Rio Grande do Sul* (UFRGS). Finally, experimental results are considered precise and those results evaluated with CFD are compared analyzing the liability and applicability. According to the results variability, quite low, we considered them appropriated for basic and final structural designs; needing, although, for special cases, of experimental probation in wind tunnel tests before the construction phase. Some CFD analysis problems of cross sections are then presented as application examples. The results and similitude corroborate earlier verifications of the method and this implementation, demonstrating why its use is becoming increasingly acceptable.

Keywords: wind tunnel; bridge aerodynamic coefficient; computer fluid dynamics, CFD; discrete vortex method, DVM; vortex particle method, VPM.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	p. 13
LISTA DE TABELAS.....	p. 18
ABREVIATURAS.....	p. 19
SIGLAS.....	p. 21
SÍMBOLOS.....	p. 23
1 INTRODUÇÃO.....	p. 24
1.1 JUSTIFICATIVAS.....	p. 24
1.1 OBJETIVOS.....	p. 25
1.1 ESTRUTURA E METODOLOGIA.....	p. 26
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	p. 28
2.1 PONTES.....	p. 28
2.2.1 Pontes Estaiadas.....	p. 28
2.2.1.1 Pontes Estaiadas no Brasil.....	p. 29
2.2 ENGENHARIA DO VENTO.....	p. 30
2.2.1 Aerodinâmica de Pontes.....	p. 32
2.2.1.1 Trabalhos na Área.....	p. 35
2.3 CARACTERÍSTICAS AERODINÂMICAS DE PONTES.....	p. 37
2.3.1 Métodos de Obtenção dos Coeficientes.....	p. 39
2.3.2 Métodos Analíticos.....	p. 39
2.3.3 Métodos Experimentais.....	p. 40
2.3.3.1 Modelos seccionais de pressões.....	p. 44
2.3.3.2 Modelos seccionais dinâmicos.....	p. 45
2.3.3.3 Modelos seccionais tensionados.....	p. 46
2.3.3.4 Modelos aeroelásticos.....	p. 47
2.3.3.5 Análises.....	p. 49
2.3.4 Métodos Numéricos.....	p. 51

2.3.4.1 Métodos Numéricos e Método dos Elementos de Contorno.....	p. 52
2.3.4.2 Método da Vorticidade Discreta.....	p. 53
3 APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA.....	p. 55
3.1 CONCRETO.....	p. 55
3.2 O PROJETO MODERNO DE PONTES.....	p. 56
3.3 BENTLEY SYSTEMS, INC. / TDV.....	p. 56
3.4 BENTLEY BRIDGE RM.....	p. 57
3.4.1 Análise de instabilidades provocadas pelo vento.....	p. 58
3.4.1.1 Vento de projeto.....	p. 61
3.4.2 Método da Vorticidade em Partículas.....	p. 65
3.4.2.1 Módulo de CFD no RM.....	p. 71
4 EXEMPLOS E APLICAÇÕES.....	p. 77
4.1 EXEMPLOS CLÁSSICOS.....	p. 77
4.1.1 Cilindro de Seção Circular.....	p. 78
4.1.2 Prisma de Seção Quadrada.....	p. 85
4.1.3 Prisma de Seção Retangular.....	p. 85
4.1.4 Prisma de Seção Tipo Placa.....	p. 86
4.1.5 Cilindro de Seção Tipo Aerofólio.....	p. 86
4.2 ENSAIOS DE PONTES NO LAC.....	p. 87
4.2.1 Estudo Paramétrico.....	p. 88
4.2.2 Ponte Guamá / PA.....	p. 88
4.2.3 Ponte Paulicéia / Rio Paraná – SP/MS.....	p. 90
4.2.4 Complexo Roberto Marinho / Pinheiros - SP.....	p. 92
4.2.4.1 Modelo Completo Aeroelástico da Ponte.....	p. 94
4.2.4.2 Dispositivo Aerodinâmico do Tipo Nariz de Vento.....	p. 98
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E PROPOSTAS.....	p.101
5.1 RESULTADOS DOS MODELOS PARAMÉTRICOS.....	p.101
5.2 RESULTADOS DOS MODELOS DAS PONTES.....	p.103

5.3 CONFIGURAÇÕES DE UM DISPOSITIVO AERODINÂMICO.....	p.111
5.4 INFLUÊNCIA DA ALTURA E LARGURA DO TABULEIRO.....	p.115
5.4.1 Seções Tipo Viga Caixaão ou Múltiplas Vigas T.....	p.115
5.4.2 Resultados Comparativos e Observações.....	p.119
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	p.133
REFERÊNCIAS.....	p.137
APÊNDICE 1.....	p.146
APÊNDICE 2.....	p.155

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ponte Estaiada Eng. Jamil Sabino e estação de trem.....	p. 29
Figura 2: perfil de velocidades do vento.....	p. 30
Figura 3: registro da velocidade do vento em um ponto no tempo.....	p. 31
Figura 4: domínio do tempo.....	p. 31
Figura 5: domínio da frequência.....	p. 32
Figura 6: desastre de <i>Firth of Tay</i> – 1879	p. 33
Figura 7: desastre de <i>Tacoma Narrows</i>	p. 34
Figura 8: Ponte Presidente Costa e Silva – RJ (1974).....	p. 36
Figura 9: eixos de referência e forças sobre o tabuleiro da ponte.....	p. 37
Figura 10: resultados em tabelas e diagramas dos coeficientes em função de α	p. 38
Figura 11: túnel de vento Joaquim Blessmann no LAC – PPGEC/UFRGS.....	p. 40
Figura 12: túnel de vento de camada limite de retorno fechado.....	p. 41
Figura 13: simuladores de Couniham no piso da câmara de ensaios e modelo.	p. 41
Figura 14: modelo seccional de pressões em ângulo com o escoamento.....	p. 42
Figura 15: modelo rígido do mastro para medir forças com célula de carga.....	p. 43
Figura 16: modelo rígido do mastro no túnel de vento para medir pressões.....	p. 43
Figura 17: detalhe da calibragem da célula de carga.....	p. 44
Figura 18: distribuição das tomadas de pressão.....	p. 44
Figura 19: modelo seccional de pressões.....	p. 45
Figura 20: detalhe do apoio do modelo seccional dinâmico.....	p. 46
Figura 21: modelo seccional tensionado.....	p. 46
Figura 22: modelo aeroelástico completo.....	p. 47
Figura 23: acelerômetros biaxiais MEMS para instrumentação.....	p. 48

Figura 24: aquisição de dados.....	p. 49
Figura 25: visualização dos vórtices do escoamento.....	p. 51
Figura 26: vórtice criado na passagem da asa do avião revelado pela fumaça..	p. 53
Figura 27: modelo computacional em MEF da ponte Rach Mieu – Vietnã.....	p. 58
Figura 28: problema do vento em 3D.....	p. 59
Figura 29: decomposição de forças na seção transversal 2D.....	p. 59
Figura 30: fluxograma da análise das instabilidades provocadas pelo vento.....	p. 60
Figura 31: vento, arrasto, sustentação e momento médios.....	p. 61
Figura 32: janela de determinação do modelo de vento de projeto.....	p. 62
Figura 33: perfis de velocidade média do vento.....	p. 63
Figura 34: intensidade de turbulência do vento.....	p. 63
Figura 35: espectro de potência.....	p. 64
Figura 36: função de coerência.....	p. 64
Figura 37: vórtices criados nas nuvens – ilha de Juan Fernandez (Chile).....	p. 66
Figura 38: vorticidade superficial.....	p. 68
Figura 39: discretização da superfície.....	p. 70
Figura 40: fluxograma resumido do Método da Vorticidade em Partículas.....	p. 71
Figura 41: escolha da normalização.....	p. 72
Figura 42: tela do módulo de CFD durante processamento.....	p. 74
Figura 43: distribuição das pressões na superfície do corpo.....	p. 75
Figura 44: velocidade absoluta comparada a velocidade do vento incidente....	p. 75
Figura 45: exemplo da análise de um problema de interação aeroelástico.....	p. 76
Figura 46: instantâneo do processamento da seção transversal de um círculo..	p. 78
Figura 47: baixa discretização e boa discretização.....	p. 79
Figura 48: número de painéis igual a 100.....	p. 80
Figura 49: número de painéis igual a 200.....	p. 80
Figura 50: número de painéis igual a 400.....	p. 80

Figura 51: passo de tempo de 0,0014s.....	p. 81
Figura 52: passo de tempo de 0,0007s.....	p. 81
Figura 53: convergência para duas simulações com parâmetros diferentes.....	p. 82
Figura 54: tamanho do núcleo de 0,005m.....	p. 83
Figura 55: tamanho do núcleo de 0,020m.....	p. 83
Figura 56: instantâneo da tela dos vórtices na seção transversal quadrada.....	p. 84
Figura 57: instantâneo da tela dos vórtices na seção transversal retangular.....	p. 85
Figura 58: instante do vídeo durante o processamento da seção tipo placa.....	p. 85
Figura 59: instantâneo da tela dos vórtices na seção transversal do aerofólio...	p. 86
Figura 60: estudo paramétrico: $B = 200\text{mm}$ ou 12m	p. 87
Figura 61: medidas da seção transversal tipo da ponte na Configuração I.....	p. 88
Figura 62: medidas da seção transversal tipo da ponte na Configuração II.....	p. 89
Figura 63: medidas da seção transversal tipo da ponte na Configuração III....	p. 89
Figura 64: modelo seccional da seção transversal da Ponte Guamá.....	p. 90
Figura 65: colocação da última aduela pré-moldada da Ponte Guamá.....	p. 90
Figura 66: medidas da meia seção transversal tipo da ponte – simétrica.....	p. 91
Figura 67: modelo seccional dinâmico instalado no interior do túnel de vento.	p. 91
Figura 68: foto aérea da Ponte Paulicéia com estrutura concluída.....	p. 91
Figura 69: maquete computacional arquitetônica.....	p. 92
Figura 70: medidas da seção transversal tipo da ponte.....	p. 92
Figura 71: pontos de medida de pressão na seção transversal tipo da ponte.....	p. 93
Figura 73: detalhe do apoio no modelo seccional dinâmico.....	p. 93
Figura 74: modelo aeroelástico completo na mesa M – IV.....	p. 94
Figura 75: detalhe do estaiamento e tabuleiro do modelo aeroelástico.....	p. 95
Figura 76: posicionamento dos acelerômetros e definição do ângulo do vento.	p. 96
Figura 77: construção do pilar das pontes.....	p. 97
Figura 78: construção do tabuleiro da ponte em avanços sucessivos.....	p. 97

Figura 79: nariz de vento para Ponte Roberto Marinho.....	p. 99
Figura 80: dispositivo aerodinâmico tipo bordo suavizador.....	p. 99
Figura 81: dispositivo aerodinâmico no modelo completo.....	p.100
Figura 82: instantâneo dos vórtices para um ângulo de ataque de +10°.....	p.101
Figura 83: coeficientes aerodinâmicos da Ponte Guamá na Configuração I.....	p.104
Figura 84: coeficientes aerodinâmicos da Ponte Guamá na Configuração II....	p.105
Figura 85: coeficientes aerodinâmicos da Ponte Guamá na Configuração III...	p.106
Figura 86: evolução dos coeficientes aerodinâmicos da Ponte Guamá.....	p.107
Figura 87: coeficientes aerodinâmicos da Ponte Paulicéia.....	p.108
Figura 88: coeficientes aerodinâmicos da Ponte Roberto Marinho.....	p.109
Figura 89: nariz de vento com ângulos variáveis para Ponte Roberto Marinho	p.112
Figura 90: gráfico comparativo dos Modelos para PRM.....	p.113
Figura 91: instantâneo dos vórtices para Modelo da PRM sem nariz.....	p.114
Figura 92: instantâneo dos vórtices para Modelo 1 da PRM com nariz.....	p.114
Figura 93: modelo tipo viga caixão unicelular com abas verticais.....	p.116
Figura 94: modelo tipo múltiplas vigas T com 5 longarinas.....	p.116
Figura 95: modelo tipo viga caixão unicelular com abas inclinadas e tráfego..	p.118
Figura 96: ponte de acesso segmentada pelo vento – EUA.....	p.118
Figura 97: coeficientes variando a altura para viga caixão reta e B=10m.....	p.120
Figura 98: coeficientes variando a altura para viga caixão inclinada e B=13m.	p.121
Figura 99: coeficientes variando a altura para viga caixão inclinada e B=17m.	p.121
Figura 100: coeficientes variando a altura para viga tipo com 3 T e B=10m....	p.122
Figura 101: coeficientes variando a altura para viga tipo com 4 T e B=13m....	p.123
Figura 102: coeficientes variando a altura para viga tipo com 5 T e B=17m....	p.123
Figura 103: coeficientes variando a base para viga caixão com H=2,40m.....	p.124
Figura 104: coeficientes variando a base para viga caixão com H=2,70m.....	p.124
Figura 105: coeficientes variando a base para viga caixão com H=2,90m.....	p.125

Figura 106: coeficientes variando a base para viga caixão com H=3,40m.....	p.125
Figura 107: coeficientes variando a base para viga caixão com H=3,90m.....	p.126
Figura 108: coeficientes variando a base para viga caixão com H=4,40m.....	p.126
Figura 109: coeficientes variando a base para viga múltipla T com H=2,40m..	p.127
Figura 110: coeficientes variando a base para viga múltipla T com H=2,70m..	p.127
Figura 111: coeficientes variando a base para viga múltipla T com H=2,90m..	p.128
Figura 112: coeficientes variando a base para viga múltipla T com H=3,40m..	p.128
Figura 113: instantâneo de vórtices do Modelo de 4 vigas T.....	p.131
Figura 114: instantâneo de vórtices do Modelo de 4 Vigas T com tráfego.....	p.131
Figura 115: distribuição de pressões do Modelo de 4 vigas T.....	p.131
Figura 116: distribuição de pressões do Modelo de 4 vigas T com tráfego.....	p.132
Figura 117: campo de velocidades do Modelo de 4 vigas T.....	p.132
Figura 118: campo de velocidades do Modelo de 4 vigas T com Tráfego.....	p.132
Figura 119: coefic. aerodinâmicos do Modelo I do estudo paramétrico.....	p.146
Figura 120: coefic. aerodinâmicos do Modelo II do estudo paramétrico.....	p.147
Figura 121: coefic. aerodinâmicos do Modelo III do estudo paramétrico.....	p.148
Figura 122: coefic. aerodinâmicos do Modelo IV do estudo paramétrico.....	p.149
Figura 123: coefic. aerodinâmicos do Modelo V do estudo paramétrico.....	p.150
Figura 124: coefic. aerodinâmicos do Modelo VI do estudo paramétrico.....	p.151
Figura 125: coefic. aerodinâmicos do Modelo VII do estudo paramétrico.....	p.152
Figura 126: coefic. aerodinâmicos do Modelo VIII do estudo paramétrico.....	p.153
Figura 127: seção transversal e carac. da Ponte Guamá na Configuração III.....	p.154
Figura 128: seção transversal e carac. geométricas da PRM com nariz de vento..	p.155

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: tipos de efeitos do vento em estruturas.....	p. 34
Tabela 2: resultados para seção do tipo perfil H alongado.....	p.103
Tabela 3: coeficientes aerodinâmicos da Ponte Guamá na Configuração I.....	p.104
Tabela 4: coeficientes aerodinâmicos da Ponte Guamá na Configuração II.....	p.105
Tabela 5: coeficientes aerodinâmicos da Ponte Guamá na Configuração III.....	p.106
Tabela 6. evolução dos coeficientes aerodinâmicos da Ponte Guamá.....	p.107
Tabela 7: coeficientes aerodinâmicos da Ponte Paulicéia.....	p.108
Tabela 8: coeficientes aerodinâmicos da Ponte Roberto Marinho.....	p.109
Tabela 9: resultados do dispositivo aerodinâmico para a PRM com $\alpha = 4^\circ$	p.112
Tabela 10: relação balanço lateral e entre-vigas da seção de múltiplas vigas T	p.117
Tabela 11: coeficientes aerodinâmicos para pontes tipo caixão fechado.....	p.119
Tabela 12: coeficientes aerodinâmicos para pontes tipo vigas T múltiplas.....	p.122
Tabela 13: coef. aerodinâmicos para pontes tipo caixão fechado com tráfego.....	p.129
Tabela 14: coef. aerodinâm. para pontes tipo vigas T múltiplas com tráfego.....	p.130
Tabela 15: coeficientes aerodinâmicos do Modelo I.....	p.146
Tabela 16: coeficientes aerodinâmicos do Modelo II.....	p.147
Tabela 17: coeficientes aerodinâmicos do Modelo III.....	p.148
Tabela 18: coeficientes aerodinâmicos do Modelo IV.....	p.149
Tabela 19: coeficientes aerodinâmicos do Modelo V.....	p.150
Tabela 20: coeficientes aerodinâmicos do Modelo VI.....	p.151
Tabela 21: coeficientes aerodinâmicos do Modelo VII.....	p.152
Tabela 22: coeficientes aerodinâmicos do Modelo VIII.....	p.153

ABREVIATURAS

Aero: Aerodynamic = Aerodinâmica

aerodin.: aerodinâmicos

BEM: Boundary Element Method = MEC

coef.: coeficientes

CS: Cross Section = Seção Transversal

CL: Classes = Classe, tipo

CFD: Computational Fluid Dynamics = DFC

CWE: Computational Wind Engineering

DES: Detached Eddy Simulation

DFC: Dinâmica dos Fluídos Computacional = *CFD*

DNS: Direct Numerical Simulation

DVM: Discrete Vortex Method = MVD

Eng.: Engenheiro

FEM: Finite Element Method = MEF

FDM: Finite Differences Method - MDF

FSI: Fluid Structure Interaction

FVM: Finite Volume Method - MVF

GR: Guarda Rodas do tabuleiro da ponte

LES: Large Eddy Simulation

LAC: Laboratório de Aerodinâmica das Construções

MEC: Método dos Elementos de Contorno = *BEM*

MEF: Método dos Elementos Finitos = *FEM*

MVD: Método dos Vórtices Discretos = *DVM*

MVP: Método da Vorticidade em Partículas = *PVM*

MaxGamToRelease: nível máximo dos vórtices liberados

OAE: Obra de Arte Especial, viaduto ou ponte

PDE: Partial Differential Equations

PPGEC: Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

PRM: Ponte Roberto Marinho = Ponte Cidade Jardim, Espraiada

PVM: Particle Vortex Method

RANS: Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations

RM: Real Modelling

RMS: Root Mean Square = raiz quadrada da media dos quadrados

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

TDV: Technische DatenVerarbeiten

SIGLAS

A: Arrasto, força de arrasto: $F_a = Drag: D$

B: Base, largura do tabuleiro,

C: Coeficiente aerodinâmico estático

C_A : Coeficiente aerodinâmico estático de arrasto = C_D

C_D : *Static Aerodynamic Coefficient of Drag* = C_A

C_L : *Static Aerodynamic Coefficient of Lift* = C_S

C_M : *Static Aerodynamic Coefficient of Moment* = C_T

C_S : Coeficiente aerodinâmico estático de Sustentação = C_L

C_T : Coeficiente aerodinâmico estático de Torção = C_M

D: *Drag* = A

H: altura total da seção transversal (do tabuleiro da ponte com GR)

I_w : Intensidade de Turbulência

Fa: Força de arrasto, Arrasto: $A = Drag: D$

Fs: Força de sustentação, Sustentação: $S = Lift: L$

L: *Lift* = S

Mt: Momento de torção, Torção: $T = pitching Moment: M$

M: *pitching Moment* = T

N_p : Número de painéis

N_v : Número de pontos discretos, marcadores fluidos (*fluid markers*)

R: vetor randômico dos avanços aleatórios

S: Sustentação, força de sustentação: $F_s = Lift: L$

T: Torção, momento de torção: $M_t = pitching Moment: M$

U: velocidade do vento no escoamento

U_r : velocidade do vento no escoamento na altura de referência

dt : passo de tempo

h : altura da seção transversal (do tabuleiro da ponte)

h : espaçamento inicial entre os vórtices

i : partícula avulsa

i_t^* : número de iterações

k : etapa do passo de tempo

ℓ : comprimento da ponte, vão

m_i : massa da partícula

n : painéis retos

n_r : número de vórtices liberados por painel

o : comprimento da linha externa da seção transversal

p : pressão

u_i : velocidade da partícula

t : tempo

u : velocidade do campo

z : altura (do tabuleiro da ponte) em relação à base

z_r : altura de referência

x_0 : posição inicial da partícula

$x_{c,i}$: centro dos painéis

x_i : posição da partícula

SÍMBOLOS

Ψ : função corrente

σ : tamanho do núcleo

∇ : operador Nabla

Γ_i : força de vorticidade de cada partícula

Γ_p : força de vorticidade total

α : ângulo de ataque (incidência) do vento, rotação da seção transversal

∂ : diferencial parcial

ρ : densidade do ar

Ω : frequência

τ : função

δ : função delta de Dirac

δ_i : densidade da massa da partícula

η : viscosidade laminar

ν : viscosidade cinemática

ω : vorticidade

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVAS

Este trabalho é uma dissertação de mestrado da Área de Estruturas do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e foi produzido no Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC).

O laboratório busca o desenvolvimento e aplicação de técnicas relativas à Engenharia de Vento e conta com diversas pesquisas em diferentes áreas deste conhecimento de ciência aplicada. A dissertação faz parte da linha de pesquisa “Ação e Efeitos do Vento Sobre Edificações, Pessoas e Meio Ambiente” que engloba todas as áreas relativas à geração de conhecimentos relativos à aerodinâmica das construções e dispersão de gases ou partículas.

A pesquisa pertence, ainda, ao projeto temático “Efeitos Estáticos e Dinâmicos do Vento em Edificações” que tem como intuito o prognóstico de pressões, tensões, deformações, deslocamentos e características das vibrações devidas ao vento em diversos tipos de edificações através de ensaios em modelos. Trata-se de problemas de instabilidade estrutural causados por grandes solicitações de vento (estático), ou pela interação entre o vento e as demais solicitações, com efeitos de segunda ordem que precisam ser criteriosamente avaliados, ou ainda de efeitos dinâmicos de interação das próprias rajadas de vento que necessitam as devidas considerações.

A abordagem relativa especificamente à aerodinâmica de pontes é motivada pelo crescimento da necessidade de conhecimento científico e tecnológico na área de desempenho aerodinâmico de seções transversais de pontes. Esta demanda ocorre devido à constante evolução nos processos construtivos e de cálculo, com conseqüentes concepções de estruturas cada vez mais flexíveis e uma significativa ampliação do vão das pontes, e por causa do aumento da aplicação da solução estrutural do tipo ponte estaiada no Brasil.

Segundo Tanaka (1992) “os progressos das modernas grandes pontes suportadas por cabos é uma contínua luta contra a ação do vento”. Um exemplo disto e de que as vibrações excessivas poderiam ser evitadas por um projeto mais adequado e rigoroso é a ponte estaiada de Kessock, na Escócia, Hay (1992).

O desafio a ser enfrentado é a decisão de quando e como levar em conta os efeitos do vento. É muito comum a dificuldade de, em fase de projeto, se procurar as soluções corretas em meio às restrições severas de custos e tempo. Soluções analíticas, com diversas simplificações podem não levar a uma descrição apurada dos efeitos eólicos e das interações entre a edificação e o vento.

A importância de abordar especificamente a aerodinâmica de pontes em etapas preliminares de projeto foi prevista por Larsen (1992) “as pontes do futuro irão acentuar ainda mais a necessidade do entendimento completo de seu comportamento aerodinâmico exatamente nas etapas de planejamento inicial e projeto”.

Estas afirmações já justificam um trabalho que apresenta e verifica uma técnica recentemente disponível para estimar o vento em fases de projeto e seguem atuais afinal hoje se verificam o previsto aumento dos vãos. Os projetos são ambiciosos e pretende-se, no futuro, cruzar não mais apenas rios ou baías, mas estreitos oceânicos de até 3.000m, como no caso de Messina e Gibraltar.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho busca sintetizar as teorias fundamentais envolvidas na engenharia de vento e busca algumas respostas sobre a confiabilidade e utilização dos parâmetros obtidos via Dinâmica dos Fluidos Computacional ou em inglês *Computational Fluid Dynamics (CFD)*.

A meta é verificar os resultados de coeficientes aerodinâmicos para as seções de tabuleiros de pontes obtidos com o método numérico no módulo de *CFD* do programa comercial de análise estrutural *Real Modelling (RM)* comparativamente aqueles obtidos em ensaios em túnel de vento. Para isto tomamos como referência os valores dos relatórios do LAC no caso das três pontes brasileiras já analisadas neste túnel de vento.

No entanto, este trabalho limita-se aos aspectos aerodinâmicos, sem abordar as considerações necessárias para as análises aeroelásticas de estruturas.

São critérios a serem analisados a precisão e a versatilidade do método implementado e dos recursos computacionais necessários, uma vez que a ferramenta numérica, para um uso em cálculos práticos, realizados em empresas de projeto, necessita ser relativamente robusta e fácil de usar. Necessita-se de uma resposta rápida, acessível, factível à fase de análise iniciais.

Propõem-se a responder objetivamente, com sim ou não, às seguintes perguntas em relação aos resultados numéricos obtidos: São satisfatórios? Servem para quais estudos nestas fases iniciais de projeto de tabuleiros de pontes? Preliminares? Básicos? E os projetos executivos? A margem de erro é aceitável? Os detalhes da seção são considerados? O computador necessário encontra-se disponível aos engenheiros em seus escritórios? Qual o tempo de processamento?

É importante demonstrar a utilidade de distintas ferramentas de trabalho para diferentes etapas e complexidades evidenciando o seu uso correto. Almeja-se colaborar analisando a aplicabilidade conforme os resultados encontrados, verificando os resultados e comprovando o caráter complementar que atualmente possuem os resultados experimentais e computacionais.

1.3 ESTRUTURA E METODOLOGIA

No Capítulo 2 abordam-se os principais dados considerados interessantes na revisão bibliográfica realizada como passo inicial. Trata-se das pontes e as pontes estaiadas no exterior e no Brasil; a engenharia do vento, a aerodinâmica de pontes, os trabalhos nesta área; os coeficientes aerodinâmicos e os modelos empregados nos três procedimentos disponíveis para a obtenção de coeficientes aerodinâmicos: os métodos analíticos, experimentais e os numéricos. São descritas as principais técnicas e os trabalhos que podem ser consultados.

O Capítulo 3 apresenta a análise de pontes atualmente, a empresa, o programa RM (Bentley / TDV), a filosofia da análise de instabilidades provocadas pelo vento, o conceito de vento de projeto, o Método da Vorticidade em Partículas com detalhamento de algumas características e fórmulas empregadas. Mostra-se ainda como é o módulo de *CFD* e como obter estes resultados da interação entre fluido e estrutura (*FSI*). Esta é a mesma seqüência que foi realizada no trabalho para cada seção apresentada.

No Capítulo 4 deste trabalho analisam-se os exemplos e aplicações bem como algumas propriedades importantes para o cálculo dos resultados finais. Realizam-se as simulações numéricas em ordem de complexidade crescente em conjunto com as subsequentes comparações. Inicialmente examinam-se casos clássicos de aerodinâmica: placa, círculo, quadrado, retângulo e aerofólio.

Posteriormente, para aumentar a base de dados, e também no intento de dar continuidade ao trabalho realizado anteriormente no LAC, utiliza-se os dados de um estudo paramétrico. Apresentam-se os dados dos relatórios e modelos seccionais em túnel de vento para comparar os resultados para os três casos de obras reais de pontes estaiadas brasileiras já ensaiadas no Túnel de Vento Joaquim Blessmann: a Ponte Guamá, no anel viário de Belém, PA; a Ponte Paulicéia sobre o rio Paraná, MS/SP; e o Complexo Viário Real Parque ou Ponte Jornalista Roberto Marinho, em São Paulo, SP.

No Capítulo 5 realiza-se a análise comparativa destes resultados e, com o objetivo de contribuir cientificamente, faz-se ainda duas análises numéricas complementares: uma para diferentes configurações de ângulos em um dispositivo aerodinâmico de borda do tipo nariz de vento e outra para uma sugestão à norma de vento relativa às seções transversais de pontes com configuração tradicionalmente utilizada como de vigas em caixão fechado e em múltiplos T.

No Capítulo 6 resumem-se as conclusões e sugestões decorrentes do trabalho.

Finalmente, apresentam-se as Referências dos autores citados no texto, a bibliografia consultada, onde se encontram os títulos recomendados sobre os assuntos abordados.

Os dados e resultados em tabelas e os gráficos comparativos, relativos aos dados de túnel de vento e numéricos, encontram-se resumidos no Apêndice 1. Duas seções com características geométricas são apresentadas no Apêndice 2 como exemplos de resultados parciais da entrada de dados no programa.

As ilustrações (fotos, gráficos ou tabelas) sem citações da fonte são do acervo pessoal do autor ou do LAC.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PONTES

Dentro do estudo das estruturas na construção civil destacam-se as estruturas especiais, mais sensíveis aos carregamentos transversais por se tratarem de estruturas lineares, onde o problema de flexibilidade e deformações é mais evidente. Esta particularidade permite o estudo de algumas características relativas somente à sua seção transversal, exatamente como acontece em relação às direções principais dos ventos e os fenômenos a elas relacionados.

Neste estudo abordam-se as pontes, muitas vezes classificadas como Obras de Arte Especiais (OAE) que têm sempre uma dimensão muito superior às demais, principalmente devido às características de seu carregamento principal, que é móvel e sendo assim causa solicitações não-permanentes. Este trabalho, mais especificamente, trata de comparações de casos clássicos de aerodinâmica, específicos de pontes e finaliza com exemplos de pontes estaiadas.

2.1.1 Pontes Estaiadas

Esta solução estrutural de pendurais é muito antiga, com registros arqueológicos egípcios, indígenas e chineses no Tibet. Muito conhecidas popularmente são as pontes pênséis, totalmente suspensas pelos cabos pendentes atrelados ao cabo principal.

Até a primeira metade do século XIX foram construídas pontes híbridas: estruturas pênséis e estaiadas, altamente hiperestáticas, e que foram, na época, dimensionadas por processos empíricos baseados nas experiências anteriores dos projetistas e construtores. A concepção moderna substituiu as correntes ou barras por cabos de aço protendidos com elevadas tensões, sendo o primeiro registro de aplicação exclusiva de estais em 1951, na França.

Com o passar dos anos a tecnologia de projeto foi mudando de poucos estais muito espaçados para múltiplos estais pouco espaçados e, modernamente, para a suspensão total do tabuleiro da ponte pelos estais. No exterior, nas últimas décadas, as pontes estaiadas evoluíram muito e se tornaram a solução mais viável economicamente para vãos livres da ordem de 100 a 1.000m e até 1.500m no caso de híbridas. O exemplo mais célebre no momento é *Le Viaduc de Millau*, Virlogeux (2006), uma ponte estaiada de múltiplos vãos, totalizando 343m de altura em uma das torres e 2.460m de extensão.

2.1.1.1 Pontes Estaiadas no Brasil

Pontes ou viadutos estaiados são adequados para transpor a grande maioria de nossos cursos de água, rodovias e avenidas quando estas são de largura considerável. Na geografia brasileira destaca-se a abundância de rios, sendo possível o emprego da navegação na grande maioria e sendo muitos deles oriundos de bacias hidrográficas bastante amplas, com grandes fluxos e enorme variabilidade no nível da água.

O Brasil, de grande cultura no uso do concreto protendido, tinha uma carência do uso mais adequado de cordoalhas externamente às seções, como estais ou até mesmo como elementos de protensão externa. Isto decorria de problemas de proteção e manutenção que inibiram investimentos em soluções deste tipo por muitos anos. Entretanto, com a nacionalização da tecnologia de fabricação e instalação de estais, com algumas décadas de atraso, nosso país entrou na era de construção de pontes modernas suportadas por cabos. Diversas pontes (figura 1) e passarelas com esta solução já foram construídas no país e muito se têm estudado sobre elas nos ambientes acadêmicos e profissionais.



Figura 1: Ponte Eng. Jamil Sabino e estação de trem / SP

Métodos construtivos mais econômicos, planejados, ou até complicados, porém ecologicamente mais corretos, vêm sendo empregados e mostram a tendência a uma ampliação da gama de estudos que são cada vez mais específicos e de grande complexidade

nos projetos destas pontes. Muitas vezes a solução empregada na obra depende e muito da tecnologia disponível para as etapas de análise e construção.

Com um competitivo custo global a solução de ponte estaiada também vem sendo muito apreciada pela considerável beleza que pode ser obtida neste tipo de obra, atendendo aos padrões brasileiros de arquitetura arrojada e necessidade de obras monumentais ou marcos nos grandes centros urbanos.

2.2 ENGENHARIA DO VENTO

Aerodinâmica conforme Simiu (1996) é o estudo do movimento de fluidos gasosos relativo às suas propriedades e características e às forças que exercem em corpos sólidos neles imersos. O vento é o movimento do ar sobre a superfície terrestre causado pelas diferenças nas pressões atmosféricas produzidas pelas variações locais na temperatura deste ar Blessmann (1990). Na engenharia civil pode-se introduzir simplificações, os problemas são sempre subsônicos, pois as velocidades do vento estão abaixo da velocidade do som; o escoamento pode ser considerado de um fluido incompressível.

O conceito introduzido por Schlichting (2000) de camada limite (*boundary layer*) é válido junto às superfícies e permite, pela divisão em duas áreas distintas, um tratamento mais simplificado e intuitivo das equações integrais diferenciais de Navier-Stokes, que definem o movimento dos fluidos e sua ação sobre corpos. No interior desta camada limite a viscosidade e a fricção do fluido são usualmente importantes e o escoamento é de um fluido viscoso podendo ser relacionado ao número de Reynolds. Normalmente uma lei exponencial é representativa da variação da velocidade média em relação à altura dentro da camada limite atmosférica (figura 2).

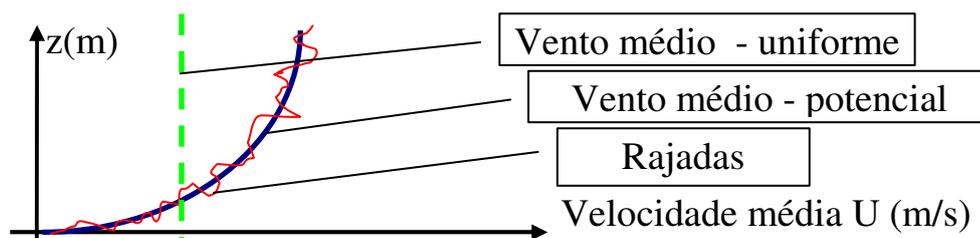


Figura 2: perfil de velocidades do vento

A engenharia do vento estuda as obras que se encontram dentro da camada limite onde há turbulência provocada pela agitação mecânica das partículas de ar. Da agitação interna, natural, resultam registros de velocidade do vento de valores incertos e variáveis (figura 3).

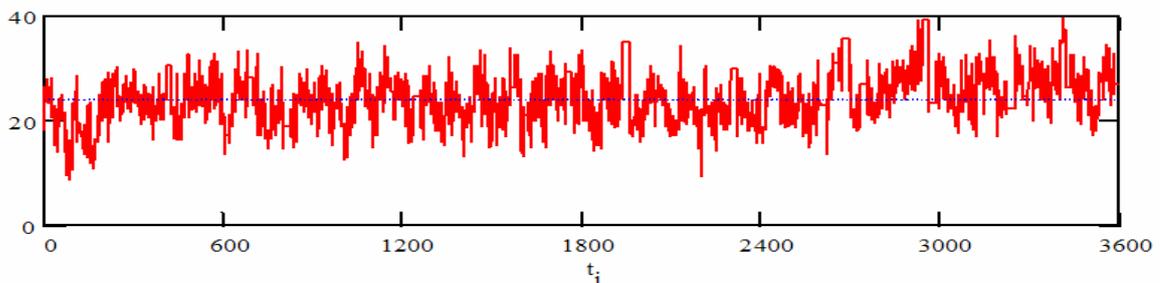


Figura 3: registro da velocidade do vento em um ponto no tempo

Conforme Blessmann (1973) “o estudo da estrutura dos ventos naturais mostra o caráter aleatório da turbulência atmosférica”, sendo assim, aplica-se um tratamento matemático estatístico estocástico (figura 4) devido à falta de dados medidos completos, mas com alguma regularidade, em amostras suficientemente grandes. Como o fenômeno apresenta parâmetros estatísticos que são invariantes e sempre representativos é também designado como um processo estacionário ergódico.

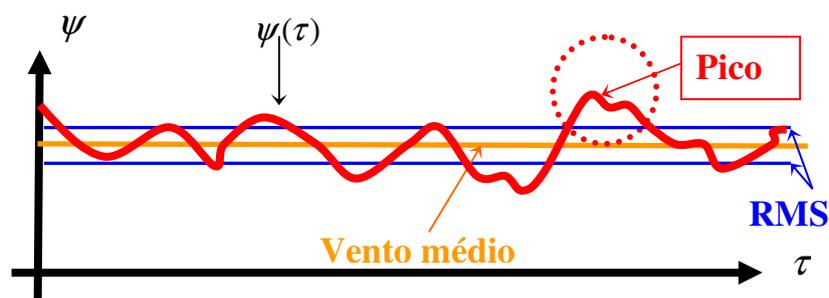


Figura 4: registro do vento no domínio do tempo

O tratamento de camadas limites turbulentas é complicado devido à dependência das variações no tempo das propriedades do fluido e procura-se solução por meio da decomposição de Reynolds entre as componentes média e flutuante, as rajadas. Diversos dados de meteorologia, micrometeorologia e climatologia foram reunidos por Davenport

especificamente para o estudo de estruturas. Novamente Blessmann (1995) constata que as solicitações dinâmicas “dependem da energia cinética contida nas flutuações e de como esta energia se distribui pelas diversas frequências” (figura 5).

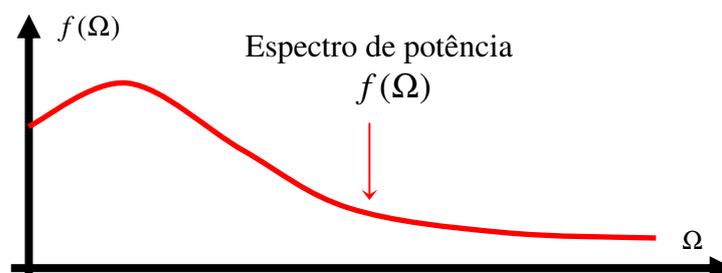


Figura 5: domínio da frequência

Portanto, as propriedades são estudadas pela teoria estatística da turbulência, caracterizada pelo espectro de potência das flutuações de velocidade, pelas correlações espaciais das flutuações em pontos distintos, pelas distribuições da probabilidade e pela intensidade de turbulência das três componentes espaciais destas flutuações. Ainda segundo Blessmann (1973) “A resposta da estrutura depende muito mais da energia contida em uma seqüência de rajadas do que da intensidade de uma única rajada”. As vibrações causadas pela energia cinética das rajadas podem ser consideradas por meio de métodos determinísticos ou probabilísticos, os mais modernos. Dentre estes se destaca o processo de Davenport ou fator de rajada que por meio da admitância aerodinâmica, segundo Blessmann, (2005) “relaciona as dimensões da construção e dos turbilhões incidentes”.

2.2.1 Aerodinâmica de Pontes

O cálculo e o dimensionamento de estruturas se fundamentam, geralmente, em profundos conhecimentos científicos e demonstram grandes conquistas na compreensão do comportamento estrutural dos sistemas. No entanto, o entendimento claro da natureza íntima de alguns fenômenos só é despertado por causa de desastrosas falhas, como no caso das interações entre vento e estruturas. Essa complicada interação leva a instabilidade das construções, e verificam-se problemas mesmo em estruturas simples como postes.

A história da aplicação de conceitos aerodinâmicos à engenharia de pontes iniciou-se em 1879 quando vários estudos foram encomendados para justificar uma tragédia: Uma rajada de vento

tombou a ponte *Firth of Tay*, na Escócia junto com um trem (figura 6). Atualmente é notório que mesmo sendo formada por treliças há resistência da estrutura ao vento, resultando em esforços laterais que devem ser combinados aos demais carregamentos estáticos e de tráfego.



Figura 6: desastre de *Firth of Tay* – 1879 (Bleich, 1948)

Algumas vezes a questão surge antes mesmo da ruína total da estrutura, como quando se observam deformações excessivas ou plásticas, ou ainda quando se verificam problemas de fadiga nos seus componentes. Também que a percepção humana pode ser o limite, conforme os critérios de conforto ao usuário, somente sendo possível ultrapassar estes considerando a perspectiva da interdição temporária da ponte. Acontece que durante séculos as travessias sustentadas por cabos eram “aventuras” e até nos últimos 125 anos problemas aerodinâmicos e aeroelásticos levaram muitas pontes ao colapso, sendo o acidente da primeira ponte de *Tacoma Narrows* (EUA) o mais famoso por ter sido documentado em vídeo (figura 7).

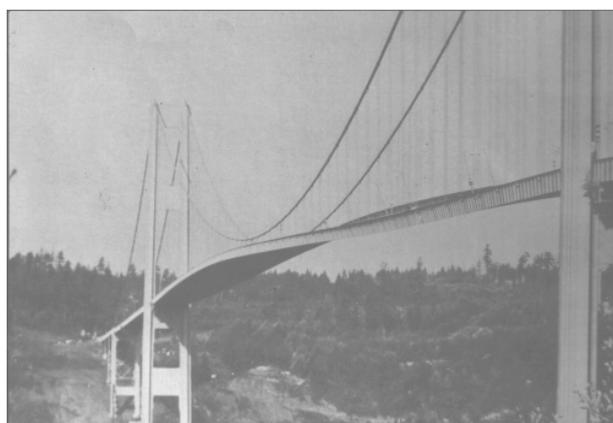


Figura 7: desastre de *Tacoma Narrows* (Ammann, 1941)

Observa-se que são justamente as pontes suportadas por cabos as mais suscetíveis às ações do vento. Em alguns dos casos não são os carregamentos de ventos extremos que ocasionam problemas, mas sim ocorrências mais comuns, com velocidades de vento médias mais baixas, mas que produzem efeitos de ressonância com os modos naturais de vibração da estrutura.

Além disto, as pontes são formadas por corpos não-aerodinâmicos, também designados de corpos rombudos, que são aqueles que apresentam pontos de separação ou descolamento da camada limite, causando um processo conhecido como transição da camada limite, que pode provocar uma esteira a sotavento ou a presença de vórtices, introduzindo mais forças dinâmicas. Ao contrário dos corpos aerodinâmicos estes provocam grandes alterações no escoamento.

A experiência recente mostra que em pontes longas a ação aerodinâmica pode ser o fator determinante para as exigências de rigidez no tabuleiro. Igualmente, podem ser enfrentados problemas nos cabos, nas torres das pontes, se estas forem suficientemente flexíveis, e excessos de carregamento de vento transversal sobre o tráfego. Concluí-se assim que uma das condições essenciais no projeto moderno destas pontes é a verificação contra níveis significativos de vibrações induzidas pelo vento.

Estes problemas podem seguir a classificação dos fenômenos por um agrupamento de acordo com os tipos de efeitos para os problemas aerodinâmicos e aeroelásticos de pontes (Tabela 1).

Tabela 1: tipos de efeitos do vento em estruturas

Estático	Efeitos dos valores médios dos esforços de vento	
	Instabilidade Estática	Divergência rotacional Flambagem lateral
Dinâmico	<i>Instabilidade Dinâmica</i>	<i>Galope</i> <i>Drapejamento</i>
	<i>Excitação por vórtices</i>	
	<i>Respostas devido à turbulência (rajadas, martelamento)</i>	

(fonte: LAC)

2.2.1.1 Trabalhos na Área

No exterior são muitos os trabalhos encontrados sobre vento em estruturas e coeficientes aerodinâmicos, específicos ou não para pontes. Leonardo da Vinci, Galilei, Huygens e Newton foram os primeiros a observar problemas aerodinâmicos e estudá-los. Considera-se Reynolds, Strouhal, Lanchester e Rayleigh os pioneiros, porém aí com trabalhos voltados a ciência de voar. Já no final do século XIX, Eiffel realizava ensaios em queda livre de modelos de suas estruturas para analisar a resistência destes ao vento. O primeiro túnel de vento é creditado a Frank H. Wenham, na Inglaterra, em 1871, os primeiros estudos em túneis documentados são de Kernot e Mann, na Austrália, em 1891.

Posteriormente, Rosenhead (1931) e Theodorsen (1935) realizaram estudos teóricos para engenharia aeronáutica que continuam como base científica da atualidade. Um dos primeiros a se preocupar com o drapejamento foi Bleich (1948) e a aeroelasticidade, foi introduzida como ciência por Fung (1955). Somente mais tarde Scanlan (1971) propôs o uso dos coeficientes de drapejamento (*flutter derivatives*) e posteriormente, em conjunto com Simiu (1978), propuseram com estes mesmos coeficientes um procedimento para encontrar a condição de velocidade limite de vento a partir da qual a estabilidade do tabuleiro da ponte não poderia mais ser garantida.

O uso para o projeto de construções foi reunido em livro por Podolny (1976), as bases das técnicas de modelagem para túneis de vento foram compiladas por Reihold (1982) e complementadas com os estudos meteorológicos e probabilísticos de Davenport (1985). Leonhardt (1987) realizou os primeiros estudos aplicados em pontes com análises mais completas, porém o trabalho de King (1990) é mais recente com técnicas mais atuais.

No cálculo numérico em geral Brooks (1982) realizou uma colaboração nos métodos estabilizados e Okajima (1982) e Bosch (1998) deram importantes contribuições para corpos de seção simples. Mais recentemente Murakami (1995) e Bouris (1999) desenvolveram simulações de grandes vórtices (LES) e Frandsen (1999) realizou um importante trabalho de análise para pontes. Os trabalhos de CFD sob os quais estão baseados os métodos deste trabalho encontram-se citados na seção específica do método. Porém anteriormente Chorin (1978), Leonard (1980), Beale (1982), Perlman (1985), Van Dommelen (1989) e Degond (1989) já citavam a solução com o uso das características dos vórtices.

No LAC/UFRGS desenvolve-se há muitos anos pesquisas na área de coeficientes aerodinâmicos; especificamente para pontes, nos últimos anos, realizaram-se estudos técnicos para as obras que são comparadas neste trabalho, resultando em diversos relatórios técnicos e alguns trabalhos científicos. Outros estudos relativos à aerodinâmica foram realizados, alguns envolvendo formas simples, torres de transmissão de energia, coberturas, edifícios altos, conforto de pessoas, dispersão de pó e poluentes. Salientam-se os trabalhos importantes para pontes como os de Brito (1995), Loredou-Souza (2002), Loredou-Souza (2004), Rocha (2002), Rocha (2003), Limas (2003), Limas (2004) e Paluch (2002), Paluch (2003), Paluch (2004), Paluch (2005). Trabalhos sobre a obtenção por simulação numérica de coeficientes aerodinâmicos têm sido desenvolvidos também pelo PPGEC da UFRGS com o uso de uma formulação Arbitrária Lagrangeana-Euleriana (ALE) e discretização no MEF no CEMACOM por Awruch (2002), Braun (2002), Braun (2003), Braun (2004), Braun (2005).

Também outras universidades brasileiras têm procurado analisar problemas aerodinâmicos. Na USP, Mazzili (1998) e Ramos (1999) da Escola Politécnica, trabalharam sobre os modelos numéricos necessários para a análise simplificada de pontes estaiadas. A UFRJ tem trabalhos na área de coeficientes aerodinâmicos de Pfeil (1993) e Hallak (2002). Além disto, a COPPE realizou o monitoramento, análise e instalação de atenuadores para as vibrações apresentadas na Ponte Rio - Niterói (figura 8), este um evidente exemplo de que nem só as estruturas suportadas por cabos devem ser analisadas criteriosamente ao vento. Trata-se do exemplar nacional de maior reconhecimento em problemas relacionados à interação estrutura e vento. O caso das oscilações do vão central de aço ortotrópico foi solucionado por um sistema de controle via amortecimento massa-mola desenvolvido por Battista (2000).



Figura 8: Ponte Presidente Costa e Silva – RJ

2.3 CARACTERÍSTICAS AERODINÂMICAS DE PONTES

Admitida a hipótese de escoamento bidimensional sobre tabuleiros de pontes estes são caracterizados aerodinamicamente em sua seção transversal pelos Coeficientes aerodinâmicos estáticos (C) de Arrasto (*Drag*), Sustentação (*Lift*) e Momento (*Moment*) de Torção. Respectivamente (C_D) (C_L) (C_M) ou (C_A) (C_S) (C_T) nas equações 2.1, 2.2., 2.3. Também denominados fatores de forma estes são normalmente encontrados na sua forma adimensional, derivada das forças de arrasto (D), sustentação (L) e momentos torçores (M) que são normalizados para possibilitar transportar a escala no estudo dos problemas aerodinâmicos. Usualmente essa escala considera a largura do tabuleiro B a densidade do ar (ρ) e a velocidade do vento no escoamento U (figura 9).

$$C_D = C_A = \frac{\bar{D}}{\frac{1}{2}\rho U^2 B} \quad (\text{equação 2.1})$$

$$C_L = C_S = \frac{\bar{L}}{\frac{1}{2}\rho U^2 B} \quad (\text{equação 2.2})$$

$$C_M = C_T = \frac{\bar{M}}{\frac{1}{2}\rho U^2 B^2} \quad (\text{equação 2.3})$$

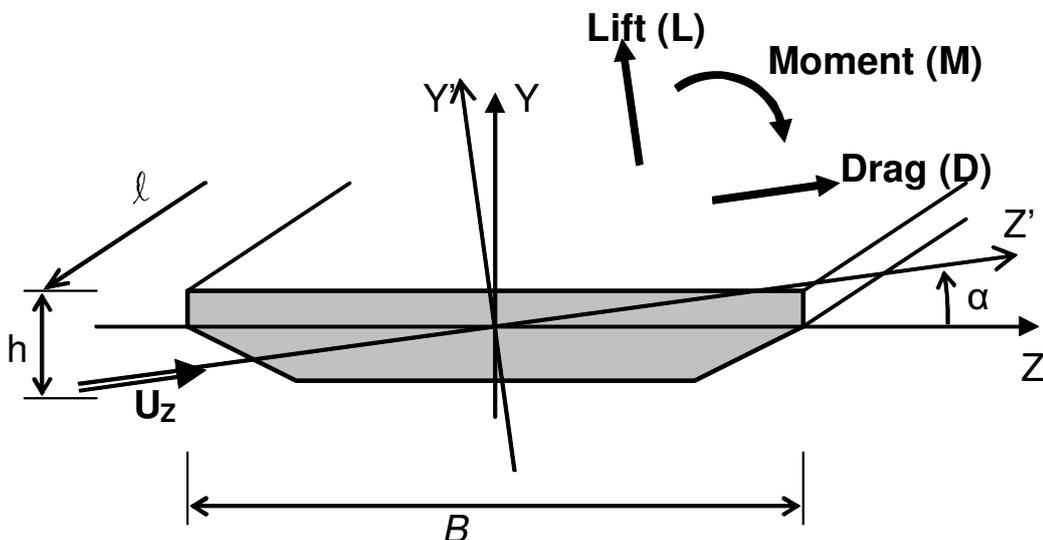


Figura 9: eixos de referência e forças sobre o tabuleiro da ponte

São também fatores importantes o Número de Reynolds, Re (equação 2.4) e o Número de Strouhal, St (equação 2.5), onde ν é a viscosidade cinemática, f é a frequência e h representa a altura da seção transversal.

$$Re = \frac{UB}{\nu} \quad (\text{equação 2.4})$$

$$St = \frac{fh}{U} \quad (\text{equação 2.5})$$

Freqüentemente analisa-se somente o tabuleiro da ponte sem tráfego. Porém, em circunstâncias especiais pode-se analisar adicionalmente ao vento o tabuleiro da ponte com tráfego e também os demais elementos estruturais como pilares, torres, cabos e outras partes. Em qualquer caso o resultado obtido na análise das seções são coeficientes de arrasto, sustentação e momento de torção como funções do ângulo de incidência do vento com o eixo principal: $C_D(\alpha)$, $C_L(\alpha)$, $C_M(\alpha)$. Estes dados podem ser isolados, em tabelas ou em gráficos em função deste ângulo de ataque (α), chamados então de diagramas de forma (figura 10).

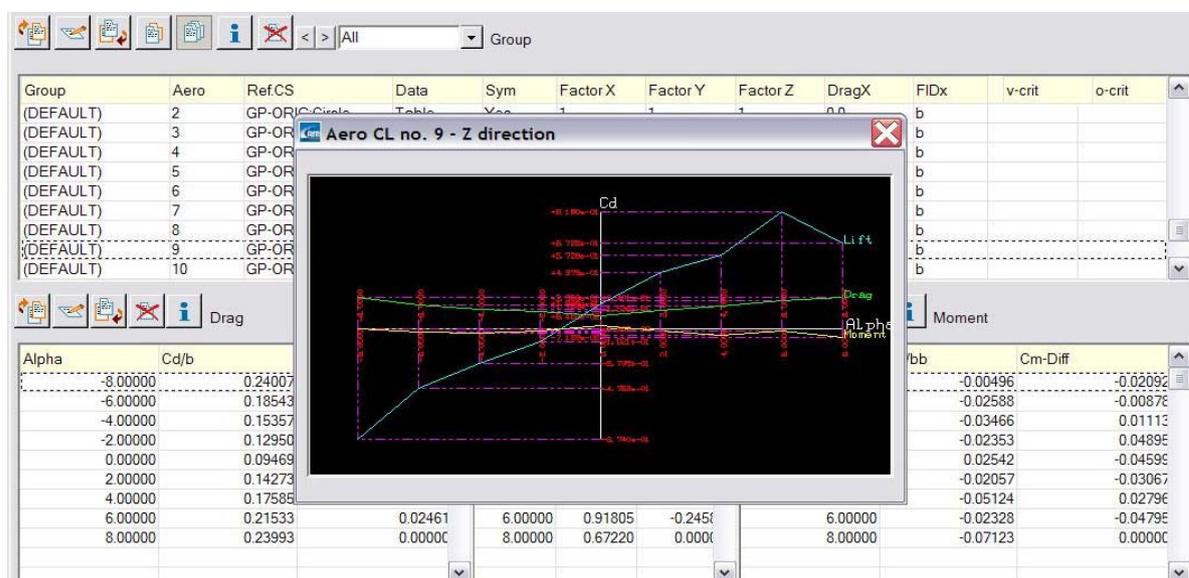


Figura 10: resultados em tabelas e diagramas dos coeficientes em função de α

Mediante a redistribuição destes coeficientes pelo uso dos fatores explicados no capítulo anterior obtêm-se os carregamentos estáticos que são a base para o cálculo da análise da resposta ao vento e condições de estabilidade. O objetivo do módulo neste programa é buscar

uma solução aproximada que proporcione aproveitar ao máximo a capacidade da seção transversal da estrutura ainda na fase de projeto e possibilite assim evitar grandes modificações em fases de projeto posteriores aos ensaios em túneis de vento e permitindo estudos de viabilidade, projetos básicos e fases iniciais de projetos de pontes mais realistas.

2.3.1 Métodos de Obtenção dos Coeficientes

De acordo com Scanlan (1992) “em princípio, testes de modelos seccionais podem fornecer os dados básicos para um estudo completo da resposta da ponte” e existem três tipos de análises de problemas aerodinâmicos: o método experimental, o método analítico e o método numérico.

Os objetivos básicos dos modelos seccionais são comprovar a estabilidade aerodinâmica, verificar a performance a excitação por vórtices, medir os coeficientes de carregamento de vento em um estado estável e extrair os derivativos aerodinâmicos das configurações possíveis para o tabuleiro da ponte. Na falta de informações sobre o comportamento em terceira dimensão deve-se, em alguns casos, usar essas informações para ressaltar a necessidade de ensaios de modelos completos de toda a estrutura.

Em aplicações práticas o problema é como obter os coeficientes adimensionais desejados para os modelos seccionais. Enquanto os exames por meio de ensaios em túneis de vento e fórmulas clássicas estão já bem estabelecidos, por outro lado, os métodos computacionais tem sido foco de muitas pesquisas acadêmicas e têm, com o aumento do poder de processamento, progressivamente chamado a atenção. Analisare-se brevemente estas possibilidades de fontes de coeficientes aerodinâmicos.

2.3.2 Métodos Analíticos

Soluções analíticas são baseadas em teorias matemáticas desenvolvidas que representem os fenômenos estudados de uma maneira bastante simplificada por meio até de modelos empíricos. A apresentação pode ser em fórmulas, tabelas ou gráficos. Formulações clássicas de Bleich, Theodorsen, Farquharson, Scanlan e da teoria linear do martelamento são muito utilizadas, porém têm aplicação restrita aos casos já solucionados e quando as simplificações por semelhanças não comprometem o problema examinado. As perguntas cruciais são: Existe a seção necessária ou uma muito parecida? Quais as simplificações a serem adotadas?

O principal problema é a falta de estudos paramétricos, o que compromete a representatividade das seções disponíveis na literatura. Além disso, de qualquer maneira os derivativos aerodinâmicos precisam ser determinados com outro método.

Usualmente estes métodos não capturam todas as características físicas dos complexos problemas de dinâmica dos fluidos apresentados em análises de corpos rombudos sendo aplicáveis somente em etapas muito preliminares. Por outro lado, o estudo analítico da estrutura como um todo, e não do modelo seccional, utiliza dados provenientes dos outros métodos tornando estes métodos complementares entre si.

2.3.3 Métodos Experimentais

“Nos casos em que a edificação, por suas dimensões ou forma, causa perturbações importantes no escoamento ou quando há uma perturbação notável causada por obstáculos vizinhos é recomendável recorrer a ensaios em túnel de vento” segundo Blessmann (2005). A complexidade geométrica das estruturas ou da vizinhança causa uma conseqüente complexidade na forma do escoamento e da distribuição de pressões aerodinâmicas sobre a estrutura, impedindo que soluções simplificadas e genéricas, como aquelas apresentadas em normas e na literatura técnica, sejam aplicáveis.

Décadas atrás eram utilizados os mesmos túneis aerodinâmicos de investigações aeroespaciais; porém, foi descoberto que estes não representavam corretamente todas as propriedades das correntes de ar naturais presentes na camada limite atmosférica. Daí a necessidade da construção de um túnel aerodinâmico de camada limite, *boundary layer wind túnel* (figuras 11 e 12), que busca, como escreveu Blessmann (1973) “uma boa reprodução das características do vento natural”.



Figura 11: túnel de vento Joaquim Blessmann no LAC – PPGEC/UFRGS

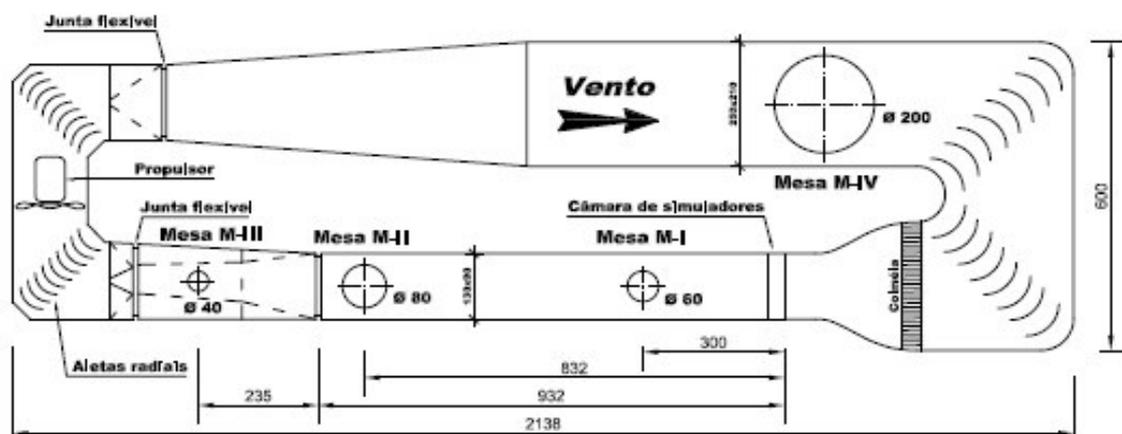


Figura 12: túnel de vento de camada limite de retorno fechado

As informações necessárias são obtidas por estudos das condições de vento no local da obra e através de mapas destas investigações. Estas particularidades, em conjunto com as características básicas do vento, são replicadas em laboratório por meio do emprego simultâneo de dispositivos que alteram estrategicamente o escoamento dentro da câmara de ensaios. Dentre estes mecanismos artificiais de simulação destacam-se os blocos de rugosidade no piso do túnel; as barreiras, ou placas dentadas (figura 13); as grelhas ou telas de malha quadrada, constituídas de barras de seções transversais retangulares, e os emissores de jatos de ar transversais.



Figura 13: simuladores de Counihan no piso da câmara de ensaios e modelo

Os testes em túneis de vento são realizados por meio de modelos reduzidos, que são construídos em madeira, alumínio e acrílico, sendo simulados todos os detalhes significativos

da ponte, incluindo guarda-corpos e guarda-rodas que são construídos em madeira balsa, MDF, poliamida e alumínio.

A maneira mais comum de testar pontes é por meio de modelos seccionais de tabuleiros de pontes, rígidos (figura 14), com escalas da ordem de 1:10 à 1:100. Eles consistem numa reprodução aerodinâmica da configuração proposta, de acordo com as leis de semelhança, em uma escala convenientemente escolhida conforme as características do vento simulado e as dimensões da mesa em uso.



Figura 14: modelo seccional de pressões em ângulo com o escoamento

Os testes são realizados ajustando-se a inclinação do modelo relativamente ao escoamento médio do vento e os coeficientes são medidos para ângulos de incidência, ou de ataque, do vento variando entre -8° e $+8^\circ$, com intervalos de 1° .

Os modelos são testados à ação do vento tanto em escoamento suave como em escoamento turbulento para a medição dos coeficientes aerodinâmicos estáticos, no modelo de pressões, e para o estudo da resposta dinâmica da ponte, no modelo dinâmico.

As informações geradas pelos modelos seccionais constituem subsídio básico às verificações de dimensionamento das estruturas tais como propostas; isto significa que as estruturas devem ser inicialmente dimensionadas para resistirem aos esforços medidos através dos modelos reduzidos rígidos. Estas informações seriam por si só suficientes não fossem algumas estruturas, como as pontes, por seu tipo e suas dimensões, naturalmente propensas a respostas ressonantes, o que necessita ser investigado mais profundamente em outros tipos de modelos.

Pode-se ter como objetivo o estudo da resposta dinâmica de partes da estrutura isolada, como o pilar, uma vez que esta situação necessariamente ocorrerá durante a construção. Este estudo

é importante na medida em que oscilações excessivas do mastro podem dificultar a locação e instalação dos estais, ou até mesmo a construção das extremidades superiores do próprio mastro. Têm-se nestes casos modelos de forças (figura 15) ou modelos de pressões (figura 16), porém não seccionais.



Figura15: modelo rígido do mastro para medir forças com célula de carga



Figura 16: modelo rígido do mastro no túnel de vento para medir pressões

No caso de modelos de forças a da captura de dados é realizada direto de balanças de forças eletronicamente instrumentadas com células de carga devidamente calibradas (figura 17).



Figura 17: detalhe da calibragem da célula de carga

Nestes obtêm-se diretamente as forças ou acelerações envolvidas e partir destas são determinadas amplitudes de vibração e as respectivas magnitudes de velocidades críticas para as condições de instabilidades.

2.3.4.1 Modelos seccionais de pressões

O modelo de pressões é confeccionado de forma a reproduzir apenas aspectos arquitetônicos relevantes da estrutura e do escoamento (figura 18).

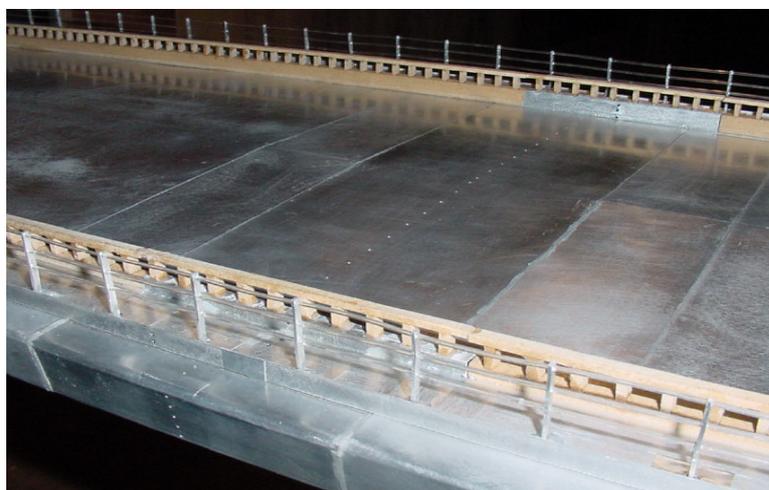


Figura 18: modelo seccional de pressões

A seção transversal média ou outro modelo completo são instrumentados com várias tomadas de pressão estática (figura 19), localizadas em pontos criteriosamente escolhidos de modo a possibilitar um levantamento da distribuição das pressões em toda a superfície externa. Como em ensaios estáticos em túnel de vento usualmente vai se variando o ângulo de incidência, a turbulência e a velocidade de vento as pressões estáticas efetivas médias medidas resultam em milhares de pontos de medida de pressões.

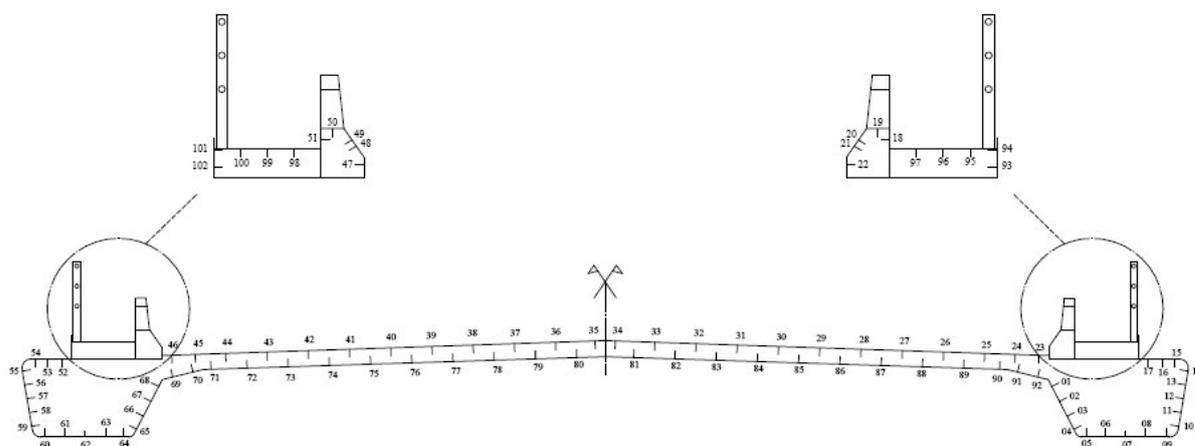


Figura 19: distribuição das tomadas de pressão

A partir dos registros das séries temporais são calculados os coeficientes de pressão externa média ao longo da secção transversal, a distribuição. A medição das forças de arrasto e sustentação, bem como do momento de torção atuantes na secção, é realizada através da integração destes coeficientes de pressão externa.

2.3.4.2 Modelos seccionais dinâmicos

Para estudos da resposta dinâmica do tabuleiro são utilizados modelos que são mais sofisticados e apresentam características aerodinâmicas conforme leis de semelhança com baixa relação entre massa e rigidez. Estudos prévios numéricos de análise modal são realizados para prever o comportamento da estrutura e utilizados para representar o comportamento do modelo completo em uma análise seccional em túnel de vento. Essas características dinâmicas são impostas por um sistema externo por meio de apoios elásticos e de complementação de massas (figura 20).



Figura 20: detalhe do apoio do modelo seccional dinâmico

2.3.4.3 Modelos seccionais tensionados

Modelo seccional dinâmico internamente protendido (figura 21) ou modelo seccional tensionado (*taut strip model*) são construídos em escala de 200 até 300 vezes menor do que o real. Empregam-se cabos internos em diferentes posições que buscam simular a rigidez vertical, lateral e torcional. A força utilizada para tensionar e a posição dos cabos, em conjunto com a massa dos segmentos da seção transversal e o vão, deve ser representativa dos modos principais de flexão (senoidais) fornecendo indicações do comportamento em três dimensões. A técnica é aplicada como alternativa ao teste de um modelo completo e dela resultam informações sobre os modos de vibração isoladamente que podem ser utilizados para prever o comportamento completo da ponte.



Figura 21: modelo seccional tensionado (King, 1990)

2.3.4.4 Modelos aeroelásticos

Modelos completos aeroelásticos (figura 22) que representam a estrutura como um todo em três dimensões são normalmente construídos em escala da ordem de 1:100 à 1:500. Estes fornecem indícios do comportamento dinâmico das estruturas completas, considerando-se efeitos de interação entre tabuleiros, estais e mastro nas três dimensões.



Figura 22: modelo aeroelástico completo

O que se deseja é conhecer as amplitudes de oscilação que deverão ocorrer em virtude de diferentes efeitos aerodinâmicos, conforme a velocidade do vento, tais como ressonância por despreendimento de vórtices, drapejamento (*flutter*) e resposta a turbulência atmosférica.

Diferentemente dos modelos rígidos, os modelos aeroelásticos são instrumentados com diversos canais de acelerometria que fornecem medidas das amplitudes de oscilações associadas a diferentes efeitos aerodinâmicos, conforme a velocidade do vento.

São utilizados pares de acelerômetros (figura 23), sendo os respectivos sinais convertidos em translação vertical e rotação em relação ao eixo do tabuleiro ou do mastro. Simultaneamente é feito um registro da velocidade do escoamento, medida por meio de um anemômetro de fio quente.

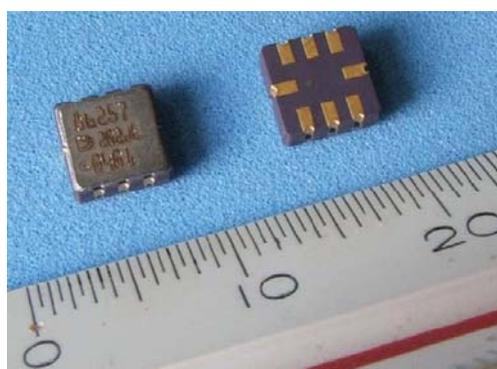


Figura 23: acelerômetros biaxiais MEMS para instrumentação

Em pontes suportadas por cabos a resposta do pilar à turbulência atmosférica pode ter uma participação importante nos deslocamentos ao nível dos tabuleiros e este efeito não poderia ser detectado através de um modelo seccional bidimensional, o que demonstra a importância da realização de um estudo em modelo completo. Além disso, em pontes estaiadas observa-se que os estais dissipam energia tornando o comportamento da estrutura extremamente não-linear.

As três grandezas de base, cujas escalas se impõem a priori, são: o comprimento, a massa específica e a aceleração. Em virtude da importância das forças gravitacionais para equilibrar as tensões no estaiamento, adota-se uma semelhança no chamado número de Froude. Após a definição de três grandezas de base, todas as demais grandezas físicas tornam-se derivadas, devendo ser respeitadas ou interpretadas conforme o caso.

O projeto do modelo aeroelástico deve ter como objetivo reproduzir as características dinâmicas e aerodinâmicas da estrutura em questão. Do ponto de vista aerodinâmico, observa-se que sejam respeitadas as semelhanças de geometria e, na medida do possível, de número de

Reynolds. Do ponto de vista dinâmico, devem ser reproduzidas as frequências e formas modais de vibração livre relevantes.

2.3.4.5 Análises

Os procedimentos utilizados no método experimental evoluíram muito com o advento da captura e análise de dados baseada em computador (figura 24) e cada vez mais a velocidade e os custos têm diminuído neste tipo de análise. Atualmente, em ensaios de túnel de vento, muitas vezes são medidas outras características, que estão relacionadas àquelas citadas anteriormente como fundamentais, tais como a intensidade de turbulência e função de autocorrelação.



Figura 24: aquisição de dados

A técnica experimental de simulação em túnel de vento de camada limite tem como principal fraqueza a visualização do escoamento, possível apenas pela introdução de fumaça, óleo, sabão ou outras partículas em camadas no escoamento. Novamente a necessidade de complementação permite o uso em paralelo de métodos numéricos.

Além disto, apesar de toda tecnologia, muitos dos procedimentos de cálculo, após a aquisição e interpretação de resultados seguem pelo caminho traçado por modelos analíticos, destacando mais uma vez a interação entre todos os métodos que ocorre nas aplicações práticas.

Destaca-se então a necessidade de todos os modelos terem semelhança geométrica, cinemática e até dinâmica, conforme a obrigatoriedade. Todavia “Isto nunca é totalmente

possível” segundo Tanaka (1992) e, por conseguinte, imprecisões são incorporadas ao processo. A equipe técnica do túnel de vento procura lidar com estes erros de maneira criteriosa, relaxando ou distorcendo parâmetros menos influentes e interpretando os resultados.

Na maioria dos casos diversos modelos são criados e experimentados de diferentes formas de modo a complementarem as informações e até mesmo atuarem de maneira que alguns resultados sejam adicionais a outros, confirmando os dados obtidos por procedimentos distintos.

Problemas de escala ocorrem quando muitos parâmetros de similaridade são relaxados ou quando há discrepâncias grandes no número de Reynolds representativo da seção como um todo e de pequenos detalhes, sendo necessário recorrer aos túneis de alta velocidade e pressão.

A validação dos resultados obtidos em túneis de vento vem sendo observada no exterior por meio da instrumentação e medição em campo de obras previamente analisadas e têm apresentado bons resultados.

Modelos numéricos computacionais podem e devem colaborar para corroborar os resultados obtidos em todas as possíveis fases aumentando a qualidade e confiabilidade das análises.

A análise da incerteza do modelo adotado em projeto nos leva a uma verificar o custo de um ensaio em túnel de vento, que pode significar até 0,5% do valor da estrutura e 0,25% do valor final da obra. Portanto conclui-se que a economia realizável pela não execução desta etapa de projeto não se justifica, afinal o nível de segurança acrescentada à análise estrutural por meio destas informações aumenta e muito a confiabilidade no resultado final.

Mesmo assim, trata-se de um procedimento caro para a grande maioria das obras, principalmente em fase de projeto e demasiadamente trabalhoso e demorado para estudos paramétricos. Provavelmente neste ponto é que o método numérico possa dar a maior assistência ajudando a aumentar a quantidade de dados disponíveis.

Conforme Wardlaw (1992) “O túnel de vento é uma ferramenta indispensável para o entendimento dos fenômenos aerodinâmicos e a busca da solução de problemas aeroelásticos”. Logo, todas as obras de grandes pontes devem passar por testes em túneis de vento. Até os dias de hoje os estudos experimentais em túneis de vento seguem sendo

reconhecidos como o mais preciso e seguro método de análise de propriedades aerodinâmicas e efeitos da interação entre fluido e estrutura.

2.3.4 Métodos Numéricos

Usualmente os estudos aerodinâmicos de pontes são realizados através de modelos analíticos de força dinâmica de vento, que utilizam coeficientes aerodinâmicos ou aeroelásticos obtidos de ensaios experimentais em túnel de vento. Porém, com a utilização de recursos mais modernos de processamento de dados via computador, como o MEF - Método dos Elementos Finitos (*FEM – Finite Element Method*), teve início as substituições de simulações experimentais por simulações numéricas também na área de mecânica dos fluidos. Até pouco presente momento a grande colaboração está na visualização do escoamento ou dos vórtices do escoamento (figura 25) junto à seção transversal, importante para o entendimento do processo físico.

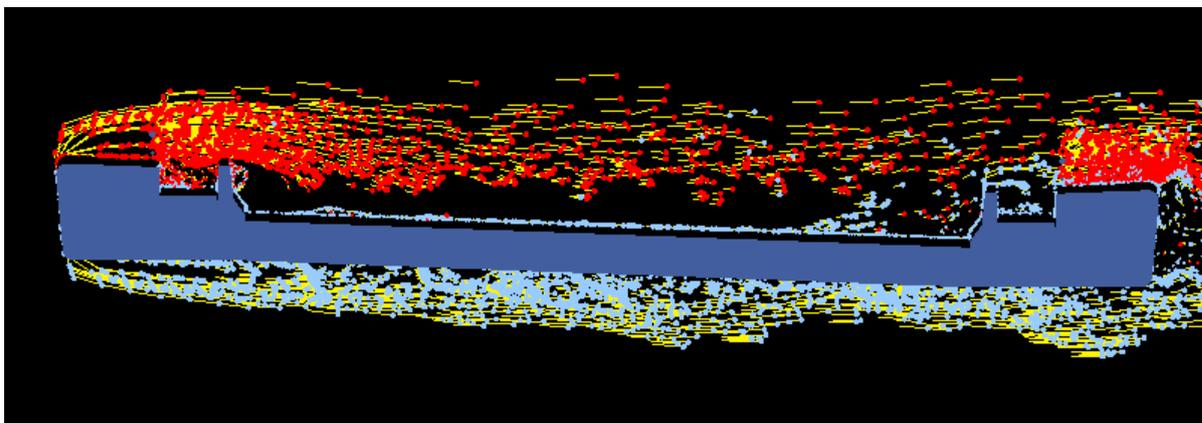


Figura 25: visualização dos vórtices do escoamento

Foi então criada uma nova subdivisão no estudo de vento: a dinâmica dos fluidos computacional (*CFD*) ou fluidodinâmica computacional, cujos modelos procuram a semelhança das realizações dos ensaios. Essa área de pesquisa experimentou um crescente nas últimas duas décadas devido principalmente ao processamento de dados cada vez mais rápido, barato e disponível.

Na última década foi introduzida a engenharia de vento computacional (*CWE - Computational Wind Engineering*) que procura solucionar especificamente os problemas de interação entre fluido e estrutura e cujas melhorias foram muito significativas. Os cálculos para

a solução geral são complementados por algoritmos adicionais que levam em conta os processos nas escalas menores e o principal problema é construir uma discretização correta para representar o contínuo.

Existem vários métodos gerais computacionais disponíveis como Volumes Finitos (*FVM*) e Diferenças Finitas (*FDM*) e da mesma forma muitas técnicas especiais como *RANS*, *LES*, e *DES* outras. Todos os métodos derivados têm que atender as exigências, ou requisitos numéricos, de serem baseados em um modelo físico razoavelmente detalhado, ter um modelo numericamente computacionalmente factível e as equações discretas do modelo devem permitir uma solução estável e precisa.

Contudo, a confiabilidade nos modelos é, ainda hoje, relativamente pequena e a utilidade prática, mesmo de códigos consagrados como *FLUENT* de Boysan (1982), *NEWT* de Morghental (2000) e *Spectrum* de Frandsen (1999), muito reduzida pela até então grande necessidade de poder de processamento computacional na maioria das análises. A pergunta é se existe um modelo aplicável, factível e a resposta é que existem bons resultados, todavia os métodos clássicos não possuem a performance computacional necessária.

2.3.4.1 Método dos Elementos de Contorno

Nesta área destaca-se então os melhoramentos que ocorreram por meio do método dos elementos de contorno (*BEM - Boundary Element Method*) que é essencialmente uma maneira de resolver equações diferenciais parciais. Trata-se de uma discretização da equação integral que é matematicamente equivalente à equação diferencial parcial original e relaciona a solução no contorno com pontos no domínio. Como somente o contorno do domínio de interesse requer essa discretização o ganho em termos computacionais é considerável. Menor tempo de processamento, menor custo e menores problemas de escala são as grandes vantagens.

A geração de malhas, os custos indiretos de processamento e a expectativa de que métodos numéricos sejam fornecedores de respostas rápidas vem gerando insatisfação. Resultante disto é que desde o aumento rápido dos anos noventa as pesquisas e publicações nesta área vem diminuindo. Mas se a solução ainda não foi encontrada, o que acontece? Queda de interesse não deveria haver uma vez que a complexidade dos problemas ainda aumenta.

2.3.4.2 Método dos Vórtices Discretos

Os métodos dos vórtices são técnicas de simulação de escoamentos que utilizam os vórtices como elementos computacionais que imitam a estrutura física da turbulência. Um vórtice é um escoamento, normalmente turbulento, em forma de parafuso ou de movimento espiral, no entorno de um eixo, com linhas de correntes fechadas (figura 26).



Figura 26: vórtice criado na passagem da asa do avião revelado pela fumaça (site da NASA)

No final da década de 80, Greengard (1987), introduziu o *Fast Multipole Method (FMM)* e a principal dificuldade, de computar a velocidade dos vórtices, foi muito facilitada aumentando significativamente a velocidade de cálculo das forças em um problema de vários corpos interagindo entre si. A partir daí, utilizando apenas uma pequena fração do custo computacional, se comparado com os demais métodos, Larsen (1992), Larsen (1998) e Walther (1997) aperfeiçoaram o código *DVMFLOW* e o utilizaram em alguns estudos que buscaram a obtenção destes mesmos coeficientes aerodinâmicos ou aeroelásticos de seções transversais e obtendo bons resultados.

Procedimentos baseados nestes métodos foram aplicados com sucesso desde o início dos anos setenta, uma ótima revisão dos métodos em geral até aquele momento foi realizada por Leonard (1980, 1985) e posteriormente por Matsumoto (1999) e Cottet (2000). Porém não se encontra quase nada sobre estes métodos em português. Morgenthal (2000), Morgenthal (2002) realizou alguns acréscimos de algoritmos que aceleraram a velocidade de processamento e outros criaram colaborações mais recentemente que foram incorporadas como Carrier (1988), Ghoniem (1985), Roberts (1985), Takeda (1989), Fishelov (1990),

Shankar (1996), Taylor (1999), Ploumhans (2000) e Chen (2005). Vezza (2003) e Liu (2005) confirmaram alguma das expectativas criadas.

A grande vantagem é o caráter Lagrangeano deste método: o procedimento consiste em seguir os vórtices se movendo no fluido ao contrário dos métodos finitos que estão baseados em atualizar quantidades em pontos fixos. Isto faz dele praticamente um método livre de grade, eliminando uma série de etapas iterativas associadas com métodos *RANS* e *LES*. Outra vantagem é que o vórtice carrega consigo todas as informações necessárias e assim simula-se de maneira acurada em pequena e larga escala ao mesmo tempo, o que é muito difícil de conseguir.

Claramente um grande benefício é a zona limitada de acompanhamento. Devido à pequena altura da camada onde se manifestam significativamente os valores de vorticidade dos vórtices estes só necessitam serem computados em uma região muito próxima ao corpo imerso no escoamento. Como é objetivo no futuro abordar a análise aeroelástica de pontes, esta zona vai mudar pouco e ser mais facilmente mapeada, o que em conjunto com o fato de ser um método livre de grelha ou de discretização espacial, é especialmente favorável quando se consideram corpos em movimento.

O método tem vantagens adicionais: por tratar com contornos no infinito, não necessita de truncamento e, portanto, desaparecem os efeitos na precisão e estabilidade; há uma baixa dispersão numérica e qualquer velocidade pode ser considerada sem deformações ou dissipações típicas de métodos baseados em grelhas.

Todos os problemas são tratados de maneira idêntica, portanto após o acerto inicial e a verificação nenhuma consideração de modelagem ou calibração é necessária. Portanto o método oferece ao engenheiro uma nova maneira de resolver difíceis problemas de dinâmica dos fluídos com uma intervenção mínima do usuário. Tudo que é necessário é a especificação da geometria do corpo além de algumas condições iniciais e de contorno.

Uma desvantagem é o tamanho dos processamentos, algumas vezes maiores do que os de outros métodos, já que é necessário partindo do repouso gerar uma amostra no tempo que estabeleça o escoamento e seja o suficientemente longa para medirem-se as médias. Além disto, a grande quantidade de informação inerente ao vórtice faz com que este seja mais pesado computacionalmente do que qualquer ponto em uma malha.

3. APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL

3.1 CONCRETO

O uso de Concretos de Alto Desempenho (CAD), dentre os quais se destacam os chamados de Concretos de Alta Resistência (CAR) permite o aumento da resistência do concreto, o crescimento do módulo de elasticidade e conseqüentemente menores deformações. Porém a difusão destes concretos permite que se adotem soluções estruturais com seções transversais de dimensões cada vez menores. Como as solicitações não permanentes permanecerem inalteradas, estas seções tornam-se bastante esbeltas, resultando em peças cada vez mais flexíveis, onde análises mais precisas devem ser executadas.

Tradicionalmente, o Brasil tem se mantido como um dos países líder na tecnologia do concreto quando grandes resistências são requeridas, permitindo estruturas mais ousadas. Toda essa liberdade arquitetônica conquistada tem, contudo, limites: as deformações.

Devido à esbeltez das peças e ao aprofundamento do estudo do material concreto, atualmente aplicam-se os conceitos de durabilidade, vida útil e manutenção de estruturas. Desta maneira se introduzem exigências relativas ao desempenho da estrutura ao longo do tempo e estes custos passaram a ser considerados importantes. O projeto precisa fazer parte de uma cadeia de acontecimentos com interoperabilidade que possibilite a integração como um todo com as demais fases de inspeção, manutenção e reabilitação da obra.

Do mesmo modo essa ousadia não pode aumentar o risco inerente aos projetos. Conseqüentemente, melhores considerações passam a ser necessárias e simplificações que antes eram aceitáveis devem ser rejeitadas: o estudo de fenômenos viscoelásticos, deformação lenta, retração, fluência, relaxação do aço de protensão, perdas de protensão e efeitos de segunda ordem são fundamentais; fissuração, plasticidade fissuração do concreto, eventuais plastificações do aço e princípios dos grandes deslocamentos podem ser necessários. Os cálculos ficam ainda mais complicados e as análises muito mais complexas incluindo ainda o tratamento não simplificado de diversos fenômenos dinâmicos.

3.2 O PROJETO MODERNO DE PONTES

O projeto de pontes funciona como a fronteira do conhecimento técnico de engenharia civil aplicado. Devido ao uso de equipamentos capazes de lançar grandes vãos, o emprego maciço de pré-moldados, estruturas compostas, mistas e introdução de agregados de baixa densidade, além dos fatores citados referentes ao material concreto, são necessárias considerações muito mais sofisticadas para analisar corretamente o modelo.

Por isso, para otimizar realmente os sistemas estruturais de pontes, é fundamental o uso massivo de recursos computacionais. Inicialmente os escritórios de projeto desenvolviam seus próprios métodos e programas, entretanto o processamento de dados é hoje uma área de rápido desenvolvimento, dificilmente acompanhado pelas equipes técnicas de um único escritório de cálculo.

Implementar rotinas, algoritmos e programar requerem um trabalho especializado, com constantes atualizações, que cada vez mais foge do conhecimento do engenheiro calculista. Este entrega a missão para especialistas da área de programação. Não somente o desenvolvimento, mas principalmente o ajuste e a comprovação pelo uso em aplicações reais de estruturas construídas, acompanhadas ou monitoradas demandam anos de trabalho e dedicação.

3.3 BENTLEY SYSTEMS, INC. / TDV

Há mais de trinta e cinco anos o reconhecido escritório de engenharia do Prof.Dr.Ing. Fritz Leonhard, de Stuttgart na Alemanha, já possuía um setor com ênfase no projeto de pontes. Cálculos de estruturas, vazão de bacias no subsolo e tensões em escavações para túneis eram uma nova necessidade de desenvolvimento e pesquisa computacional para a época. Este escritório percebeu o alto custo de desenvolvimento de seus programas internos e terceirizou parte da tarefa de processar dados técnicos de engenharia.

Em alemão: *Technische Daten Verarbeiten, TDV*, a sigla e nome fantasia da empresa que criou e desenvolveu o *RM - Real Modelling*. Alguns anos depois estes programas estavam disponíveis para outros parceiros, por meio de consultorias especializadas, e décadas após a empresa se tornou uma verdadeira fabricante de programas de computador, passando também a vender seus sistemas como produtos.

O sistema *Bentley Bridge RM* encontra-se na versão 2006 e é desenvolvido pela *TDV Consulting Ges.m.B.H. - Dorian Janjic & Partners*, em Graz, na Áustria: www.tdv.at. Trata-se de um programa computacional comercializado pela *Bentley Systems Inc.* dos Estados Unidos: www.bentley.com na linha de produtos para pontes agrupada sob o nome BrIM: *Bridge Information Modelling*. O conceito é de, em conjunto com os demais produtos, atuar em toda a cadeia do setor de pontes atendendo a todas as necessidades dos clientes com foco na sustentabilidade da infraestrutura para as licitações de construção e operação.

A empresa mantém vários acordos de parceria, atingindo alcance mundial, com atualmente quatro idiomas: alemão, inglês, francês e chinês em mais de 500 licenças em uso no mundo.

A divisão entre comercialização, desenvolvimento e consultoria objetiva que o programa continue envolvido em grandes obras e serviços de projeto de novas pontes em todo o globo. Isto garante a inovação permanente e o aperfeiçoamento, uso e controle de novas metodologias e tecnologias aplicadas. Estas se fazem necessárias devido aos grandes desafios que são propostos e os recordes que são continuamente quebrados nestes projetos de ponta.

3.4 BENTLEY BRIDGE RM

O programa *Bentley Bridge RM* é reconhecido como o mais eficiente, versátil e completo programa para análise estrutural de engenharia de pontes. Abrange estruturas usuais, em concreto armado, protendido, aço, mistas, pré-fabricadas, em avanços sucessivos, em arcos, em aduelas, empurradas, estaiadas, suspensas. Com análise, dimensionamento e verificação de estados limites de serviço e últimos para barras, placas ou elementos, incluem-se mais de vinte normas internacionais no que tange a propriedade dos materiais e controle. Composto por diversos módulos a parte que utiliza-se é a de pré-processamento geométrico e de *CFD*, com o intuito de preparar os dados para a análise de carregamento de vento turbulento *Wind Buffeting*.

O método de resolução de sistemas é de *Newton-Raphson*, através de um processo cujo número de iterações depende da taxa de convergência arbitrada. A integração no tempo é do tipo *Newmark* estendido permitindo a inclusão do tempo como quarta dimensão pelo carregamento da estrutura em etapas, de forma incremental.

Desta maneira se analisa estruturas com diferentes fases construtivas, inclusive com mudanças no sistema estrutural, de isostática para hiperestática, caso da maioria das grandes pontes. O *RM* pode realizar análises não-lineares físicas em conjunto com não-linearidades geométricas. Isto é possível por meio de uma análise incremental no tempo. O nível de detalhamento da estrutura também pode variar incluindo até a interação solo-estrutura (figura 27) com ou sem o uso de sub-sistemas representados por matrizes. Análises dinâmicas de alta complexidade vêm sendo implementadas, dentre as quais aquelas relacionadas ao vento.

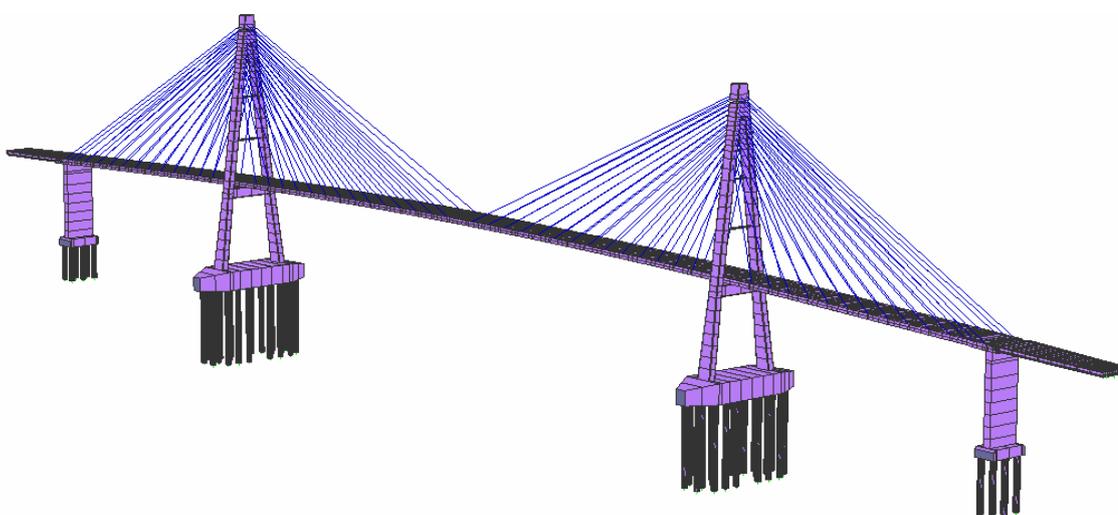


Figura 27: modelo computacional em MEF da ponte Rach Mieu – Vietnã

A união destas e de muitas outras características em um único pacote de programa computacional busca minimizar os problemas na troca de dados e propiciar a atualização automática das mudanças efetuadas em qualquer fase do projeto. Muitas aplicações foram desenvolvidas para pré-programar a entrada de dados e enfrentar dificuldades específicas dos diversos tipos de pontes: compostas, pré-fabricadas, móveis, empurradas, estaiadas e suspensas.

3.4.1. Análise de instabilidades provocadas pelo vento

Por ser um programa específico para pontes foram inseridas funções relativas às ações de vento para estimar praticamente todas as necessidades para o projeto de pontes de grandes vãos. Como escreveu Simiu (1978) o objetivo é “a partir de informações sobre o vento

incidente, estimar as relações entre este ambiente e as forças induzidas sobre as estruturas e a resposta das estruturas sob a ação destas forças”.

O problema em três dimensões (figura 28) é reduzido para análise nas duas dimensões da seção transversal rígida (figura 29) que é considerada indeformável e é representada por três graus de liberdade correspondentes à força de arrasto: F_a (*drag*: D); à força de sustentação: F_s (*lift*: L); e à rotação ou momento de torção M_t (*pitching moment*: M).

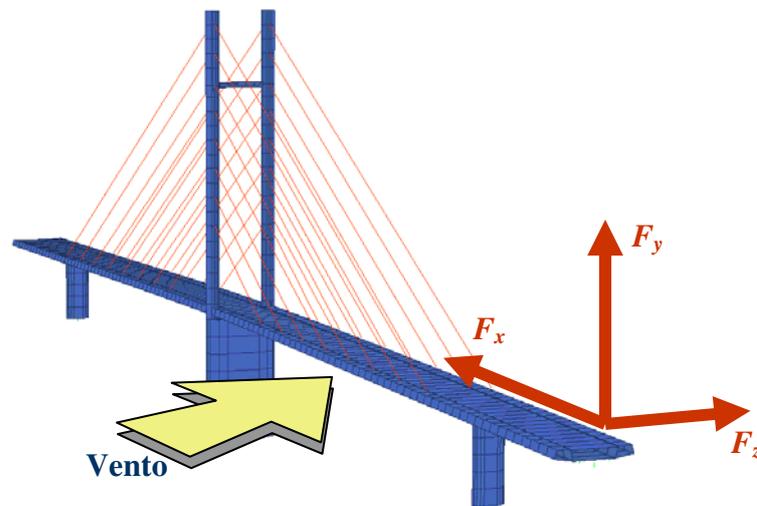


Figura 28: problema do vento é uma análise em 3D

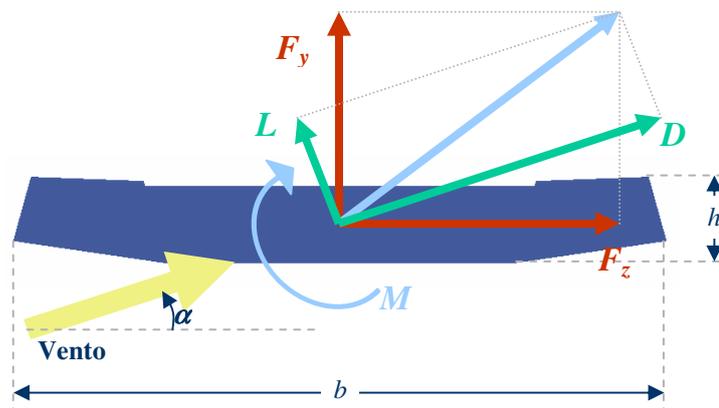


Figura 29: decomposição de forças na seção transversal 2D

A análise das instabilidades provocadas pelo vento (*wind buffeting analysis*) é realizada no espaço modal e no domínio da frequência (figura 30), incluindo o amortecimento estrutural e os efeitos da rigidez devido ao movimento estrutural causado pelo escoamento de vento. Isto permite a consideração apenas dos turbilhões que tenham dimensões suficientes para envolver plenamente a estrutura utilizando as escalas espaciais por meio de correlações espaciais.

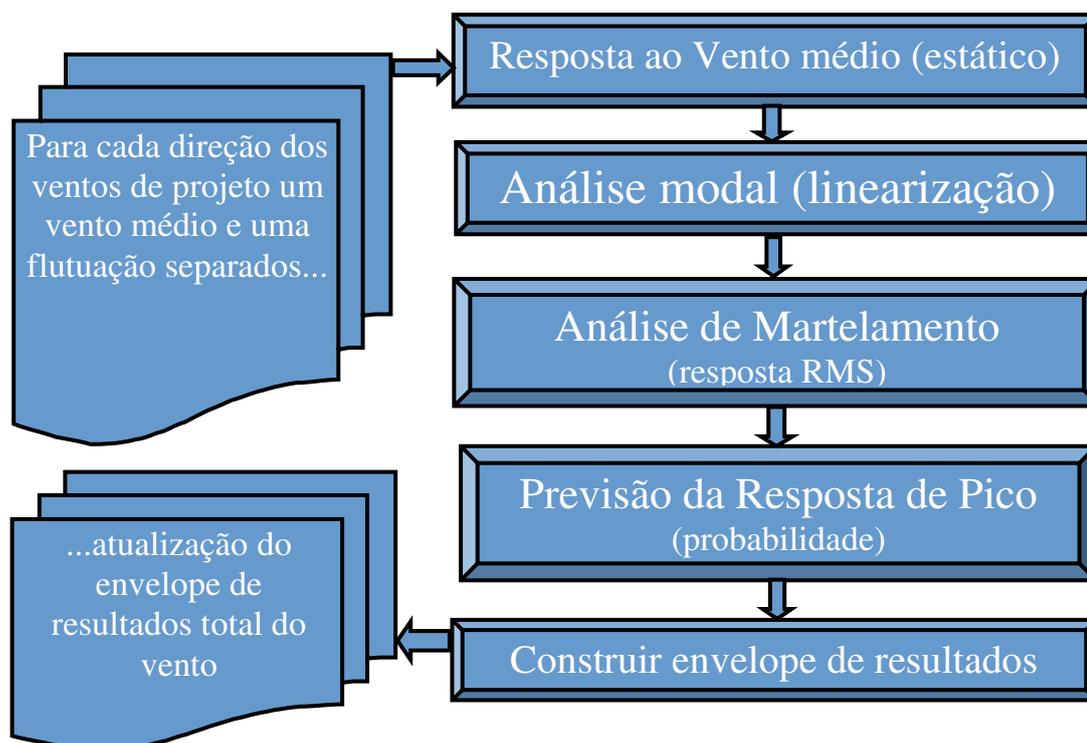


Figura 30: fluxograma da análise das instabilidades provocadas pelo vento

Conforme Scanlan (1978) “a estabilidade aerodinâmica depende dos seguintes fatores que caracterizam a ponte: a geometria do tabuleiro, as frequências de vibração e o amortecimento estrutural”. No programa todos os cálculos são baseados na rigidez tangencial da estrutura em um dado momento no tempo, com a estrutura sobre carregamentos permanentes, de vento médio e vento dinâmico, a parcela flutuante no tempo. Isto garante a inclusão de todos os efeitos das não-linearidades que aconteceram anteriormente.

As cargas de vento médio (*mean wind*), de arrasto médio (*mean drag*), de sustentação média (*mean lift*) e de momento médio (*mean pitch*) são definidas (figura 31) ou calculadas por rotinas automáticas. Os carregamentos são então resultantes da multiplicação dos fatores de forma pela pressão dinâmica longitudinalmente no tabuleiro da ponte.

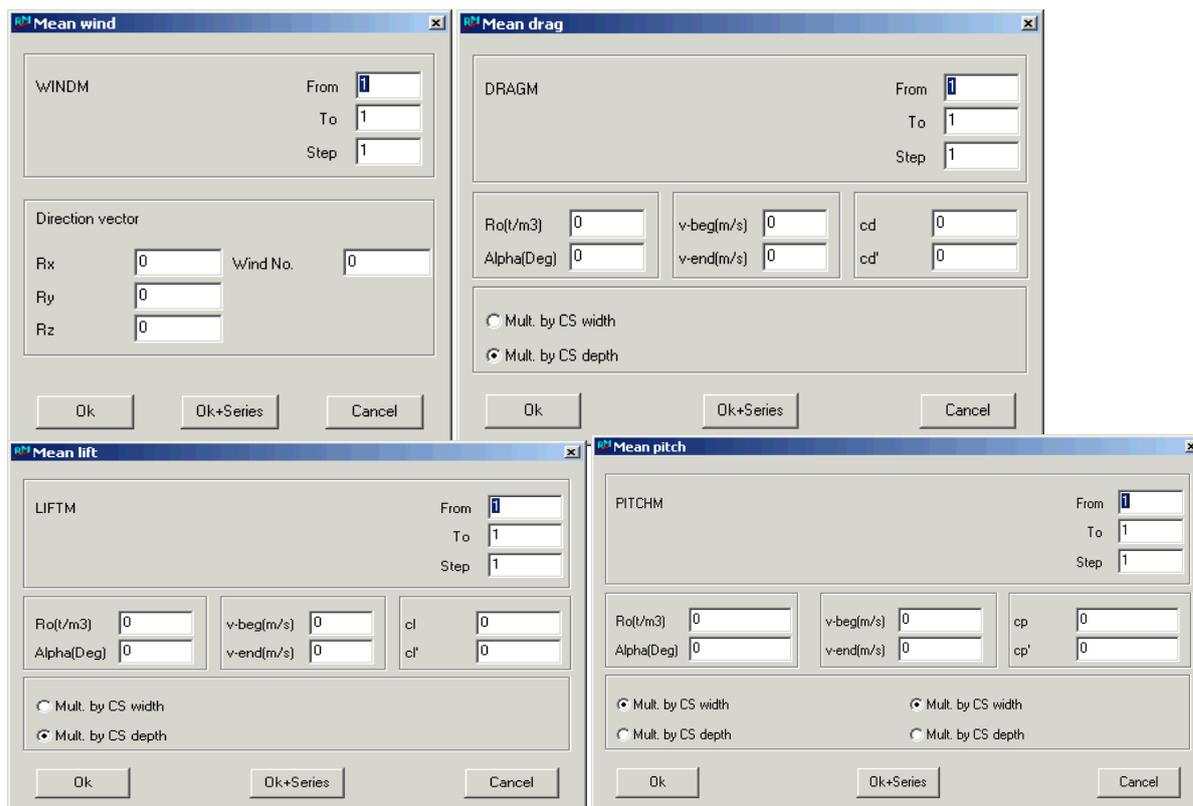


Figura 31: vento, arrasto, sustentação e momento médios

No carregamento de vento a intensidade e a direção variam com o tempo; porém, uma variação com tempo suficientemente longo para atingir uma parte significativa da estrutura pode ser considerada como diferentes casos de carga estacionários. Sendo assim, soma-se a parcela do vento principal (constante) com cada golpe em cada direção e as tratam-se separadamente como casos de carga diferentes.

3.4.1.1 Vento de projeto

Além da duração e método de superposição, definiu-se um modelo de vento de projeto (figura 32) que pode ser estabelecido pelo usuário ou escolhido entre aqueles previamente disponíveis. Este modelo é constituído basicamente pelos parâmetros velocidade média do vento (*mean wind velocity*), intensidade de turbulência do vento (*turbulence wind*), espectro de potência do vento (*wind power spectra*) e funções de coerência (*coherence data*). Em cada um destes parâmetros outros fatores podem ser definidos ou alterados conforme os dados obtidos do clima local sendo que diferentes ventos podem ser designados em diferentes direções para uma mesma estrutura.

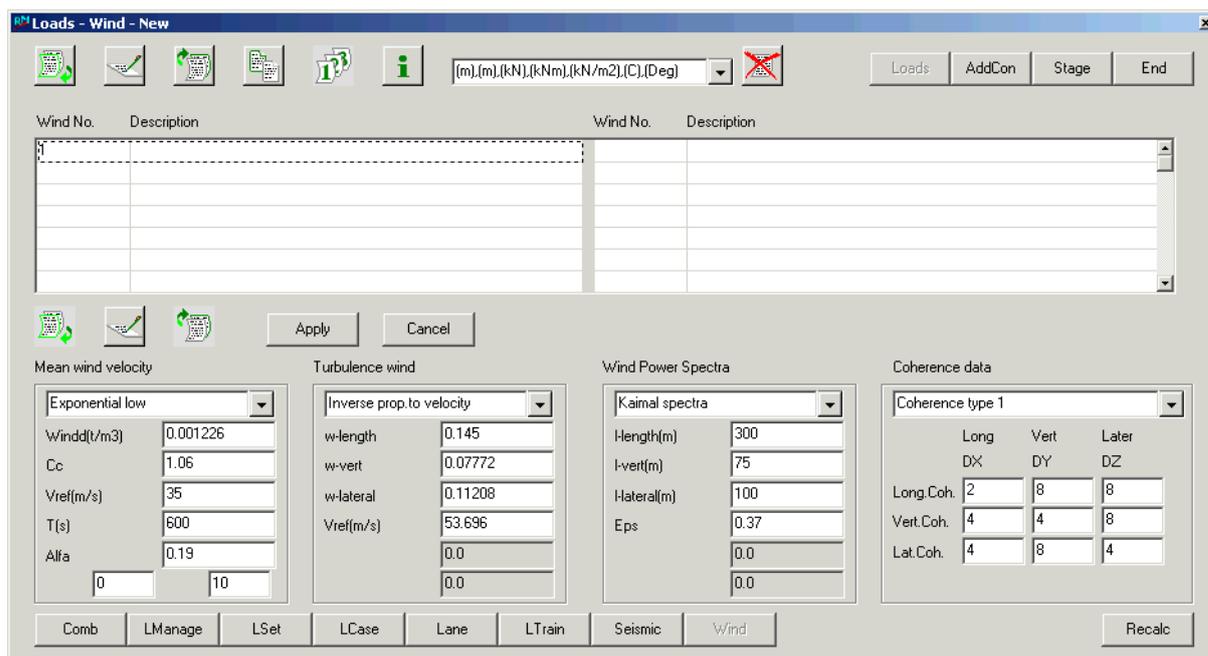


Figura 32: janela de determinação do modelo de vento de projeto

Dentro da camada limite atmosférica a velocidade média do vento varia de zero, junto à superfície terrestre, até a velocidade gradiente, na altura gradiente. Conseqüentemente utilizam-se perfis de vento (*wind profiles*) com variações na velocidade média de vento por intermédio de leis aplicadas para a variação na altura (figura 33).

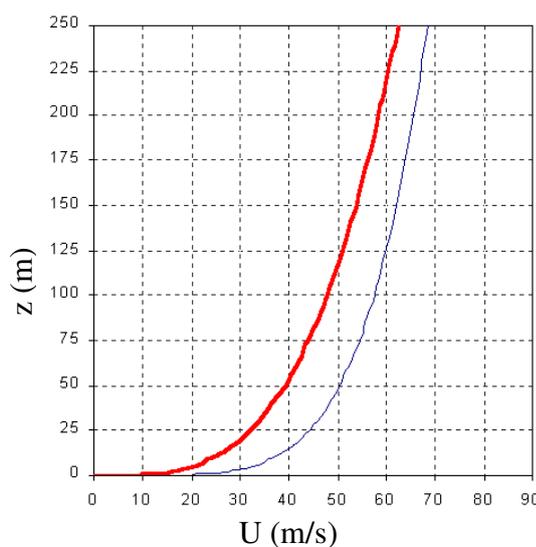


Figura 33: perfis de velocidade média do vento

O exemplo mais usual é o de uma simples lei exponencial (equação 3.1), mas há outras opções com distribuição logarítmica, logarítmica de rajadas, constante ou de normas.

$$U(z) = U_r \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (\text{equação 3.1})$$

O tratamento matemático requer a consideração das rajadas com variáveis no tipo de espectro de potência e nos modelos de intensidade de turbulência, de acordo com diferentes formulações de várias normas, que podem ser definidas de maneira simples.

As flutuações na velocidade do vento e na sua direção são definidas em termos de intensidade de turbulência (I_u) constante (equação 3.2) ou exponencial, relacionadas ao vento médio e também com leis de variação na altura de distribuição constante inversamente proporcional, inversa logarítmica (figura 34) ou de normas. Para cada direção do vento tem-se a flutuação das três componentes espaciais destas flutuações: longitudinal, lateral e vertical do vento.

$$I_u = \frac{S_u}{U} \quad (\text{equação 3.2})$$

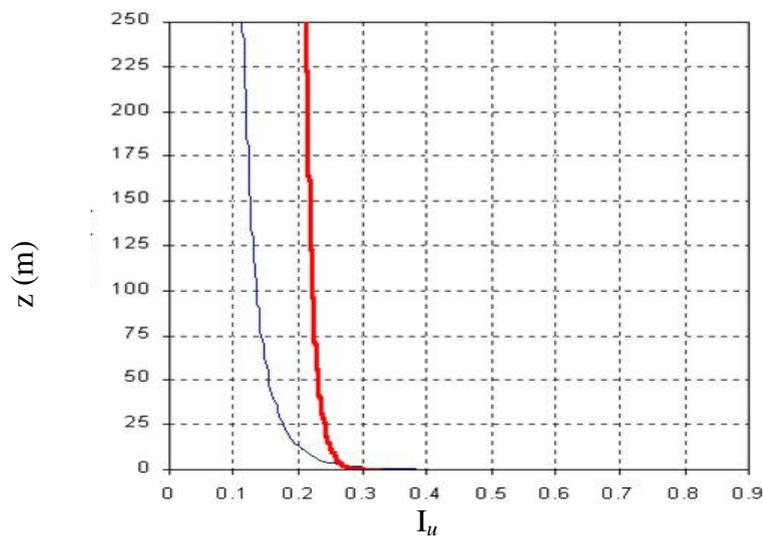


Figura 34: intensidade de turbulência do vento

As flutuações são transformadas para o domínio da frequência, no qual a análise de vento dinâmica é realizada permitindo a consideração da dependência da variação no tempo. A energia contida nessas rajadas é descrita pelos espectros de potência do vento (figura 35).

Diversos autores propuseram várias leis de densidade espectral (constante, Kaimal, Karman, Davenport, Van der Hoven e outras) para diferentes regiões do globo.

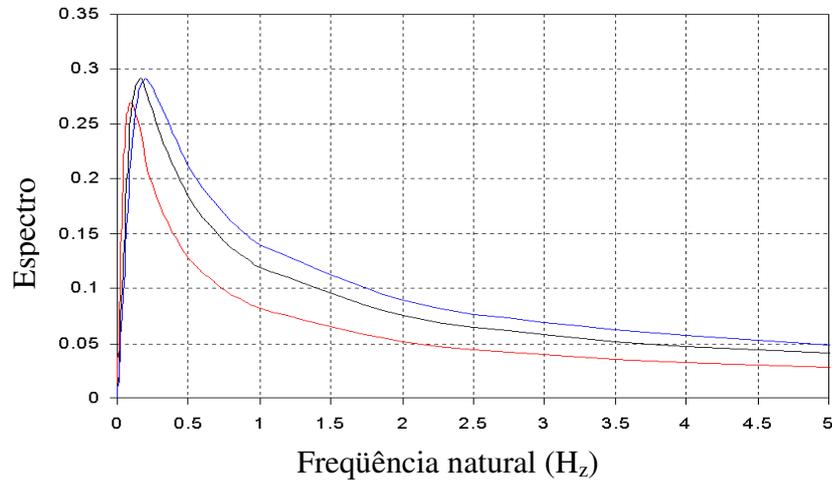


Figura 35: espectro de potência

As correlações espaciais das flutuações em pontos distintos dão informações sobre a simultaneidade da ocorrência de máximos das densidades espectrais na mesma estrutura, ou seja, fornecem a descrição espacial da turbulência. Para cada um dos componentes da turbulência usam-se funções de coerência ou fatores de decaimento (figura 36).

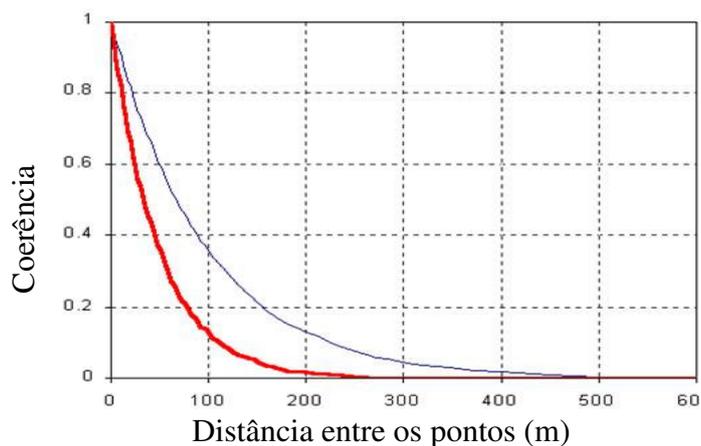


Figura 36: função de coerência

A previsão da resposta de pico é um fator dependente da frequência que pode ser calculado por distribuições de probabilidade do tipo Poisson. Utiliza-se o conceito de que “a resposta

dinâmica de pico é a soma da resposta média e do valor quadrático médio da resposta fluante multiplicado pelo fator de pico”, conforme Loredou-Souza (1998). Criam-se assim carregamentos variáveis nas direções do vento e transversalmente que serão considerados por meio de incrementos no tempo.

Desta maneira os diagramas dos fatores de forma das seções transversais, que definem a dependência dos coeficientes aerodinâmicos de arrasto, sustentação, e momentos, em conjunto com o vento de projeto permitem uma análise abrangente da instabilidade provocada pelos eventos de vento tempestuosos (*gusty wind*).

3.4.2 Método da Vorticidade em Partículas

O programa RM utiliza uma série de algoritmos baseados no MVD – Método dos Vórtices Discretos (*DVM - Discrete Vortex Method*) e no MVP – Método dos Vórtices em Partículas (*VPM – Vortex Particle Method*) que são muito semelhantes entre si por realizarem uma discretização em partículas, ou características destas, no espaço e no tempo. Deve-se compreender que teremos três discretizações principais quando se resolvem fluídos: a espacial, a temporal e a das equações. Alguns autores têm uma terceira classificação: MVB – Método dos Vórtices em Blocos (*VBM – Vortex Blob Methods*) e outros se referem às técnicas aplicadas como MP – Métodos de Painéis (*PM – Panel Methods*). Em comum entre todos é o ponto de partida da teoria que é o vórtice (*vortex*).

Escolheu-se a tradução e classificação como MVP por considerar-se este nome o mais significativo, uma vez que o uso de características do fluido (vorticidade) representadas em partículas no espaço já significam discretizações. Também se interpretou esta sigla como mais explicativa da implementação, com o uso na tradução para o português da característica vorticidade (*vorticity*) e não do fenômeno mais amplo, o vórtice (*vortex*) para explicitar melhor a matemática envolvida e não somente a física.

A vorticidade é um conceito matemático relacionado à quantidade de circulação, ou rotação, ou mais estritamente à razão de rotação do ângulo local em um fluido por unidade de área em um ponto. Neste caso a vorticidade é transformada em discreta para um determinado número de pequenos vórtices livres que são criados na superfície do corpo, em uma região ou ponto e acompanhados na sua evolução durante o tempo por todo o seu desenvolvimento no fluxo.

Qualitativamente o que se realiza é uma discretização do entorno onde ocorre a interação entre o fluído e o sólido em partículas que possuem uma característica que pode ser acompanhada na evolução do tempo. Devido à algumas características dos fenômenos e possíveis simplificações adotadas soltam-se do sólido algumas partículas em um escoamento que envolve este e, após o tempo necessário para o completo desenvolvimento do escoamento, criam-se uma série de etapas que reproduzem a interação entre o sólido e o escoamento.

Na média destas obtêm-se as forças envolventes e assim, mesmo partindo de um momento zero, ou seja, estagnado, o método acaba por convergir e obtêm-se para quantidades médias valores próximos daqueles obtidos em ensaios de túnel de vento. No caso deste trabalho o fluído é o ar, o sólido a ponte, a evolução no tempo as iterações numéricas e a vorticidade a característica matemática que é carregada pelas partículas em vórtices (figura 37).



Figura 37: vórtices criados nas nuvens – ilha de Juan Fernandez (site da NASA)

Outras características fundamentais do escoamento para aplicação deste método são a incompressibilidade do fluído, a consideração do escoamento apenas como bidimensional e a desconsideração de qualquer efeito da temperatura. Para pontes estas simplificações são aceitáveis uma vez que o comprimento do vão é idealmente considerado infinito.

A densidade e a viscosidade constantes permitem a aplicação das equações de Navier-Stokes, de onde provém a chamada equação da vorticidade. Esta equação faz ainda com que seja este um método independente da malha criada e com a vantagem de que, como citado, na forma

Lagrangeana, a equação de vorticidade é livre das instabilidades numéricas associadas ao termo convectivo. O princípio é de que em escoamentos com número de Reynolds altos existem três regiões distintas: a camada limite viscosa rotacional, a esteira e a região externa, invíscida e irrotacional onde a vorticidade é zero.

Os modelos teóricos devem ser factíveis no microscópico e no contínuo e para tanto se considera que cada partícula (i) avulsa se move no espaço vazio em um “movimento Browniano” sendo descrita pela sua massa (m_i), posição (x_i) e velocidade (u_i). A massa das partículas é estipulada de acordo com o volume considerado e a densidade da massa $\delta(x)$ e a velocidade $\mathbf{u}(x)$ são funções da posição. O que se acompanha não são os vórtices, mas sim o centro destes.

Descreve-se a matemática do método que, como para todo caso de fluídos é baseada nas formulações de Navier-Stokes que transformaram as leis fundamentais de conservação da física em equações diferenciais parciais (*PDE*), tais como a Equação do Contínuo (equação 3.3) para conservação de massa:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (\text{equação 3.3})$$

Trata-se o problema em duas dimensões para uma dada secção transversal, onde as equações de Navier-Stokes governam três incógnitas: duas para a velocidade do campo (\mathbf{u}) e uma para a pressão (p).

Discrimina-se, sendo ν a viscosidade cinemática, a equação de Conservação de momento (equação 3.4) por:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (\text{equação 3.4})$$

Reduz-se as incógnitas para uma única no caso de duas dimensões introduzindo a vorticidade como a rotação da velocidade pela equação de transporte da vorticidade (equação 3.5):

$$\omega = \nabla \times \mathbf{u} \quad (\text{equação 3.5})$$

Fica-se então com a equação de Navier-Stokes simplificada para duas dimensões (equação 3.6):

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \omega = \nu \nabla^2 \omega \quad (\text{equação 3.6})$$

Assim satisfaz-se a equação de Poisson (equação 3.7):

$$\nabla^2 \psi = -\omega \quad (\text{equação 3.7})$$

Para resolver-se as equações de Navier-Stokes se reconstrói o campo de velocidades a partir da vorticidade. Realiza-se isto aplicando a relação conhecida como de Biot-Savart (equação 3.8):

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \mathbf{U} - \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega} \frac{\omega(\mathbf{x}_0) \times (\mathbf{x}_0 - \mathbf{x})}{|\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}|^2} d\Omega_0 \quad (\text{equação 3.8})$$

Escreve-se o campo de velocidades como a superposição do fluxo à barlavento com a vorticidade induzida pela seção transversal. Na liberação da vorticidade superficial as partículas de ar aderem à superfície, portanto elas não possuem velocidade tangencial à superfície (*no slip condition*). Internamente à camada limite de altura (h), a velocidade (\mathbf{U}) aumenta de zero ao seu valor máximo e isto induz momentos rotacionais (figura 38). Determina-se a profundidade da camada limite pela viscosidade e liberam-se as partículas a uma pequena distância das paredes.

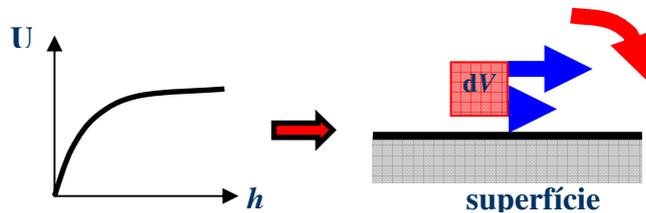


Figura 38: vorticidade superficial

Aplica-se um operador de divisão pelo método Lagrangiano e desta forma resolve-se as equações simplificadas de Navier-Stokes para a convecção da vorticidade (equação 3.9):

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \omega = 0 \quad (\text{equação 3.9})$$

Determina-se o campo de vorticidades em um tempo ($t + dt$) pelas seguintes características (equação 3.10):

$$\omega(\mathbf{x}, t + dt) = \omega(\mathbf{x} - \mathbf{u} \cdot dt, t) \quad (\text{equação 3.10})$$

Trata-se no passo de difusão da vorticidade, a segunda parte da equação (equação 3.11):

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \nu \nabla^2 \omega \quad (\text{equação 3.11})$$

Integra-se essa equação estocasticamente executando o método dos avanços aleatórios. Realizam-se integrações no tempo pelo método de Euler com um esquema de segunda ordem de Runge-Kutta.

Nesta formulação admite-se que a circulação concentra-se em um número de pontos discretos (N_v), conhecidos como marcadores fluidos (*fluid markers*), que são os lugares onde se encontram as partículas, com uma força de vorticidade total (Γ_p) e núcleo de tamanho (σ). Portanto, no espaço e no tempo a vorticidade é formada pela soma (equação 3.12):

$$\omega(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=1}^{N_v} \delta_{\sigma}[\mathbf{x} - \mathbf{x}_i(t)] \Gamma_i \quad (\text{equação 3.12})$$

Estes marcadores fluidos têm características de moverem-se no tempo de acordo com o campo de velocidades (convecção), moverem-se conforme uma marcha aleatória (difusão) além de poderem ser absorvidos e emitidos pelo corpo sólido.

O tratamento numérico destas características requer operadores de divisão para convecção (equação 3.13) e difusão (equação 3.14) onde \mathbf{R} é o vetor randômico de acordo com os avanços aleatórios e k é a etapa do passo de tempo:

$$\tilde{\mathbf{x}}_i^{k+1} = \mathbf{x}_i^k + \Delta t \mathbf{u}(\mathbf{x}_i^k) \quad (\text{equação 3.13})$$

$$\mathbf{x}_i^{k+1} = \mathbf{x}_i^k + \mathbf{R}_i^k \quad (\text{equação 3.14})$$

Onde os resultados serão muito semelhantes e estão próximos realiza-se a fusão dos vórtices, em outros casos se apagam ou se agrupam em células que representem bem estes vórtices. Por isso as seguintes interações entre vórtices são possíveis: somar diretamente, apagar, fundir, aderir (ao sólido), lançar (pelo sólido) e sumir (pela distância de corte).

Discretiza-se a superfície do corpo (figura 39) aproximando sua linha externa por um grande número (Np) de painéis retos (\mathbf{n}). No centro dos painéis ($x_{c,i}$) as concebe-se as seguintes condições de contorno (*boundary conditions*): condição de não deslizamento no contorno e condição de não penetração no contorno.

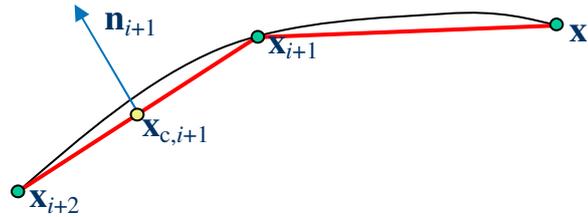


Figura 39: discretização da superfície

A velocidade devido ao campo de vórtices depende do núcleo e se dois vórtices estão muito próximos isto resultaria em velocidades muito altas devido à singularidade obtidas na resolução do núcleo. Este problema é superado introduzindo vórtices com núcleos de tamanhos finitos (σ) resultando em núcleos de velocidade mais suaves. Um núcleo comum utilizado é o de Gauss (equação 3.15):

$$\mathbf{K}_{\sigma}^{\text{Gauss}}(\mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi} \frac{\mathbf{e}_z \times \mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{|\mathbf{r}|^2}{\sigma^2}\right) \right] \quad (\text{equação 3.15})$$

Decorrentes da equação de Navier-Stokes em termos da vorticidade, considerando a condição de contorno de não-deslizamento e sendo μ a viscosidade laminar, determinam-se as distribuições de pressão (p) na superfície (equação 3.16). Realiza-se isto pela integração na superfície (n_0) a cada passo ou instante de referência com a integral sobre a superfície e o vetor tangencial unitário (t_0):

$$\nabla p \cdot t_0 = -\mu \nabla \omega \cdot n_0 \quad (\text{equação 3.16})$$

Após, realiza-se o balanço de momentos que resulta nas forças em cada instante.

Implementaram-se ainda uma série de outras adições tais como algoritmos mais rápidos e distintos modelos de difusão por intermédio de técnicas do tipo *Vortex-In-Cell Methods (VIC)*

& FFT & Green, Immersed Interface Methods, Lumping Methods, Particle Particle Particle Mesh (PPPM= P^3M), Algoritmos de pólos múltiplos, Computational box, Mesh hierarchy e Multithreading. Desta forma utilizam-se nesta implementação os chamados *High-resolution Vortex Particle Methods*, introduzidos para melhorar a precisão e aumentar a velocidade.

Abaixo (figura 40) um fluxograma resumido destas operações apresentadas acima.

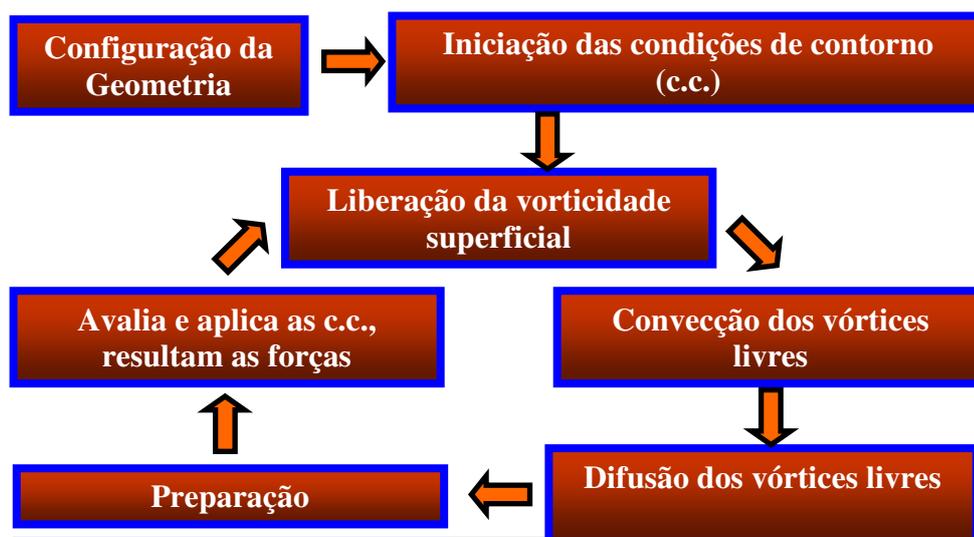


Figura 40: fluxograma resumido do Método da Vorticidade em Partículas

Ainda assim, muito provavelmente a grande maioria dos cálculos realizados, quando analisados a cada passo do tempo, não se encontram e nem se aproximam da verdadeira solução. Porém, quando analisados como um conjunto de dados, por meio de médias temporais produzem resultados que são quantitativamente bastante apurados, estatisticamente válidos, especialmente no que se refere às quantidades globais, de forças e momentos. Isto pode ser considerado ao mesmo tempo uma fraqueza como uma das vantagens do método.

3.4.2.1 Módulo de CFD no RM

Mostra-se agora como obter os coeficientes aerodinâmicos no módulo de dinâmica dos fluidos computacional do programa RM, algumas das suas características principais e os resultados. É necessário compreender que em computação sempre teremos três fases: o pré-processamento, ou entrada de dados; o processamento em si, ou seja, a busca da resolução do sistema de equações pelo algoritmo e o pós-processamento, ou visualização dos resultados.

Acessando o programa na árvore de navegação ou no menu de propriedades (*Properties*) encontra-se a opção classes aerodinâmicas (*Aero Classes*).

Inicialmente define-se os elementos que receberão os carregamentos de vento nas distintas direções por meio destas classes aerodinâmicas conectando as informações conforme as formas das seções transversais de referência (*Ref.CS*). Armazena-se diferentes grupos de coeficientes em várias classes aerodinâmicas e dentro de cada classe há a separação nas quatro direções principais dos ventos sobre a seção transversal incidentes conforme os eixos principais: positivo ou negativo em Z e positivo ou negativo em Y.

Associa-se a cada classe os casos de carga e assim cria-se uma série de carregamentos, conforme a variação do ângulo de ataque e das direções principais do vento. Até a criação do módulo de CFD realizava-se a entrada destes dados diretamente pelo usuário com dados de análises de túnel de vento. Isto segue sendo possível para os casos em que se recebem resultados experimentais, porém agora se pode também obter diretamente do programa os coeficientes aerodinâmicos.

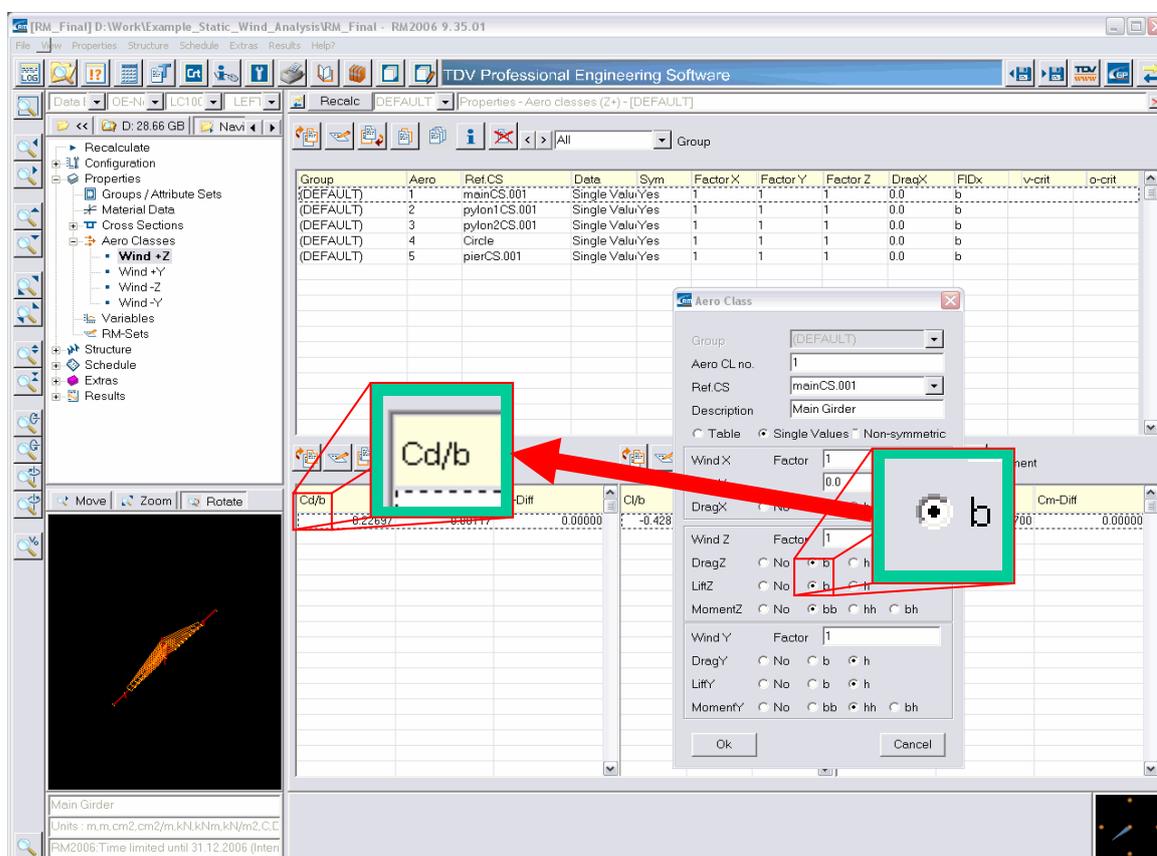


Figura 41: escolha da normalização

Identificam-se as classes por número (*Aero CL. No*) e assinala-se aos elementos estruturais formados por estas seções transversais. Permitem-se diferentes maneiras de tratar os dados de coeficientes: como valores únicos que são interpolados linearmente do valor e da derivada no ângulo principal ou por pontos discretos dependentes do ângulo em uma tabela.

Considera-se a assimetria da seção transversal bem como o tipo de normalização (figura 41), indicando que comprimento, base (B) ou altura (H), ou área ($B*H$ ou B^2 ou H^2) é utilizado para normalizar os coeficientes em cada direção para cada tipo. Existe ainda um fator adicional f para o cálculo das forças ou momentos que necessitem de fatoração.

Vincula-se a cada caso os tipos de forças as quais as seções estarão submetidas: arrasto, sustentação e momento, que são razões entre forças ou momentos e a pressão dinâmica: não-normalizados (*No*). Decompõem-se a força do vento nas direções principais e se obtêm as forças de arrasto D (equação 3.17) e sustentação L (equação 3.18); já o momento de torção M (equação 3.19) é resultante da excentricidade entre estas componentes. As demais variáveis envolvidas são as mesmas dos coeficientes (página 37: equações 2.1, 2.2 e 2.3).

$$D_b = \frac{1}{2} \rho U^2 B [2C_D \frac{u(x,t)}{U}] \quad (\text{equação 3.17})$$

$$L_b = \frac{1}{2} \rho U^2 B [2C_L \frac{u(x,t)}{U} + (\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D) \frac{w(x,t)}{U}] \quad (\text{equação 3.18})$$

$$M_b = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 [2C_M \frac{u(x,t)}{U} + (\frac{dC_M}{d\alpha} + C_D) \frac{w(x,t)}{U}] \quad (\text{equação 3.19})$$

No caso de uma seqüência de cálculos deve-se acessar o cronograma de etapas *Schedule* no menu principal e no menu secundário de fases *Stage* criar ação *Aero* na série de eventos *Schedule Action*. Neste deve-se assinalar o número da classe aerodinâmica previamente definida a ser calculada. No caso de um único cálculo estas definições não são necessárias. Disponibiliza-se funções de copiar, colar e editar, além da pré-programação de entrada de dados para acelerar atividades repetitivas e monótonas. Em ambos os casos, se iniciam diretamente a execução dos cálculos no botão *Recalc*.

O sistema fornece uma sugestão do conjunto de parâmetros que podem ser modificados: velocidade de referência do vento (U), passo de tempo (dt), número de iterações (it), número de painéis (Np) e tamanho do núcleo (σ). No início das aplicações avalia-se a influências destes valores nos resultados.

Durante os cálculos no módulo de CFD (figura 42) são realizados dois processos paralelos sobre os valores quadrados médios (RMS): um sobre todos os dados, outro sobre os 80% últimos de maneira a verificar a convergência. Além disto, as forças instantâneas são calculadas e mostradas a cada passo.

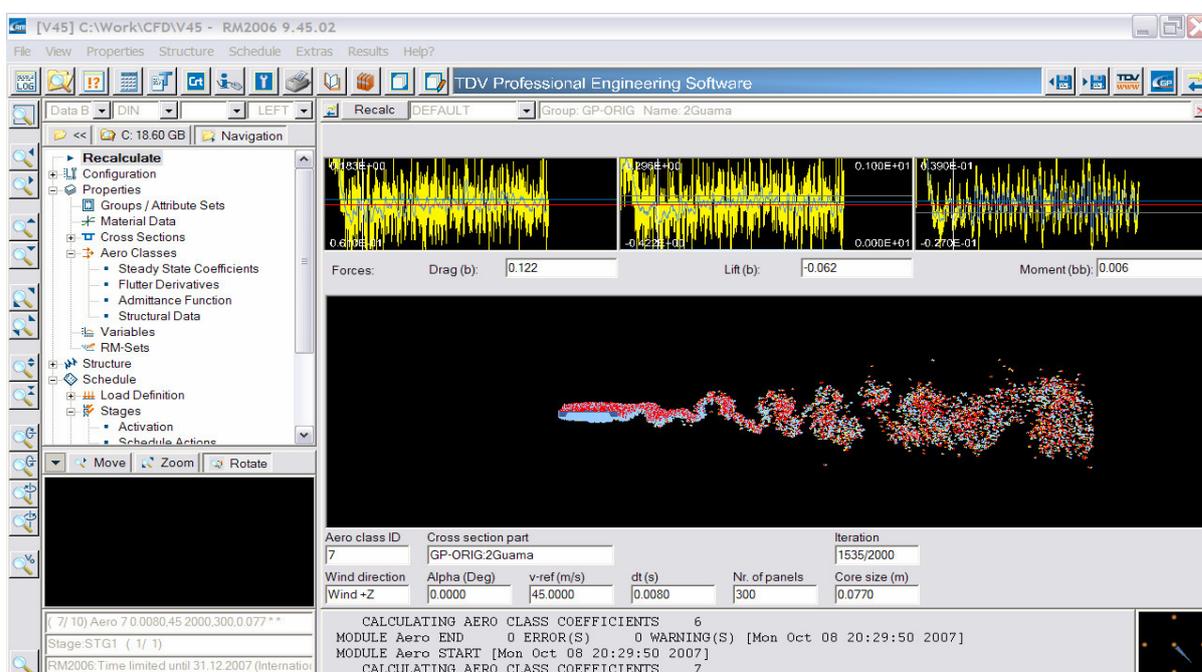


Figura 42: tela do módulo de CFD durante processamento

O processamento, os históricos de tempo de arrasto, sustentação e momento, bem como os coeficientes aerodinâmicos resultantes são armazenados e podem ser apresentados ou exportados para arquivos de texto, tabelas ou gráficos. Existe ainda a possibilidade de exportar um arquivo de vídeo com a seqüência de cálculo para visualização do escoamento.

Recentemente redesenha-se completamente a interface gráfica do usuário (GUI) para possibilitar uma navegação e entrada de dados mais rápida e fácil. Adicionam-se novos recursos para permitir uma correta interpretação dos resultados: a visualização da distribuição

das pressões na superfície do corpo (figura 43), a visualização da velocidade absoluta comparada com a velocidade do vento incidente a barlavento (figura 44) e o cálculo do número de Strouhal.

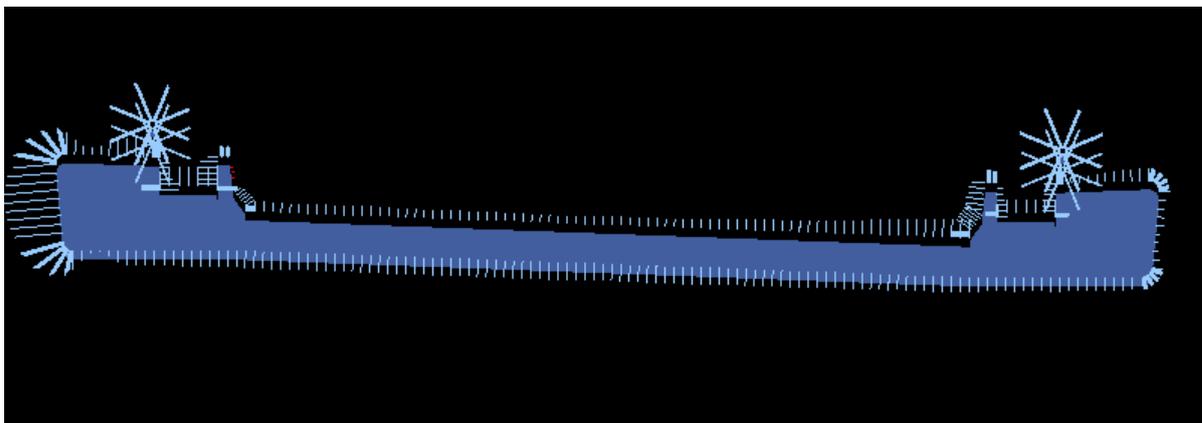


Figura 43: distribuição das pressões na superfície do corpo

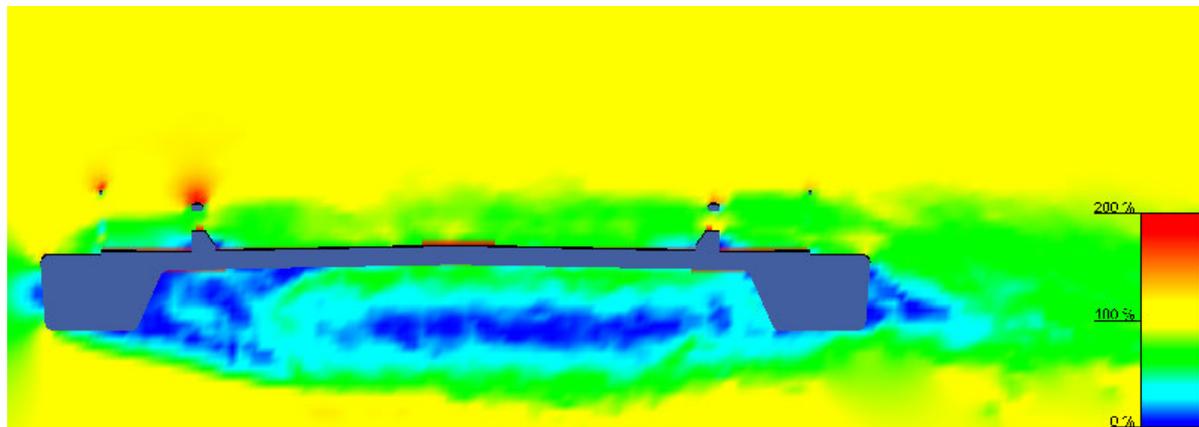


Figura 44: velocidade absoluta comparada a velocidade do vento incidente

Em breve o programa vai solucionar também problemas aeroelásticos (figura 45) logo após o cálculo das seções estáticas também as seções em movimento podem ser estimadas resultando diretamente nos derivativos aerodinâmicos e funções de admitância aerodinâmica. Obtêm-se os demais dados necessários no próprio programa pelo cálculo de autovalores ou entradas diretamente pelo usuário por meio da frequência de oscilação.

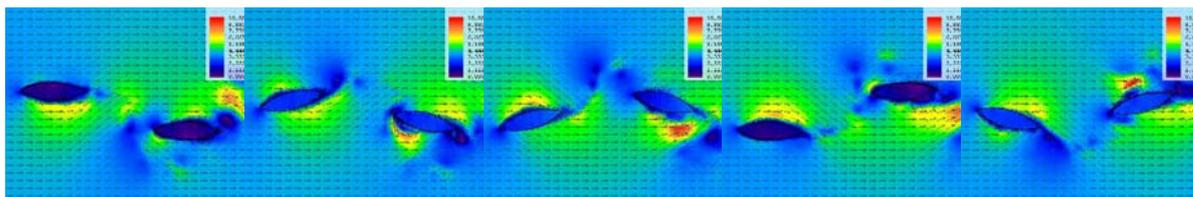


Figura 45: exemplo da análise de um problema de interação aeroelástico

Incluir um módulo de análise da dinâmica dos fluidos computacional tem como intenção propiciar uma ferramenta rápida e suficientemente precisa para análises aeroelásticas em duas dimensões que proporcione ao engenheiro calculista de pontes uma resposta sobre o comportamento da seção transversal aos ventos de projeto resultando em forças sobre estas seções devidas ao escoamento de ar turbulento ao redor delas. Uma variação automática da direção do vento cria, de maneira direta e correta, diagramas para os coeficientes de forma em relação ao ângulo de ataque. Até o momento as análises aerodinâmicas apresentaram resultados satisfatórios; condição que até então tinha de ser estimada em túneis de vento para os casos em que não há valores disponíveis na literatura técnica pública.

4 EXEMPLOS E APLICAÇÕES

4.1 EXEMPLOS CLÁSSICOS

Inicialmente tomaram-se problemas clássicos em aerodinâmica de escoamentos bidimensionais como exemplos. Ensaiou-se, em regime acima do crítico, a seção transversal de barras cilíndricas ou prismáticas ideais, de comprimento infinito, com seção transversal constante do tipo: circular, quadrada, retângulo, placa e aerofólio.

Como estes resultados destes problemas são amplamente conhecidos e alguns deles representam questões limítrofes referentes à aerodinâmica, são assim considerados indicativos da aplicabilidade do método utilizado e desta implantação e os resultados destas simulações numéricas foram utilizados na calibração em fases iniciais de verificação. Com estas simulações e outras foi possível observar muitas das propriedades que podem ser alteradas pelo usuário no módulo de dinâmica dos fluidos computacional e criou-se uma base de dados que aconselha alguns números baseados na experiência até o presente momento.

Consideram-se básicas para a análise a direção e velocidade de referência do vento (U_r). No módulo de CFD o usuário deve determinar ou utilizar o valor previamente determinado para as seguintes propriedades:

- (1) discretização;
- (2) número de painéis (N_p);
- (3) passo de tempo (dt);
- (4) número de iterações (i_t^*);
- (5) tamanho do núcleo (σ).
- (6) número de Reynolds (R_e).

Realiza-se o levantamento em túnel de vento dos coeficientes aerodinâmicos e de outras características das estruturas conforme detalhado na seção sobre o método experimental, o procedimento de entrada dos dados de acordo com a seção do módulo de dinâmica dos fluidos computacional e o processamento segundo a sub-seção sobre o Método da Vorticidade em Partículas.

4.1.1. Cilindro de Seção Circular

Para a seção transversal de um cilindro ideal, com comprimento infinito, do tipo circular, (figura 46) com uma velocidade do vento de 15m/s e Número de Reynolds de aproximadamente 8×10^6 , do processamento computacional resulta o valor de 0,6 para o coeficiente de arrasto, conforme o esperado.

A seção transversal de um cilindro do tipo circular apresenta características fundamentais muito especiais em aerodinâmica. Como a seção é completamente simétrica, sem apresentar pontos de descolamento do escoamento este despreendimento ocorre em pontos de separação transitórios, que variam com o tempo e a velocidade do escoamento. Portanto, aproveita-se esta simulação para verificar a influência das propriedades (1) a (5):

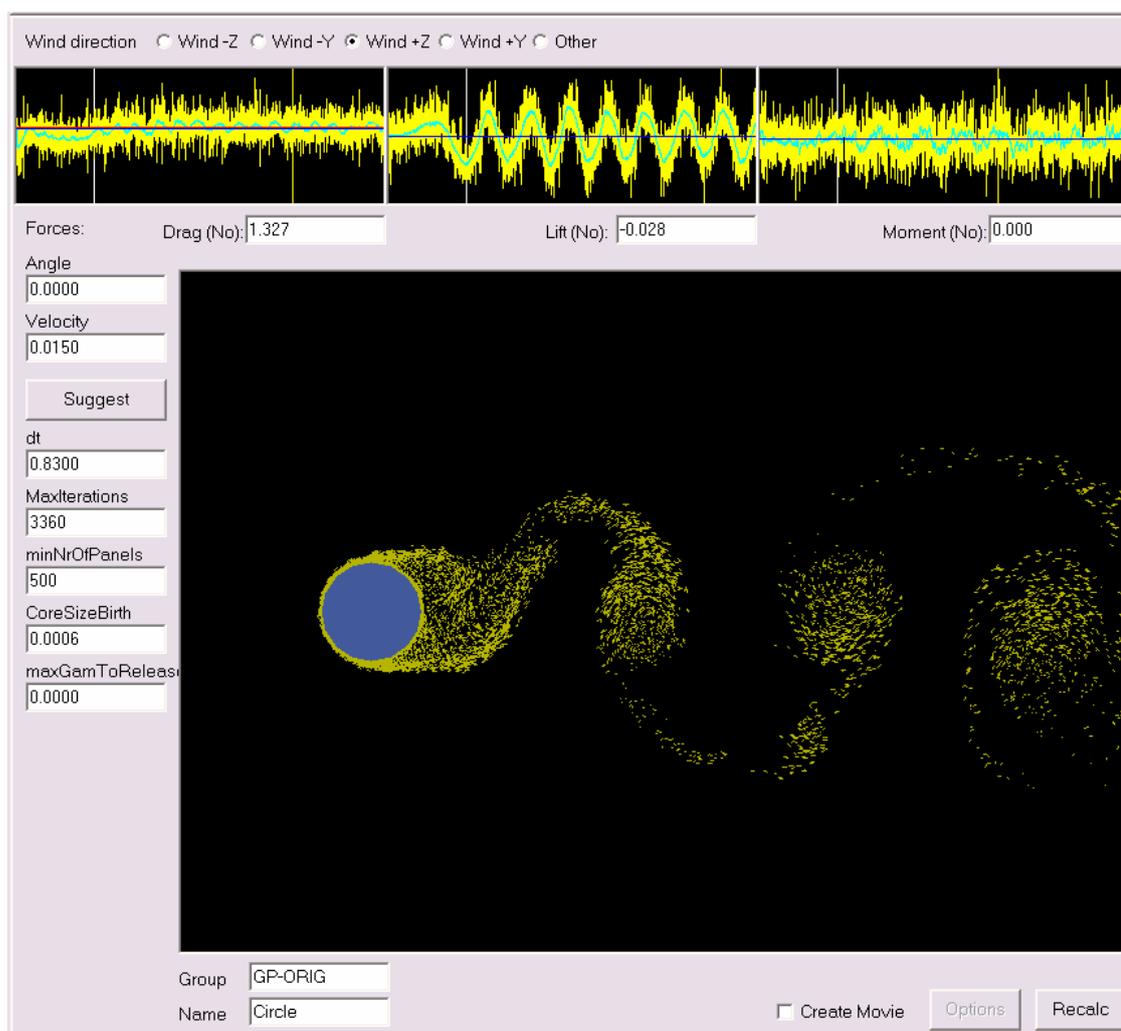


Figura 46: instantâneo do processamento da seção transversal do círculo

A discretização (1) é o nível de refinamento global da malha no entorno do sólido. No Método da Vorticidade Discreta isto reflete finalmente na quantidade de marcadores de fluido, ou seja, a distância entre os pontos de cálculo em cada passo de tempo uma vez que o número total de painéis vai ser determinado a partir da discretização pela quantidade de faces da seção transversal.

Neste exemplo de uma seção circular verifica-se facilmente quando há uma baixa discretização afinal ela repercute na qualidade do contorno da seção do sólido (figura 47). É importante que a discretização não seja baixa demais, porém um elevado número de divisões requer mais tempo de cálculo uma vez que com mais subdivisões resultam mais pontos de cálculo em cada etapa de tempo.

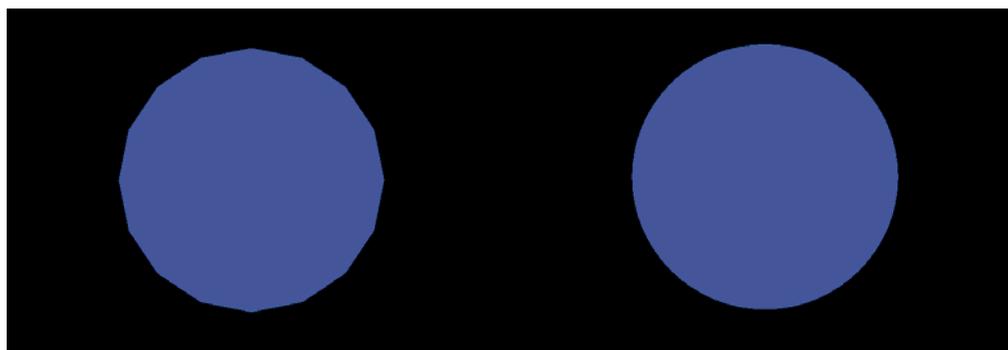


Figura 47: baixa discretização e boa discretização

O número de painéis (2) é a quantidade de subdivisões por faces da seção transversal, a quantidade determina a discretização fina junto ao sólido onde acontecem os fenômenos mais interessantes como adução e liberação das partículas.

Visualiza-se a influência do número de painéis (N_p) na superfície de contorno nos resultados no histórico no tempo. Neste exemplo, para um intervalo de tempo (d_t^*) de 0,0014s, 2000 iterações (i_t), tamanho do núcleo (σ) de 0,005m e número de Reynolds (R_e) de aproximadamente 8×10^6 observam-se as diferenças para 100, 200 e 400 painéis (figuras 48, 49 e 50). O sinal aparenta maior clareza quando se aumenta o número de painéis; porém, novamente, deve-se ter cuidado para não aumentar exageradamente a quantidade de cálculos desnecessariamente. A partir de um nível de discretização não aparecem vantagens em discretizar mais já que o parâmetro número de vórtices liberados por painel passa a governar a

discretização localizada em partículas. Observa-se, finalmente, que para seções normais, de 300 a 400 painéis de superfície (N_p) devem ser suficientes.

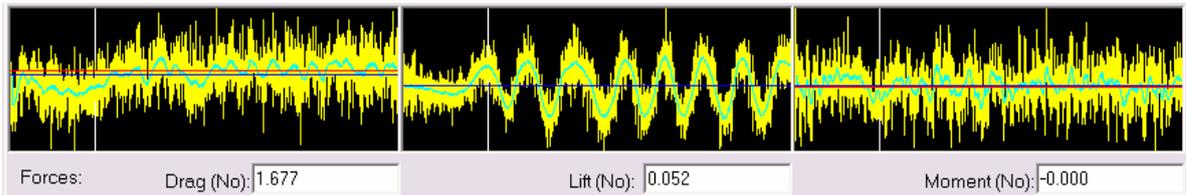


Figura 48: número de painéis igual a 100

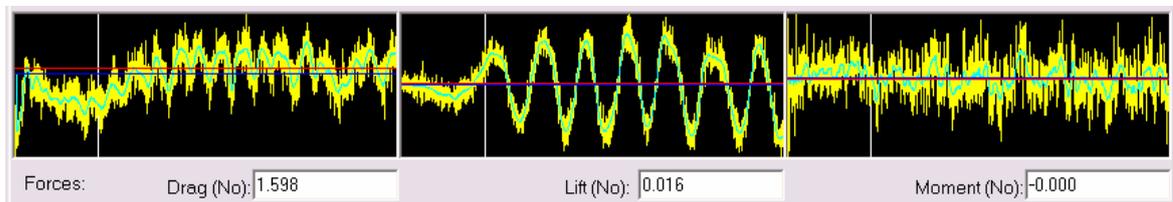


Figura 49: número de painéis igual a 200

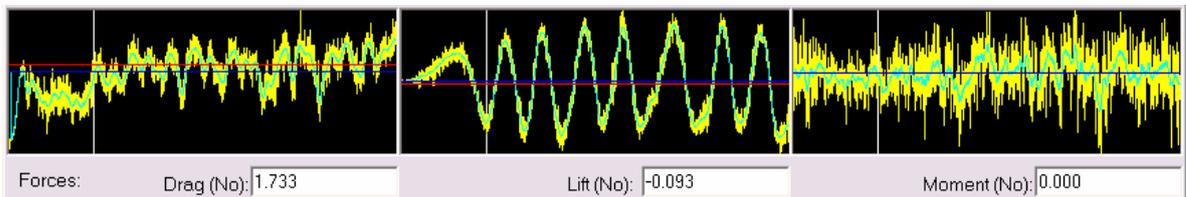


Figura 50: número de painéis igual a 400

O parâmetro chamado de passo de tempo (3), ou intervalo de tempo (d_t^*) é essencial para os cálculos e é automaticamente definido pelo programa como adimensional por meio da relação entre a velocidade U e a distância padrão B (equação 4.1):

$$d_t^* = d_t \left(\frac{U}{B} \right) \quad (\text{equação 4.1})$$

Porém, o usuário pode alterar este valor, realizar o processamento e verificar as diferenças. Observa-se a influência no exemplo da seção circular com 400 painéis, tamanho do núcleo de 0,005m e Re aproximadamente 8×10^6 (figuras 51 e 52).

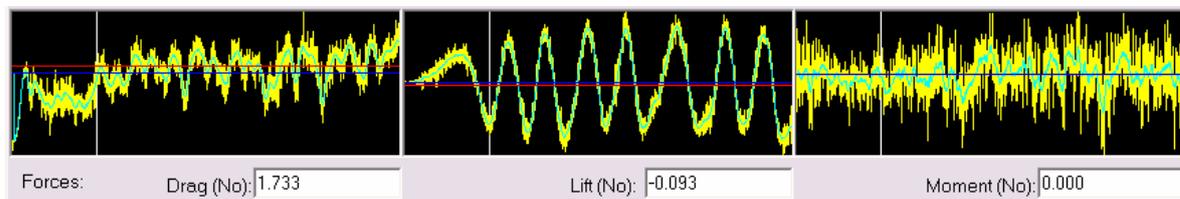


Figura 51: passo de tempo de 0,0014s

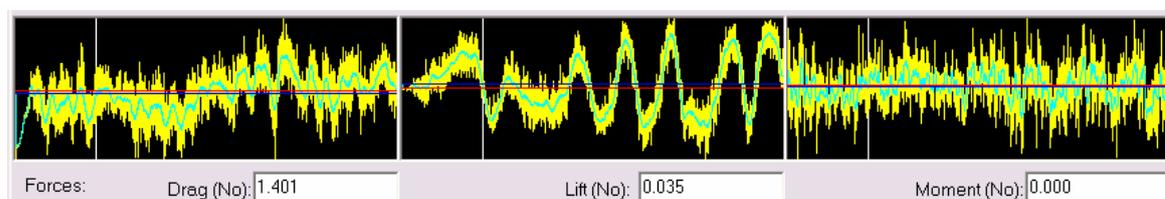


Figura 52: passo de tempo de 0,0007s

Este é um parâmetro cuja alteração varia muito e tem íntima relação com a necessidade do número de iterações para se chegar a um resultado satisfatório. Verifica-se que para um intervalo de tempo de aproximadamente 0.025s pelo menos 1200 iterações são necessárias.

O número de iterações (4) influencia diretamente na qualidade dos resultados obtidos. Poucas iterações não dão o tempo necessário para que todos os fenômenos entrem em ação e, portanto, para que exista um resultado médio que possa ser considerado significativo. No programa trata-se de simulações com evoluções no tempo e o excesso de interações é um desperdício de tempo e processamento de dados.

Observa-se a convergência dos resultados médios em um arquivo salvo pelo programa para cada processamento, este arquivo salva os resultados para cada 100 iterações com um mínimo de 250 iterações (figura 53).

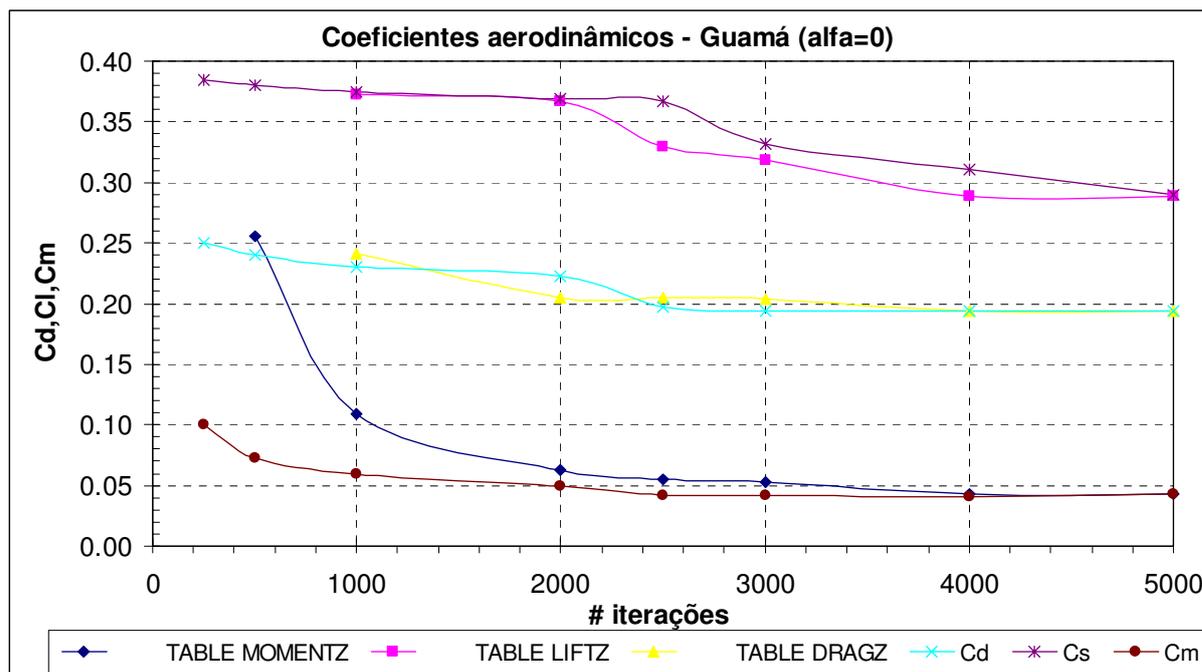


Figura 53: convergência para duas simulações com parâmetros diferentes

Na figura 53 pode-se observar que alguns resultados demoram um pouco mais para convergir e também é possível verificar que se deve alterar outro parâmetro para acelerar o processo de cálculo. Concluiu-se que o número de iterações (i_t) deve ser superior a 1200 para os casos mais simples e na maioria dos casos pode ser inferior a 3000. Nos casos em que se estudam diferentes configurações de detalhes da seção transversal de pontes, por causa da grande diferença entre o tamanho dos painéis envolvidos deve-se aumentar o número de iterações para aproximadamente 5000.

O tamanho do núcleo (5) neste método representa a escala da discretização da vorticidade em cada partícula. Trata-se do refinamento da malha criada para acompanhar a vorticidade em cada etapa no tempo. É o parâmetro de efeito mais complexo, se for escolhido um valor pequeníssimo as bolhas de vórtex são também muito pequenas e produzem singularidades; se for escolhido um valor muito grande a solução é prejudicada e importantes processos físicos podem ser desconsiderados. Se muitos fenômenos localizados referentes a detalhes na seção precisam ser considerados o tamanho do núcleo necessário para um resultado mais preciso pode ser significativamente menor.

Muitos autores recomendam um tamanho do núcleo em função de uma constante q e do espaçamento inicial entre vórtices h (equação 4.2):

$$\sigma = h^q \quad (\text{equação 4.2})$$

A constante varia entre 0,5 e 0,75 e h é igual a uma relação entre o comprimento da linha externa da seção transversal o e o número de vórtices liberados por painel n_r (equação 4.3):

$$h = \frac{\left(\frac{o}{N_p}\right)}{n_r} \quad (\text{equação 4.3})$$

Demonstra-se a influência do tamanho do núcleo (σ) para o intervalo de tempo de 0,0007s, com 400 painéis, Reynolds de aproximadamente 8×10^6 e tamanho do núcleo de 0,005m ou tamanho do núcleo de 0,020m (figuras 54 e 55).

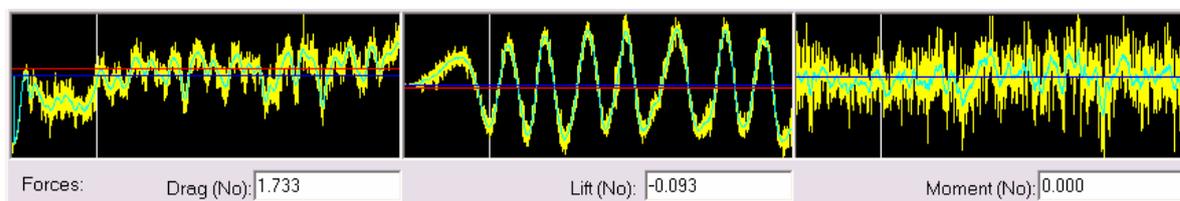


Figura 54: tamanho do núcleo de 0,005m

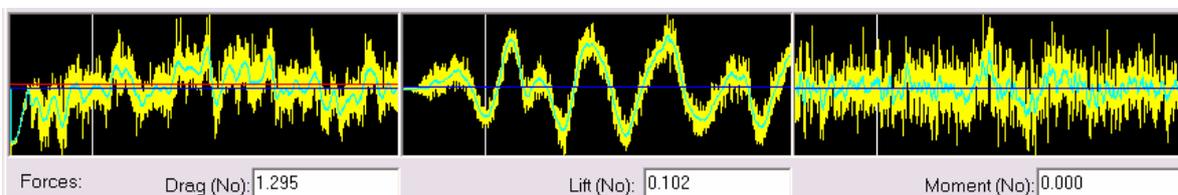


Figura 55: tamanho do núcleo de 0,020m

Verifica-se que apesar de resultarem em valores médios semelhantes a qualidade do processamento é melhor para o caso do tamanho do núcleo menor, $\sigma = 0,005\text{m}$, apresentando uma amplitude de variação menor ou seja, um sinal no histórico do tempo mais limpo.

O número de vórtices liberados por painel pode ser um pouco influenciado modificando o parâmetro que controla o nível máximo dos vórtices liberados (*MaxGamToRelease*).

Devido a complexidade teórica envolvida na escolha dos parâmetros, número de vórtices liberados por painel e nível máximo dos vórtices liberados foram retirados da tela de entrada de dados. Utiliza-se automaticamente uma relação de 2 a 4 vórtices liberados por painel conforme o comprimento resultante da quantidade de divisões determinada pelo tamanho do núcleo (σ) em metros e número de painéis (N_p) na superfície de contorno.

4.1.2. Prisma de Seção Quadrada

Encontra-se para uma velocidade do vento de 15m/s e Número de Reynolds dentro da faixa de 10^5 a 10^7 o coeficiente de arrasto para a seção transversal de um cilindro do tipo quadrada (figura 56) o valor de 2,03. Esse resultado é bastante satisfatório e aproveita-se esta simulação para verificar o comportamento frente modificações da propriedade mais fundamental da mecânica dos fluidos:

(7) Número de Reynolds:

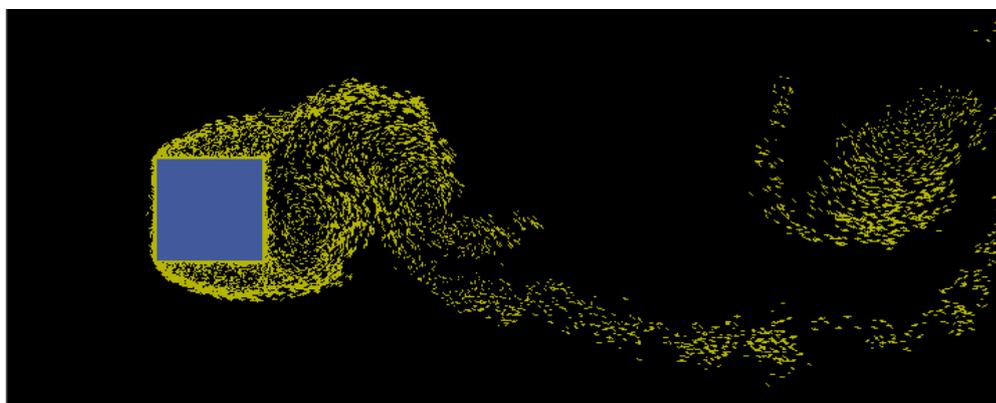


Figura 56: instantâneo da tela dos vórtices na seção transversal quadrada

Os cantos vivos do quadrado definem claramente os pontos de separação e devido a isto, conforme aguardado, observa-se apenas uma pequena dependência do Número de Reynolds (Re) nos resultados obtidos.

Com estas simulações e outras mais realizadas observa-se que todos estes parâmetros, que podem ser alteradas, influenciam de alguma maneira na rapidez e na qualidade da resposta obtida e pelo usuário no módulo de dinâmica dos fluidos computacional.

A base de dados que gera automaticamente valores para o processamento não deve ser considerada infalível e destaca-se que, em casos especiais, o ideal é verificar a influências destes parâmetros nos resultados.

Além disto, é importante contar sempre com a participação de um especialista em aerodinâmica na equipe que realizará a análise dos resultados.

4.1.3. Prisma de Seção Retangular

Avalia-se, para uma velocidade do vento de 15m/s e Número de Reynolds de aproximadamente 10^6 , o coeficiente de arrasto para a seção transversal de um retângulo o valor em 0,7, no caso da largura ser o dobro da espessura. Para a seção transversal de um retângulo com largura maior que quatro vezes a espessura (figura 57) estimou-se o coeficiente de arrasto em 0,4. Resultados este de acordo com o esperado devido aos dados da literatura e normas.



Figura 57: instantâneo da tela dos vórtices na seção transversal retangular

4.1.4. Prisma de Seção Tipo Placa

Encontra-se, para uma velocidade do vento de 15m/s e Número de Reynolds de aproximadamente 10^6 , o coeficiente de arrasto para o prisma de seção tipo placa, ou retângulo consideravelmente alongado, o valor de 0,09. Este é bastante semelhante aos valores encontrados em ensaios anteriores para relações entre a espessura e a largura da placa (e/l) menores que um décimo (figura 58).

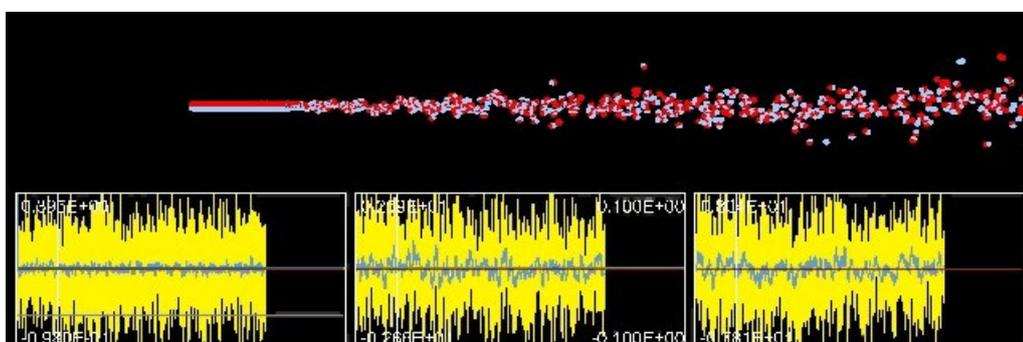


Figura 58: instante do vídeo durante o processamento da seção tipo placa

4.1.5. Cilindro de Seção Tipo Aerofólio

Para uma seção do tipo aerofólio NACA2412 (figura 59) com uma velocidade do vento de 15m/s e Número de Reynolds 3×10^3 obtêm-se o coeficiente de arrasto de 0,006. Valor bastante semelhante ao encontrado na bibliografia de resultados experimentais e numéricos: $C_D = 0,0061$.



Figura 59: instantâneo da tela dos vórtices na seção transversal do aerofólio

4.2. ENSAIOS DE PONTES NO LAC

Nesta seção apresentam-se os dados dos ensaios aerodinâmicos de pontes realizados no LAC que foram introduzidos no programa e utilizados como parâmetros de real comparação. Nestes casos as velocidades do vento consideradas são de 30 à 45m/s por se tratarem de obras com sua faixa de aplicação. Os resultados dos ensaios em túnel de vento encontram-se no anexo A nos gráficos e os resultados completos podem ser encontrados na bibliografia.

As seções já estudadas no LAC incluem o estudo paramétrico com seções simples, oito no total; as três grandes pontes nacionais estaiadas: as Configurações I, II e III da Ponte Guamá, somando três modelos; a Ponte Paulicéia; e o Complexo Viário Real Parque “Jornalista Roberto Marinho”. Desta forma, totalizam-se 5 modelos numéricos de pontes reais.

Devido a grande quantidade de resultados por causa da variação no ângulo de ataque e também a complexidade crescente nas simulações numéricas, em conjunto com as subsequentes comparações, os resultados do trabalho nas seções seguintes do Capítulo 3, com gráficos e tabelas, encontram-se compilados no Apêndice 1, após a Bibliografia. A análise comparativa dos resultados encontra-se no Capítulo 4.

4.2.1. Estudo Paramétrico

Nesta seção do trabalho utiliza-se como base a dissertação de mestrado sobre um estudo paramétrico de ensaios de modelos seccionais de pontes do ano de 2003, de autoria de Lisandra Fraga Limas: “Determinação das Características Aerodinâmicas de Seções Transversais de Pontes em Túnel de Vento”. Este estudo com seções transversais simples (figura 60) buscou levantar uma base de dados e aumentar a experiência sobre análise aerodinâmica de tabuleiros de pontes no LAC e agora foi utilizado para enriquecer a comparação de resultados.

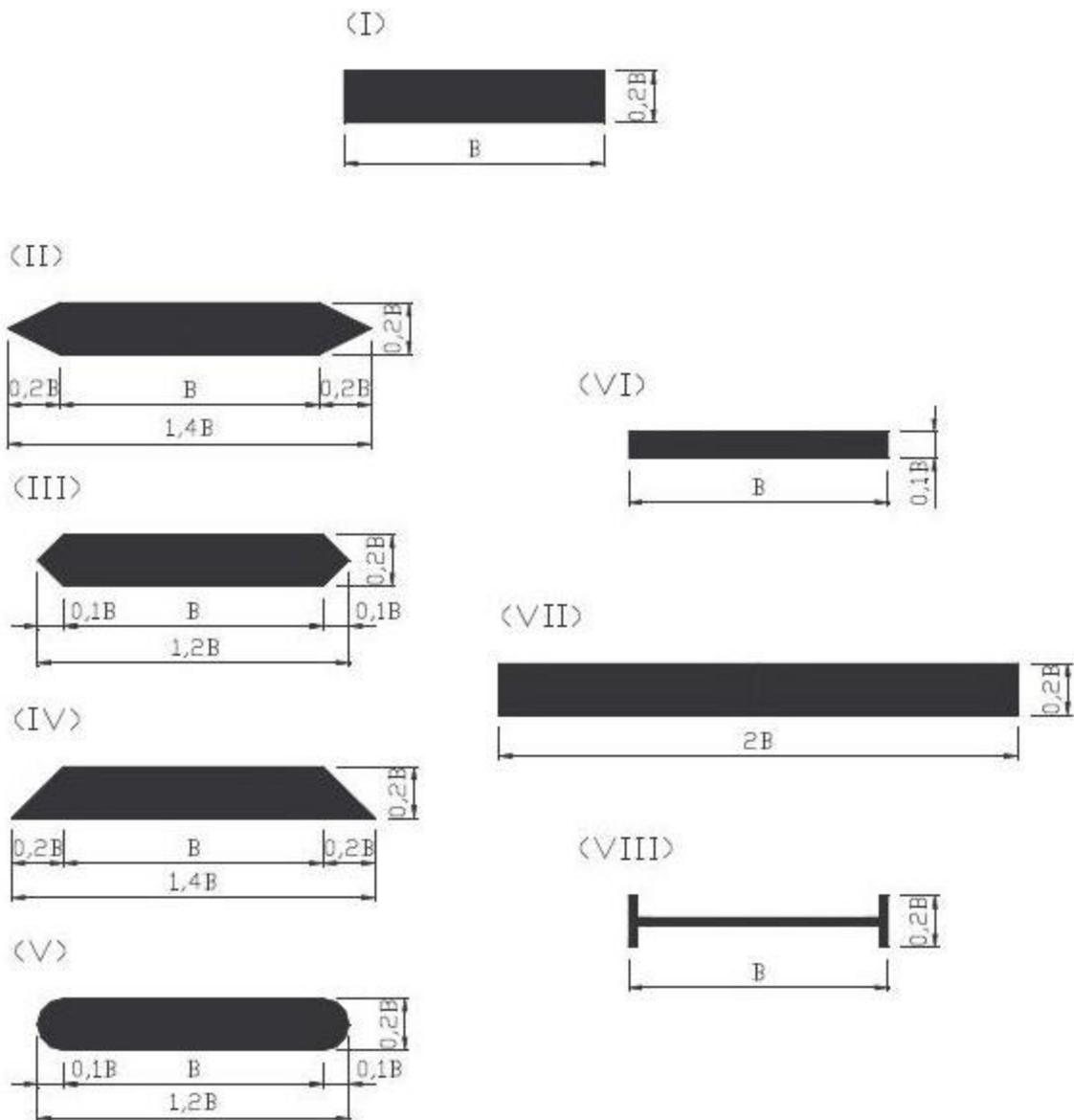


Figura 60: estudo paramétrico: $B = 200\text{mm}$ ou 12m

Os modelos reduzidos foram fabricados em madeira na escala 1:60 com comprimento de 1200mm. O parâmetro básico do estudo é a largura da seção (B) que têm 200mm nos protótipos representando 12m nas estruturas. Todas as demais dimensões, a altura e os dispositivos aerodinâmicos, são colocados como funções deste parâmetro. Na seção média dos oito modelos foram inseridas tomadas de pressão com mais de mil perfurações por peça. Os modelos reduzidos foram construídos sem semelhanças de materiais e estruturas, isto é, unicamente as propriedades geométricas foram levadas em conta.

4.2.2. Ponte Guamá / PA

O LAC realizou estudos da ação do vento sobre três modelos seccionais reduzidos para a ponte estaiada sobre o rio Guamá, no anel rodoviário da cidade de Belém na selva amazônica do estado do Pará, Brasil. A ponte em segmentos pré-moldados em concreto tem um comprimento total da superestrutura de 582m, com um vão principal de 320m e dois vãos de 131m. O tabuleiro, cuja largura é de 14,20m, é suspenso 31m acima do leito do rio Guamá. Em fase inicial foi ensaiada a Configuração I (figura 61) do projeto básico da estrutura.

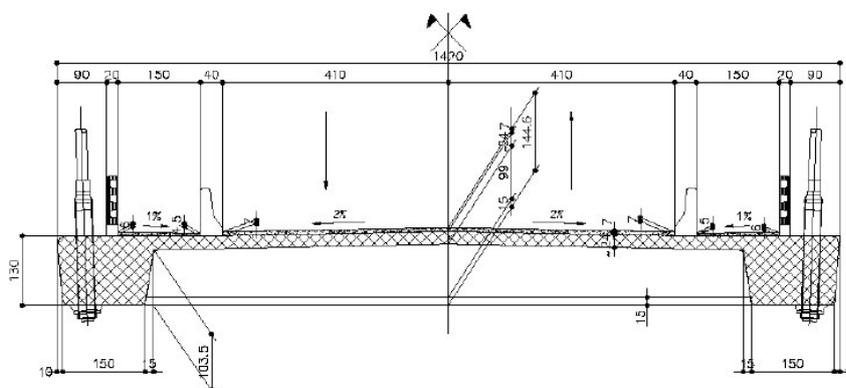


Figura 61: medidas da seção transversal tipo da ponte na Configuração I

Esta foi transformada para a Configuração II (figura 62), parte integrante do projeto executivo da ponte, também ensaiada. As modificações foram na geometria do guarda-rodas e guarda-corpos que se tornaram mais vazados e conseqüentemente mais aerodinâmicos.

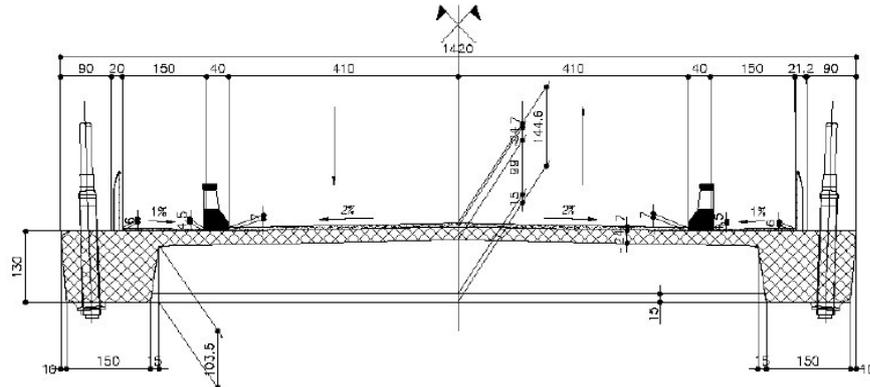


Figura 62: medidas da seção transversal tipo da ponte na Configuração II

Na fase final foi apresentada outra seção que também foi ensaiada: a alteração foi no vigamento longitudinal e inclinação das paredes internas constituindo-se na aqui denominada Configuração III (figura 63).

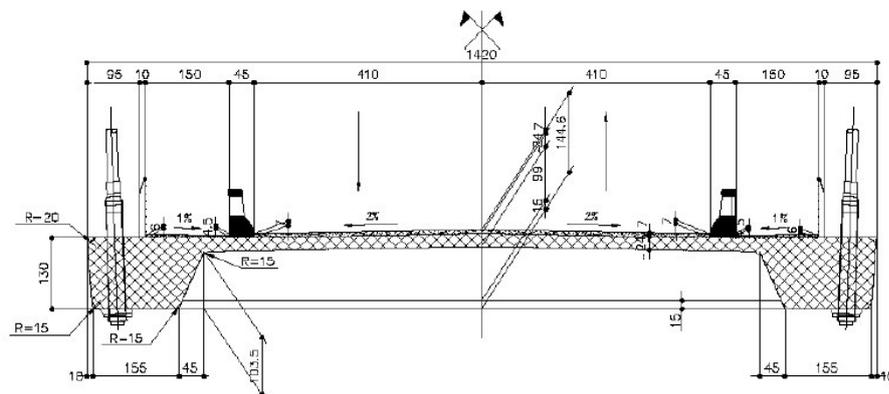


Figura 63: medidas da seção transversal tipo da ponte na Configuração III

As mudanças resultaram da evolução da seção transversal na seqüência de projeto com o objetivo de melhorar sua performance aerodinâmica e evidenciam um caso em que uma análise numérica inicial poderia direcionar a forma da seção transversal da ponte para o modelo final.

Abaixo se apresentam o modelo seccional da seção transversal da Ponte Guamá no interior do túnel de vento (figura 64) e a elevação da última aduela pré-moldada da Ponte Guamá, (figura 65) fechando o vão central.



Figura 64: modelo seccional da seção transversal da Ponte Guamá



Figura 65: colocação da última aduela pré-moldada da Ponte Guamá

4.2.3. Ponte Paulicéia / Paraná - SP / MS

Foram realizados também estudos da ação do vento em modelo seccional reduzido da ponte estaiada sobre o Rio Paraná em Paulicéia (figura 66), na divisa dos estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul, Brasil. A estrutura proposta tem um comprimento total da superestrutura de 400m, composto de um vão principal central de 200m e dois vãos laterais de 100m. A largura da seção transversal do tabuleiro é de 17,30m e sua maior altura, nas longarinas, é de 1,20m (figura 67). Os pilares chegam à 61m de altura.

Dois modelos seccionais reduzidos, modelo de pressões e modelo dinâmico (figura 68), da configuração proposta da seção transversal do tabuleiro da ponte foram projetados e construídos em uma escala geométrica 1:50.

4.2.4. Complexo Roberto Marinho / Pinheiros – SP

Recentemente realizaram-se estudos da ação do vento, em modelo seccional reduzido, do tabuleiro dos dois vãos principais do Complexo Viário Jornalista Roberto Marinho, Ponte Espiraiada e Ponte Morumbi. Trata-se de duas pontes estaiadas que estão sendo construídas em uma região considerada nobre de São Paulo, SP, Brasil, sobre o rio Pinheiros e suas vias marginais (figura 69). As duas pontes em curva compartilham um único mastro de 139m de altura em forma de X. Sob o mastro os tabuleiros dos vãos principais, curvos e estaiados com 290m, se sobrepõem.



Figura 69: maquete computacional arquitetônica

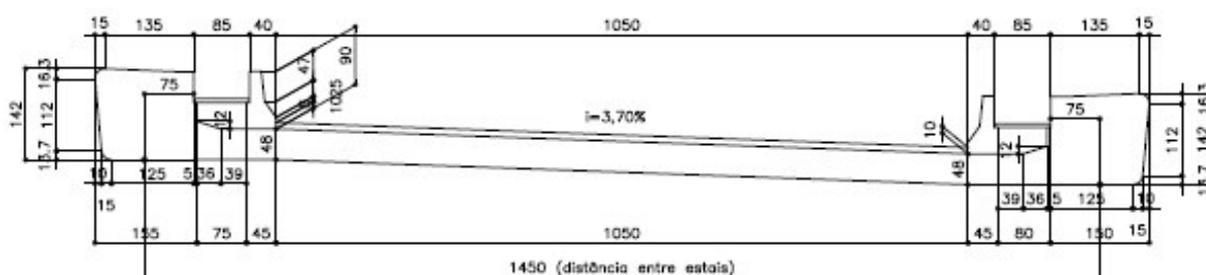


Figura 70: medidas da seção transversal tipo da ponte

A complexidade geométrica da estrutura e a seção transversal pouco aerodinâmica (figura 70) fizeram com que fosse necessária uma verificação experimental mais detalhada através de sete etapas Loredo-Souza (2006) e Loredo-Souza (2007) de modelos em túnel de vento:

- (1) Estudo de pressões e forças aerodinâmicas estáticas no mastro;
- (2) Estudo de pressões e forças aerodinâmicas nos tabuleiros;
- (3) Estudo da resposta dinâmica do tabuleiro;
- (4) Estudo da resposta dinâmica da estrutura completa;
- (5) Estudo da resposta dinâmica do mastro isolado (situação construtiva);
- (6) Estudo da alternativa aerodinâmica do tabuleiro;
- (7) Estudo da alternativa aerodinâmica da estrutura completa.

Na etapa (1) em uma escala geométrica 1:200 e na etapa (2) foram utilizados modelos rígidos, acoplados a balanças e instrumentados com sensores de pressão (figura 71).



Figura 71: pontos de medida de pressão na seção transversal tipo da ponte

Nas etapas (2) (3) e (6) foi admitida a hipótese de escoamento bidimensional, com modelos seccionais em escala 1:50 (figuras 72 e 73).



Figura 72: modelo seccional de forças com célula de carga



Figura 73: detalhe do apoio no modelo seccional dinâmico

4.2.4.1. Modelo Completo Aeroelástico da Ponte

Nas etapas (4), (5) e (7) um modelo aeroelástico da ponte em escala 1:125 (figura 74) com semelhança de número de *Froude* foi projetado, construído e ensaiado. No modelo completo utiliza-se uma instrumentação constituída de 16 canais de acelerometria, nos quais foram medidas as amplitudes de vibrações em posições criteriosamente escolhidas, em função da velocidade e direção do vento.

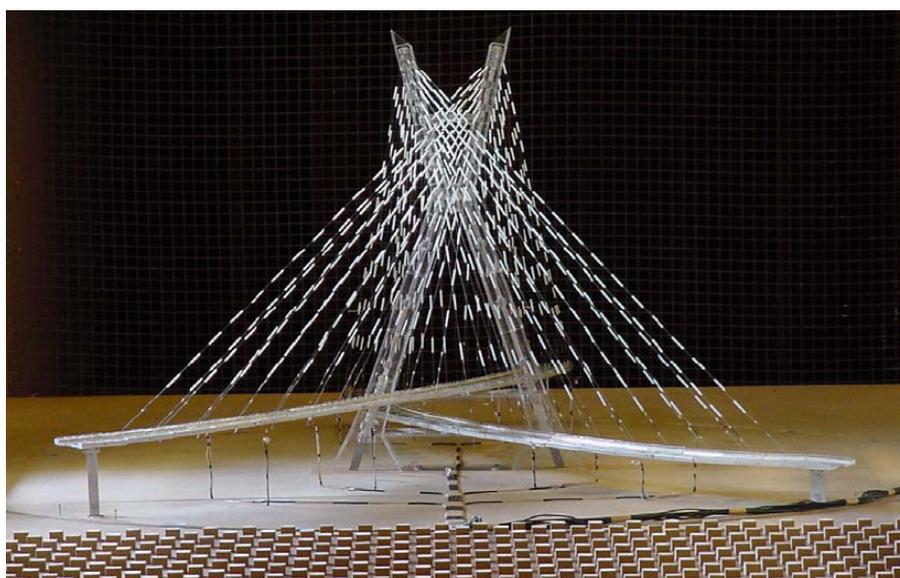


Figura 74: modelo aeroelástico completo na mesa M – IV

O tabuleiro foi modelado como sendo constituído de uma espinha, projetada para reproduzir corretamente as três componentes de rigidez relevantes da seção transversal: flexão segundo dois eixos ortogonais e torção. A curvatura no plano horizontal é aproximada por segmentos curtos e elementos complementares são afixados à espinha através de presilhas de aço temperado e parafusos de aço inox. A posição das presilhas é definida pelo alinhamento com os pontos de fixação dos estais. À espinha são afixados elementos complementares, responsáveis pela correta forma aerodinâmica e massa do conjunto. O material utilizado foi uma liga de alumínio, fresado para uma forma final com tolerâncias de 0,1mm.

Para o acabamento, durante a montagem, a parte central do tabuleiro é vedada através de lâmina plástica para que não haja descontinuidades na forma aerodinâmica. Também são acrescentados os guarda-corpos e parte dos guarda-rodas, que por questões construtivas não estão incluídos nos complementos de alumínio fresado. A montagem do conjunto é um processo delicado, algo semelhante à construção do tabuleiro da estrutura real, pois o tabuleiro não se sustenta sem o estaiamento.

Os estais (figura 75) foram modelados segundo dois aspectos essenciais: sua rigidez e tensão axial, que têm influência na rigidez do conjunto, e seu arrasto aerodinâmico, que é responsável por parte das forças aerodinâmicas a serem transferidas para tabuleiros e mastro.

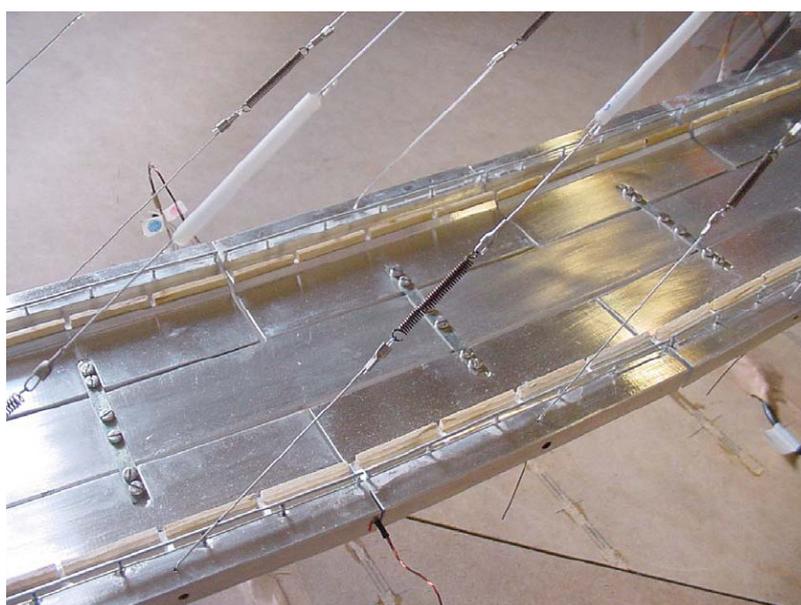


Figura 75: detalhes do estaiamento e tabuleiro do modelo aeroelástico

As amplitudes de vibrações em pontos escolhidos da estrutura foram medidas por meio de pequenos acelerômetros biaxiais (figura 76). Os sinais de aceleração são registrados por meio de um sistema de aquisição de dados e posteriormente processados integrados duas vezes no domínio do tempo, sendo convertidos em amplitudes de deslocamentos, cujos picos e valores R.M.S. (*root mean square*) são julgados à luz de critérios estabelecidos pelo projetista.

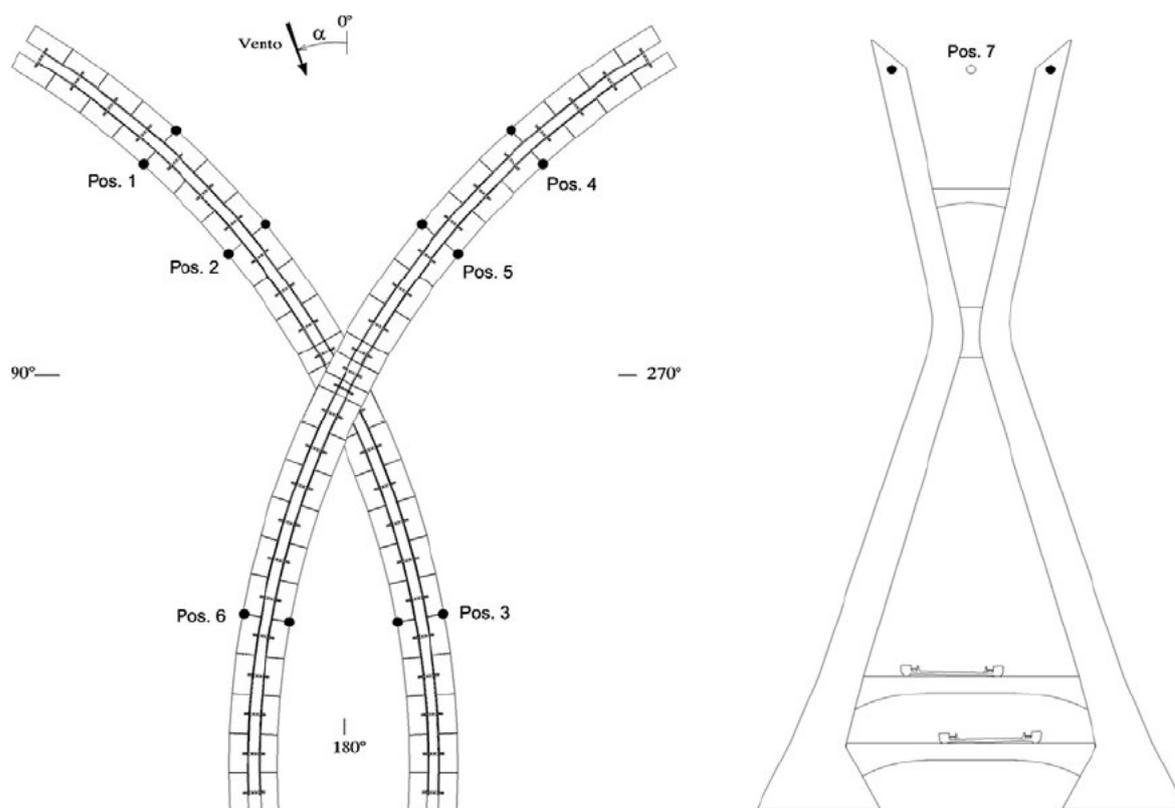


Figura 76: posicionamento dos acelerômetros e definição do ângulo do vento

Analogamente ao tabuleiro, o mastro foi modelado através de um esqueleto equivalente de alumínio responsável pela correta rigidez da estrutura para que se reproduzam corretamente as primeiras formas modais de vibração livre. O esqueleto é envolvido por segmentos tronco-piramidais de acrílico, responsáveis pela correta forma aerodinâmica e são acrescentados pequenos elementos de chumbo, corrigindo a massa do conjunto. A base do modelo do mastro e os apoios extremos das quatro extremidades dos tabuleiros também foram modelados.

Durante a etapa de construção (figuras 77 e 78) evidenciou-se a dimensão da obra e a originalidade da solução adotada no projeto: um novo marco para a cidade foi sendo erguido.



Figura 77: construção do pilar das pontes



Figura 78: construção dos tabuleiros das pontes em avanços sucessivos

4.2.4.2. Dispositivo Aerodinâmico do Tipo Nariz de Vento

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais indicam que a velocidade crítica para ângulo de ataque de 0° é aproximadamente 70m/s, a qual pode considerar-se como alta para a região onde a estrutura está localizada. Contudo, conforme os dados de Loredou-Souza (2006) observa-se que para ângulo de ataque de $+4^\circ$ a velocidade crítica se reduz a aproximadamente 45m/s, o que, a despeito da alta relação entre as frequências vibração livre em torção e translação, indica uma seção pouco favorável do ponto de vista aerodinâmico.

A norma brasileira de vento, NBR6123 da ABNT (1998), determina uma velocidade básica de vento de 40m/s para São Paulo capital. Porém, nas últimas décadas o que se têm observado é a elevação das máximas velocidades médias e uma diminuição de seus intervalos de recorrência. Além disso, existem fatores locais a serem observados e determinados, faltam dados de vento específicos do ponto onde se localiza a obra e uma incidência com baixo ângulo de ataque, como quatro graus é bastante provável.

Entretanto, sabe-se que a seção se comporta um pouco diferente dos ensaios seccionais e necessita de intervalos de tempo maiores para atingir velocidades médias máximas em dimensões superiores. Também colabora para que não se verifique isto o comportamento conjunto de todos demais elementos como cabos, mastro e o amortecimento.

Por conseguinte o que se realiza é uma série de medidas preventivas, estuda-se um comportamento observado em algumas etapas dos ensaios, mas não comprovados em outras etapas do mesmo modelo. Projeta-se a estrutura normalmente sem estas considerações, mas fica o alerta de que podem ocorrer. Se forem observadas as alternativas estão avaliadas e uma medida mitigadora de custo viável disponível como alternativa de intervir na obra já concluída caso a estrutura venha a apresentar muito frequentemente os problemas estimados nos ensaios seccionais.

Existem diversas formas de alterar o comportamento da estrutura que podem ser classificadas como dispositivos mecânicos ou aerodinâmicos. Os mecanismos mecânicos modificam propriedades fundamentais ao comportamento da estrutura; enquanto que os artifícios aerodinâmicos buscam modificar a forma da seção transversal do tabuleiro da ponte. Ambos nem sempre são viáveis, uma vez que a seção foi determinada pelas necessidades estruturais e funcionais.

Usualmente a introdução de abas, aberturas e flapes são mais fáceis de integrar ao projeto do que alterações em peças estruturais. Apenas adicionam-se materiais com o menor peso possível e que alteram a forma, consequentemente modificando o escoamento.

Para este caso analisa-se o uso de um dispositivo aerodinâmico de extremidade no tabuleiro. O tipo escolhido pelo projetista foi do tipo bordo suavizador pela sua facilidade de execução, instalação e manutenção. A modificação, a ser introduzida posteriormente, consiste na utilização de um *nariz de vento* (figura 79), que pode ser construtivamente implementado através de uma estrutura leve, anexada nas duas faces laterais dos tabuleiros.

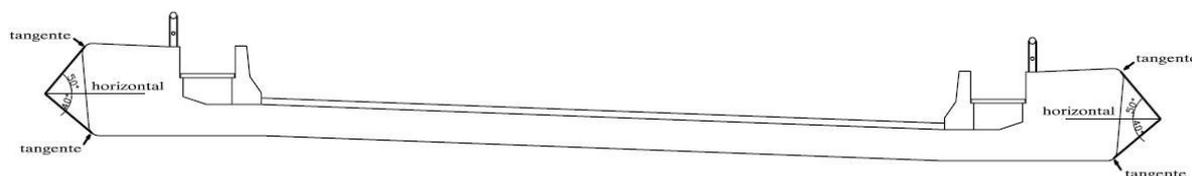


Figura 79: nariz de vento para Ponte Roberto Marinho

A utilização do dispositivo aerodinâmico proposto no modelo ensaiado em túnel de vento (figura 80) produz melhorias significativas no desempenho aerodinâmico da seção do tabuleiro, para o desprendimento de vórtices e no que diz respeito às velocidades críticas de drapejamento (*flutter*). A instalação do nariz de vento pode ser uma solução eficaz para melhorar o desempenho da seção quanto aos vórtices, caso não se venha a observar na estrutura real os níveis de amortecimento esperados.



Figura 80: dispositivo aerodinâmico tipo bordo suavizador

Os resultados mostram que a lâmina adicionada à seção modifica o escoamento de ar ao seu redor fornecendo valores mais satisfatórios. No túnel de vento o estudo da alternativa aerodinâmica foi realizado sobre o modelo seccional e também sobre o modelo aeroelástico completo (figura 81).

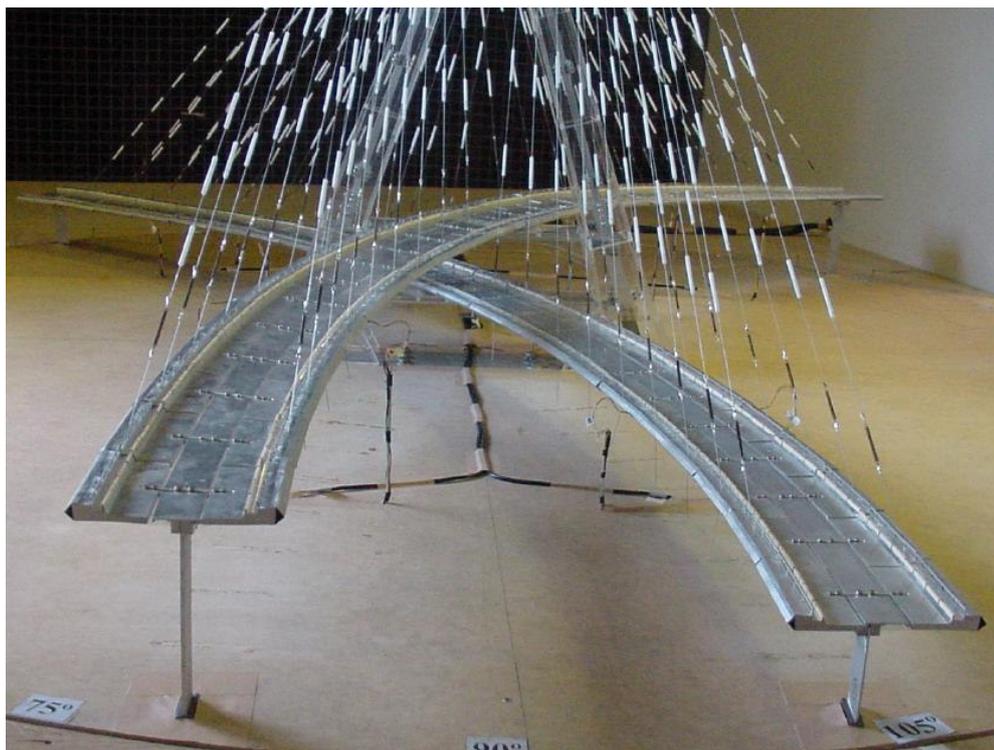


Figura 81: dispositivo aerodinâmico no modelo completo

Nestes ensaios observa-se, no entanto, que a utilização do nariz de vento não produz melhorias significativas no desempenho aerodinâmico da estrutura completa, com tabuleiro, estais e mastro, no que concerne à resposta frente à turbulência atmosférica. Esta constatação indica que a resposta dinâmica observada para a estrutura pode ser dominada pelas características aerodinâmicas do mastro. Esta hipótese é corroborada pelos estudos das etapas anteriores (5) e (6).

Neste trabalho, sabendo-se que a instalação de um nariz de vento pode elevar o valor da velocidade crítica busca-se aumentar os dados disponíveis para detectar a melhor seção dentre várias configurações, ou seja, variando os ângulos e comparando seus coeficientes aerodinâmicos.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS E PROPOSTAS

5.1. RESULTADOS DOS MODELOS PARAMÉTRICOS

Devido a grande quantidade de resultados a maioria destes encontram-se no Apêndice 1. Após as tabelas com os resultados numéricos de dinâmica dos fluidos computacional encontram-se os gráficos comparativos com valores de túnel de vento para cada um dos modelos ensaiados. Apresentam-se junto às análises somente os principais resultados com o objetivo de facilitar as observações.

Os resultados de coeficientes aerodinâmicos encontram-se, como usualmente, em função da variação no ângulo de ataque (α), em resultados pontuais, com intervalo de um grau e na faixa de dez graus positivos (figura 82) à dez graus negativos. Ampliou-se a gama de resultados numéricos para dez graus conforme se observou ser usual na literatura. Objetivou-se aproveitar a facilidade de obtenção e complementar os resultados já disponíveis, já que anteriormente considerava-se que não ocorrem incidências de vento significativas para tabuleiros de pontes na faixa acima de oito graus no ângulo de ataque.

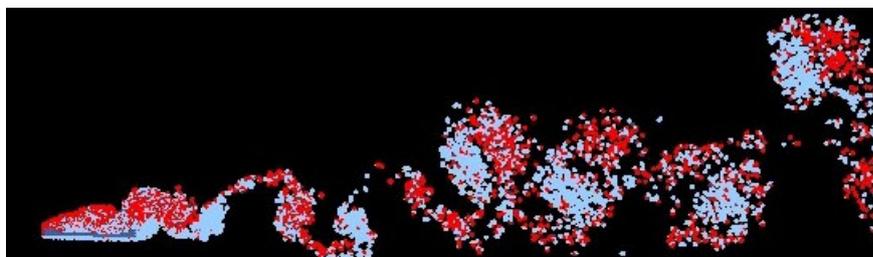


Figura 82: instantâneo dos vórtices para um ângulo de ataque de $+10^\circ$

Representa-se o coeficiente de arrasto (C_A), ou *drag coefficient* (C_D), por meio de triângulos; o coeficiente de sustentação (C_S), ou *lift coefficient* (C_L), por meio de círculos e o coeficiente de torção (C_M), ou *moment coefficient* (C_D), por meio de quadrados. Mostram-se os resultados pontuais do túnel de vento nos gráficos por meio de casas cheias e os resultados numéricos com casas vazias. Exibem-se nos resultados simulações suaves (*smooth*), que em alguns casos são duas (V2), e também as simulações turbulentas (*turb*) em túnel de vento.

As linhas, nos modelos paramétricos, são aproximações por polinômios para os resultados em CFD; já nos modelos das três pontes, as linhas são aproximações para os resultados do túnel de vento e se encontram em destaque, mais grossas. Assim procura-se mostrar a proximidade dos resultados e evidenciar que o comportamento em função do ângulo de incidência do vento está sendo acompanhado.

Analisando-se os resultados obtidos dos modelos paramétricos com uma visão geral e pode-se observar que são análogos para a grande maioria dos casos, portanto, concluí-se que a implementação e o método estão de acordo com os objetivos iniciais propostos de estimar coeficientes aerodinâmicos de seções transversais simples de pontes. Observando-se caso a caso os modelos paramétricos e verifica-se que em alguns pontos existem divergências maiores entre os valores experimentais e numéricos. Nos modelos I, II, III, V, VI e VII considerou-se a paridade de resultados muito boa.

Somente para o coeficiente de sustentação dos modelos IV e VIII apresentam-se diferenças mais significativas para ângulos de ataque do vento de seis e oito graus. Os demais coeficientes e nos demais valores os resultados foram os usuais, bastante satisfatórios. Parte desta diferença pode ser creditada a técnica de realizar os ensaios na época, ou seja, a incerteza faz parte do processo e novas metodologias vão sendo adotadas com uma melhoria contínua dos procedimentos experimentais. Outra parcela pode estar na implementação e mereceu um estudo mais aprofundado do caso: alteraram-se alguns parâmetros e os resultados encontrados foram muito semelhantes aos numéricos entre si.

A variação nas formas das seções transversais dos modelos paramétricos permite afirmar-se que a implementação é sensível a estas mudanças das seções. Como se altera apenas dimensões das seções transversais entre alguns modelos, julga-se que o método é compatível com o objetivo de avaliar e escolher seções inicialmente propostas para pontes.

O modelo VIII apresenta uma seção do tipo Perfil H alongado, problema clássico para tabuleiros de pontes tipo a Ponte Tacoma Narrows. Para o ângulo de ataque zero e Número de Reynolds (Re) 1.0×10^5 encontra-se valores muito semelhantes de dinâmica dos fluidos computacional e de outros experimentos encontrados na literatura (tabela 2).

Tabela 2: resultados para seção do tipo perfil H alongado

<i>Resultados</i>	<i>CFD</i>	<i>RM2006</i>
C_D	0.28	0.27
C_{L,RMS}	0.33	0.38
St	0.11	0.12

(fonte: Larsen, 1998)

5.2. RESULTADOS DOS MODELOS DAS PONTES

Como foram considerados satisfatórios os resultados obtidos até então e deu-se seguimento aos estudos de vento para o passo mais importante: ensaiar os casos das três obras de pontes, com todos os detalhes das seções transversais de modo a avaliar os resultados para seções transversais mais complexas. A seguir expõem-se os resultados e os argumentos.

Os coeficientes aerodinâmicos da Ponte Guamá na Configuração I encontram-se na tabela 3 e na figura 83 onde se verifica que o programa realiza, conforme solicitado, a variação automática da direção do vento produzindo automaticamente as tabelas e os diagramas que antes só eram possíveis de serem obtidos nos túneis de vento ou na literatura técnica disponível resultante destes ensaios em túnel.

Analisando-se os resultados obtidos dos modelos da Ponte Guamá com uma visão geral pode-se observar que são análogos para a grande maioria dos casos, portanto, concluí-se que a implementação e o método estão de acordo com os objetivos iniciais propostos de estimar coeficientes aerodinâmicos de seções transversais simples de pontes. Observando-se caso a caso verifica-se que em alguns pontos existem divergências maiores entre os valores experimentais e numéricos.

Porém estas discrepâncias se verificam em ângulos com valores maiores, casos de menor importância para pontes. Além disso os resultados, após a calibragem inicial da implementação passaram a ser bastante satisfatórios e dentro da faixa de valores encontrados nos mais diversos ensaios, sejam eles em túneis de vento ou numéricos.

Tabela 3: coeficientes aerodinâmicos da Ponte Guamá na Configuração I

alfa	C_d	C_l	C_m
-10	0.31	1.00	0.05
-8	0.27	0.72	0.04
-6	0.23	0.58	0.04
-4	0.20	0.20	0.03
-2	0.18	0.06	0.03
0	0.17	-0.20	0.02
2	0.16	-0.45	0.00
4	0.19	-0.55	0.00
6	0.21	-0.61	-0.02
8	0.26	-0.63	-0.03
10	0.30	-0.67	-0.04

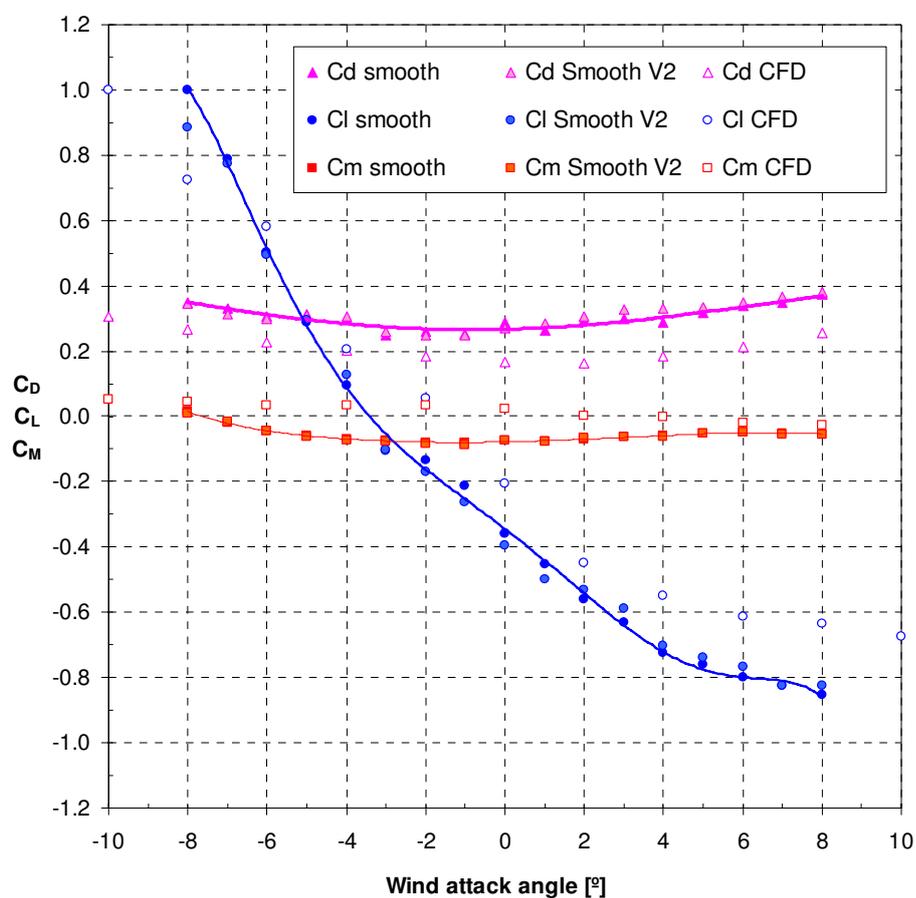


Figura 83: coeficientes aerodinâmicos da Ponte Guamá na Configuração I

Os coeficientes aerodinâmicos da Ponte Guamá na Configuração II encontram-se na tabela 4 e na figura 84.

Tabela 4: coeficientes aerodinâmicos da Ponte Guamá na Configuração II

alfa	C_d	C_l	C_m
-10	0.26	-0.51	0.06
-8	0.23	-0.49	0.05
-6	0.19	-0.46	0.04
-4	0.16	-0.44	0.03
-2	0.14	-0.36	0.02
0	0.13	-0.07	0.01
2	0.14	0.20	-0.01
4	0.16	0.44	-0.02
6	0.20	0.63	-0.03
8	0.24	0.76	-0.03
10	0.30	0.85	-0.04

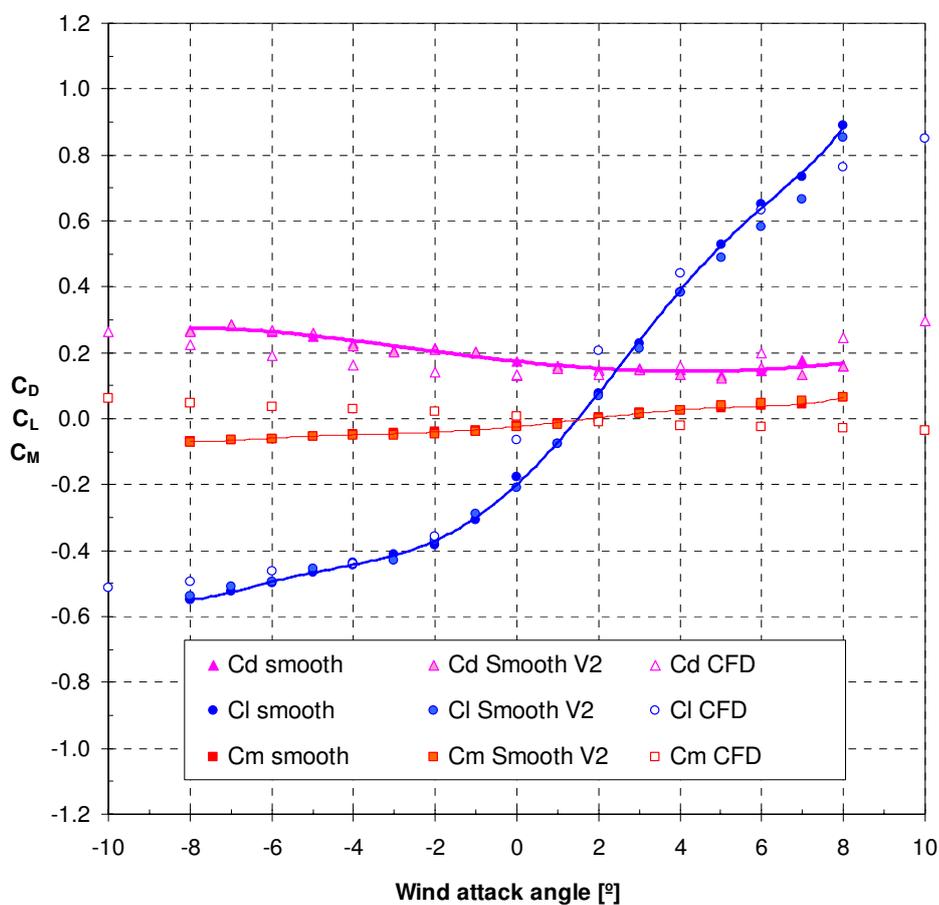


Figura 84: coeficientes aerodinâmicos da Ponte Guamá na Configuração II

Os coeficientes aerodinâmicos da Ponte Guamá na Configuração III encontram-se na tabela 5 e na figura 85.

Tabela 5: coeficientes aerodinâmicos da Ponte Guamá na Configuração III

alfa	C_d	C_l	C_m
-10	0.30	-0.79	0.03
-8	0.28	-0.58	0.02
-6	0.23	-0.46	0.01
-4	0.19	-0.38	0.01
-2	0.15	-0.30	0.00
0	0.18	0.17	0.05
2	0.13	0.21	-0.01
4	0.18	0.44	0.02
6	0.31	0.79	0.06
8	0.29	0.82	0.03
10	0.41	1.10	0.00

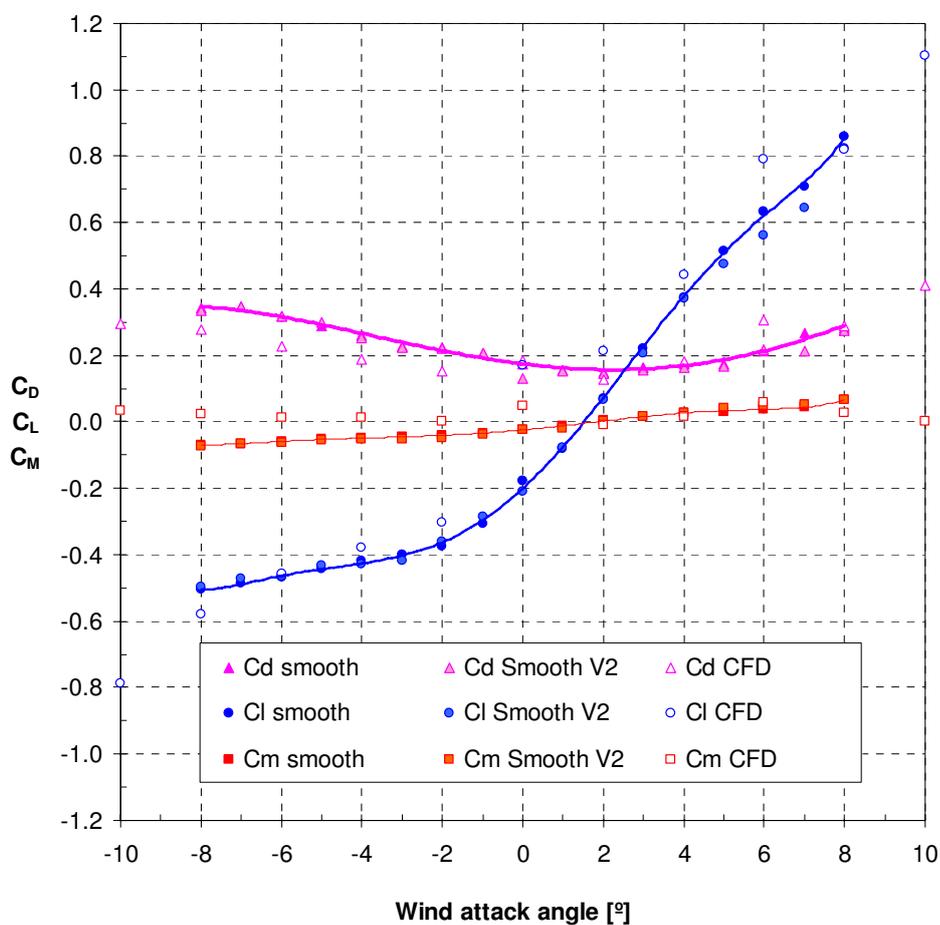


Figura 85: coeficientes aerodinâmicos da Ponte Guamá na Configuração III

As alterações realizadas e os resultados obtidos para as três configurações da Ponte do Guamá permitem afirmar-se que o método é sensível (tabela 6) a estas pequenas mudanças na seção transversal da ponte. Como se altera apenas pequenas aberturas no guarda-rodas e guarda-corpo, ou uma inclinação na parede interna e um pequeno aumento na dimensão da viga principal das seções transversais entre as configurações, julga-se que a implementação é compatível com o objetivo de avaliar e escolher aerodinamicamente seções ideais para pontes. A etapa intermediária desta escolha, com o uso dos coeficientes aerodinâmicos pode ser acompanhada por via gráfica plotando os valores conforme os modelos propostos (figura 86).

Tabela 6. Evolução dos Coeficientes Aerodinâmicos da Ponte Guamá

Guamá Configuração	Túnel: escoamento suave			CFD			Túnel: escoamento suave V2		
	C_D	C_L	C_M	C_D	C_L	C_M	C_D	C_L	C_M
I	0.27	-0.40	-0.07	0.17	-0.20	0.02	0.29	-0.36	-0.07
II	0.13	-0.21	-0.02	0.13	-0.07	0.01	0.17	-0.18	-0.02
III	0.18	-0.05	0.00	0.18	0.17	0.05	0.13	-0.21	-0.02

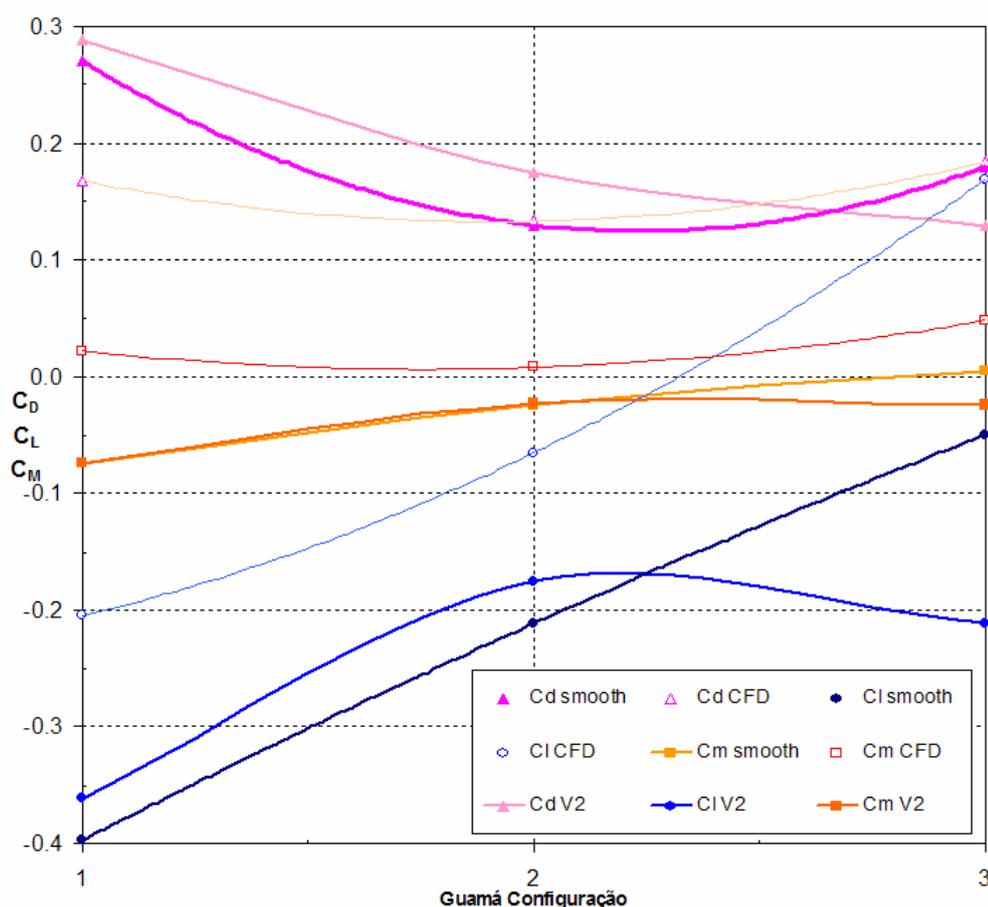


Figura 86: evolução dos coeficientes aerodinâmicos da Ponte Guamá

Os coeficientes aerodinâmicos da Ponte Paulicéia encontram-se na tabela 7 e na figura 87.

Tabela 7: coeficientes aerodinâmicos da Ponte Paulicéia

alfa	C_d	C_l	C_m
-10	0.32	-1.03	0.02
-8	0.26	-0.90	0.01
-6	0.18	-0.49	0.02
-4	0.16	-0.54	0.00
-2	0.13	-0.48	0.00
0	0.11	-0.47	-0.01
2	0.10	0.32	-0.03
4	0.19	0.63	0.04
6	0.25	0.93	0.03
8	0.28	0.95	0.03
10	0.37	1.15	0.00

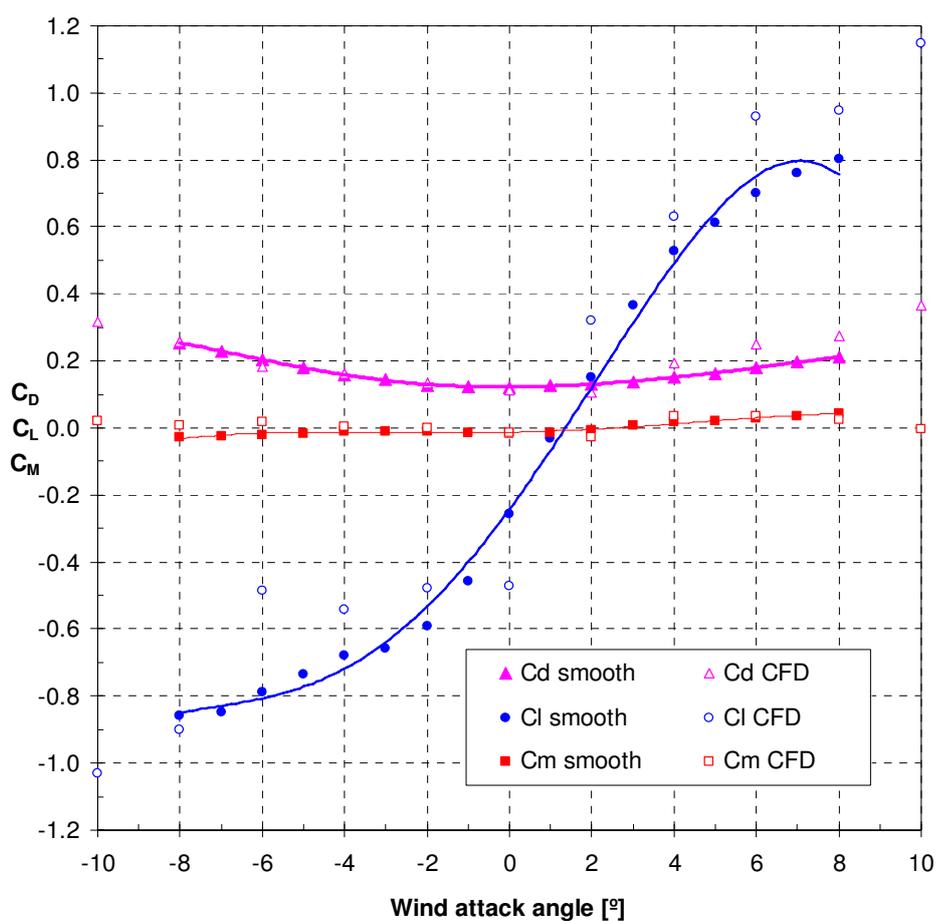


Figura 87: coeficientes aerodinâmicos da Ponte Paulicéia

Os coeficientes da Ponte Roberto Marinho encontram-se na tabela 8 e na figura 88.

Tabela 8: coeficientes aerodinâmicos da Ponte Roberto Marinho

alfa	C_d	C_l	C_m
-10	0.28	-0.89	-0.01
-8	0.24	-0.88	0.00
-6	0.19	-0.48	-0.03
-4	0.15	-0.27	-0.03
-2	0.13	-0.10	-0.02
0	0.10	0.19	0.03
2	0.11	0.44	-0.02
4	0.16	0.54	-0.01
6	0.21	0.63	-0.02
8	0.24	0.67	-0.06
10	0.31	0.88	-0.06

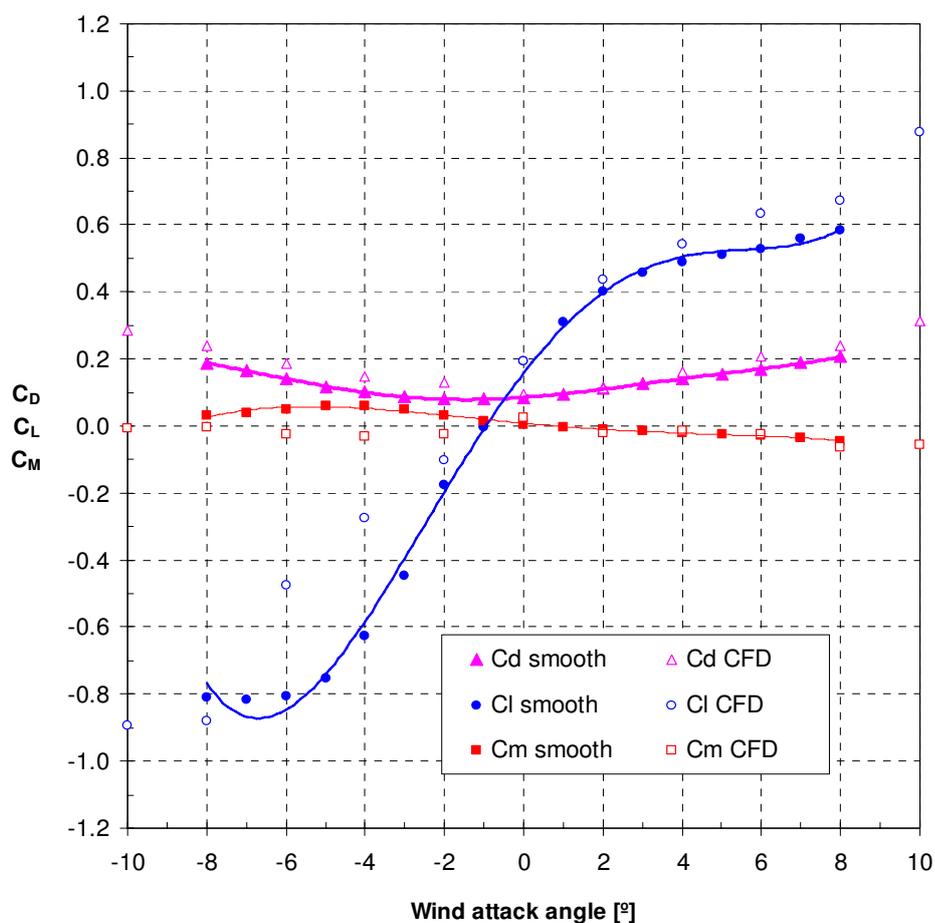


Figura 88: coeficientes aerodinâmicos da Ponte Roberto Marinho

Analisando-se os resultados obtidos nos modelos numéricos das pontes com uma visão geral e pode-se observar que são muito similares aos experimentais. Nos modelos das obras construídas de pontes observa-se que em alguns pontos existem pequenas divergências entre os valores experimentais e numéricos. Estas diferenças são muito pequenas e foram consideradas insignificantes aos objetivos propostos.

Como trata-se de engenharia, ou seja, ciência aplicada, muitas são as simplificações adotadas em ambos os métodos. Lembra-se ainda que os fatores de forma são parâmetros adimensionais com valores absolutos também muito pequenos e com um caráter intrínseco de coeficientes que são calculados.

Certifica-se que, devido à semelhança entre a gama de variabilidade encontrada nos ensaios em túneis de vento, mesmo naqueles com aquisição de dados via computador, pode-se estabelecer que os resultados obtidos encontram-se em uma faixa de variação aceitável. Conseqüentemente, consideraram-se satisfatórios os resultados obtidos para estudos preliminares e projetos básicos de pontes com grandes vãos.

Avaliou-se que até projetos executivos podem ser estudados para os casos de pontes com vãos menores e seções mais simples, que até então não tinham a sua seção transversal ensaiada ao vento. Também outros usos em mecânica dos fluidos podem ser considerados.

Conclui-se por estes testes realizados e demais estudos paramétricos que esta implementação com este Método da Vorticidade em Partículas do módulo de dinâmica dos fluidos computacional permite obter coeficientes calculados com exatidão de aproximadamente 20% para o arrasto e o momento torcional e de 25% para a sustentação. A estes números chama-se de valores esperados, uma vez que testes em túnel de vento vão determinar futuramente e mais precisamente os valores a serem utilizados na fase final de cálculo.

A variação nas formas das seções transversais dos modelos das pontes permite afirmar-se que a implementação é sensível as diferentes seções. Como se alteram não apenas dimensões das seções transversais entre alguns modelos, mas sim todo o formato da seção, julga-se que o método é compatível com o objetivo de avaliar e escolher as melhores seções propostas para pontes.

O ideal seria instrumentar durante a construção para posteriormente monitorar a ponte construída e obter os resultados das solicitações de verdade. Entretanto, compreende-se que

isto não condiz com a realidade, é observado pouquíssimas vezes, mesmo no exterior, e somente em grandes obras, que signifiquem avanços muito consideráveis na engenharia estrutural. Sabe-se, entretanto, que não se deveria considerar o resultado do túnel de vento como comprovadamente correto; porém, julga-se o experimento em túnel de vento o melhor modo disponível de prever os coeficientes. Como se tratam nestes casos de obras de pontes reais, já construídas ou ainda em construção, estas determinam as melhores possíveis medidas para comparação, mesmo sem as comprovações práticas no campo.

Observa-se que o módulo se destina ao uso em computadores de uso pessoal, chamados *Personal Computers (PC)*, ferramenta esta acessível aos engenheiros de estruturas. O processamento finaliza-se e o resultado encontra-se disponível cerca de uma hora após o início do cálculo, isto em computadores com capacidade de processamento e memória correntes, ao redor de duas vezes 1,7GHz (*dual core*) e aproximadamente 1Mb, respectivamente. Considera-se, portanto, esta uma ferramenta disponível, rápida e de precisão aceitável.

Portanto, conclui-se que a implementação e o método estão de acordo com os objetivos finais de estimar coeficientes aerodinâmicos de seções transversais de pontes para realizar um caminho ótimo de projeto desde a concepção aerodinâmica inicial.

5.3. CONFIGURAÇÕES DE UM DISPOSITIVO AERODINÂMICO

Conforme se observou anteriormente, um dispositivo aerodinâmico produz melhorias no desempenho aerodinâmico da seção do tabuleiro, e verifica-se que a opção por um nariz de vento é uma solução eficaz para melhorar o desempenho da seção quanto aos vórtices, se acontecerem os mesmos problemas dos ensaios na obra concluída. Sabendo-se que a instalação de um nariz de vento pode elevar o valor da velocidade crítica busca-se detectar a melhor seção dentre várias configurações realizando um comparativo entre configurações de um dispositivo aerodinâmico. A intenção é demonstrar a utilidade da ferramenta numérica para atuar também como ferramenta complementar aos ensaios de túnel de vento.

Realiza-se uma variação nos ângulos da parte superior e inferior do nariz para se obter diferentes modelos. Utilizando-se um intervalo médio de 5° varia-se de a 25° a 52° o ângulo em relação à horizontal da parte superior do nariz e de 35° a 52° o ângulo em relação à

horizontal da parte inferior do nariz, produzindo-se assim 10 modelos diferentes, conforme a figura 89 e a tabela 9.

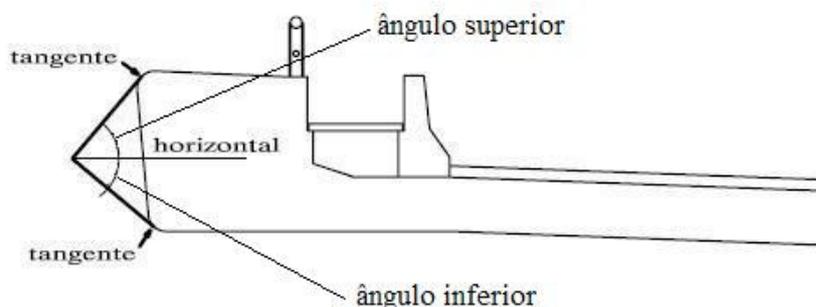


Figura 89: nariz de vento com ângulos variáveis para Ponte Roberto Marinho

Para melhor comparar seus coeficientes aerodinâmicos incluem-se os modelos iniciais, sem nariz aerodinâmico: o Modelo 0 é o experimental, e o Modelo 0.5, o numérico. Por último, também foi incluído o modelo ensaiado em túnel com nariz, denominado Modelo 11.

Tabela 9: resultados do dispositivo aerodinâmico para a PRM com $\alpha = 4^\circ$

MODELO	ângulo inferior	ângulo superior	Largura total (m)	Cd/b	Ci/b	Ct/bb
0	90	0	16.00	0.16	0.54	-0.01
0.5	90	0	16.00	0.15	0.52	0.01
<u>1</u>	<u>25</u>	<u>35</u>	<u>18.07</u>	<u>0.099</u>	<u>0.401</u>	<u>-0.086</u>
<u>2</u>	<u>30</u>	<u>40</u>	<u>17.67</u>	<u>0.107</u>	<u>0.431</u>	<u>-0.092</u>
3	35	45	17.36	0.113	0.526	-0.085
4	40	50	17.10	0.121	0.600	-0.067
5	45	52	16.97	0.126	0.581	-0.058
6	52	52	16.85	0.124	0.594	-0.058
7	50	50	16.93	0.118	0.599	-0.065
8	45	45	17.14	0.111	0.591	-0.067
<u>9</u>	<u>40</u>	<u>40</u>	<u>17.40</u>	<u>0.103</u>	<u>0.493</u>	<u>-0.086</u>
10	35	35	17.71	0.124	0.608	-0.062
11	40	50	17.10	0.09	0.60	-0.07

Sendo assim, totaliza-se 13 modelos para comparação da Ponte Roberto Marinho com e sem dispositivo aerodinâmico do tipo nariz de vento. As tabelas com os resultados obtidos para cada seção encontram-se no Apêndice 1. Simularam-se ainda os mesmos modelos para outras incidências de vento, de -4° (tabela 9 e figura 90) e 0° , para complementar os resultados.

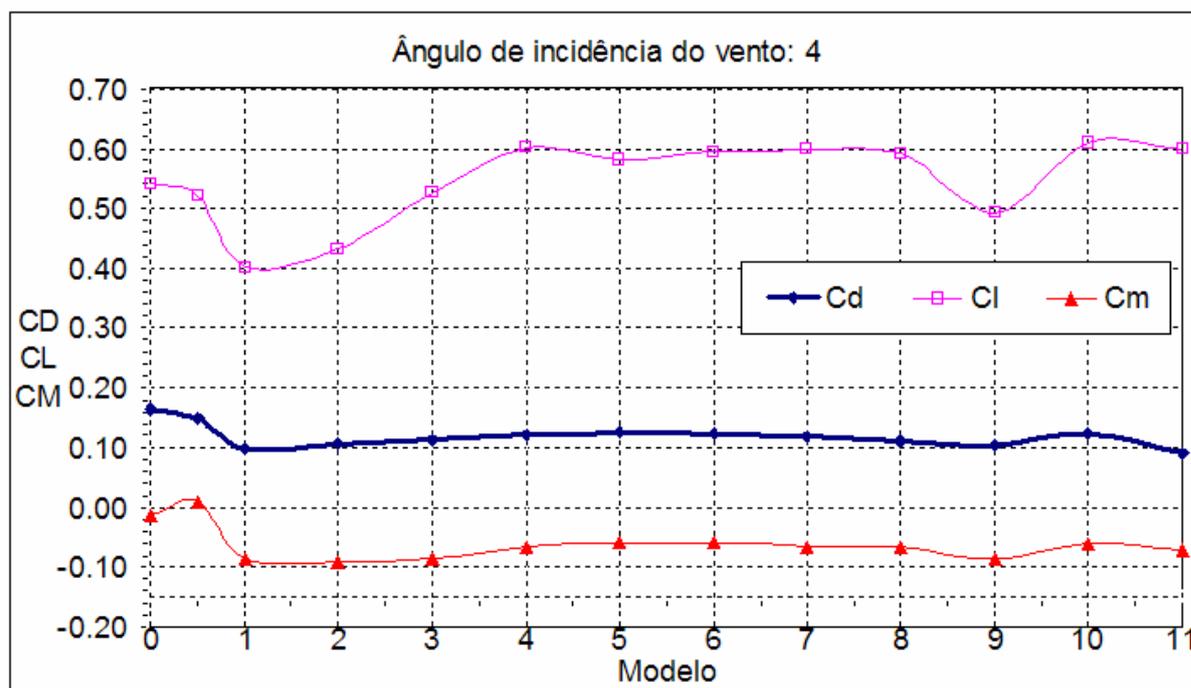


Figura 90: comparativo dos Modelos para PRM

Observa-se no geral que os valores dos coeficientes se modificam bastante com a adição do dispositivo aerodinâmico do tipo nariz de vento. Verifica-se que assim como nos valores sem nariz, os Modelos 0 e 0,5; há entre os Modelos 4 e 11, a configuração experimental e a numérica, com ângulos de 40° e 50° , uma grande semelhança nos resultados encontrados. Comprova-se mais uma vez que o método encontra valores satisfatórios para estimar coeficientes aerodinâmicos.

Conforme esperado, uma vez que apenas valores grandes para os ângulos foram considerados, observando-se modelo a modelo que os resultados dos coeficientes com adição do nariz de vento não se modificam muito, exceto para os coeficientes de sustentação. Supõem-se isto também porque este estudo adicional trata somente de pequenas modificações em detalhes mínimos do projeto aerodinâmico da seção.

Porém é na visualização do processamento dos vórtices que se percebe o que é ainda mais significativo para o escoamento: Na situação sem nariz percebem-se dois pontos de separação (figura 91) que flutuavam próximo às pequenas curvaturas da face a barlavento com a linha horizontal das faces superior e inferior criando vórtices que atuando em conjunto tornam-se maiores a sotavento, desestabilizando mais a seção. Com nariz cria-se um único ponto de separação na ponta (figura 92) e este passa a governar o desempenho aerodinâmico de uma maneira mais favorável do que a anterior. A amplitude e o formato visualizados dos vórtex sinalizam, em parte, os esforços envolvidos desde que comparados os maiores resultados obtidos a uma mesma distância da seção.

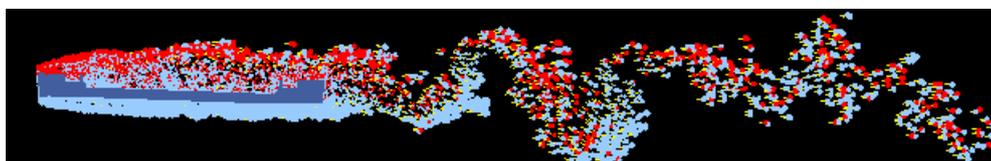


Figura 91: instantâneo dos vórtices para Modelo da PRM sem nariz



Figura 92: instantâneo dos vórtices para Modelo 1 com Nariz da PRM

Demonstra-se assim a utilidade da ferramenta numérica para suplementar os resultados de ensaios de túnel de vento. Porém fica evidente, novamente, que para um desempenho adequado ao uso proposto ao programa, este necessita de uma etapa automatizada de pós-processamento, chegando a valores e gráficos mais significativos para a análise dos resultados por parte dos engenheiros responsáveis em etapas preliminares de projeto do que estes simples valores de coeficientes.

5.4. INFLUÊNCIA DA ALTURA E LARGURA DO TABULEIRO

5.4.1. Seções Tipo: Viga Caixaão ou Múltiplas Vigas T

Existem diversas formas de se considerar o vento atuando nas estruturas e conforme se aborda nos capítulos iniciais muitas são as simplificações adotadas. A norma da brasileira de projeto de obras de pontes de concreto NBR7187, ABNT (2003) cita a norma de vento no item “7.2.3.Carga de vento” e determina que esta seja atendida para estimar os carregamentos de vento sobre a estrutura.

Também a norma de concreto, NBR6118, ABNT (2003) recomenda a obtenção dos carregamentos de vento pela NBR6123. Esta, por sua vez, determina que se utilize uma velocidade básica sobre a qual incidem diversos parâmetros. Em relação aos coeficientes de forma, normalmente utilizados somente em pontes com grandes vãos a mesma norma sugere a utilização da forma tradicional, explicada no Capítulo 2.

Observando-se estas recomendações normativas surgiu a intenção de abordar o tema coeficientes aerodinâmicos para seções de pontes usuais de concreto. Não somente porque se economizaria no dimensionamento das obras correntes; mas também devido às vias de acesso de grandes pontes, onde se utilizam seções consagradas, porém estas deveriam igualmente ser mais detalhadamente estudadas em referência às ações do vento. Isto não acontece e obtêm-se carregamentos de vento da maneira usual, considerando somente a altura total da seção. Ou seja, sem o uso de coeficientes aerodinâmicos relativos à forma da seção.

Entretanto, muitas vezes observa-se que o montante investido na obra de acesso é semelhante ao da ponte principal, assim como o grande número de pequenas obras de engenharia totaliza investimentos de ordem até superior ao das poucas obras de grande vulto. Justifica-se então o interesse em otimizar ainda mais estas seções tipo, bastante conhecidas e utilizadas.

O objetivo é comparar como se calcula conforme a norma para os dois casos e verificar as diferenças encontradas. O método dos vórtices é utilizado como fornecedor de indicativos dos coeficientes aerodinâmicos para estudos paramétricos. Pretende-se chegar à conclusão de que existem sugestões que podem ser incorporadas em uma revisão das normas e avaliar se é válido aprofundar este estudo em função das possibilidades de economia encontradas.

O ângulo de incidência do vento foi sempre considerado constante, de zero graus.

Foram escolhidas duas seções tipo:

- múltiplos T, com 3, 4 e 5 longarinas principais, conforme as larguras; (figura 94).
- caixão unicelular fechado, com abas verticais até 10m de largura e abas inclinadas para maiores (figura 93).

Para estas duas seções tipo determinou-se três larguras de ponte, consideradas as mais usuais decorrentes da quantidade de pistas, acostamentos, passeios, utilidades e guarda-rodas necessários:

- largura de 10m, composta por: duas pistas simples com 3,50m, dois passeios de 1,10m e dois guarda-rodas de 0,40m;
- largura de 13m, composta por: duas pistas simples com 3,50m, dois acostamentos de 1,5m, dois passeios de 1,10m e dois guarda-rodas de 0,40m;
- largura de 17m, composta por: quatro pistas simples com 3,50m, dois passeios de 1,10m e dois guarda-rodas de 0,40m.

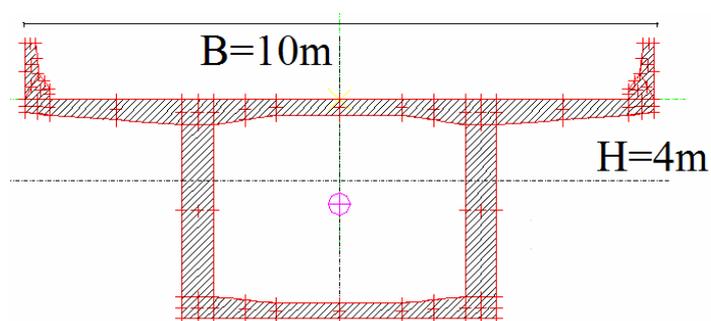


Figura 93: modelo tipo viga caixão unicelular com abas verticais

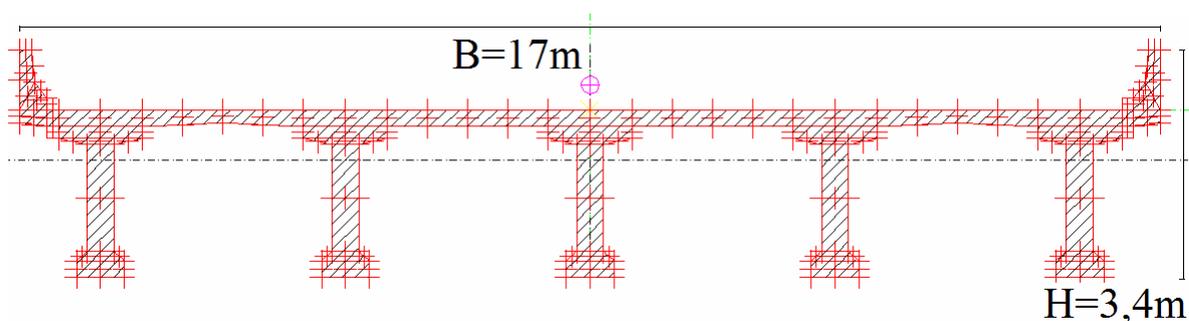


Figura 94: modelo tipo múltiplas vigas T com 5 longarinas

No caso da seção com múltiplas longarinas, conforme as larguras pré-estabelecidas, se determina uma relação próxima a considerada mais adequada de espaçamento entre vigas e balanços, conforme a experiência do autor em projetos e critérios de anteprojetado de pontes.

Tabela 10: relação balanço lateral e entre-vigas da seção de múltiplas vigas T

Largura (m)	Número de vigas	Entre-vigas (m)	Balanço (m)
10	3	1,20	3,80
13	4	1,04	3,64
17	5	1,20	3,65

Para as seções tipo determinaram-se ainda quais seriam as alturas mais adequadas para o cálculo. Estas considerações dependem muito do vão e materiais aplicados. Considerando-se o uso de concreto protendido nas obras, examinaram-se as alturas totais (H) que incluem o vigaamento de altura variável (h) em função dos vãos, mais a laje superior de 0,3m e o guarda-rodas (GR) de 0,9m. Conforme as experiências em projetos do autor avaliaram-se as alturas totais de 2,4m, 2,7m, 2,9m e 3,4m como as mais usuais.

Justifica-se ainda a inclusão de valores mais altos para a seção do tipo caixão porque nas grandes pontes podem-se utilizar viadutos ou até outras pontes de acesso, com vãos consideravelmente maiores e vigaamento com altura variável. Portanto, adicionalmente foram calculados para a seção do tipo caixão os coeficientes aerodinâmicos para alturas de 3,9m e 4,4m para cobrir esta possibilidade.

Sendo assim têm-se 12 modelos de vigas múltiplas e 18 modelos de viga caixão, totaliza-se 30 modelos de pontes usuais. Cada seção, em um desenho de sua geometria, com as respectivas características, encontra-se no Apêndice 2, bem como os resultados obtidos.

Usualmente, de modo adicional, nos casos de vãos pequenos de acessos ou viadutos realiza-se uma verificação ao vento com a presença do tráfego sobre a seção. Isto ocorre porque, com veículos pesados e vãos pequenos, pode ocorrer uma obstrução total do vão na direção longitudinal. Desta maneira obtêm-se uma altura exposta ao vento muito maior que resulta em forças bem superiores; porém, com probabilidades de ocorrência menores.

Para os casos com o tráfego adicionou-se à seção transversal um prisma retangular quadrado de dimensão $3 \times 3 \text{m}^2$ a uma altura de 1m do pavimento e afastado 0,2m do guarda-rodas (figura 95). Para confirmar dimensionaram-se ainda modelos com tráfego na pista central. Com o objetivo de comparar os resultados obtidos, calcularam-se outros 30 modelos com tráfego próximo ao guarda-rodas e mais 9 na segunda pista do barlavento. Totalizam-se assim 69 modelos numéricos de seções típicas.

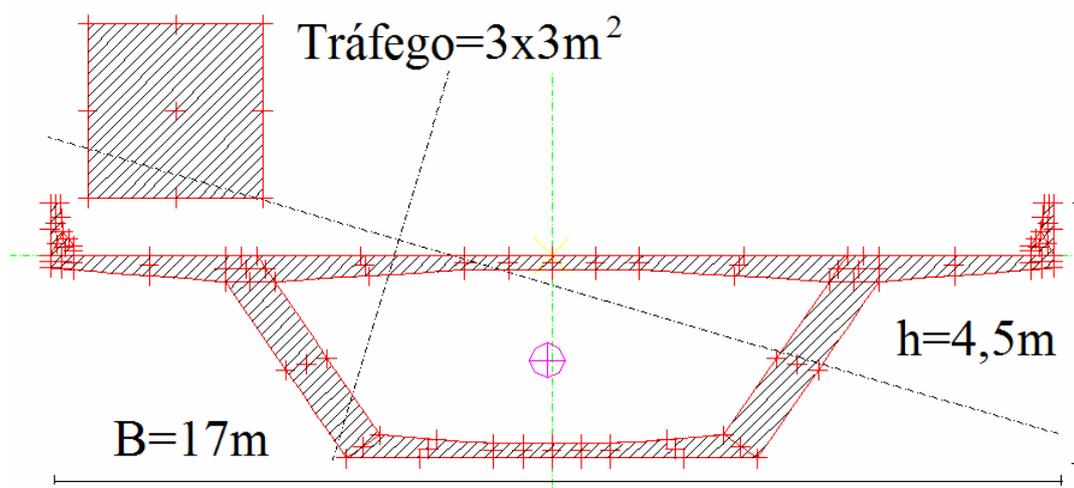


Figura 95: modelo tipo viga caixão unicelular com abas inclinadas e tráfego



Figura 96: ponte de acesso segmentada pelo vento – EUA

A importância desta verificação deve-se ao fato de que muitas vezes as obras simples são constituídas por peças isostáticas (figura 96) ou algumas vezes compostas por elementos com continuidade apenas na laje. Nesta situação as forças transversais principais são resultantes do vento e muito superiores às dos demais casos.

5.4.2. Resultados Comparativos e Observações

A NBR6123 determina as forças estáticas devido ao vento por meio da velocidade básica V_0 , fatores S_1 , S_2 , S_3 com os quais se avalia a pressão dinâmica do vento q em N/m^2 . Considera-se a área frontal efetiva A , ou seja, a área da projeção ortogonal sobre um plano perpendicular à direção da ação do vento. Compara-se a força atuante com o uso de coeficientes F_i e sem usar os coeficientes \mathbf{F} e obtêm-se uma relação simples da influência direta do uso dos coeficientes (equação 5.1):

$$\frac{F_i}{\mathbf{F}} = \left(\frac{q C_i A}{q A} \right) = C_i \quad (\text{equação 5.1})$$

Verifica-se nos ensaios disponíveis que o módulo dos coeficientes para seções de pontes varia em uma faixa de zero a dois. Observa-se, portanto, que conforme for o valor do coeficiente teremos, com o estudo mais aprofundado da seção, acréscimos ou decréscimos em relação ao cálculo simplificado.

Apresentam-se os resultados de coeficientes aerodinâmicos nas tabelas 11 e 12. Nos gráficos comparativos entre a base (B) e a altura total (H), uma variável foi mantida constante e modifica-se a outra conforme se observa na relação H/B (figuras 97 à 112).

Tabela 11: coeficientes aerodinâmicos para pontes tipo caixão fechado

CS	B	H	Cd	Cl	Cm	H/B	St
BoxWing1:001	10.00	2.40	0.25	0.61	-0.06	0.24	0.05
BoxWing1:002	10.00	2.70	0.30	0.69	-0.08	0.27	0.05
BoxWing1:003	10.00	2.90	0.34	0.70	-0.09	0.29	0.05
BoxWing1:004	10.00	3.40	0.44	0.84	-0.11	0.34	0.04
BoxWing1:005	10.00	3.90	0.52	0.87	-0.12	0.39	0.01
BoxWing1:006	10.00	4.40	0.62	0.89	-0.14	0.44	0.01
BoxWing2:003	13.00	2.40	0.18	0.36	-0.05	0.18	0.06
BoxWing2:005	13.00	2.70	0.21	0.42	-0.07	0.21	0.04
BoxWing2:007	13.00	2.90	0.23	0.41	-0.08	0.22	0.04
BoxWing2:009	13.00	3.40	0.29	0.48	-0.10	0.26	0.04

BoxWing2:011	13.00	3.90	0.36	0.59	-0.11	0.30	0.04
BoxWing2:001	13.00	4.40	0.42	0.75	-0.13	0.34	0.03
BoxWing2:004	17.00	2.40	0.13	0.29	-0.05	0.14	0.06
BoxWing2:006	17.00	2.70	0.15	0.35	-0.06	0.16	0.05
BoxWing2:008	17.00	2.90	0.17	0.41	-0.07	0.17	0.04
BoxWing2:010	17.00	3.40	0.21	0.61	-0.09	0.20	0.04
BoxWing2:012	17.00	3.90	0.24	0.74	-0.11	0.23	0.03
BoxWing2:002	17.00	4.40	0.28	0.85	-0.12	0.26	0.03

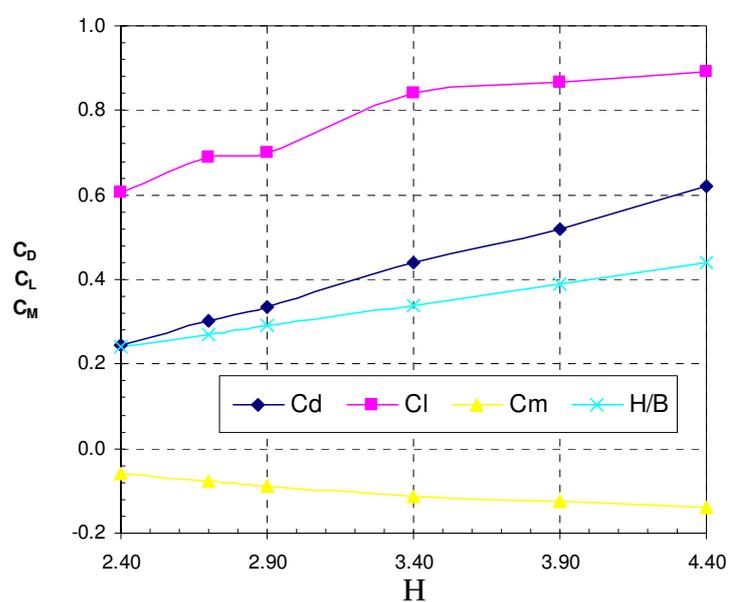


Figura 97: coeficientes aerodinâmicos variando a altura para viga caixão reta e B=10m

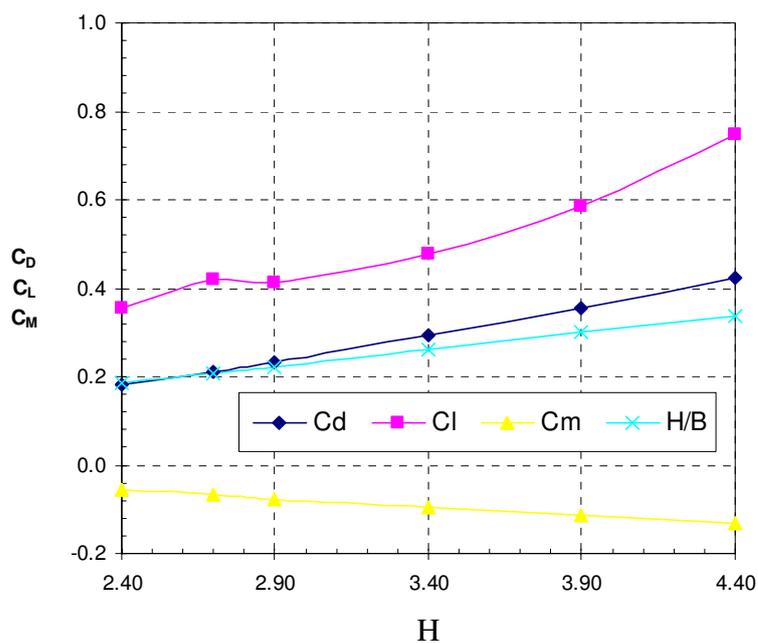


Figura 98: coeficientes aerodinâmicos variando a altura para viga caixaão inclinada e B=13m

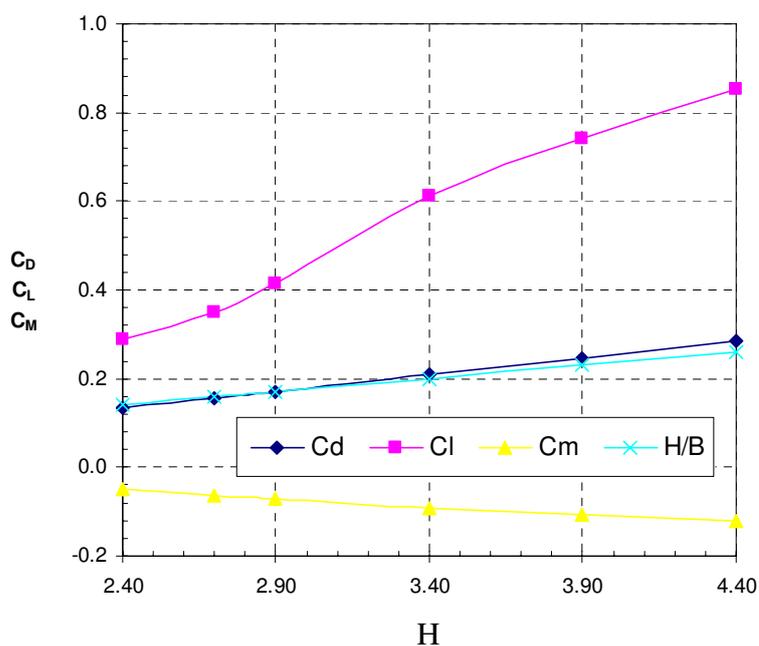


Figura 99: coeficientes aerodinâmicos variando a altura para viga caixaão inclinada e B=17m

Observa-se nos resultados de viga caixaão com abas verticais ou inclinadas que, na medida em que se eleva a altura, aumentam também os coeficientes. O arrasto quase acompanha o crescimento da relação H/B, porém, verifica-se que as derivadas dos polinômios dos coeficientes é maior. Evidencia-se assim que os esforços aumentam em um ritmo mais acelerado do que o aumento da altura.

O coeficiente de momento apresenta comportamento invertido, porém demonstra-se que a torção dos modelos aumenta a medida que se eleva a altura. Isto ocorre porque se multiplica a altura e a base na obtenção final dos mesmos e a derivada deste coeficiente é significativamente menor do que a da relação H/B.

Tabela 12: coeficientes aerodinâmicos para pontes tipo vigas T múltiplas

CS	B	H	Cd	Cl	Cm	H/B	St
T-Beam3:001:4	10.00	2.40	0.28	0.52	-0.01	0.24	0.05
T-Beam3:002:4	10.00	2.70	0.33	0.56	-0.02	0.27	0.05
T-Beam3:003:4	10.00	2.90	0.36	0.52	-0.02	0.29	0.05
T-Beam3:004:4	10.00	3.40	0.43	0.54	-0.02	0.34	0.05
T-Beam4:001:5	13.00	2.40	0.22	0.44	0.01	0.18	0.05
T-Beam4:002:5	13.00	2.70	0.24	0.45	0.01	0.21	0.04
T-Beam4:003:5	13.00	2.90	0.27	0.43	0.00	0.22	0.04
T-Beam4:004:5	13.00	3.40	0.32	0.44	0.00	0.26	0.04
T-Beam5:001:6	17.00	2.40	0.17	0.39	0.01	0.14	0.03
T-Beam5:002:6	17.00	2.70	0.19	0.42	0.01	0.16	0.04
T-Beam5:003:6	17.00	2.90	0.21	0.42	0.01	0.17	0.04
T-Beam5:004:6	17.00	3.40	0.24	0.36	0.01	0.20	0.03

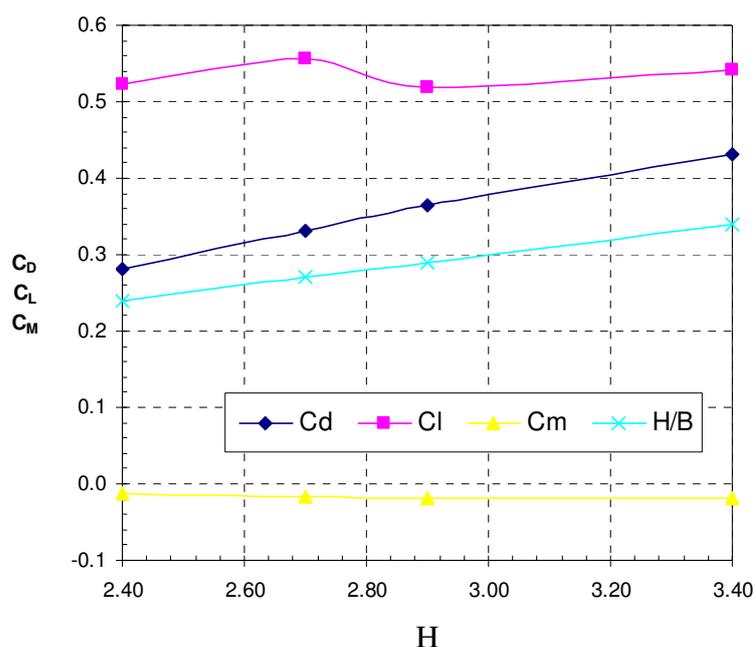


Figura 100: coeficientes aerodinâmicos variando a altura para viga tipo com 3 T e B=10m

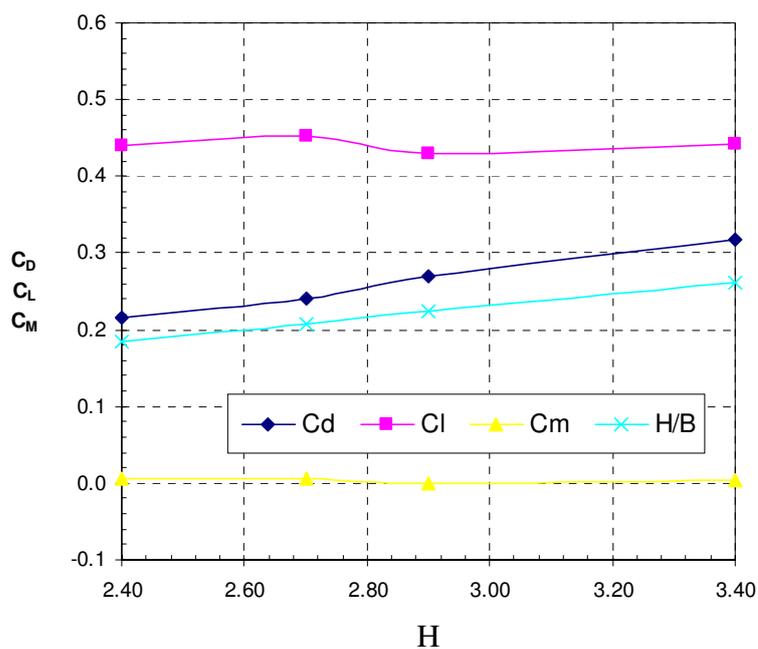


Figura 101: coeficientes aerodinâmicos variando a altura para viga tipo com 4 T e B=13m

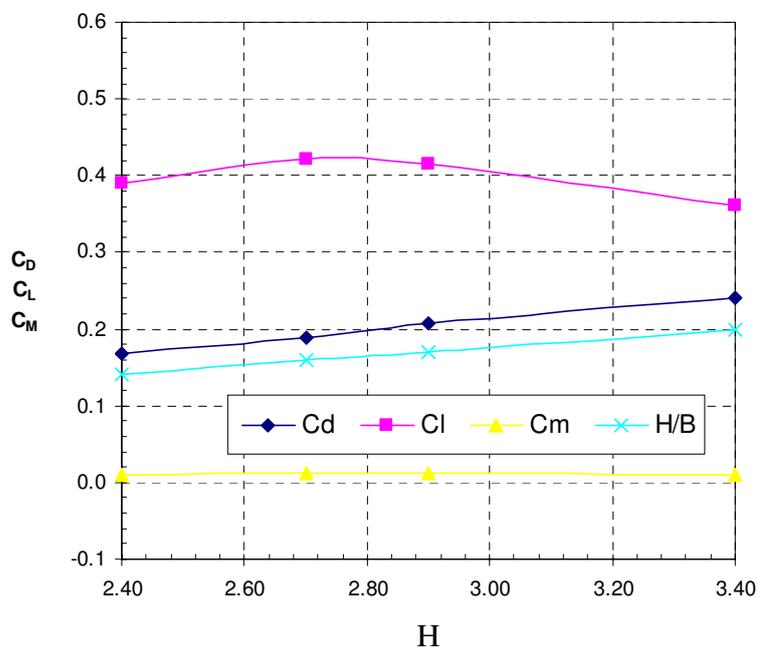


Figura 102: coeficientes aerodinâmicos variando a altura para viga tipo com 5T e B=17m

Observa-se nos resultados dos modelos de múltiplas vigas T invertidas que, na medida em que se mantém constante a base e se eleva a altura, nem sempre aumentam os valores dos coeficientes. O coeficiente de arrasto praticamente acompanha o crescimento da relação entre

a altura e a base. Verifica-se que após a altura de 2,70m há uma tendência de queda dos valores de sustentação e momento. Evidencia-se assim que estes esforços de sustentação e momento seguem a mesma tendência de queda na medida em que se eleva a altura.

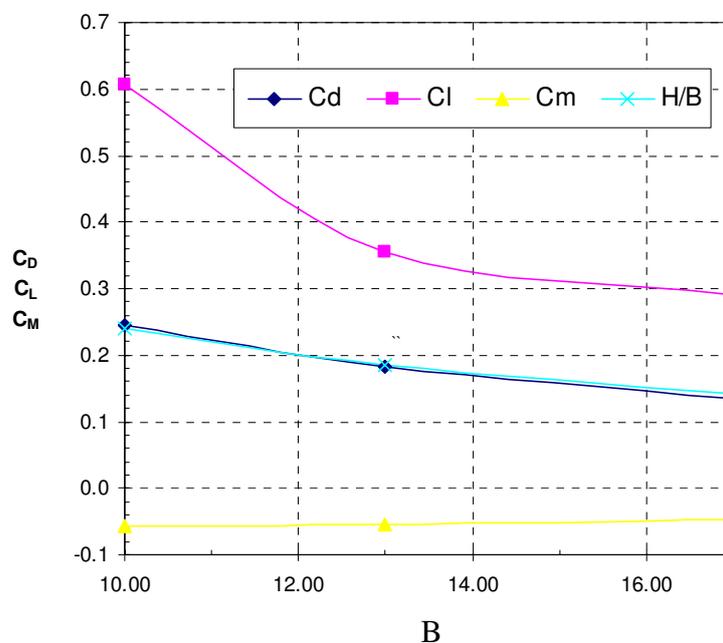


Figura 103: coeficientes aerodinâmicos variando a base para viga caixão com H=2,40m

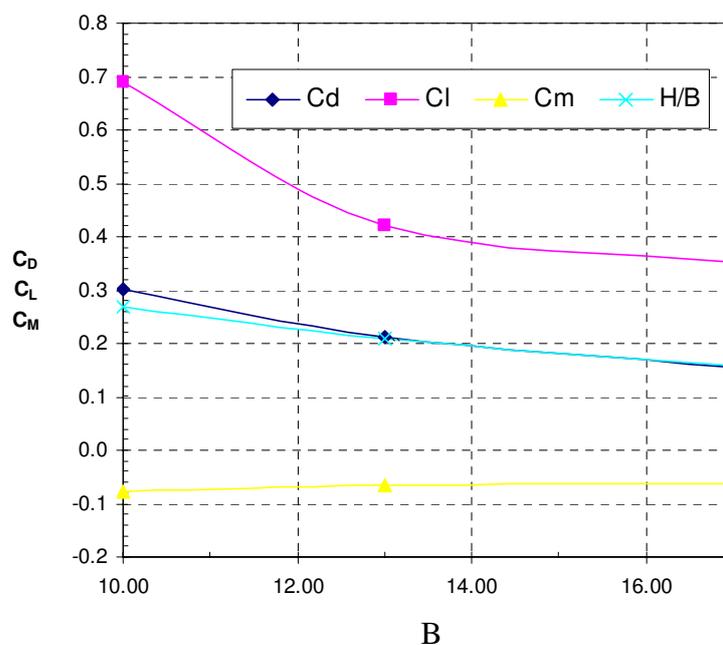
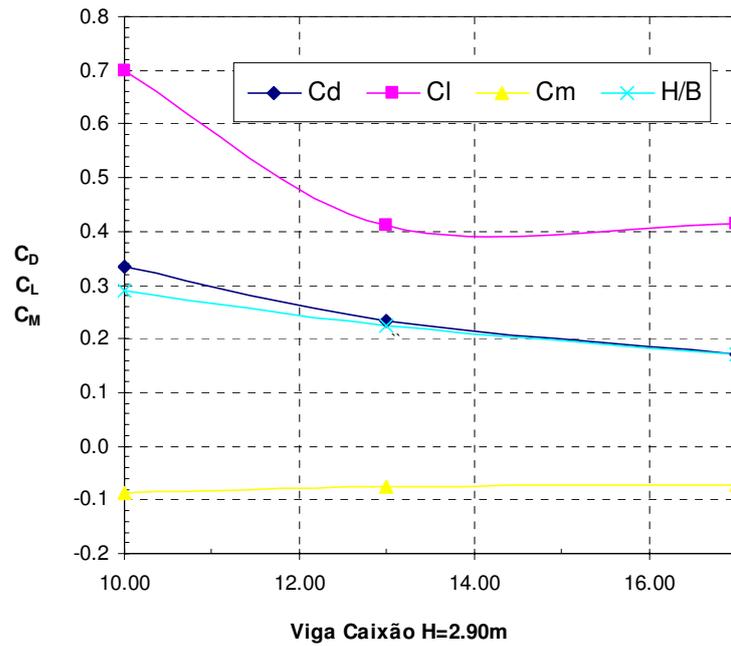
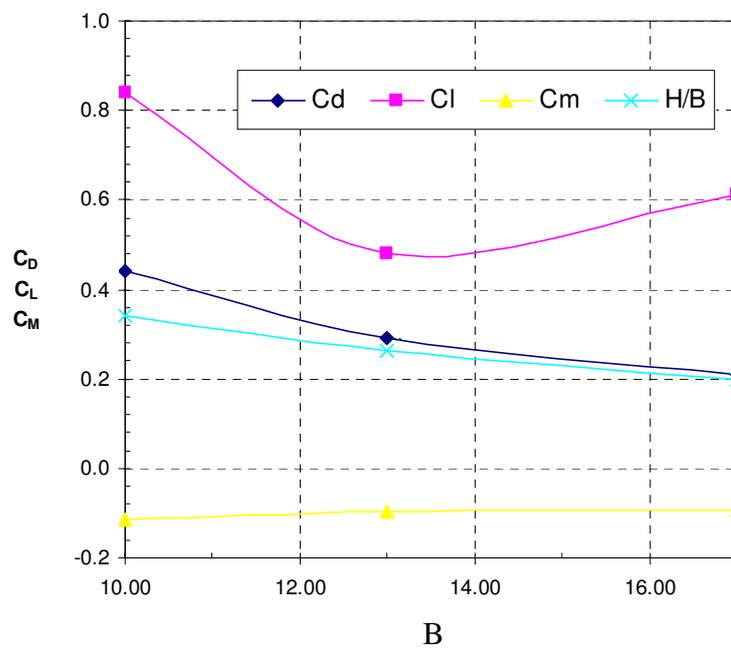


Figura 104: coeficientes aerodinâmicos variando a base para viga caixão com H=2,70m



B

Figura 105: coeficientes aerodinâmicos variando a base para viga caixão com H=2,90m



B

Figura 106: coeficientes aerodinâmicos variando a base para viga caixão com H=3,40m

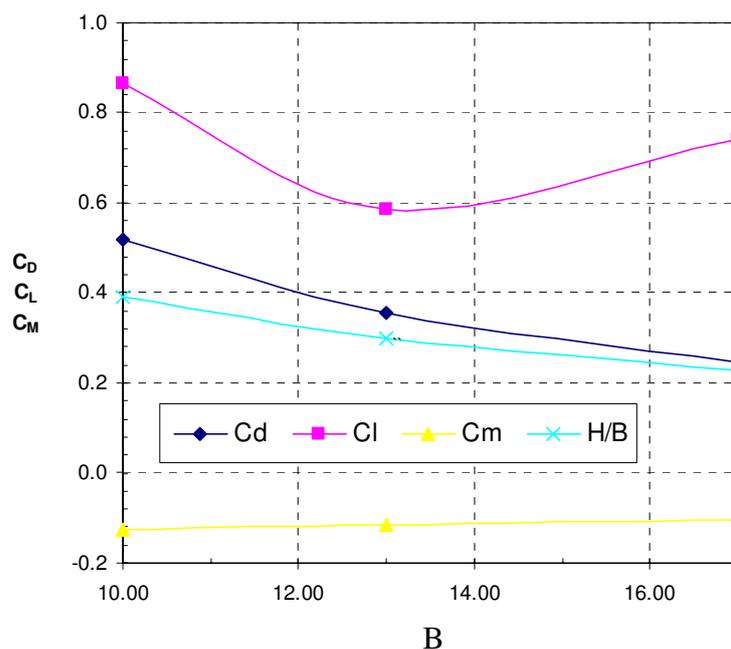


Figura 107: coeficientes aerodinâmicos variando a base para viga caixão com H=3,90m

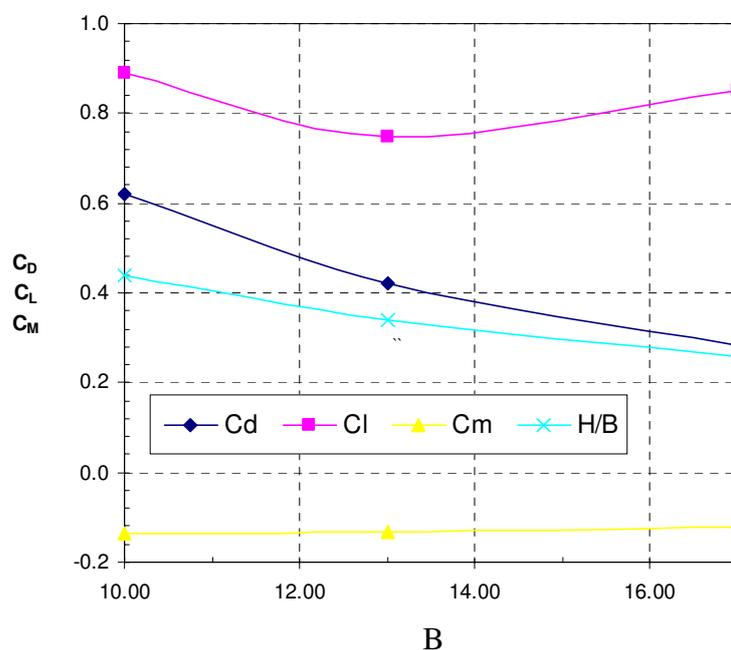


Figura 108: coeficientes aerodinâmicos variando a base para viga caixão com H=4,40m

Invertendo-se o valor constante para a altura (H) e modificando-se a base (B) os resultados obtidos nos ensaios numéricos indicam que para as vigas caixão há uma queda nos valores dos coeficientes a medida que se alonga a base. Contudo, observa-se que para alturas maiores

que 2,7m essa tendência modifica-se para a sustentação em larguras maiores do que 13m, após a qual passa a crescer novamente.

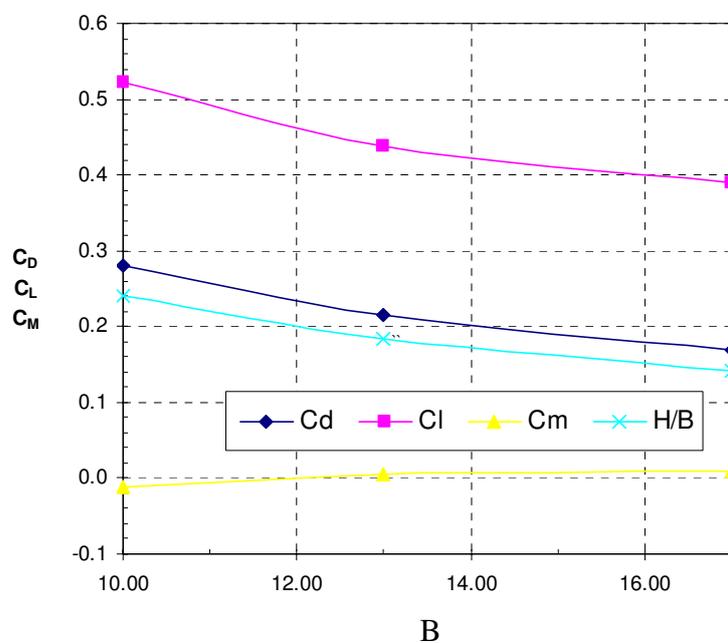


Figura 109: coeficientes aerodinâmicos variando a base para viga T com H=2,40m

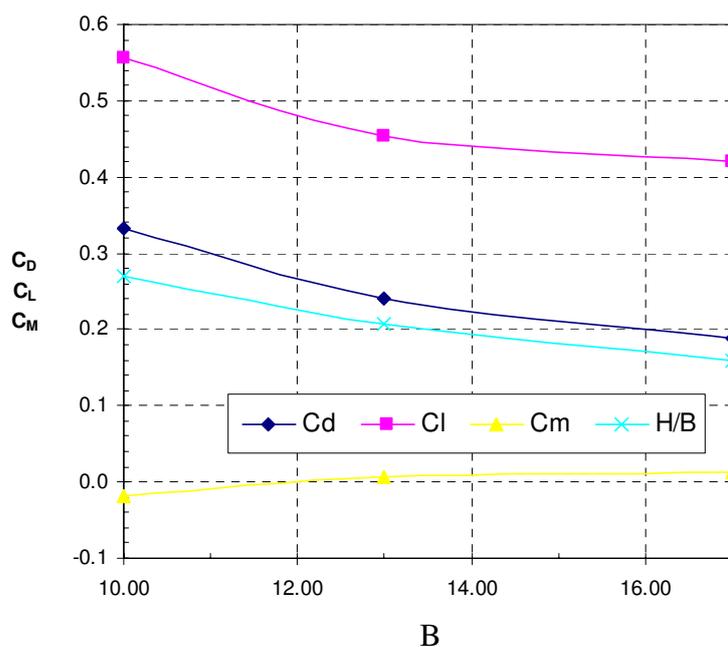


Figura 110: coeficientes aerodinâmicos variando a base para viga T com H=2,70m

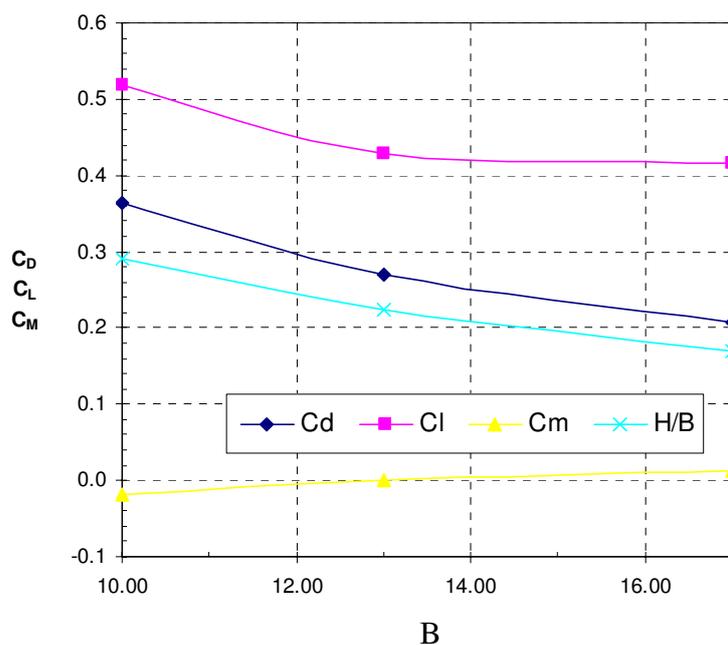


Figura 111: coeficientes aerodinâmicos variando a base para viga T com H=2,90m

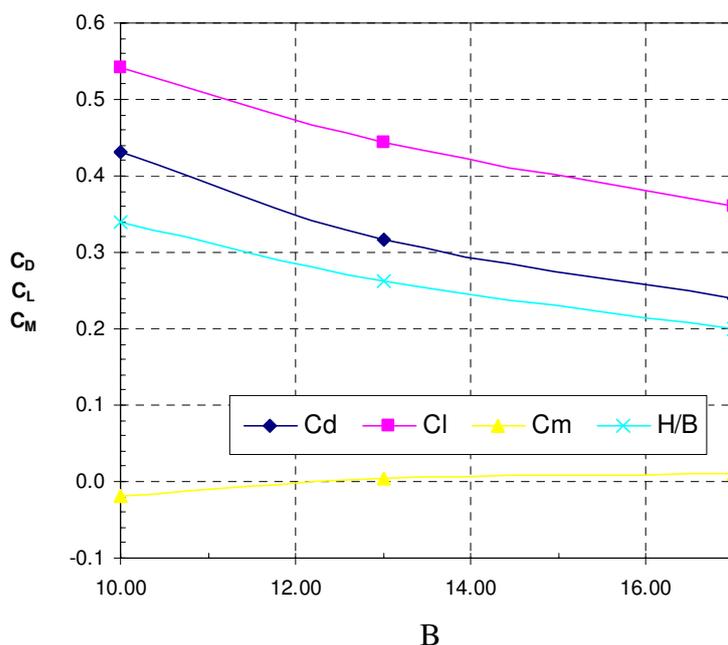


Figura 112: coeficientes aerodinâmicos variando a base para viga T com H=3,40m

Observa-se nos resultados invertendo-se o valor constante para a altura (H) e modificando-se a base (B) dos modelos de múltiplas vigas T invertidas que em geral há uma queda nos valores dos coeficientes a medida que se alonga a base. Contudo, observa-se que para larguras maiores que 13m essa tendência modifica-se para a sustentação, quando esta parece que tende

a se estabilizar em um valor. Para a torção, entretanto, há uma variação de um valor negativo para um positivo e que passa em zero próxima da largura de 13m.

Para os casos apresentados analisam-se os resultados obtidos e concluí-se que nas seções utilizadas os coeficientes aerodinâmicos são sempre constituídos de valores com módulo menores do que um, resultando sempre em solicitações menores e conseqüentemente mais econômicas. Por outro lado, os valores obtidos com o uso de procedimentos de cálculo simplificado apresentam-se sempre a favor da segurança, o que igualmente justifica-se, afinal realiza-se uma análise menos rigorosa, com menor detalhamento.

Evidencia-se assim o uso de ferramentas numéricas simplificadas que possibilitam estimar valores de coeficientes aerodinâmicos para otimizar também obras usuais e de acessos.

Tabela 13: coeficientes aerodinâmicos para pontes tipo caixão fechado com tráfego

CS	B	H	Cd	Cl	Cm	H/B	St
BoxWing1:001	10.00	2.40	0.25	0.61	-0.06	0.24	0.05
BoxWing1:002	10.00	2.70	0.30	0.69	-0.08	0.27	0.05
BoxWing1:003	10.00	2.90	0.34	0.70	-0.09	0.29	0.05
BoxWing1:004	10.00	3.40	0.44	0.84	-0.11	0.34	0.04
BoxWing1:005	10.00	3.90	0.52	0.87	-0.12	0.39	0.01
BoxWing1:006	10.00	4.40	0.62	0.89	-0.14	0.44	0.01
BoxWing2:003	13.00	2.40	0.18	0.36	-0.05	0.18	0.06
BoxWing2:005	13.00	2.70	0.21	0.42	-0.07	0.21	0.04
BoxWing2:007	13.00	2.90	0.23	0.41	-0.08	0.22	0.04
BoxWing2:009	13.00	3.40	0.29	0.48	-0.10	0.26	0.04
BoxWing2:011	13.00	3.90	0.36	0.59	-0.11	0.30	0.04
BoxWing2:001	13.00	4.40	0.42	0.75	-0.13	0.34	0.03
BoxWing2:004	17.00	2.40	0.13	0.29	-0.05	0.14	0.06
BoxWing2:006	17.00	2.70	0.15	0.35	-0.06	0.16	0.05
BoxWing2:008	17.00	2.90	0.17	0.41	-0.07	0.17	0.04
BoxWing2:010	17.00	3.40	0.21	0.61	-0.09	0.20	0.04
BoxWing2:012	17.00	3.90	0.24	0.74	-0.11	0.23	0.03
BoxWing2:002	17.00	4.40	0.28	0.85	-0.12	0.26	0.03

Tabela 14: coeficientes aerodinâmicos para pontes tipo vigas T múltiplas com tráfego

CS	B	H	Cd	Cl	Cm	H/B	St
T-Beam3:001:4	10.00	2.40	0.28	0.52	-0.01	0.24	0.05
T-Beam3:002:4	10.00	2.70	0.33	0.56	-0.02	0.27	0.05
T-Beam3:003:4	10.00	2.90	0.36	0.52	-0.02	0.29	0.05
T-Beam3:004:4	10.00	3.40	0.43	0.54	-0.02	0.34	0.05
T-Beam4:001:5	13.00	2.40	0.22	0.44	0.01	0.18	0.05
T-Beam4:002:5	13.00	2.70	0.24	0.45	0.01	0.21	0.04
T-Beam4:003:5	13.00	2.90	0.27	0.43	0.00	0.22	0.04
T-Beam4:004:5	13.00	3.40	0.32	0.44	0.00	0.26	0.04
T-Beam5:001:6	17.00	2.40	0.17	0.39	0.01	0.14	0.03
T-Beam5:002:6	17.00	2.70	0.19	0.42	0.01	0.16	0.04
T-Beam5:003:6	17.00	2.90	0.21	0.42	0.01	0.17	0.04
T-Beam5:004:6	17.00	3.40	0.24	0.36	0.01	0.20	0.03

Nos modelos com o tráfego próximo a borda de barlavento (tabelas 13 e 14), verifica-se que os coeficientes modificam-se muito pela inserção na seção transversal do elemento adicional representativo do veículo pesado. Os resultados apresentam todos os coeficientes de arrasto substancialmente maiores, tipicamente mais que o dobro dos valores sem tráfego, e chega-se a observar valores de coeficientes de até 1,36. Multiplicados por uma área muito maior, em consequência da altura da seção exposta ao vento aumentada pelo veículo, obtêm-se cargas de arrasto muito mais elevadas.

Nos modelos com o tráfego o coeficiente de torção se mantém muito próximo ao original; entretanto, como a área aumenta, elevam-se os valores dos carregamentos. Os coeficientes de sustentação é que decrescem; porém, novamente, devido ao aumento da área exposta ao vento, mantêm-se os valores das solicitações.

Sabendo-se que a presença do tráfego na análise ao vento eleva a área frontal efetiva é interessante observar-se os vórtices, a distribuição das pressões na seção e o campo de velocidades comparativas à situação sem tráfego.

Observa-se que os valores estáticos tendem a serem sempre superiores com a adição de um tráfego pesado (figura 114, 116 e 118) em relação a ponte sem tráfego (figura 113, 115 e 117). Observa-se no exterior a tendência de preocupação com o conforto ao usuário e elevação das velocidades diretrizes nas rodovias. Daí conclui-se que essa análise será cada vez mais comum levando em consideração o uso de outros detalhes a serem acrescentados na seção transversal da ponte: as venezianas guias para minimizar efeitos de vento no tráfego.

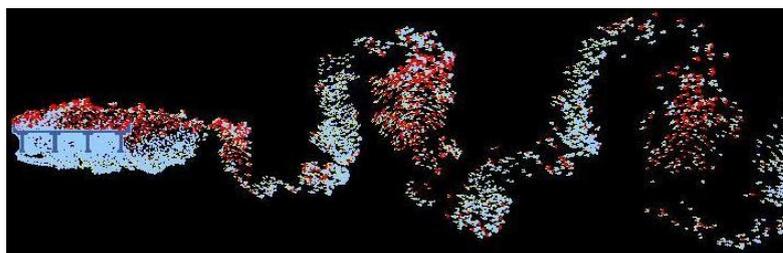


Figura 113: instantâneo de vórtices do Modelo de 4 vigas T

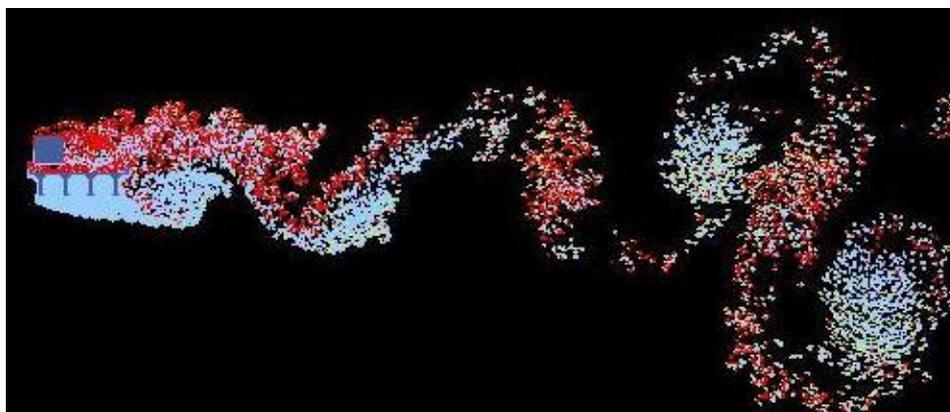


Figura 114: instantâneo de vórtices do Modelo de 4 Vigas T com tráfego

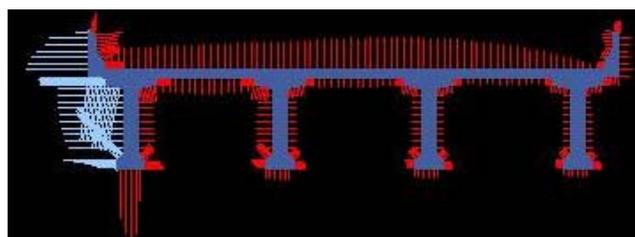


Figura 115: distribuição de pressões do Modelo de 4 vigas T

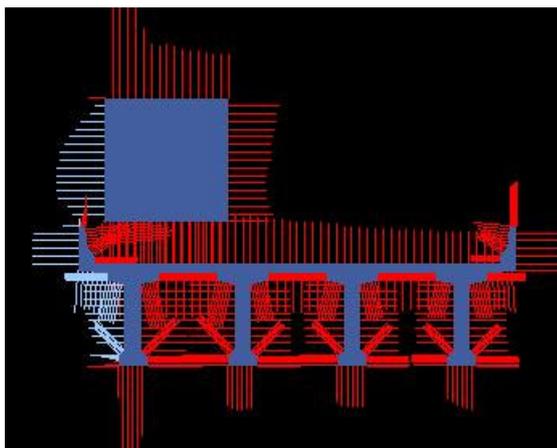


Figura 116: distribuição de pressões do Modelo de 4 vigas T com tráfego

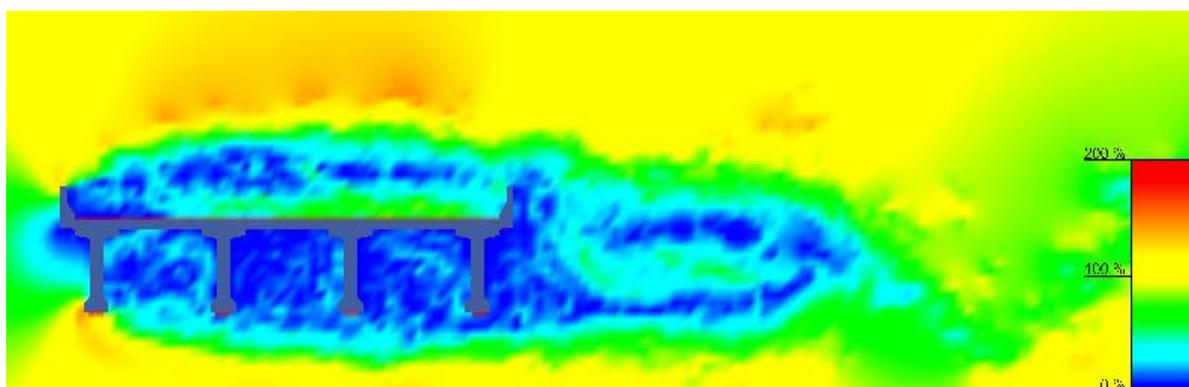


Figura 117: campo de velocidades do Modelo de 4 vigas T

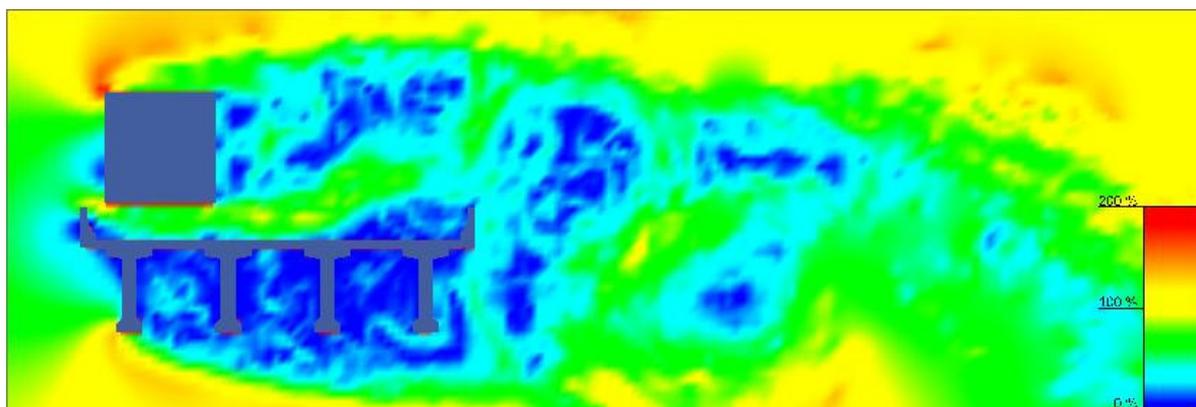


Figura 118: campo de velocidades do Modelo de 4 vigas T com Tráfego

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Se considerarmos a infraestrutura como a interface entre a espécie humana e o seu meio ambiente e verifica-se que as pontes estão entre as grandes realizações desta humanidade. Portanto estes elos fundamentais precisam de sustentabilidade, as melhores práticas devem ser empregadas. Conforme Morghental (2000) muitas “pontes representam conquistas técnicas consideráveis e fazem parte de nosso patrimônio cultural. Apesar de serem fomentos ao crescimento econômico a sua principal função ainda é a de conectar pessoas e promover as trocas culturais. Superando barreiras, criando a imagem positiva da conexão entre os povos as pontes também preenchem as diferenças sociais”.

Se deve então promover projetos que sejam mais detalhados, específicos, bem elaborados e estudados; afinal, não se admite falha nestes elementos. O custo do erro ou da simplificação é muito alto para a sociedade.

Apesar dos avanços na área de materiais e do conhecimento julga-se que muitas são ainda as simplificações adotadas nos métodos de cálculo usuais nos escritórios de engenharia estrutural em nosso país. Ainda assim, otimizar é uma etapa cada vez mais fundamental na análise estrutural, mas que requer grande sofisticação e confiança naquilo que está sendo aplicado. O investimento inicial em tecnologia muitas vezes se paga imediatamente na economia realizada na primeira obra, não necessitando de amortização.

Segundo Ito (1992) “a consideração da estabilidade aerodinâmica em etapas preliminares de cálculo é extremamente essencial em grandes pontes suportadas por cabos”. A solução aproximada do problema de iteração entre fluido e estrutura permite prever a utilização máxima da seção transversal da estrutura, ainda na fase de projeto, pelo próprio engenheiro projetista. Evitam-se assim grandes modificações em fases de projeto posteriores aos ensaios em túneis de vento e possibilitando estudos de viabilidade, projetos básicos e fases iniciais de projetos executivos de pontes muito mais realistas.

A tendência mundial em estruturas é de analisar o risco, a probabilidade de falha da estrutura e a sua importância relativa. Num futuro breve se prevê a aplicação de avaliações de confiabilidade aos principais investimentos realizados, cujas investigações levarão em conta o tipo e a profundidade das análises efetuadas para baixar custos sem aumentar os riscos pelo

exame de incertezas nos modelos e propriedades. O uso de técnicas diferentes, numéricas e experimentais em um mesmo projeto diminui e muito as possibilidades de falhas na análise terem sido cometidas por ambas as equipes técnicas.

Este trabalho de pesquisa contribuiu fornecendo uma análise comparativa destes métodos atualmente disponíveis para estimar coeficientes aerodinâmicos e calcular o carregamento de vento em pontes. Analisando todos os resultados obtidos de modo geral observa-se que são muito semelhantes e, deduz-se que o método e a implementação cumprem a tarefa de estimar valores de coeficientes aerodinâmicos de pontes que posteriormente serão confirmados em túnel de vento.

Tomando-se como critérios de análise a precisão e a versatilidade do método e dos recursos necessários, considera-se que a ferramenta numérica utilizada é sim de muito boa precisão, tem um tempo de processamento aceitável, em torno de horas, com aplicabilidade em diferentes seções e necessita apenas de recursos computacionais usuais e disponíveis aos engenheiros de projeto. Respondendo-se objetivamente, em relação aos resultados numéricos obtidos determinou-se que estes são satisfatórios sim e servem sim para estudos preliminares básicos e até executivos no caso de obras de pequeno porte. A margem de erro encontrada é sim aceitável e os detalhes da seção transversal são sim considerados.

Destaca-se que o Método da Vorticidade Discreta explora a natureza compacta do campo de vorticidades e realiza uma eficiente discretização das partículas no espaço e no tempo sendo um método independente da malha criada. Aponta-se que discretizar em vórtices livres introduzidos na superfície do corpo e acompanhar a evolução destes simplifica muito o procedimento numérico, que a equação da vorticidade derivada de Navier-Stokes na forma Lagrangeana é desta maneira livre de instabilidades numéricas e satisfaz exatamente as condições de contorno de espaço-livre para escoamentos externos.

Realiza-se uma abordagem de cada parâmetro necessário e sua influência nos cálculos realizados. Nota-se que todos influenciam na qualidade e rapidez dos resultados, mas que a pré-calibragem do sistema permite um uso adequado na maioria das situações. Em casos especiais deve-se estudar variando e observando a atuação de cada um deles.

Porém, acrescenta-se que o cálculo da interação entre vento e estrutura não pára nesta etapa, a determinação dos coeficientes aerodinâmicos é na verdade o passo inicial neste longo processo. Sugere-se que considerações aeroelásticas sejam implementadas para aprofundar a análise numérica e crie-se uma etapa automatizada de pós-processamento para obter mais e melhores informações, como os derivativos aerodinâmicos.

Muitas são as possibilidades para dar prosseguimento a este trabalho. Uma maneira é buscar na literatura e nos relatórios dos laboratórios internacionais as seções, de pontes ou outras, e comparar resultados. Isto enriqueceria mais a base de dados e acrescentaria confiança ao método. Outra colaboração interessante seria realizar uma variação paramétrica dos cantos das seções por meio da relação entre um raio e a altura total. Desta forma, comparando estes resultados com os números de laboratórios e normas se obteria ainda mais confiabilidade.

Uma outra sugestão é desenvolver uma análise aeroelástica, introduzindo frequências iniciais de movimento na seção e deixar as forças agirem em relação à rigidez. Outra possibilidade mais avançada é a de introduzir uma turbulência inerente ao escoamento, que possa ser especificada pelo usuário, para modelar ainda mais corretamente as interações entre o vento e a estrutura. Portanto, conclui-se que, apesar de encontrarem-se em uma etapa avançada, ainda restam vários escopos de trabalho para aumentar a exatidão das previsões numéricas. Muitos desenvolvimentos ainda estão para serem realizados nos programas computacionais nesta área, sempre seguindo as tendências observadas em laboratório, que também evoluem.

O engenheiro de estruturas tem como objetivo final observar como se comporta a estrutura quando solicitada com relação às deformações e deslocamentos. Estes valores máximos em função de velocidades do vento, indicativos de desestabilização como os derivativos aerodinâmicos e concentrações de energia em certas faixas, observáveis nos espectros de potência, são mais importantes do que os coeficientes em si.

Portanto, na maioria das vezes não é uma simples redução dos coeficientes o objetivo do projeto da estrutura; mas sim uma combinação mais favorável entre eles que proporcione mais conforto e segurança ao tráfego sobre a ponte, o interesse recai não somente sobre as condições da estrutura, mas também sobre a situação para o usuário.

Um exemplo é o uso de um dispositivo aerodinâmico que aumenta o arrasto, porém é favorável devido ao contrabalanço de outros fatores importantes como a sustentação e a sua distribuição ao longo da estrutura. Por conseguinte, e devido aos parâmetros necessários ao

processamento, o uso de uma ferramenta específica como este módulo requer um engenheiro com conhecimento nesta área e a consultoria a um aerodinamicista é fundamental.

Observa-se que fazer com que a variação, ou seja, o declive do polinômio que representa os coeficientes em função do ângulo de ataque, diminua pode ser interessante em muitas situações; mas destaca-se que para pontes a incidência com ângulo zero é normalmente a mais importante, uma vez que a maioria das pontes se localiza sobre grandes planos ou vales abertos, recebendo ventos importantes com baixos ângulos de incidência. Desta forma, em algumas circunstâncias, pode não adiantar somente diminuir a variação se no ponto zero o valor aumentar.

Como consequência das observações realizadas no decorrer deste trabalho, se adicionará um novo módulo chamado *WindChk* para realizar os diversos controles usuais em projetos de estruturas submetidas ao vento. Os exames deste módulo incluem o cálculo de velocidades críticas para instabilidade ao galope, desprendimento de vórtices, divergência torcional, drapejamento clássico e drapejamento de um único grau de liberdade. Essa ferramenta buscará complementar todo o trabalho a ser realizado referente à aerodinâmica permitindo o uso do programa para todas as fases de estudos de vento.

Ainda especificamente em relação ao programa RM alguns termos em inglês, de uso corrente em aerodinâmica mas pouco conhecidos dos engenheiros em geral, devem ser alterados para expressões mais adequadas às funções que executam.

Ao final verifica-se que somente com o cumprimento de todas as etapas de projeto se obtêm estruturas que explorem, com responsabilidade, integralmente o potencial dos materiais empregados na construção de modernas obras-de-arte. As pontes suportadas por cabos podem então executar seu importante papel para superar estas barreiras físicas naturais que até hoje separam pessoas, bairros, cidades, estados, nações e até mesmo continentes.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR-6118, Projeto de Estruturas de Concreto Armado e Protendido - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR-6123 - Forças Devidas ao Vento em Edificações – Procedimento**. Rio de Janeiro, 1998.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR-7187: Projeto de pontes de concreto armado e protendido - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR7188 - Carga Móvel em Ponte Rodoviária e Passarela de Pedestre – Procedimento**. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR-8681, Ações e Segurança nas Estruturas**. Rio de Janeiro, 2003.

AMMANN, O.H.; VON KARMAN, T.; WOODRUFF, G.B. **The failure of The Tacoma Narrows bridge**. Report to Federal Works Agency, 28 March 1941.

BATTISTA, R.C.; PFEIL, M.S. **Reduction of vortex induced oscillations of Rio-Niterói Bridge by dynamic control devices**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v.84, p.273-288, Elsevier Ltd., 2000.

BEALE, J.T.; MAJADA, A. **Vortex methods I: Convergence in three dimensions**. Mathematics of Computation v.39, p.1-27, American Mathematical Society, 1982.

BLEICH, F. **Dynamic instability of truss-stiffened suspension bridges under wind action**. American Society of Civil Engineers, v.74, n.8, p. 1269-314, Oct., 1948.

BLESSMANN, J. **The Boundary Layer Wind Tunnel of UFRGS**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, n.10, v.2, p.231-248, Elsevier Ltd., 1982.

BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das construções**. 2ª ed., Porto Alegre: Sagra, 1990.

BLESSMANN, J. **O Vento na Engenharia Estrutural**. 1ª ed., Porto Alegre: Ed. Da Universidade / UFRGS, Porto Alegre, 1995.

BLESSMANN, J. **Introdução às Ações Dinâmicas do Vento**. 2ª ed., Porto Alegre: Editora da UFRGS, Porto Alegre, 2005.

BOURIS, D.; BERGELES, G. **2D LES of vortex shedding from a square cylinder**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v.80, n.1–2, p.31–46. Elsevier Ltd., 1999.

BOYSAN, F.; WEBER, R.; SWITENBANK, J.; AYERS, W.A. **Mathematical Modeling of Heterogeneous Combustion in Strongly Swirling Flows**. International Symposium on Refine Modeling of Flows, Paris, 1982.

BRAUN, A.L.; AWRUCH, F. **Um Modelo Para Simulação Numérica da Ação do Vento sobre Seções de Pontes**. Dissertação (Mestre em Ciências) – PPGEC, UFRGS, Porto Alegre, 2002.

BRAUN, A.L.; AWRUCH, F. **Numerical simulation of wind action on a long-span bridge deck**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v.XXV, n.4, p. 352-363, Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 2003.

BRAUN, A.L.; AWRUCH, F. **Análise numérica da ação do vento na ponte sobre o rio Guamá**, XXXI Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Brasília, 2004.

BRITO, J.L.V. **Formulação dos Efeitos de Interação Fluido-estrutura em Elementos Prismáticos Visando a Determinação da Instabilidade Dinâmica Devida à Ação do Vento**. Tese (Doutor em Ciências) CPGEC, UFRGS, Porto Alegre, 1995.

BROOKS, A.N.; HUGHES, T.J.R. **Streamline upwind/Petrov-Galerkin formulations for convection dominated flows with particular emphasis on the incompressible Navier-Stokes equations**. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v.32, p.199-259, Elsevier Ltd., 1982.

CARRIER, J.; GREENGARD, L.; ROKHLIN, V. **A Fast Adaptive Multipole Algorithm for Particle Simulations**. SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, v.9, n.4, p.669-686, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1988.

CHEN, B.; GUO, L.J.; YANG, X.G. **Numerical Simulation of Flow Around Circular Cylinder by Discrete Vortex Method**, Progress in Natural Science, v.12, p.964-969, Elsevier Ltd., 2002.

CHORIN, A.J., **On the convergence of Discrete Approximations to the Navier-Stokes Equations**, SIAM J. SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, v.27, p.341-353, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1978.

COTTET, G.H.; KOUMOUTSAKOS, P., **Vortex Methods: Theory and Practice**, University of Cambridge, Cambridge, 2000.

DE SAMPAIO, P.A.B. **A Petrov-Galerkin Formulation for the Incompressible Navier-Stokes Equations using Equal Order Interpolation for Velocity and Pressure**, International Journal for Numerical Methods in Engineering, V.31 p.1135-49, 1991.

DEGOND, P.; MAS-GALLIC, S. **The weighted particle method for convection diffusion equations**. Mathematics of Computation, v.53, p.485-507, American Mathematical Society, 1989.

FISHELOV, D. **A New Vortex Scheme for Viscous Flows**. Journal of Computational Physics, v.86, p.211-224, Academic Press, 1990.

FRANDBSEN, B. **Computational Fluid-Structure Interaction Applied to Long-Span Bridge Design**, PhD Thesis, Magdalene College, University of Cambridge, Cambridge, 1999.

FUNG, Y. C. **An introduction to the theory of aeroelasticity**. New York: John Wiley, 1955.

GHONIEM, A.F.; SHERMAN, F.S. **Grid-Free Simulation of Diffusion Using Random Walk Methods**. Journal of Computational Physics, v.61, p.1–37, Academic Press, 1985.

GREENGARD, L.; ROKHLIN, V. **A Fast Algorithm for Particle Simulations** Journal of Computational Physics, v.73, p.325-348, Academic Press, 1987.

HAY, J. **Response of Bridges to Wind**, Transport Research Laboratory, Department of Transport, UK, HMSO Publication Center, 1992.

HALLAK, P. H.; PFEIL, M. **Parâmetros Aeroelásticos para Pontes via Fluidodinâmica Computacional**. Rio de Janeiro: Tese COPPE / UFRJ, 2002.

IRANI, B.R.; ANDRÉ, J.C. **Modelos matemáticos simples para análise aeroelástica de pontes estaiadas e de pontes pênséis: desprendimentos de vórtices e drapejamento** Dissertação LMC, EP / USP, 1999.

ITO, M. **21st century super long span bridges in Japan**, Bridge Aerodynamics. Cowi, A.A. Balkena, Rotterdam, Netherlands, 1998.

ITO, M. **Wind engineering of large bridges in Japan**, Aerodynamics of Large Bridges. A.A. Balkena, Rotterdam, Netherlands, 1992.

JANCIC, D.; PIRCHER, H. **Consistent Numerical Model for Wind Buffeting Analysis of Long-Span Bridges**. TDV Ges.m.b.H. Graz, 2004.

JANCIC, Dorian. RM2006, **Computer Fluid Dynamic Analysis**. Dorian Jancic & Partners TDV Consulting Ges.m.b.H. Graz, 2006.

JENSSEN, C.B.; JAKOBSEN, J.B.; ENEVOLDSEN, I.; HANSEN, S.O. **Predicting wind induced motion of suspension bridges using parallel CFD**, in Fourth European CFD Conference, Special Technological Sessions, Greece, Athens, 1998.

JENSSEN, C.B.; KVAMSDAL, T. **Computational methods for fsi-simulations of slender bridges on high performance computers**, in Computational Methods for Fluid-Structure Interactions, p. 31-40, Tapir Forlag, Trondheim, Norway, 1999.

KING, J. P. C.; LAROSE, G. L.; DAVENPORT, A. G. **A study of wind effects for a cablestayed bridge**. Research Report BLWT-SS29-1990. The University of Western Ontario. London. Canada, 1990.

LAROSE, G.L. **The Response of a Suspension Bridge Deck to turbulent Wind: The Taut Strip Model Approach**. M. Eng. Sc. Thesis, The University of Western Ontario, Ontario, Canada, 1992.

LARSEN, A. **Aerodynamics of Large Bridges**. A.A. Balkena, Rotterdam, Netherlands, 1992.

LARSEN, A.; WALTHER J.H. **Aeroelastic analysis of bridge girder sections based on discrete vortex simulations**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v.67-68, p.253-265, Elsevier Ltd., 1997.

LARSEN, A.; WALTHER J.H. **Two Dimensional Discrete Vortex Method for Application to Bluff Body Aerodynamics**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v.67-68, p.183-193, Elsevier Ltd., 1997.

LARSEN, A. **Computer simulation of wind-structure interaction in bridge aerodynamics** Journal of International Association for Bridge and Structural Engineering, v.8, n.2, p.105-111, IABSE, 1998.

LARSEN, A.; ESDAHL, S. **Discrete vortex simulation of fluid-structure interaction in bridge engineering**. Magdalene College, University of Cambridge, Cambridge, 1998.

LARSEN, A.; ESDAHL, S. **Vortex models for aeroelastic assessment of multi element bridge deck**, Bridge Aerodynamics. Cowi, A.A. Balkena, Rotterdam, Netherlands, 1998.

LARSEN, A.; WALTHER, J.H. **Discrete vortex simulation of flow around five generic bridge deck sections**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v.77-78, p.591-602, Elsevier Ltd., 1998.

LEONARD, A. **Vortex Methods for Flow Simulation**. Journal of Computational Physics, v.37, p.289-335, Academic Press, 1980.

LIMAS, L. F.; LOREDO-SOUZA, A. M. **Determinação das Características Aerodinâmicas de Seções Transversais de Pontes em Túnel de Vento**. Dissertação (Mestre em Ciências) PPGECC, UFRGS, Porto Alegre, 2003.

LIMAS, L. F. ; LOREDO-SOUZA, A. M. ; ROCHA, M. M; PALUCH, M. J. **Determinação das Características Aerodinâmicas de Seções Transversais de Pontes em Túnel de Vento**. Em XXXI Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Mendoza, Argentina, 2004.

LIU, L.; JI, F.; FAN, J.; CEN, K. **Recent development of vortex method in incompressible viscous bluff body flows.** Journal of Zhejiang University SCIENCE, v.6A n.4, p.283-288, 2005.

LOREDO-SOUZA, A. M.; DAVENPORT, A. G. . Aeroelastic Wind Tunnel Modelling of Transmission Lines. Em Transactions of **the Jubileum Conference on Wind Effects on Buildings and Structures**, v.II. p. 53-60, Gramado, 1998.

LOREDO-SOUZA, A.M.; BRITO, J.L.V.; **Estudo da ação do vento sobre uma ponte estaiada: influência da forma da seção transversal**, XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Brasília, 2002.

LOREDO-SOUZA, A.M. **Simulação da camada limite atmosférica em tunel de vento** [recurso eletrônico]. In: Escola de Primavera em Transição e Turbulência Rio de Janeiro, ABCM, 2004.

LOREDO-SOUZA, A.M.; ROCHA, M.M.; PALUCH, M.J.; NÚÑEZ, G.J.Z.; CARPEGGIANI, E. A. **O uso do Túnel de Vento no Projeto de Pontes Estaiadas, Estudo de Caso: Ponte sobre o Rio Guamá.** Em 46º Congresso Brasileiro do Concreto, CD- Anais do 46º CBC, 2004. v. I. p. 1063-1078, Florianópolis, 2004.

LOREDO-SOUZA, A. M. ; ROCHA, M.M. ; PALUCH, M.J.; NÚÑEZ, G.J.Z.; CARPEGGIANI, E. A.; RIPPEL, L. I. . **Aspectos Aerodinâmicos a Serem Considerados no Projeto de Pontes Estaiadas.** Em Conferência: Pontes e Grandes Estruturas, São Paulo, 2004.

LOREDO-SOUZA, A. M. ; PALUCH, Mário José ; ROCHA, Marcelo Maia ; NÚÑEZ, Gustavo Javier Zani ; CARPEGGIANI, Elvis Antônio ; RIPPEL, Leandro Inácio . **Projetos de Pontes Estaiadas - Ação do Vento.** Em Congresso de Pontes e Estruturas, Rio de Janeiro, 2005.

LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M.M.; NÚÑEZ, G.J.Z. **Estudo da ação do vento sobre um modelo seccional reduzido da ponte Roberto Marinho sobre o rio Pinheiros.** Relatório Técnico, LAC, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M.M.; NÚÑEZ, G.J.Z. **Estudo da ação do vento sobre um modelo aeroelástico da ponte Roberto Marinho sobre o rio Pinheiros.** Relatório Técnico, LAC, UFRGS, Porto Alegre, 2007.

MATSUMOTO, M. **Vortex shedding of bluff bodies: A review**, Journal of Fluids and Structures, v.13, p.791-811, Elsevier Ltd., 1999.

MAZZILLI, C. E. N.; ANDRÉ, J. C.; SOARES, M.E.S. A simple numerical model for the aeroelastic analysis of cable-stayed bridges. In: **Jubileum Conference On Wind Effects on Buildings and Structures.** Proceedings. LAC-UFRGS,. v.2, p.307-313, Porto Alegre, 1998.

MORGENTHAL, G. **Fluid-Structure Interaction In Bluff Body Aerodynamics and Long-Span Bridge Design: Phenomena and Methods**. Magdalene College, University of Cambridge, Cambridge, 2000.

MORGENTHAL, G. **Comparison of Numerical Methods for Bridge-Deck Aerodynamics**. Thesis (Master of Philosophy) Magdalene College, University of Cambridge, Cambridge, 2000.

MORGENTHAL, G. **Aerodynamic Analysis of Structures Using High-resolution Vortex Particle Methods**. Thesis (Doctor of Philosophy) Magdalene College, University of Cambridge, Cambridge, 2002.

MURAKAMI, S.; MOCHIDA, A. **On turbulent vortex shedding flow past 2D square cylinder predicted by CFD**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v.54/55, p.191–211, Elsevier Ltd., 1995.

NAKAMURA, H.; OGAKI, I. **Flutter simulation for bridges**. In: THE MSC 1990 WORLD USER CONFERENCE. Proceedings v.1, n.1, s.1 , p.20, 1990.

PALUCH, M.J.; LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M.M. ; NÚÑEZ, G.J.Z.; CARPEGGIANI, E.A.; RIPPEL, L.I. **Projeto de Pontes Estaiadas - Vibrações por Desprendimento de Vórtices**. Em Congresso de Pontes e Estruturas, Rio de Janeiro, 2005.

PALUCH, M.J.; ROCHA, M.M.; LOREDO-SOUZA, A.M.; NÚÑEZ, G.J.Z. **Estudo da Estabilidade de uma Ponte Estaiada ao Desprendimento de Vórtices** Em XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Brasília, 2002.

PALUCH, M.J.; ROCHA, M.M.; LOREDO-SOUZA, A.M.; NÚÑEZ, G.J.Z. **Estudo da Estabilidade de Pontes Estaiadas de Concreto Armado ao Desprendimento de Vórtices**. Em V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo, 2003.

PALUCH, M. J., SCHETTINI, E. B. C., LOREDO-SOUZA, A. M. Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento. **Anais da IV Escola de Primavera de Transição e Turbulência**, Porto Alegre: UFRGS, ABCM, 2004.

PERLMAN, M. **On the accuracy of vortex methods**. Journal of Computational Physics v.59, p.200–23, Academic Press, 1985.

PFEIL, M. S., **Comportamento Aeroelástico de Pontes Estaiadas**, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1993.

PLOUMHANS, P.; WINCKELMANS, G.S. **Vortex methods for high-resolution simulations of viscous flow past bluff bodies of general geometry**. Journal of Computational Physics, v.165, p.354-406, Academic Press, 2000.

OKAJIMA, A. **Flow around a rectangular cylinder with a section of various depth/breath ratios.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v.17, p.79-80, Elsevier Ltd., 1983

RAMOS, I. B. **Modelos matemáticos simples para análise aeroelástica de pontes estaiadas e de pontes pênséis: desprendimento de vórtices e drapejamento.** Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

REINHOLD, T. A. **Wind Tunnel Modeling for Civil Engineering Applications – Proceedings of the International Workshop on Wind Tunnel Modeling Criteria and Techniques in Civil Engineering Applications.** Cambridge: Cambridge University Press, 1982.

ROBERTS, S. **Accuracy of the random vortex method for a problem with non-smooth initial conditions** Journal of Computational Physics, v.58, p.29–43, Academic Press, 1985.

ROCHA, M.M. LOREDO-SOUZA, A. M.; NÚÑEZ, G.J.Z. **Estudo da ação do vento sobre um modelo seccional reduzido da ponte estaiada sobre o rio Guamá.** Relatório Técnico, LAC, UFRGS, Porto Alegre, 2002.

ROCHA, M.M. LOREDO-SOUZA, A. M.; NÚÑEZ, G.J.Z. **Estudo Experimental da Estabilidade Aerodinâmica da Ponte Estaiada sobre o Rio Guamá.** Em XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Brasília, 2002.

ROCHA, M.M.; LOREDO-SOUZA, A. M.; PALUCH, M.J.; NÚÑEZ, G.J.Z. **Aspectos Aerodinâmicos a serem Considerados no Projeto de Pontes Estaiadas - Estudo de Caso: Ponte sobre o Rio Guamá.** Em V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo, 2003.

BOSCH, G.; RODI, W. **Simulation of vortex shedding past a square cylinder with different turbulence models.** International Journal for Numerical Methods in Fluids v.28, n.4, p.601-616, John Wiley & Sons, Ltd., 1998.

SCHLICHTING, H. & GERTEN, K. **Boundary-layer Theory.** 8th Ver. And Enl. Ed., ed. Springer, 2000.

SCANLAN, R. H. **Wind dynamics of long-span bridges.** Aerodynamics of Large Bridges. A.A. p.47-57, Balkena, Rotterdam, Netherlands, 1992.

SCANLAN, R. H.; TOMKO, J. J. **Airfoil and Bridge Deck Flutter Derivatives.** Journal of Engineering Mechanics, v.97, n.6, p.1717-1737, 1971.

SHANKAR, S.; van DROMMELEN, L. **A new diffusion procedure for vortex methods.** Journal of Computational Physics, v.127, p.88–109, Academic Press, 1996.

SIMIU, E.; SCANLAN, R. H. **Wind effects on structures: Fundamentals and Applications to Design,** 3rd Edition, New York, John Wiley & Sons, 1996.

SIMIU, E.; SCANLAN, R. H. **Wind effects on structures: an introduction to wind engineering**, New York, John Wiley & Sons, 1978.

SOCKEL, H. **Wind Excited Vibrations of Structures**. CISM Courses and Lectures No. 335. Springer – Verlag, Udine Italy 1994.

TANAKA, H. **Aerodynamics of large bridges during erection**, Bridge Aerodynamics. Cowi, A.A. Balkena, Rotterdam, Netherlands, 1998.

TANAKA, H. Similitude and modelling in bridges, Aerodynamics of Large Bridges. A.A. Balkena, Rotterdam, Netherlands, 1992.

TAYLOR, I.J.; VEZZA, M. **An Overview of Numerical Bridge Deck Aerodynamics**. QNET-CFD Network Newsletter, v.2, n.2, p.21-26 2003.

TAYLOR, I.J.; VEZZA, M. Analysis of the Wind Loading on Bridge Deck Sections Using a Discrete Vortex Method. 10th Int. conf. on Wind Eng., Copenhagen, 1999.

TAKEDA, K., Parallel Discrete Vortex Methods for Viscous Flow Simulation, PhD Thesis, University of Southampton, 1999.

TDV Ges.m.b.H. **GP2006 User Guide**, Dorian Janjic & Partners, Graz, 2006.

TDV Ges.m.b.H. **RM2006 Procedures Guide**, Dorian Janjic & Partners, Graz, 2006.

TDV Ges.m.b.H. **RM2006 User Guide**, Dorian Janjic & Partners, Graz, 2006.

TDV Ges.m.b.H. **RM2006 User Guide - Appendix**, Dorian Janjic & Partners, Graz, 2006.

THEODORSEN, T. **General theory of aerodynamic instability and mechanism of flutter**. National Advisory Committee for Aeronautics, n.496, 1935.

VIRLOGEUX, Michel. **The Millau Viaduct**. Millau Viaduct Seminar, Arcadis, 2004.

VAN DOMMELEN, L.; RUDENSTEINER, E. A. **Fast adaptive summation of point forces in the two-dimensional Poisson equation..** Journal of Computational Physics, v.83, p.126-147, Academic Press, 1989.

WALTHER, J.H.; LARSEN, A. **Two dimensional discrete vortex method for application to bluff body aerodynamics**. Computational Wind Engineering. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v.67-68, April-June, p.183-193, Elsevier Ltd., 1997.

WALTHER, J.H.; MORGENTHAL, G., **An Immersed Interface Method for the Vortex-in-cell Algorithm**. Journal of Turbulence, v.3, p.1-9, Taylor & Francis, 2002.

WALTHER, J.H. **An Influence Matrix Particle-particle-particle-mesh Algorithm with exact Particle-particle Correction.** Journal of Computational Physics, v.184, p.670-678, Academic Press, 2003.

WARDLAW, R. L. The improvement of aerodynamic performance, **Aerodynamics of Large Bridges.** A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1992.

WARDLAW, R. L. Flutter and torsional instability, **Wind-excited vibrations of structures.** CISM Courses and Lectures No. 335. Springer – Verlag, Udine Italy 1994.

WALLACE, C.; NISSEN, J. Kessock Bridge: Joint Engineer Role, **I.C.E. Proceedings,** Vol.76, p. 67-80, 1984.

ZHU, B.S.; KYOJI, K. **A Lagrangian vortex method for flows over a moving bluff body.** Computational Fluid Dynamics Journal, v.11:, p.363-370, Taylor & Francis, 2003.

APÊNDICE 1

Tabelas de resultados obtidos no método computacional e gráficos comparativos aos valores dos ensaios experimentais em escoamentos suaves e turbulentos.

Tabela 13: coeficientes aerodinâmicos do Modelo I

Alfa	C_d	C_l	C_m
-10	0.48	-0.82	-0.03
-8	0.41	-0.78	0.00
-6	0.37	-0.63	0.04
-4	0.30	-0.43	0.02
-2	0.30	-0.13	0.01
0	0.30	0.00	0.00
2	0.30	0.02	-0.01
4	0.29	0.13	-0.03
6	0.34	0.43	-0.05
8	0.39	0.78	-0.04
10	0.43	0.82	-0.03

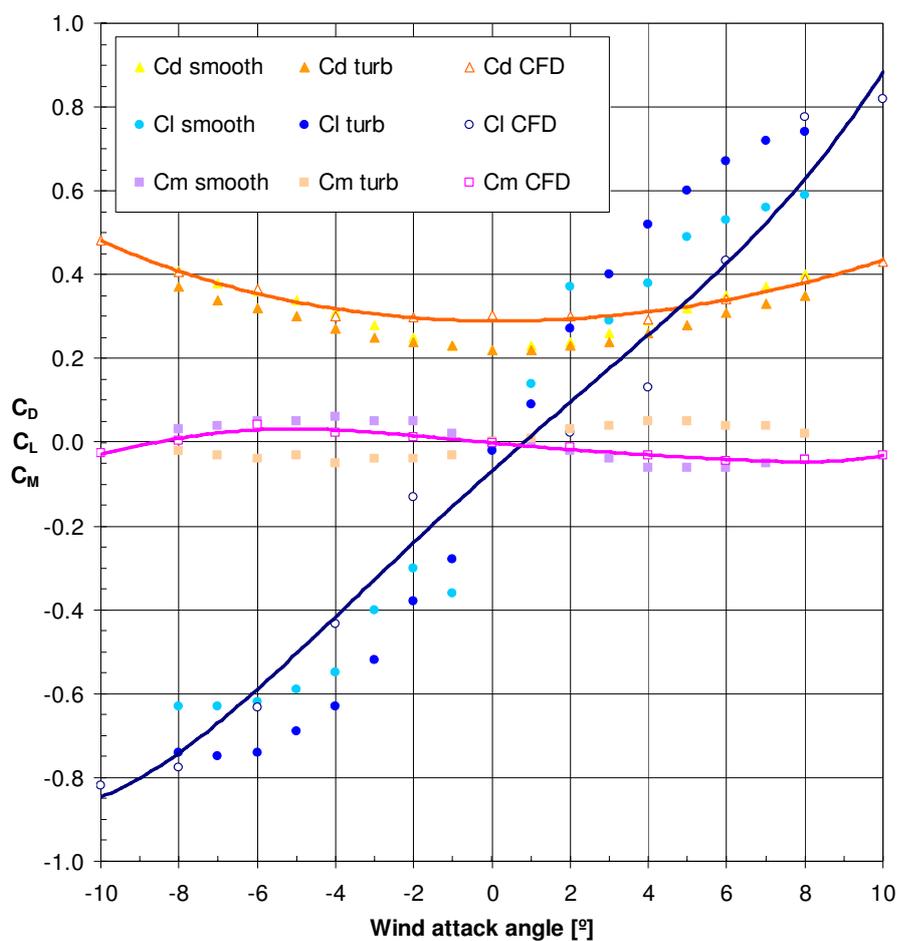


Figura 119: coeficientes aerodinâmicos do Modelo I do estudo paramétrico

Tabela 14: coeficientes aerodinâmicos do Modelo II

alfa	C_d	C_l	C_m
-10	0.22	-0.61	-0.08
-8	0.16	-0.60	-0.06
-6	0.14	-0.40	-0.03
-4	0.12	-0.31	-0.01
-2	0.11	-0.21	0.01
0	0.11	0.01	0.00
2	0.12	0.23	0.01
4	0.15	0.46	0.04
6	0.18	0.55	0.06
8	0.21	0.79	0.09
10	0.25	0.98	0.12

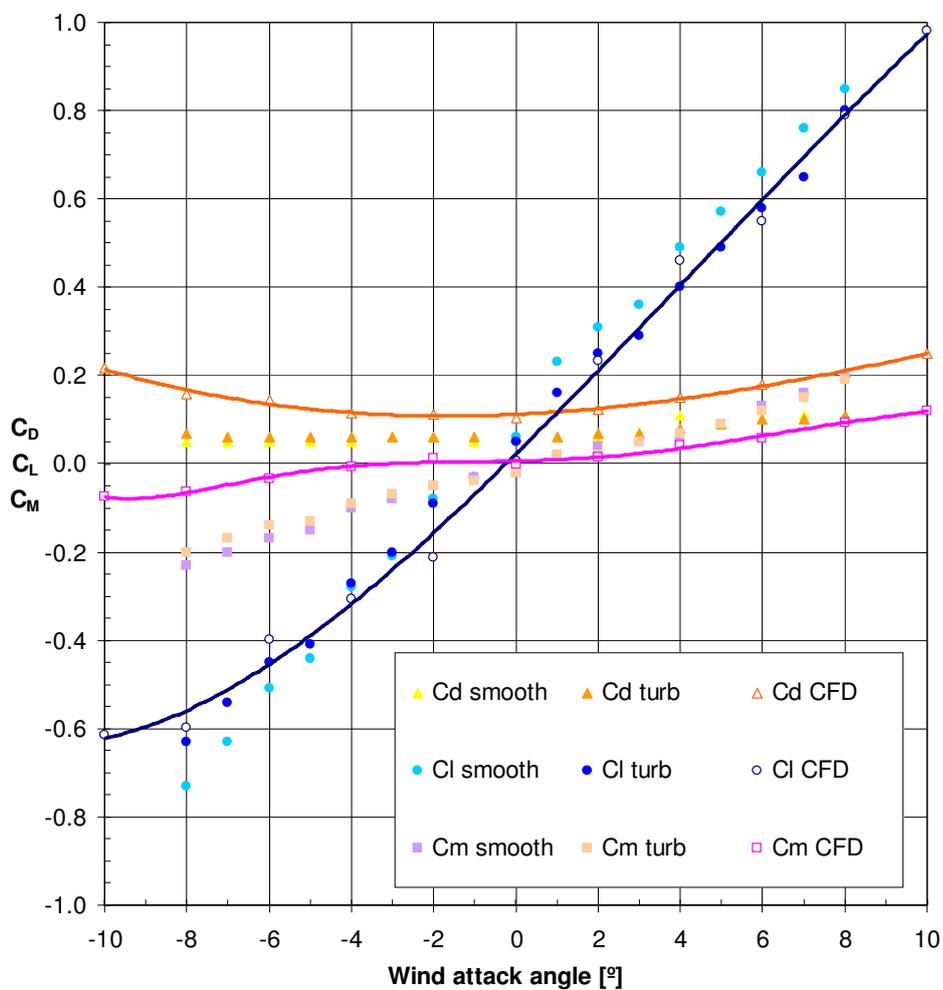


Figura 120: coeficientes aerodinâmicos do Modelo II do estudo paramétrico

Tabela 15: coeficientes aerodinâmicos do Modelo III

alfa	C_d	C_l	C_m
-10	0.32	-0.95	0.05
-8	0.26	-0.94	0.04
-6	0.23	-0.52	0.00
-4	0.19	-0.31	-0.01
-2	0.19	-0.06	0.00
0	0.18	-0.01	0.00
2	0.22	0.02	0.00
4	0.23	0.31	0.00
6	0.26	0.52	0.02
8	0.31	0.94	-0.01
10	0.35	0.95	-0.03

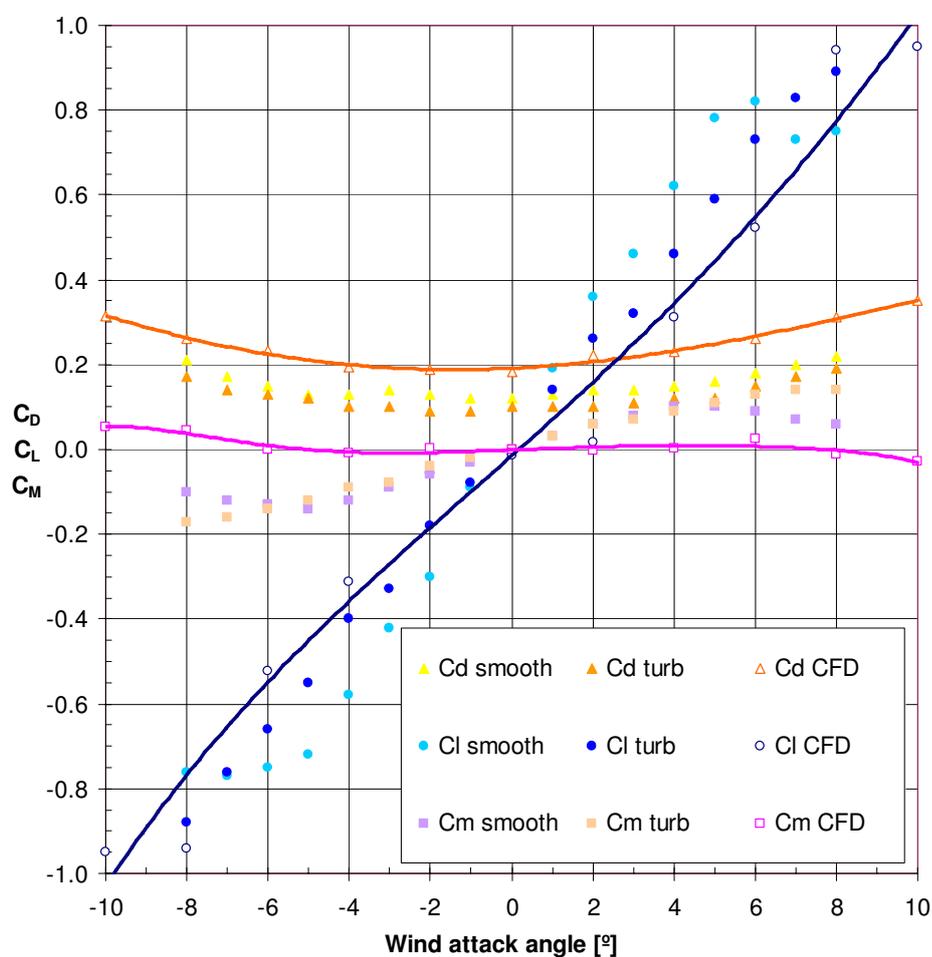


Figura 121: coeficientes aerodinâmicos do Modelo III do estudo paramétrico

Tabela 16: coeficientes aerodinâmicos do Modelo IV

alfa	C_d	C_l	C_m
-10	0.33	-1.06	0.06
-8	0.27	-1.00	0.05
-6	0.25	-0.55	0.01
-4	0.20	-0.38	-0.02
-2	0.17	-0.05	-0.02
0	0.16	0.03	0.00
2	0.18	0.28	0.01
4	0.22	0.43	0.03
6	0.26	0.33	0.01
8	0.31	0.47	-0.02
10	0.36	0.61	-0.04

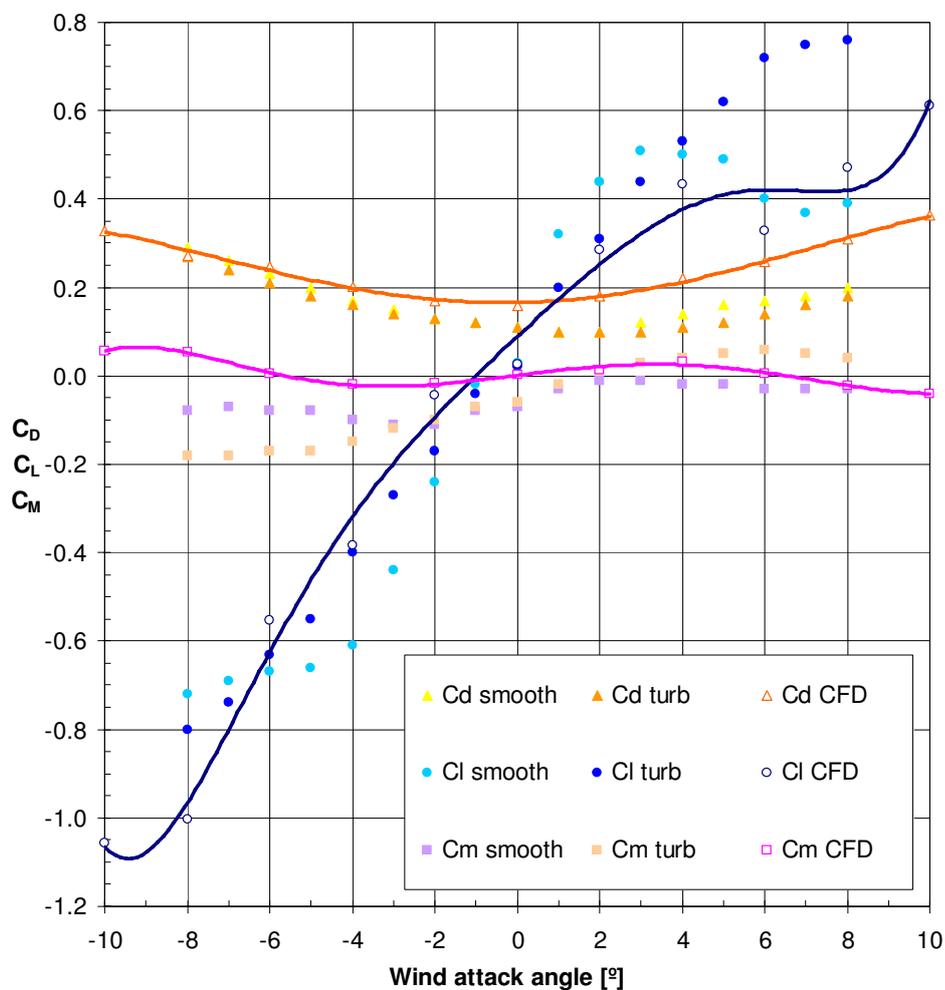


Figura 122: coeficientes aerodinâmicos do Modelo IV do estudo paramétrico

Tabela 17: coeficientes aerodinâmicos do Modelo V

alfa	C_d	C_l	C_m
-10	0.48	-0.85	-0.03
-8	0.41	-0.78	-0.04
-6	0.37	-0.43	-0.05
-4	0.30	-0.13	-0.03
-2	0.30	0.00	-0.01
0	0.30	0.01	0.00
2	0.30	0.11	0.01
4	0.29	0.28	0.02
6	0.34	0.48	0.04
8	0.39	0.59	0.00
10	0.43	0.76	-0.03

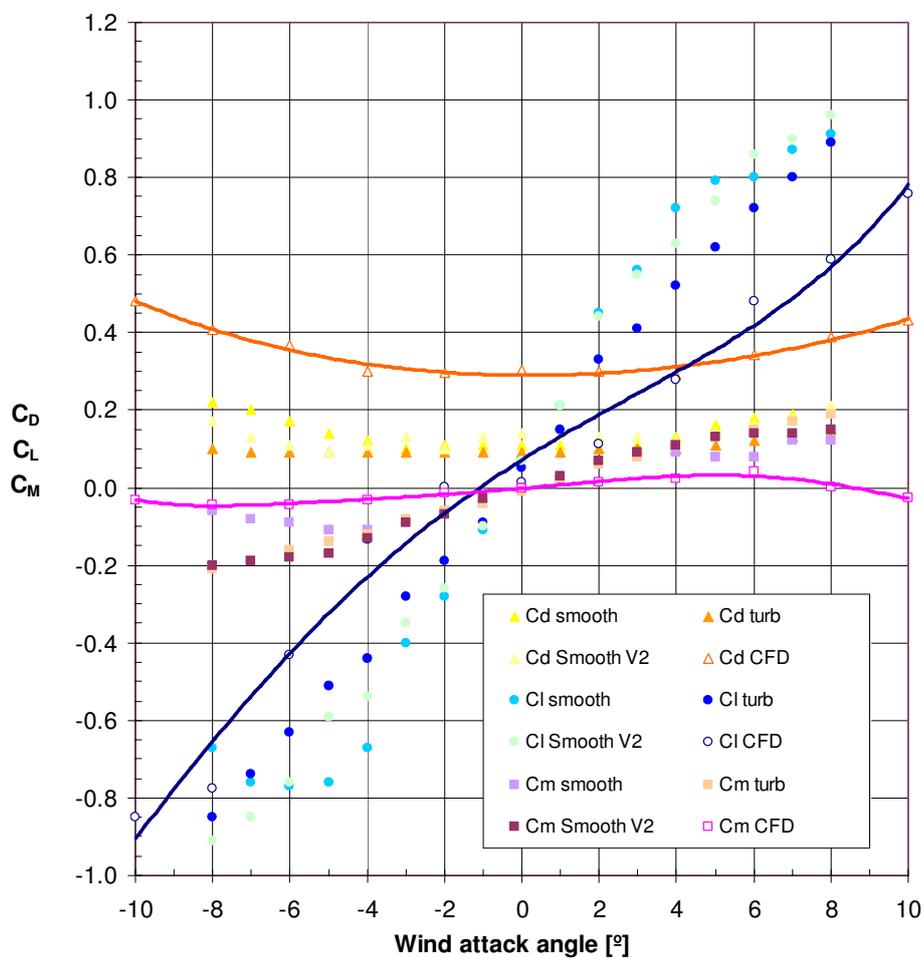


Figura 123: coeficientes aerodinâmicos do Modelo V do estudo paramétrico

Tabela 18: coeficientes aerodinâmicos do Modelo VI

alfa	C_d	C_l	C_m
-10	0.32	-0.98	0.02
-8	0.28	-0.96	0.01
-6	0.21	-0.80	0.01
-4	0.16	-0.68	-0.01
-2	0.13	-0.23	-0.03
0	0.11	0.00	0.00
2	0.13	0.25	0.03
4	0.17	0.40	0.01
6	0.20	0.50	-0.01
8	0.25	0.65	-0.04
10	0.33	1.01	-0.01

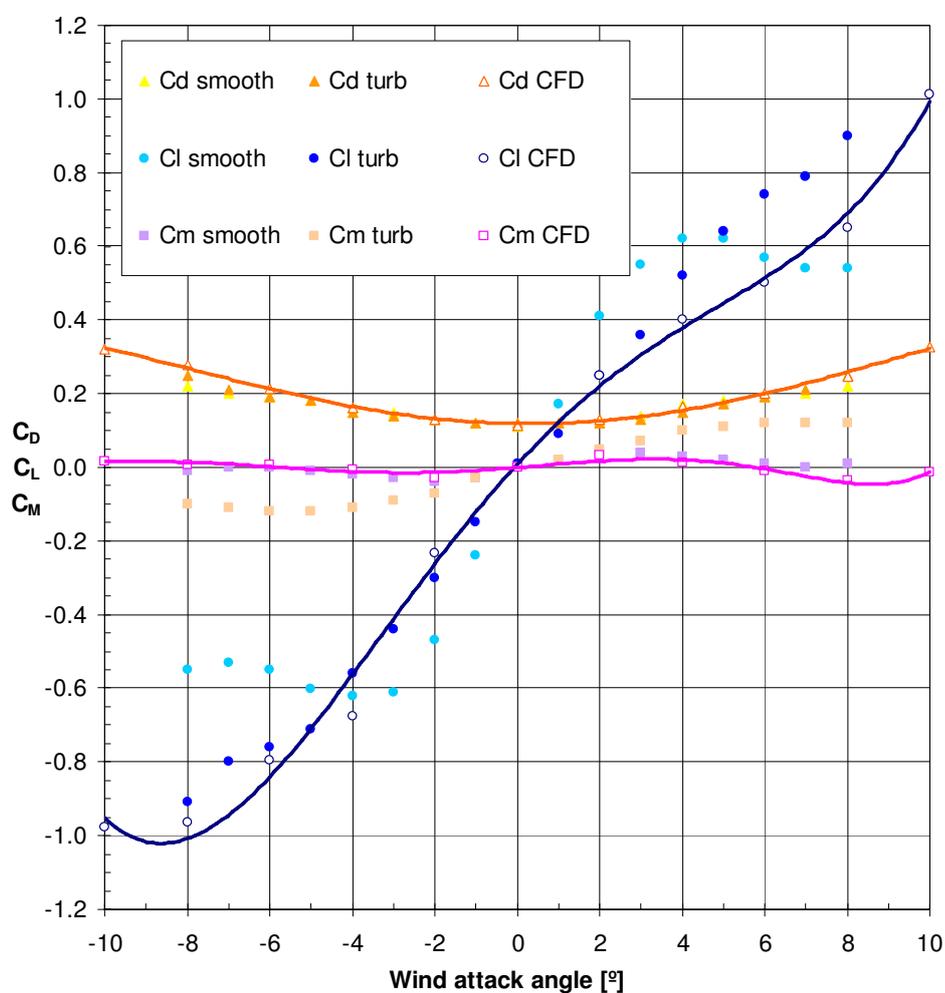


Figura 124: coeficientes aerodinâmicos do Modelo VI do estudo paramétrico

Tabela 19: coeficientes aerodinâmicos do Modelo VII

alfa	C_d	C_l	C_m
-10	0.33	-0.98	0.02
-8	0.27	-1.02	0.01
-6	0.21	-0.83	0.01
-4	0.17	-0.47	-0.02
-2	0.13	-0.25	-0.03
0	0.12	0.01	0.01
2	0.13	0.14	0.04
4	0.17	0.44	0.01
6	0.21	0.55	-0.02
8	0.24	0.60	-0.04
10	0.32	1.02	-0.02

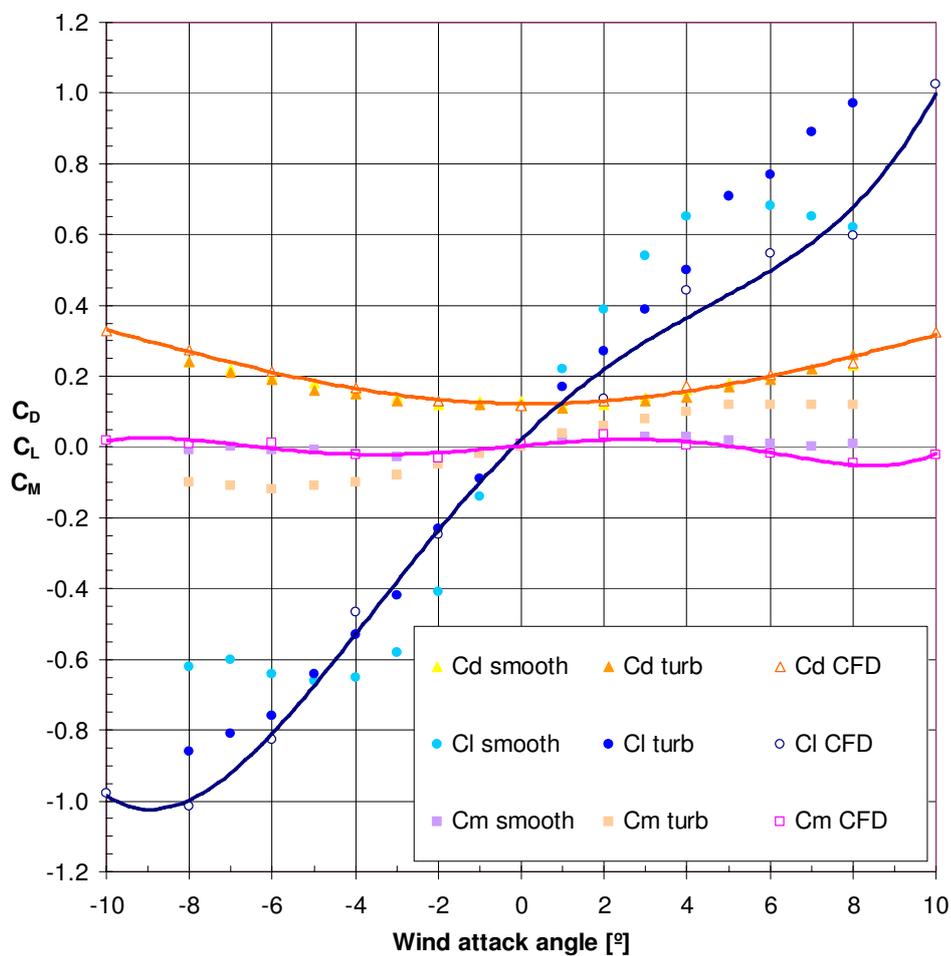


Figura 125: coeficientes aerodinâmicos do Modelo VII do estudo paramétrico

Tabela 20: coeficientes aerodinâmicos do Modelo VIII

alfa	C_d	C_l	C_m
-10	0.56	-1.31	-0.07
-8	0.47	-1.07	-0.06
-6	0.41	-0.60	-0.04
-4	0.33	-0.30	-0.01
-2	0.30	-0.09	0.00
0	0.30	0.03	0.01
2	0.31	0.15	0.01
4	0.31	0.14	0.02
6	0.32	0.21	0.04
8	0.38	0.36	0.04
10	0.47	0.66	0.08

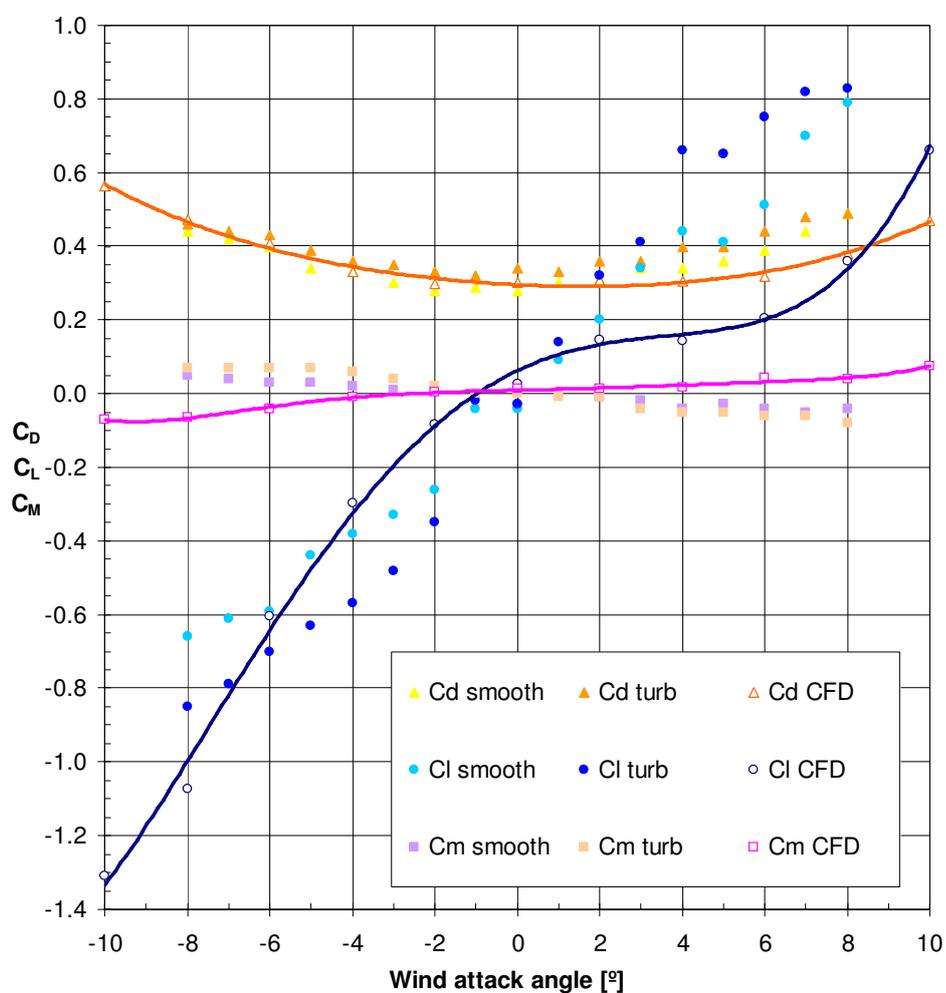


Figura 126: coeficientes aerodinâmicos do Modelo VIII do estudo paramétrico

APÊNDICE 2

Seções transversais dos Modelos e respectivas características geométricas.

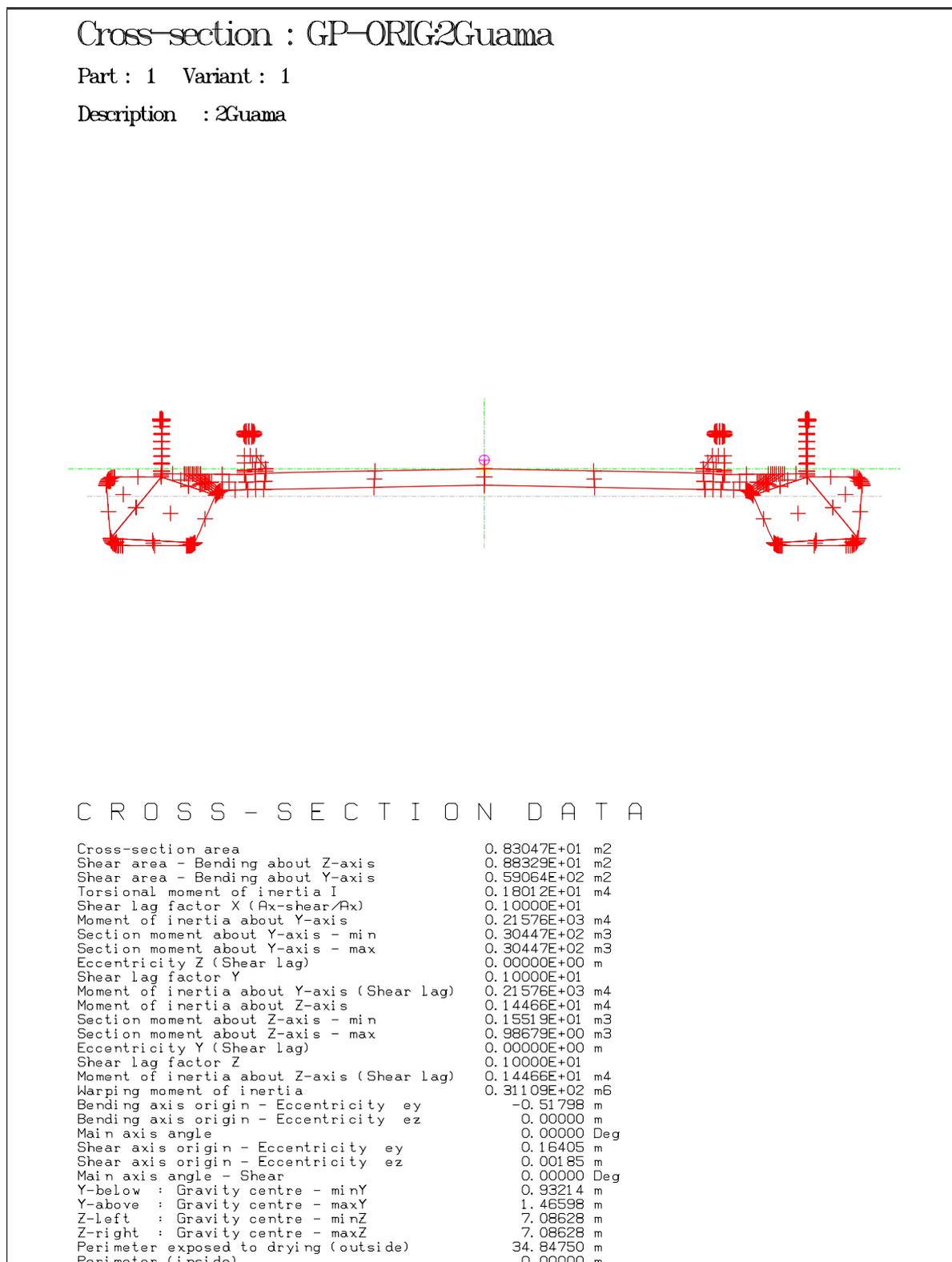


Figura 127: seção transversal e características da Ponte Guamá na Configuração III

Cross-section : RMVAR1:001

Part : 1 Variant : 1

Description : RMVAR1



CROSS - SECTION DATA

Cross-section area	0.13946E+02	m ²
Shear area - Bending about Z-axis	0.31534E-05	m ²
Shear area - Bending about Y-axis	0.53692E-04	m ²
Torsional moment of inertia I	0.35837E+01	m ⁴
Shear lag factor X (Ax-shear/Ax)	0.10000E+01	
Moment of inertia about Y-axis	0.44524E+03	m ⁴
Section moment about Y-axis - min	0.49433E+02	m ³
Section moment about Y-axis - max	0.49107E+02	m ³
Eccentricity Z (Shear lag)	0.00000E+00	m
Shear lag factor Y	0.10000E+01	
Moment of inertia about Y-axis (Shear lag)	0.44524E+03	m ⁴
Moment of inertia about Z-axis	0.20945E+01	m ⁴
Section moment about Z-axis - min	0.30328E+01	m ³
Section moment about Z-axis - max	0.13108E+01	m ³
Eccentricity Y (Shear lag)	0.00000E+00	m
Shear lag factor Z	0.10000E+01	
Moment of inertia about Z-axis (Shear lag)	0.20945E+01	m ⁴
Warping moment of inertia	0.55801E+02	m ⁶
Bending axis origin - Eccentricity ey	-0.08365	m
Bending axis origin - Eccentricity ez	-0.02990	m
Main axis angle	-1.67811	Deg
Shear axis origin - Eccentricity ey	-0.52365	m
Shear axis origin - Eccentricity ez	0.20626	m
Main axis angle - Shear	0.00000	Deg
Y-below : Gravity centre - minY	0.69060	m
Y-above : Gravity centre - maxY	1.59790	m
Z-left : Gravity centre - minZ	9.00702	m
Z-right : Gravity centre - maxZ	9.06682	m
Perimeter exposed to drying (outside)	41.37748	m
Perimeter (inside)	0.00000	m

Figura 128: seção transversal e características geométricas da PRM com nariz de vento