

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

**Determinação experimental em túnel de vento dos fatores de
vizinhança estáticos e dinâmicos para um modelo de edifício alto
em distintas condições de vizinhança**

Marcelo Zanfelice Cavalcante

Porto Alegre
2020

MARCELO ZANFELICE CAVALCANTE

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO
DOS FATORES DE VIZINHANÇA ESTÁTICOS E
DINÂMICOS PARA UM MODELO DE EDIFÍCIO ALTO EM
DISTINTAS CONDIÇÕES DE VIZINHANÇA**

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.

Porto Alegre
2020

CIP - Catalogação na Publicação

Cavalcante, Marcelo Zanfelice

Determinação experimental em túnel de vento dos fatores de vizinhança estáticos e dinâmicos para um modelo de edifício alto em distintas condições de vizinhança / Marcelo Zanfelice Cavalcante. -- 2020. 203 f.

Orientador: Acir Mércio Loredo-Souza.

Coorientador: Marcelo Maia Rocha.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2020.

1. edifício altos. 2. efeitos de vizinhança. 3. túnel de vento. I. Mércio Loredo-Souza, Acir, orient. II. Maia Rocha, Marcelo, coorient. III. Título.

MARCELO ZANFELICE CAVALCANTE

**Determinação experimental em túnel de vento dos fatores de
vizinhança estáticos e dinâmicos para um modelo de edifício alto
em distintas condições de vizinhança**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração 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, 19 de novembro de 2020

Prof. Acir Mércio Loredou-Souza
Ph.D., University of Western Ontario
Orientador

Prof. Marcelo Maia Rocha
Dr. Techn., Universität Innsbruck
Coorientador

Prof. Nilo Cesar Consoli
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Gustavo Javier Zani Núñez (UFRGS)
D.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Eng. Mario Gustavo Klaus Oliveira (Vento-S)
D.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof^a. Leticia Fleck Fadel Miguel (UFRGS)
D.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Adrián Roberto Wittwer (UNNE)
D.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Acir Mércio Loredou-Souza, orientador deste trabalho, pelos ensinamentos diários em Engenharia do Vento ao longo de todos os anos.

Agradeço ao Prof. Marcelo Maia Rocha, coorientador deste trabalho, pelos ensinamentos na área de dinâmica de estruturas.

Agradeço ao Eng. Dr. Mario Gustavo Klaus Oliveira pela disponibilização da balança dinâmica, auxílio e cooperação durante os ensaios.

Agradeço à equipe técnica do Laboratório de Aerodinâmica das Construções pelo auxílio na realização dos ensaios.

Agradeço a todos mestrados, doutorados e alunos de graduação que passaram pelo LAC, pelas vivências e pelo conhecimento compartilhado.

Agradeço a todos que um dia fizeram parte da empresa Vento-S Consultoria em Engenharia do Vento, pela amizade construída e pelo desenvolvimento profissional.

Agradeço à toda minha família, pelo apoio incondicional.

Agradeço especialmente à Théa Louise Sequeira Pessoa e ao Arthur Paulo Ozelame Bastos pelo amparo em tempos difíceis. Os pequenos gestos de carinho e palavras de incentivo na hora certa fizeram toda a diferença. Tenho sorte de poder partilhar a caminhada ao lado de vocês.

RESUMO

CAVALCANTE, M.Z. **Determinação experimental em túnel de vento dos fatores de vizinhança estáticos e dinâmicos para um modelo de edifício alto em distintas condições de vizinhança.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A maioria das normas que preconizam as cargas devidas ao vento em edifícios foram derivadas de estudos em túneis de vento com modelos de edifícios isolados. No entanto, em ambientes reais, as cargas de vento em edifícios altos cercados por outros edifícios altos podem ser bem diferentes daquelas para isolados. Edifícios altos na vizinhança podem aumentar ou diminuir significativamente as cargas de vento locais que atuam nos elementos de revestimento do edifício, bem como a carga de vento total que atua na estrutura. Infelizmente, poucas normas referem-se às cargas de vento induzidas por efeitos de vizinhança, sendo que algumas apenas os citam e os alertam brevemente sobre o fenômeno. Este trabalho tem como objetivo central a determinação dos fatores de vizinhança considerando coeficientes de força, coeficientes de torção e deslocamentos flutuantes longitudinais, transversais e torcionais em um modelo de edifício alto padrão (*CAARC Standard Tall Building*). Os testes foram realizados para duas configurações de vizinhança no entorno considerando dois tipos de perfis de vento natural incidente, simulando situações reais. Os resultados foram obtidos a partir de ensaios no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann. Os ensaios estáticos foram realizados a partir da medição de pressões na superfície do modelo. Os ensaios dinâmicos foram realizados utilizando uma balança dinâmica de três graus de liberdade (BD3GDL). Busca-se contribuir com o aumento do conhecimento sobre os fatores de vizinhança indicados para uso pela NBR-6123. Nos ensaios estáticos, a presença das vizinhanças causou, em geral, o efeito de proteção esperado provocando uma diminuição nos coeficientes de pressão, coeficientes de força e de torção comparados com o edifício isolado. No entanto, a resposta flutuante dos ensaios dinâmicos sofreu ampliações significativas nos três graus de liberdade para determinadas configurações de vizinhança e tipo de vento incidente.

Palavras-chave: edifícios altos; efeitos de vizinhança; túnel de vento.

ABSTRACT

CAVALCANTE, M.Z. **Experimental determination in a wind tunnel of static and dynamic neighborhood factors for a tall building model in different neighborhood conditions.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Most standards for wind loads in buildings were derived from wind tunnel studies of isolated building models. However, in real environments, wind loads on tall buildings surrounded by other tall buildings may be quite different from those in isolation. Tall buildings in the surrounding area can significantly increase or decrease local wind loads acting on the building cladding as well as the wind load acting on the structure. Unfortunately, few standards refer to wind load-induced neighborhood effects, but only cite and warn them briefly about their risks. The main objective of this study is the determination of neighborhood factors considering pressure coefficients, force coefficients, torsion coefficients and longitudinal, transversal and torsional floating displacements in a *CAARC Standard Tall Building* for two configurations surrounding neighborhood considering two types of incident natural wind profile, simulating real situations. The results were obtained from tests in the wind tunnel Prof. Joaquim Blessmann. Static tests were performed using pressure taps. The dynamic tests were performed using a dynamic scale of three degrees of freedom (BD3GDL) through aeroelastic modeling. We seek to contribute to the increase in knowledge about neighborhood factors for use by NBR-6123. In the static tests, the presence of the neighborhoods caused, in general, the expected protection effect, causing a decrease in the pressure coefficients, force and torsion coefficients compared to the isolated building. However, the fluctuating response of dynamic tests has undergone significant amplifications in the three degrees of freedom for certain neighborhood configurations and incident wind type.

Key-words: tall buildings; interference effects; wind tunnel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ensaio do edifício Citibank.....	25
Figura 2 - Ensaio do edifício Manhattan.....	26
Figura 3 - Comparação da resposta dinâmica máxima.....	26
Figura 4 - Convenções de ensaio.....	28
Figura 5 - Espectros de torção para edificação isolada e com vizinho à barlavento.....	28
Figura 6 - Convenções e distribuição dos coeficientes de pressão médios.....	29
Figura 7 - Comparação dos momentos torçores para o MODELO 12.....	30
Figura 8 - Força global F_y [kN] na Torre Norte para 24 ângulos de incidência do vento.....	31
Figura 9 - Resposta transversal para a configuração III de vizinhança.....	32
Figura 10 - Variação da velocidade média do vento com a altura.....	36
Figura 11 - Espectro da velocidade do vento em gama de frequência.....	38
Figura 12 - Espectros de Harris, Davenport, Kármán e Kaimal.....	41
Figura 13 - escoamento em corpos rombudos e corpos aerodinâmicos.....	42
Figura 14 - Eixos do vento e eixos do corpo.....	44
Figura 15 - escoamento em torno de edifício alto.....	47
Figura 16 – Espectros de estruturas com desprendimentos de vórtices.....	50
Figura 17 - Efeito da turbulência do vento no desprendimento de vórtices alternados em uma torre de base quadrada.....	51
Figura 18 - Percepção humana de vibrações.....	54
Figura 19 - Efeito Venturi.....	56
Figura 20 - Regimes de escoamento.....	56
Figura 21 - <i>CAARC Standard Tall Building Basic</i>	63
Figura 22 - Circuito aerodinâmico do Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann.....	64
Figura 23 - Combinação típica de dispositivos de simulação do vento natural.....	65
Figura 24 - Dispositivos utilizados para simular perfil de vento com expoente $p = 0,11$	66
Figura 25 - Dispositivos utilizados para simular perfil de vento com expoente $p = 0,26$	66
Figura 26 - Características do vento simulado com expoente $p = 0,11$	67
Figura 27 - Características do vento simulado com expoente $p = 0,26$	68
Figura 28 - Configuração A de vizinhança.....	69
Figura 29 - Configuração B de vizinhança.....	70
Figura 30 - Distribuição das tomadas de pressão no <i>CAARC Standard Tall Building</i>	70
Figura 31 - Dimensões do modelo <i>CAARC Standard Tall Building</i>	71

Figura 32 - Referência de ângulo de incidência do vento - Isolado	72
Figura 33 - Referência de ângulo de incidência do vento - Configuração A	72
Figura 34 - Referência de ângulo de incidência do vento - Configuração B.....	72
Figura 35 - Balança dinâmica de três graus de liberdade	77
Figura 36 - Modelo do CAARC <i>Standard Tall Building</i> e sua fixação à BD3GDL.....	79
Figura 37 - Laudo de fabricação das molas utilizadas - Eixos X e Y	83
Figura 38 - Laudo de fabricação das molas utilizadas - Eixo Z	83
Figura 39 - Registro de vibração livre	87
Figura 40 - Sistema utilizado na calibração dos sensores ópticos.....	88
Figura 41 - Curvas de calibração dos sensores ópticos	88
Figura 42 - Coeficientes de força C_x por ângulo de incidência do vento.....	90
Figura 43 - Coeficientes de força C_y por ângulo de incidência do vento.....	91
Figura 44 - Fator de vizinhança para C_x por ângulo de incidência do vento – Conf. A	93
Figura 45 - Fator de vizinhança para C_y por ângulo de incidência do vento – Conf. A.....	94
Figura 46 - Fator de vizinhança para C_x por ângulo de incidência do vento – Conf. B.....	96
Figura 47 - Fator de vizinhança para C_y por ângulo de incidência do vento – Conf. B.....	96
Figura 48 - Coeficientes de torção C_t por ângulo de incidência do vento.....	97
Figura 49 - Fator de vizinhança para C_t por ângulo de incidência do vento – Conf. A	100
Figura 50 - Fator de vizinhança para C_t por ângulo de incidência do vento – Conf. B	100
Figura 51 - Deslocamento flutuante para as direções X, Y e Angular - Incidência 0°	102
Figura 52 - Fatores de martelamento para a resposta flutuante para ângulo de incidência do vento a 0°	103
Figura 53 - Deslocamento flutuante para as direções X, Y e Angular – Incidência 90°	104
Figura 54 - Fatores de martelamento para a resposta flutuante para ângulo de incidência do vento a 90°	106
Figura 55 - Deslocamento flutuante para as direções X, Y e Angular - Incidência 180°	107
Figura 56 - Fatores de martelamento para a resposta flutuante para ângulo de incidência do vento a 180°	108
Figura 57 - Deslocamento flutuante para as direções X, Y e Angular - Incidência 270°	109
Figura 58 - Fatores de martelamento para a resposta flutuante para ângulo de incidência do vento a 270°	110
Figura 59 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 0^\circ$	121
Figura 60 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 15^\circ$	121
Figura 61 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 30^\circ$	122

Figura 62 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11$ - 45°	122
Figura 63 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11$ - 60°	123
Figura 64 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11$ - 75°	123
Figura 65 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11$ - 90°	124
Figura 66 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11$ - 105°	124
Figura 67 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11$ - 120°	125
Figura 68 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11$ - 135°	125
Figura 69 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11$ - 150°	126
Figura 70 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11$ - 165°	126
Figura 71 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11$ - 180°	127
Figura 72 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11$ - 195°	127
Figura 73 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11$ - 210°	128
Figura 74 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11$ - 225°	128
Figura 75 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11$ - 240°	129
Figura 76 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11$ - 255°	129
Figura 77 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11$ - 270°	130
Figura 78 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11$ - 285°	130
Figura 79 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11$ - 300°	131
Figura 80 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11$ - 315°	131
Figura 81 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11$ - 330°	132
Figura 82 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11$ - 345°	132
Figura 83 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26$ - 0°	134
Figura 84 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26$ - 15°	134
Figura 85 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26$ - 30°	135
Figura 86 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26$ - 45°	135
Figura 87 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26$ - 60°	136
Figura 88 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26$ - 75°	136
Figura 89 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26$ - 90°	137
Figura 90 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26$ - 105°	137
Figura 91 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26$ - 120°	138
Figura 92 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26$ - 135°	138
Figura 93 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26$ - 150°	139
Figura 94 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26$ - 165°	139
Figura 95 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26$ - 180°	140

Figura 96 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26$ - 195°	140
Figura 97 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26$ - 210°	141
Figura 98 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26$ - 225°	141
Figura 99 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26$ - 240°	142
Figura 100 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26$ - 255°	142
Figura 101 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26$ - 270°	143
Figura 102 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26$ - 285°	143
Figura 103 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26$ - 300°	144
Figura 104 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26$ - 315°	144
Figura 105 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26$ - 330°	145
Figura 106 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26$ - 345°	145
Figura 107 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11$ - 0°	147
Figura 108 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11$ - 15°	147
Figura 109 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11$ - 30°	148
Figura 110 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11$ - 45°	148
Figura 111 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11$ - 60°	149
Figura 112 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11$ - 75°	149
Figura 113 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11$ - 90°	150
Figura 114 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11$ - 105°	150
Figura 115 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11$ - 120°	151
Figura 116 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11$ - 135°	151
Figura 117 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11$ - 150°	152
Figura 118 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11$ - 165°	152
Figura 119 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11$ - 180°	153
Figura 120 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11$ - 195°	153
Figura 121 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11$ - 210°	154
Figura 122 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11$ - 225°	154
Figura 123 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11$ - 240°	155
Figura 124 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11$ - 255°	155
Figura 125 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11$ - 270°	156
Figura 126 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11$ - 285°	156
Figura 127 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11$ - 300°	157
Figura 128 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11$ - 315°	157
Figura 129 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11$ - 330°	158

Figura 130 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11$ - 345°	158
Figura 131 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26$ - 0°	160
Figura 132 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26$ - 15°	160
Figura 133 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26$ - 30°	161
Figura 134 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26$ - 45°	161
Figura 135 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26$ - 60°	162
Figura 136 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26$ - 75°	162
Figura 137 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26$ - 90°	163
Figura 138 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26$ - 105°	163
Figura 139 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26$ - 120°	164
Figura 140 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26$ - 135°	164
Figura 141 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26$ - 150°	165
Figura 142 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26$ - 165°	165
Figura 143 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26$ - 180°	166
Figura 144 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26$ - 195°	166
Figura 145 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26$ - 210°	167
Figura 146 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26$ - 225°	167
Figura 147 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26$ - 240°	168
Figura 148 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26$ - 255°	168
Figura 149 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26$ - 270°	169
Figura 150 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26$ - 285°	169
Figura 151 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26$ - 300°	170
Figura 152 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26$ - 315°	170
Figura 153 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26$ - 330°	171
Figura 154 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26$ - 345°	171
Figura 155 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11$ - 0°	173
Figura 156 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11$ - 15°	173
Figura 157 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11$ - 30°	174
Figura 158 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11$ - 45°	174
Figura 159 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11$ - 60°	175
Figura 160 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11$ - 75°	175
Figura 161 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11$ - 90°	176
Figura 162 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11$ - 105°	176
Figura 163 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11$ - 120°	177

Figura 164 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11$ - 135°	177
Figura 165 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11$ - 150°	178
Figura 166 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11$ - 165°	178
Figura 167 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11$ - 180°	179
Figura 168 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11$ - 195°	179
Figura 169 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11$ - 210°	180
Figura 170 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11$ - 225°	180
Figura 171 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11$ - 240°	181
Figura 172 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11$ - 255°	181
Figura 173 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11$ - 270°	182
Figura 174 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11$ - 285°	182
Figura 175 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11$ - 300°	183
Figura 176 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11$ - 315°	183
Figura 177 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11$ - 330°	184
Figura 178 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11$ - 345°	184
Figura 179 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26$ - 0°	186
Figura 180 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26$ - 15°	186
Figura 181 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26$ - 30°	187
Figura 182 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26$ - 45°	187
Figura 183 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26$ - 60°	188
Figura 184 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26$ - 75°	188
Figura 185 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26$ - 90°	189
Figura 186 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26$ - 105°	189
Figura 187 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26$ - 120°	190
Figura 188 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26$ - 135°	190
Figura 189 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26$ - 150°	191
Figura 190 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26$ - 165°	191
Figura 191 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26$ - 180°	192
Figura 192 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26$ - 195°	192
Figura 193 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26$ - 210°	193
Figura 194 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26$ - 225°	193
Figura 195 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26$ - 240°	194
Figura 196 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26$ - 255°	194
Figura 197 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26$ - 270°	195

- Figura 198 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26$ - 285° 195
- Figura 199 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26$ - 300° 196
- Figura 200 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26$ - 315° 196
- Figura 201 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26$ - 330° 197
- Figura 202 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26$ - 345° 197

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros para determinação dos espectros de potência.....	40
Tabela 2 - Relações de bloqueio por configuração de ensaio.....	76
Tabela 3 - Frequências e razões de amortecimento crítico medidos	87
Tabela 4 - Valores de representativos de C_x e C_y , ângulos de ocorrência e fator de vizinhança - Configuração A	92
Tabela 5 - Parâmetros para cálculo do fator de vizinhança a partir da NBR 6123 - Configuração A.....	92
Tabela 6 - Valores representativos de C_x e C_y , ângulos de ocorrência e fator de vizinhança - Configuração B.....	95
Tabela 7 - Parâmetros para cálculo do fator de vizinhança a partir da NBR 6123 - Configuração B.....	95
Tabela 8 - Valores representativos de C_t , ângulos de ocorrência e fatores de vizinhança	98
Tabela 9 - Coeficientes de força C_x por ângulo de incidência do vento.....	199
Tabela 10 - Coeficientes de força C_y por ângulo de incidência do vento.....	200
Tabela 11 - Coeficientes de torção C_t por ângulo de incidência do vento	202

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Valores do número de <i>Strouhal</i> para diversas seções	52
--	----

LISTA DE SIGLAS

CLA	Camada Limite Atmosférica
HFBB	<i>High Frequency Base Balance</i>
HFPI	<i>High Frequency Pressure Integration</i>
LAC	Laboratório de Aerodinâmica das Construções
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
CAARC	<i>Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council</i>
BD3GDL	Balança Dinâmica de 3 Graus de Liberdade
NBR	Norma Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

$\bar{V}(z)$	velocidade média do vento na altura de interesse
$\bar{V}(z_{ref})$	velocidade média do vento em uma altura de referência
\bar{V}_{zg}	velocidade média do vento na altura gradiente
z	altura de interesse
z_d	deslocamento do plano zero
z_{ref}	altura de referência
z_g	altura gradiente
z_0	comprimento de rugosidade
p	expoente que representa o tipo de terreno
u^*	velocidade de corte
τ_0	tensão de cisalhamento na superfície do solo
ρ	massa específica do ar
$I_{u,v,w}$	intensidades de turbulência longitudinal, lateral e vertical, respectivamente
$\sigma_{u,v,w}$	desvio padrão das flutuações longitudinais, laterais e verticais, respectivamente
$\sigma_{u,v,w}^2$	variância das flutuações longitudinais, laterais e verticais, respectivamente
T	período
u, v, w	velocidade do vento instantânea longitudinal, lateral e vertical, respectivamente
$S(n)$	densidade espectral de potência por unidade de frequência
n	frequência
$S_u(n)$	potência por unidade da frequência n da componente da velocidade u

\bar{u}'^2	variância da parcela flutuante da componente da velocidade u
L_u	escala da componente longitudinal da turbulência
F_A	força de arrasto
F_L	força lateral (ou de sustentação)
T_z	torção
\bar{V}	velocidade média do escoamento
C_A	coeficiente de arrasto
C_L	coeficiente lateral (ou de sustentação)
C_T	coeficiente torcional
B	dimensão característica
F_x	força no eixo x
F_y	força no eixo y
C_x	coeficiente de força em x
C_y	coeficiente de força em y
$V(t)$	velocidade do vento instantânea
$v(t)$	componente longitudinal da flutuação do vento
$f_A(t)$	força de arrasto instantânea
\bar{f}_A	força de arrasto média por unidade de altura
$\bar{f}'_A(t)$	força de arrasto flutuante por unidade de altura
St	número de <i>Strouhal</i>
n_s	frequência do desprendimento de vórtices alternados

FV	fator de vizinhança
C	coeficiente aerodinâmico
n_x	frequência fundamental em x
n_y	frequência fundamental em y
n_z	frequência fundamental em z
ζ	razão de amortecimento crítico
\bar{c}_p	coeficiente de pressão média
$p(t)$	pressão instantânea na superfície da edificação, medida em relação à pressão estática de referência
t	tempo
q	pressão dinâmica de referência
C_e	coeficiente de forma externo
F	força resultante
A	área de referência
$F_{x,y}$	força resultante em x e y
$B_{x,y}$	dimensão de referência em x e y
H	altura de referência
M_t	momento torçor em relação ao ponto de origem dos eixos x e y
e	excentricidade em relação ao ponto de origem dos eixos x e y
k_0	fator de calibração do túnel de vento
ΔPa	diferença de pressão estática medida entre os anéis piezométricos situados nos extremos do convergente do túnel de vento

q_c	pressão dinâmica corrigida pela relação de bloqueio
A_b	área frontal do modelo e vizinhança
A_t	área da seção transversal do túnel de vento
$T_{túnel}$	temperatura do escoamento no túnel de vento
P_{atm}	pressão atmosférica
λ_L	escala de comprimento
L_m	comprimento do modelo
L_p	comprimento do edifício em escala real
λ_{Im}	escala de momento de inércia de massa
ρ_m	massa específica no modelo
ρ_p	massa específica no edifício em escala real
λ_ρ	escala de massa específica
λ_f	escala de frequência
f_m	frequência no modelo
f_p	frequência no edifício em escala real
K_θ	rigidez rotacional
N	número de molas utilizadas
r	distância perpendicular entre o vetor da força da mola e o centro de giro
K	constante elástica da mola
I_m	momento de inércia de massa do modelo
λ_T	escala de tempo

λ_V	escala de velocidade
V_m	velocidade no modelo
V_p	velocidade no edifício em escala real.
ω_n	frequência angular
e_a	excentricidade medida na direção do lado a
e_b	excentricidade medida na direção do lado b

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	VENTO EM EDIFICAÇÕES ALTEADAS INSERIDAS EM MEIO URBANO	23
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
1.3	OBJETIVOS	33
2	AÇÃO DO VENTO EM EDIFÍCIO ALTOS	34
2.1	CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA	34
2.1.1	Perfil de velocidades médias do vento	35
2.1.2	Turbulência	37
2.2	FORÇAS DEVIDAS AO VENTO	41
2.3	RESPOSTA DE EDIFÍCIOS ALTOS FRENTE À AÇÃO DO VENTO	46
2.3.1	Resposta longitudinal	47
2.3.2	Resposta transversal	48
2.3.2.1	<i>Excitações devido à esteira: desprendimento de vórtices alternados</i>	48
2.3.2.2	<i>Excitações devido à turbulência no escoamento</i>	50
2.3.3	Resposta torcional	52
2.3.4	Conforto de usuários e aceleração limite	53
2.4	EFEITOS DE VIZINHANÇA	54
2.4.1	Martelamento	55
2.4.2	Efeito Venturi	55
2.4.3	Turbulência de Esteira	56
2.4.4	Fator de Vizinhança	57
2.4.5	Fator de Martelamento	58
2.5	ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO DE EDIFÍCIOS ALTOS	59
2.5.1	Ensaio de pressões	59
2.5.2	Balança de força de alta frequência	60
2.5.3	Modelagem aeroelástica	61
3	ESTUDO EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO	62
3.1	EDIFÍCIO ESTUDADO	62
3.1.1	Geometria do edifício	62
3.1.2	Propriedades dinâmicas	63
3.2	TÚNEL DE VENTO PROF. JOAQUIM BLESSMANN	63
3.3	SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL	64
3.4	CONFIGURAÇÕES DE VIZINHANÇA	68

3.5	ENSAIOS ESTÁTICOS.....	70
3.6	ENSAIOS DINÂMICOS.....	76
3.6.1	Modelo construído	79
3.6.2	Projeto do modelo dinâmico	79
3.6.2.1	<i>Escala de comprimento</i>	79
3.6.2.2	<i>Escala de momento de inércia de massa.....</i>	80
3.6.2.3	<i>Escala de frequência</i>	81
3.6.2.4	<i>Escala de tempo.....</i>	84
3.6.2.5	<i>Escala de velocidade</i>	85
3.6.2.6	<i>Escala de amortecimento</i>	85
3.6.3	Ajuste das frequências e amortecimento	86
3.6.4	Calibração dos sensores ópticos	87
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	89
4.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS ESTÁTICOS.....	89
4.1.1	Coefficientes de pressão.....	89
4.1.2	Coefficientes de força.....	90
4.1.3	Coefficientes de torção.....	97
4.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS DINÂMICOS.....	101
4.2.1	Incidência do vento 0°	101
4.2.2	Incidência do vento 90°	104
4.2.3	Incidência do vento 180°	107
4.2.4	Incidência do vento 270°	109
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	111
	REFERÊNCIAS	115
	APÊNDICE A	120
	APÊNDICE B.....	133
	APÊNDICE C	146
	APÊNDICE D	159
	APÊNDICE E.....	172
	APÊNDICE F	185
	APÊNDICE G	198
	APÊNDICE H.....	201

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história, os seres humanos sempre construíram estruturas monumentais altas, como templos, pirâmides e catedrais para honrar seus deuses. Sempre se lutou para ultrapassar os limites da natureza em sua busca por altura, desde a lendária Torre de Babel na antiguidade, supostamente projetada com o objetivo de alcançar o céu, até o edifício mais alto de hoje. Atualmente, os arranha-céus também podem ser considerados edificações imponentes e são construídos como símbolos de poder, riqueza e prestígio.

No início do século XX, edifícios altos eram geralmente projetados como escritórios e alcançavam uma posição importante como um espaço diferenciado na história da arquitetura urbana. Esses prédios surgiram como resposta à crescente população urbana, com o objetivo de atender à demanda de unidades de escritórios para serem posicionadas o mais próximo possível umas das outras. As abordagens criativas dos arquitetos em seus projetos de edifícios altos, a escassez e alto custo de terrenos urbanos, o desejo de impedir a expansão urbana desordenada, o esforço para criar um conceito de horizonte e fatores como preocupações com uma identidade cultural e prestígio impulsionaram o aumento da altura dos edifícios.

Hoje é quase impossível imaginar uma grande cidade sem edifícios altos. Como os símbolos mais importantes das cidades de hoje, os edifícios altos se tornaram uma fonte de fé na tecnologia e mudaram o conceito de cidade moderna, juntamente com sua escala e aparência. Apesar do fato de que edifícios altos afastaram a vida da cidade da escala humana, em geral é aceito que esses edifícios são uma característica inevitável do desenvolvimento urbano.

1.1 VENTO EM EDIFICAÇÕES ALTEADAS INSERIDAS EM MEIO URBANO

A maioria das normas que preconizam os carregamentos devidos ao vento em edifícios foram derivadas de estudos em túnel de vento com modelos de edifícios isolados. No entanto, em ambientes reais, as cargas de vento em edifícios altos cercados por outras edificações altas podem ser, e em geral são, bem diferentes daquela em situação isolado. Os edifícios altos no entorno podem aumentar ou diminuir significativamente as cargas de vento locais que atuam no revestimento do edifício, bem como a carga total de vento. Infelizmente, poucas normas

referem-se aos efeitos de vizinhança induzidos pelas cargas de vento, sendo que algumas apenas os citam e alertam brevemente sobre seus possíveis efeitos. Isso se deve a problemas naturais complexos e a muitas variáveis, como forma geométrica dos edifícios, localização relativa das edificações na vizinhança de entorno, ângulo de incidência do vento, rugosidade do terreno a barlavento e assim por diante. Por isso, os efeitos da vizinhança têm sido amplamente estudados por muitos pesquisadores nas últimas décadas. A maioria das pesquisas realizadas estudou efeitos de vizinhança a partir das respostas de edifícios altos na direção longitudinal e transversal ao vento, bem como para o movimento torcional.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Blessmann (1985) estudou os efeitos de martelamento devido a efeitos de vizinhança em edifícios altos estudando diferentes posições relativas entre dois modelos iguais frente à ação do vento. Observou-se um aumento da relação de desvios padrão entre o caso isolado e com vizinho de 78% para vento com escoamento uniforme e suave e aumento de 95% para vento com escoamento deslizante e turbulento em posições relativas intermediárias entre os edifícios.

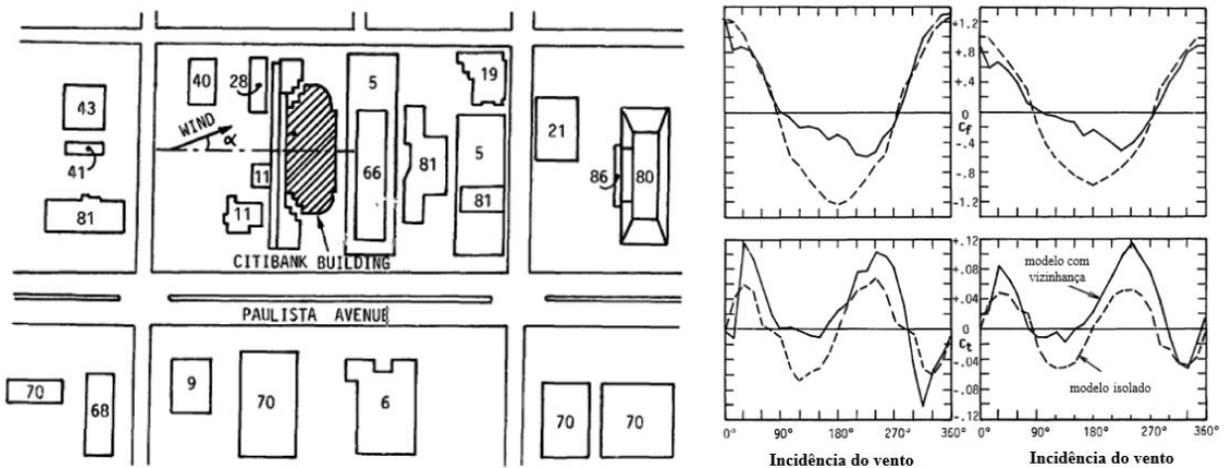
Conforme Kareem (1987) explica, a determinação do comportamento dinâmico de uma edificação na presença de outra, ou um grupo de edificações adjacentes, é um problema devido à falta de informação disponível considerando os fundamentos da mecânica dos fluidos de um escoamento turbulento em torno de sólidos simples. Em seu trabalho foi estudado os efeitos de vizinhança considerando a resposta dinâmica de sólidos prismáticos em uma série de ensaios em túnel de vento. Os resultados mostram que a presença de um único, ou um par de sólidos, de mesmo tamanho à barlavento do modelo em estudo podem aumentar os resultados principalmente em vento com baixa turbulência.

Lythe e Surry (1990) em seu trabalho examinaram os carregamentos torcionais médios devidos ao vento de edifícios altos usando uma base de dados experimentalmente determinada com ensaios em túnel de vento. Embora a contribuição média do carregamento torcional seja apenas uma parte da consideração para cargas de projeto das estruturas, ela promove uma importante compreensão da aerodinâmica de torção. Os autores concluem que a variabilidade dos coeficientes de torção pode ser reduzida usando escolhas apropriadas de parâmetros de

normalização e, além disso, examinando os fatores de pico calculados para o movimento de torção notaram que são maiores do que os calculados para os movimentos de flexão em X e Y.

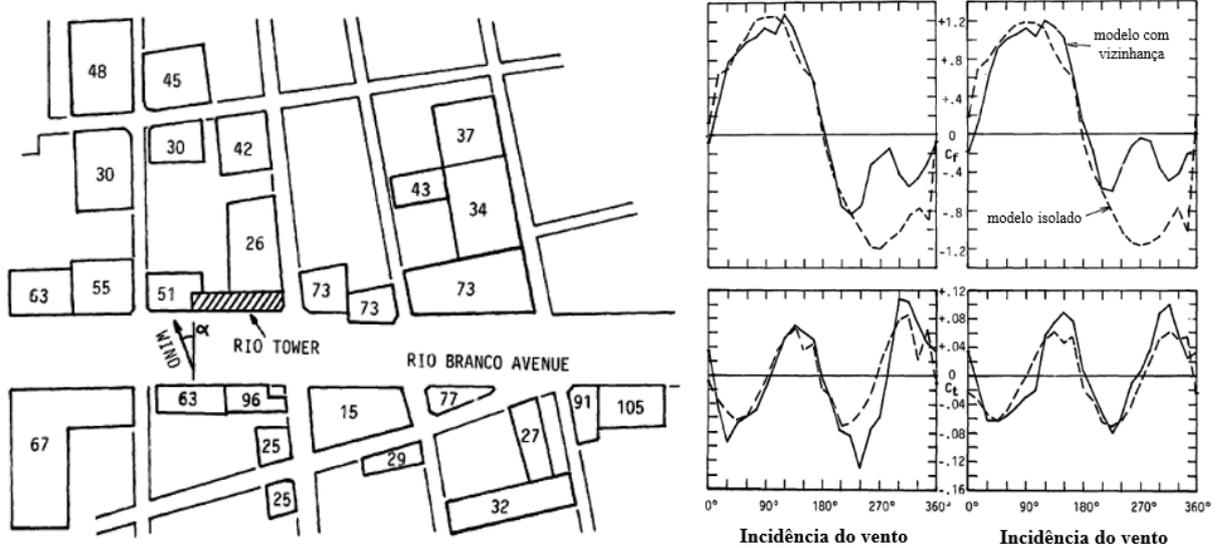
Um estudo realizado no Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) por Blessmann (1992) mostra uma análise dos efeitos de vizinhança em duas edificações existentes, o edifício Citibank, em São Paulo, e o edifício Manhattan, no Rio de Janeiro. Os ensaios em túnel de vento foram realizados para as edificações isoladas e na presença dos prédios que compõem a vizinhança real em seus entornos. O autor introduziu o conceito de “fator de efeito de vizinhança” definido pela razão entre o máximo valor absoluto do coeficiente de força considerado na presença de edifícios vizinhos e o máximo valor absoluto do parâmetro aerodinâmico considerado para o edifício isolado. Os resultados mostraram que, para os dois edifícios, os coeficientes de força sofreram uma leve diminuição na presença da vizinhança em relação à situação do edifício isolado. Enquanto para o coeficiente de torção houve um aumento significativo nos casos com vizinhança conforme mostrado na Figura 1 e na Figura 2 a seguir.

Figura 1 - Ensaios do edifício Citibank



(fonte: adaptado de BLESSMANN, 1992)

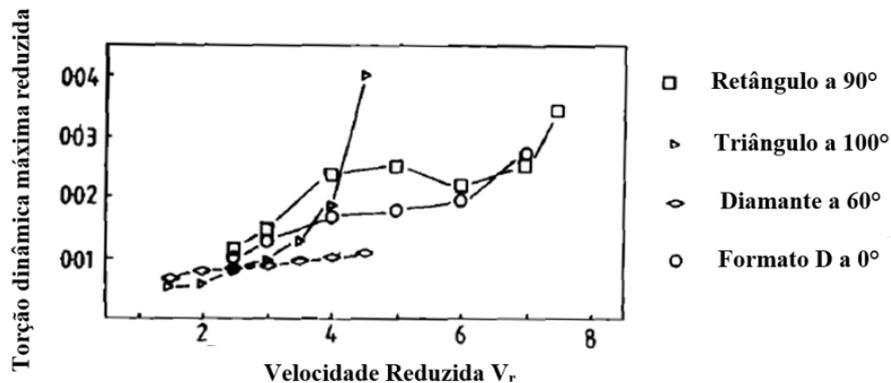
Figura 2 - Ensaio do edifício Manhattan



(fonte: adaptado de BLESSMANN, 1992)

Um estudo em túnel de vento sobre a resposta em torção utilizando modelagem aeroelástica foi desenvolvido por Beneke e Kwok (1993). Foram estudados quatro modelos de edifícios com seções transversais diferentes (retangular, triangular, formato de diamante e seção em D) mantendo as suas proporções geométricas, densidade do edifício e amortecimento para diversos ângulos de incidência e velocidades do vento. Os resultados representados na Figura 3 mostraram uma variação drástica entre as diferentes seções, sendo que o formato triangular produziu a maior resposta dinâmica torcional.

Figura 3 - Comparação da resposta dinâmica máxima



(fonte: adaptado de BENEKE e KWOK, 1993)

Zhang et al. (1995) afirmam que as construções modernas tendem a ser mais sensíveis à excitação torcional devida ao vento pelo aumento na complexidade nos formatos geométricos das edificações, acentuando as excentricidades estrutural e aerodinâmica. Além disso, edifícios altos são, geralmente, construídos em grupos, o que acaba criando um escoamento muito complexo nas edificações e induzindo a maiores forças e momentos devidos ao vento.

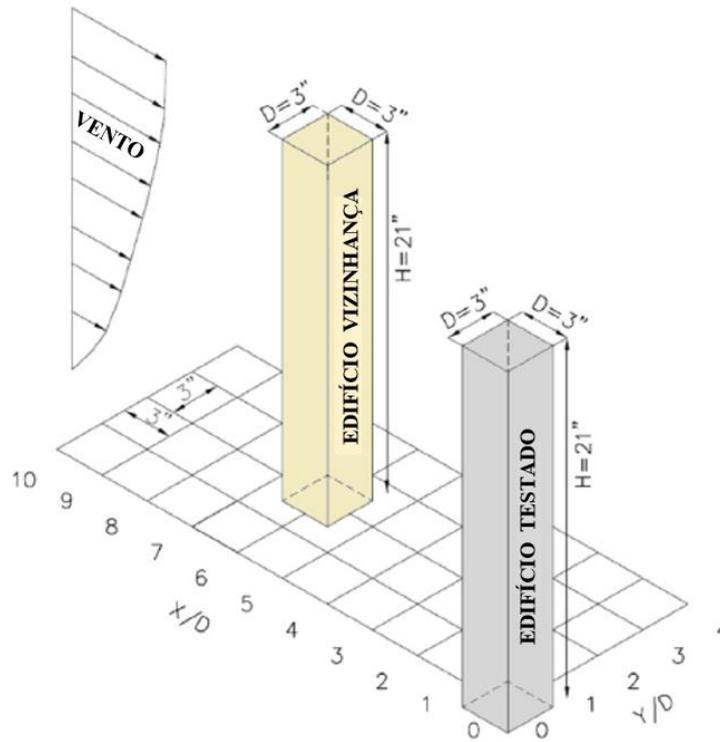
Thepmongkorn et al. (2002) executaram ensaios em túnel de vento com um modelo aeroelástico do edifício padrão da *Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council* (CAARC) para investigar os efeitos de vizinhança sobre o movimento translacional-torcional acoplado induzido pelo vento. Um edifício de seção transversal quadrada com a mesma altura do CAARC foi utilizado como vizinho. Os dados coletados indicaram respostas significativamente maiores para velocidades reduzidas entre 4,3 e 6, onde a frequência de desprendimento de vórtices originados no edifício a barlavento está próxima da frequência natural de vibração do CAARC. Quando o edifício vizinho está localizado a barlavento em diagonal com o CAARC, este apresenta aumento nas respostas longitudinal, transversal e momento torçor. No entanto, quando o edifício vizinho está diretamente alinhado com o CAARC, a resposta transversal é ainda maior.

Hui et al. (2012) estudaram os efeitos de vizinhança mútuos entre o modelo de dois edifícios altos com diferentes formas geométricas através de ensaios em túnel de vento com foco nos picos de coeficientes de pressão local. Os resultados mostram que esses efeitos dependem muito do formato do edifício e dos ângulos de incidência do vento. Eles também mostram que cuidados especiais devem ser tomados com o projeto do revestimento nas bordas verticais, especialmente nos cantos dos edifícios, uma vez que o pico de pressão negativa na fachada de um prédio pode ser 40% maior na presença de um vizinho do que na condição isolada.

Os resultados de um estudo em túnel de vento conduzido por Mara et al. (2014) sobre os efeitos de vizinhança considerando apenas um único vizinho de mesma forma geométrica e altura à barlavento ao edifício de interesse mostram que, dependendo da combinação de rugosidade do terreno e propriedades dinâmicas adotadas, os resultados de efeitos de vizinhança sobre a resposta em torção se aproximam dos indicados por normas internacionais, em outros casos os valores de efeitos de vizinhança são excedidos. As Figura 4 e Figura 5, a seguir, mostram as convenções de ensaio e os resultados obtidos pelo autor para as configurações (a) campo aberto

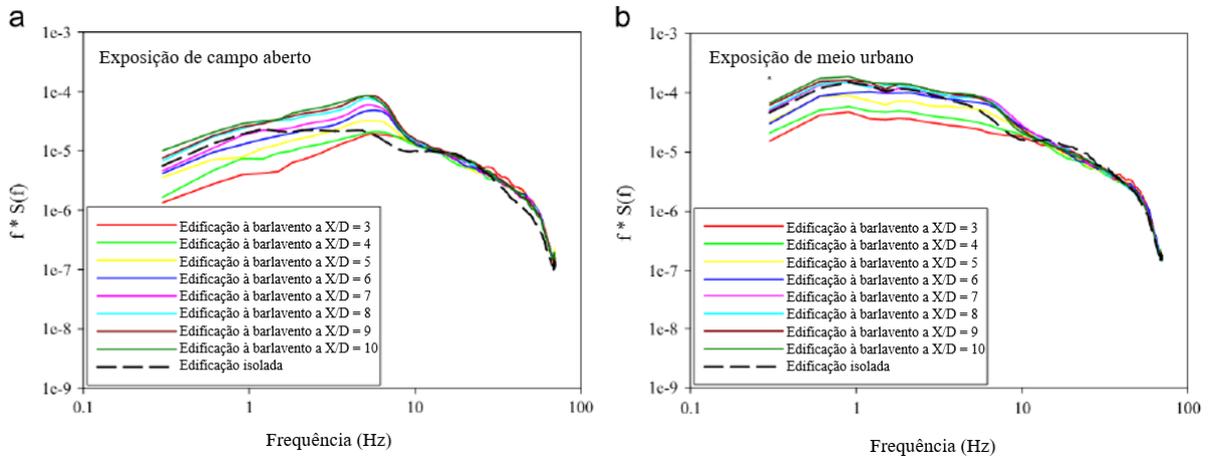
e (b) em meio urbano. Os espectros obtidos para exposição de campo aberto possuem uma relativamente baixa densidade de energia nas faixas de frequências mais baixas, que pode ser explicado pelo baixo nível de turbulência à barlavento.

Figura 4 - Convenções de ensaio



(fonte: adaptado de MARA et al., 2014)

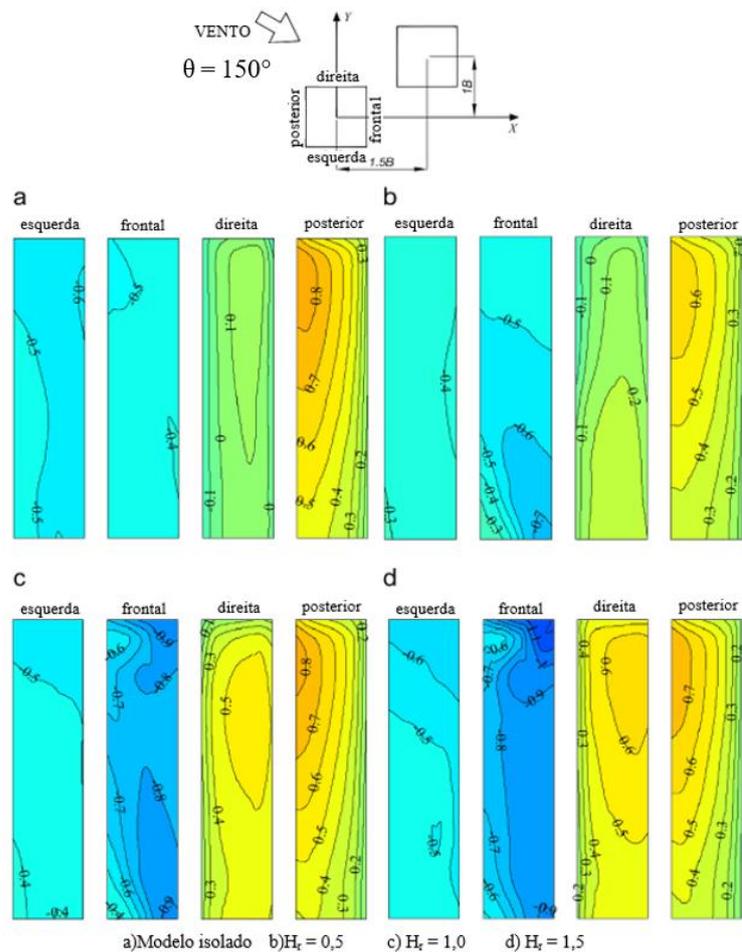
Figura 5 - Espectros de torção para edificação isolada e com vizinho à barlavento



(fonte: adaptado de MARA et al., 2014)

Mais recentemente, Kim et al. (2015) conduziram um estudo em túnel de vento de efeitos de vizinhança através de uma técnica de medição de pressões nos modelos de edifícios. Cinco tipos de edifícios vizinhos foram considerados com diferentes relações de alturas H_r entre o vizinho adjacente e o modelo em estudo e os ângulos de incidência do vento foram considerados de 0° a 355° , variando a cada 5° . Como resultado, foi identificado que os efeitos de vizinhança para os coeficientes de momento na base longitudinais à direção do vento são significativamente maiores quando a relação das alturas é igual a 1 ou 1,5 e o vizinho está próximo do modelo em estudo. Na Figura 6 é mostrada a referência de ângulos de incidência do vento e convenções de ensaio, bem como exemplos da distribuição dos coeficientes de pressão médios no modelo em estudo para o ângulo de incidência do vento 150° .

Figura 6 - Convenções e distribuição dos coeficientes de pressão médios no modelo em estudo

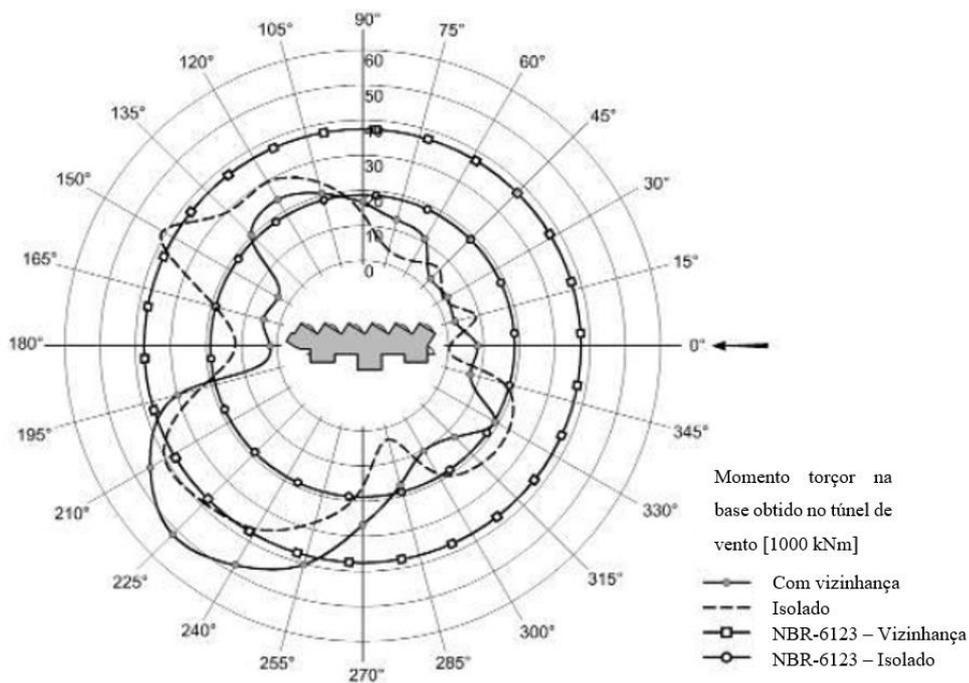


(fonte: adaptado de KIM et al., 2015)

O Laboratório de Aerodinâmica das Construções tem realizado ao longo dos anos diversos estudos sobre os efeitos de vizinhança em edifícios altos através de ensaios em túnel de vento. A seguir, são apresentados alguns dos trabalhos publicados em destaque sobre esses estudos.

Carpeggiani et al. (2005) estudaram os efeitos estáticos de torção em edifícios altos inseridos em vizinhança devidos à ação do vento através de ensaios experimentais de modelos reduzidos de edifício com diversas seções transversais. Foram realizadas comparações dos resultados experimentais com os resultados teóricos obtidos a partir das metodologias indicada na norma brasileira, NBR-6123 – Força devidas ao vento em edificações. Foi observado que os momentos torçores na base medidos nos ensaios, em relação aos valores estimados pela NBR, são superestimados em alguns casos, subestimados em outros e por vezes, se equivalem, conforme o tipo de edificação. Na Figura 7 são apresentadas as comparações dos valores de momento torçor obtido em túnel de vento com os valores obtido pela norma brasileira em forma de gráficos polares de dois modelos estudados.

Figura 7 - Comparação dos momentos torçores para o MODELO 12

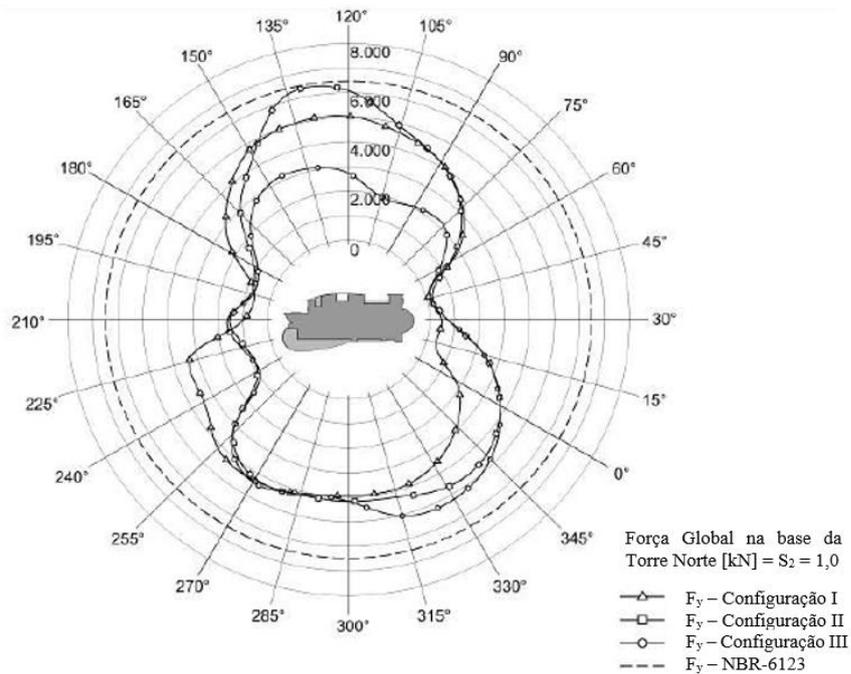


(fonte: CARPEGGIANI et al., 2005)

Um estudo em túnel de vento do modelo reduzido de dois edifícios altos com 120 metros de altura a serem construídos em Natal, RN foi realizado por Loredou-Souza et al. (2007). Foram

apresentados resultados de forças globais e de torção para somente uma torre construída e com a vizinhança existente, Configuração I; as duas torres construídas com a vizinhança existente, Configuração II; e com as duas torres construídas com a vizinhança existente e mais quatro prédios altos projetados para a vizinhança imediata dos prédios em estudo, Configuração III. Os resultados indicaram que as solicitações podem ser significativamente alteradas pela presença da vizinhança, em relação ao prédio isolado. Na Figura 8 são apresentados os resultados da força global F_Y para as diferentes configurações de vizinhança em uma das torres.

Figura 8 - Força global F_Y [kN] na Torre Norte para 24 ângulos de incidência do vento



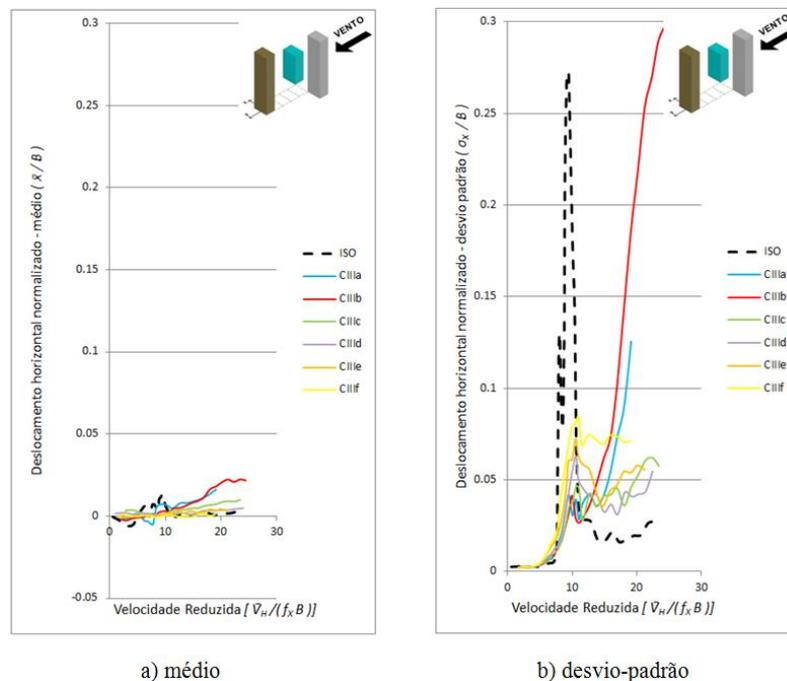
(fonte: LOREDO-SOUZA et al., 2007)

Loredo-Souza et al. (2009) apresenta os resultados de uma série de estudos, em túnel de vento, sobre modelos reduzidos de prédios altos de concreto armado. Os efeitos de vizinhança são estudados em termos de coeficientes de força, coeficientes de torção e coeficientes de pressão para efeitos locais. Os resultados em túnel de vento dos modelos isolados, sem vizinhança, são comparados com aqueles obtidos levando-se em conta os edifícios existentes no entorno. Os resultados indicam que as solicitações podem ser significativamente alteradas pela presença da vizinhança, em relação ao prédio isolado.

Loredou-Souza et al. (2013) verificaram, através de resultados de ensaios em túnel de vento, que a NBR 6123 e suas recomendações para excentricidade da força de arraso para determinar os momentos torçores, subestimam as indicações para os casos sem vizinhança, mas cobrem a maioria dos casos para as configurações com vizinhança.

Bênia et al. (2014) realizaram estudos sobre os efeitos de vizinhança na resposta dinâmica de um edifício alto padrão para dezoito configurações de vizinhança. Para a determinação da resposta do edifício, em termos de suas componentes médias e flutuantes, para deslocamentos longitudinais e transversais à direção do vento incidente e a torção, utilizou-se uma balança dinâmica de três graus de liberdade. Em termos de resposta média, a presença de edificações vizinhas causou, em geral, o efeito de proteção esperado provocando a diminuição destas respostas no edifício principal, quando comparada à resposta da edificação isolada. No entanto, a resposta flutuante sofreu ampliações significativas, para os três graus de liberdade, para determinadas configurações de vizinhança. Na Figura 9 são mostrados os resultados da resposta transversal em termos da parcela média e da parcela flutuantes para uma das configurações de vizinhança estudadas.

Figura 9 - Resposta transversal para a configuração III de vizinhança



(fonte: BÊNIA et al., 2014)

Vieira et al. (2018) apresentam uma série de resultados de ensaios em túnel de vento para forças globais médias, momentos fletores na base e momentos torçores em um edifício alto padrão para diferentes configurações de vizinhança. As configurações de vizinhança são constituídas por somente um edifício de mesma altura que o edifício em estudo para diferentes espaçamentos entre eles. Concluiu-se que a presença da edificação vizinha aumentou os carregamentos médios no edifício em estudo para um número significativo de direções consideradas.

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo central a determinação dos fatores de vizinhança considerando coeficientes de pressão, coeficientes de força, coeficientes de torção e deslocamentos flutuantes em um edifício alto padrão. Os testes foram realizados para diferentes configurações de vizinhança no entorno, considerando diferentes tipos de perfil de vento natural incidente, a partir de ensaios estáticos e dinâmicos em escala reduzida no túnel de vento. Busca-se contribuir com o aumento do conhecimento sobre os fatores de vizinhança indicados pela NBR-6123.

2 AÇÃO DO VENTO EM EDIFÍCIO ALTOS

Edifícios altos e extremamente altos (atualmente ultrapassando 800 metros) projetam-se em grande extensão no interior da camada limite atmosférica e, assim, podem sofrer os efeitos de ventos de tempestades de larga escala, como ciclones tropicais. A resposta dinâmica ressonante nos modos longitudinal, transversal e torcional é uma ocorrência usualmente experimentada por essas estruturas. Além disso, podem ocorrer pressões extremas locais nos elementos de revestimento de suas fachadas para determinados ângulos de incidência do vento.

2.1 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

De acordo com Cook (1985), a camada limite atmosférica (CLA) é toda a região da troposfera na qual o vento é afetado pela presença da superfície terrestre. Para quase qualquer velocidade do vento, o número de Reynolds associado à CLA é tão grande que os escoamentos sempre são considerados como sendo turbulentos.

American Society of Civil Engineers (1980) afirma que o vento é caracterizado pelo movimento de ar na atmosfera de uma região de alta pressão para uma região de baixa pressão causado pelo aquecimento desigual na superfície terrestre. Seu movimento é composto de uma ampla gama de escalas: as escalas enormes, onde estão as flutuações sazonais de velocidade do vento; as escalas grandes, utilizadas nos mapas meteorológicos de previsão do tempo, características de vento sinótico; as pequenas escalas, onde a variação da velocidade do vento só é observada por registros de anemômetros de alta velocidade.

Ainda de acordo com *American Society of Civil Engineers* (1980) é conveniente, por razões analíticas, separar a gama de escalas de flutuações da velocidade do vento em duas categorias: as flutuações de grande escala, características dos ventos sinóticos, que são referidas como flutuações de velocidade média e as flutuações de pequena escala que são referidas como rajadas.

2.1.1 Perfil de velocidades médias do vento

O perfil de velocidades médias do vento é definido pela variação da velocidade do ar em função da altura dentro da CLA. Segundo Stathopoulos (2007) para ventos perto da superfície terrestre, os efeitos de fricção causados pelas obstruções no solo exercem um papel significativo, causando uma redução na velocidade média do vento.

A certa altura acima do chão, o movimento do ar não é mais afetado por esses obstáculos. Essa altura é chamada de altura gradiente, z_g , que depende da rugosidade do terreno. A velocidade do vento a esta altura é chamada de velocidade gradiente \bar{V}_{zg} e é considerada constante acima da altura gradiente. O parâmetro z_0 , geralmente designado por comprimento de rugosidade, está diretamente ligado à altura dos obstáculos que formam a rugosidade da superfície terrestre, sendo uma pequena fração dessa altura e constituindo uma referência para o grau de rugosidade superficial. O termo z_d , denominado como deslocamento do plano zero, representa um deslocamento do perfil de velocidades médias do vento em função da altura média dos obstáculos na superfície terrestre.

Os perfis de velocidade médias do vento mais utilizados em Engenharia do Vento são expressos pelas leis potencial e logarítmica. A lei potencial, usada por engenheiros estruturais para representar a variação da velocidade média do vento com a altura até a altura gradiente é uma equação empírica e é representada pela equação 1 a seguir.

$$\frac{\bar{V}(z)}{\bar{V}(z_{ref})} = \left(\frac{z - z_d}{z_{ref}} \right)^p \quad \text{equação 1}$$

Onde:

$\bar{V}(z)$	velocidade média do vento na altura de interesse;
$\bar{V}(z_{ref})$	velocidade média do vento em uma altura de referência;
z	altura de interesse;
z_d	deslocamento do plano zero;
z_{ref}	altura de referência;
p	expoente que representa o tipo de terreno.

A lei logarítmica, apresentada na equação 2, usada tanto por engenheiros quanto por meteorologistas, é baseada em conceitos físicos de camada limite e é válida na região de 20% a 30% de altura gradiente a partir do nível do solo.

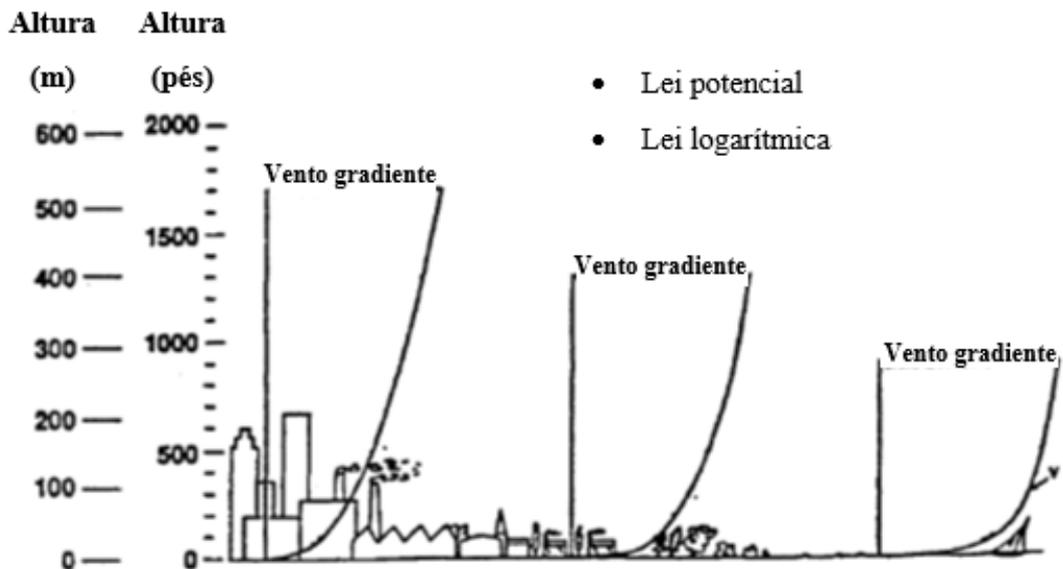
$$\bar{V}(z) = 2,5 \cdot u^* \cdot \ln\left(\frac{z - z_d}{z_0}\right) \quad \text{equação 2}$$

Onde:

$\bar{V}(z)$	velocidade média do vento na altura de interesse;
z	altura de interesse;
z_d	deslocamento do plano zero;
z_0	comprimento de rugosidade;
u^*	velocidade de fricção = $\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = 1-2$ m/s (para ventos extremos);
τ_0	tensão de cisalhamento na superfície do solo;
ρ	massa específica do ar.

A Figura 10 mostra as variações típicas da velocidade média sob diferentes tipos de terreno:

Figura 10 - Variação da velocidade média do vento com a altura



(fonte: adaptado de STATHOPOULOS, 2007)

2.1.2 Turbulência

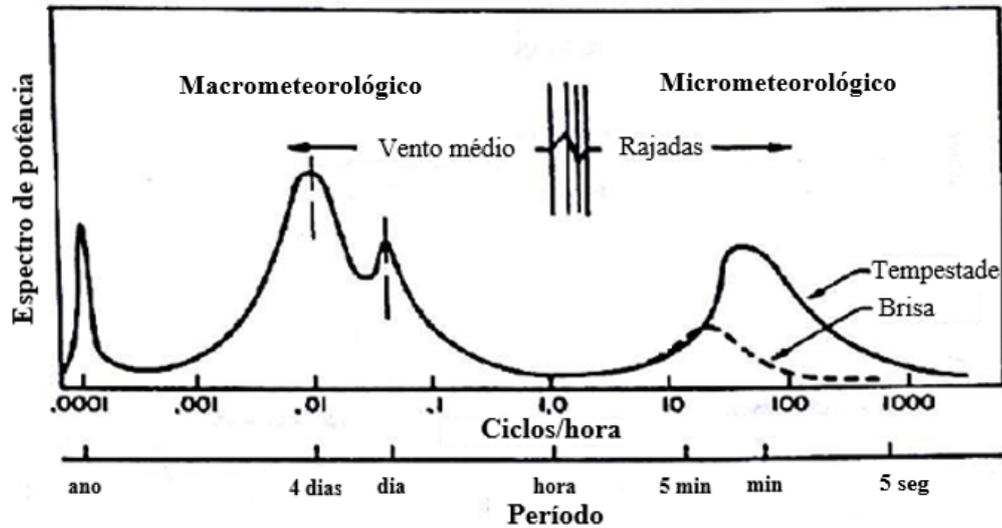
De acordo com Blessmann (2013) a agitação mecânica do vento causada pela rugosidade natural e artificial da superfície terrestre forma muitos turbilhões de diversas dimensões, que vão desde a ordem de grandeza do milímetro até a ordem de grandeza da altura da camada limite atmosférica.

Ainda segundo Blessmann (2013, p.127):

As flutuações da velocidade do vento em torno de um valor médio são designadas pelo termo rajadas. Essas flutuações ocorrem em uma sequência aleatória de frequências e intensidade. As rajadas mais velozes são de menor duração (fração de segundo) e atuam sobre uma pequena região. Correspondem à chegada simultânea, ao ponto de estudo, de turbilhões de diversas dimensões e em condições tais que seus efeitos se superpõem.

A Figura 11 mostra o espectro de potência de Van der Hoven (1956), no qual existem dois picos claros: o pico macrometeorológico, que mostra a concentração de energia por um período de cerca de 4 dias; o outro é chamado de pico micrometeorológico, que tem um pico de energia de cerca de 1 minuto. O primeiro está relacionado ao movimento de um sistema meteorológico de larga escala devido às circulações globais do vento. O segundo está relacionado à turbulência causada por efeitos topográficos, rugosidade do terreno, obstáculos etc. A faixa de frequências entre os dois picos não contém quase nenhuma energia. A flutuação do vento correspondente ao pico micrometeorológico deve ser levada em conta na avaliação das forças dinâmicas do vento no projeto do edifício. No entanto, a flutuação do vento na faixa de baixas frequências, incluindo o pico macrometeorológico, pode ser considerado a variação da velocidade média do vento no projeto do edifício.

Figura 11 - Espectro da velocidade do vento em gama de frequência



(fonte: adaptado de VAN DER HOVEN, 1956)

De acordo com Cao (2013), o parâmetro de turbulência atmosférica mais simples é a intensidade de turbulência. Ela é definida como o quociente entre o desvio padrão das flutuações da velocidade e a velocidade média do vento conforme mostra a equação 3.

$$I_{u,v,w} = \frac{\sigma_{u,v,w}}{\bar{V}(z)} \quad \text{equação 3}$$

Onde:

$I_{u,v,w}$ intensidades de turbulência longitudinal, lateral e vertical, respectivamente;

$\sigma_{u,v,w}$ desvio padrão das flutuações longitudinais, laterais e verticais, respectivamente;

$\bar{V}(z)$ velocidade média do vento na altura de interesse.

Os desvios padrões das flutuações são calculados a partir da equação 4:

$$\sigma_{u,v,w}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (u, v, w)^2 dt \quad \text{equação 4}$$

Onde:

$\sigma_{u,v,w}^2$ variância das flutuações longitudinais, laterais e verticais, respectivamente;
 T período;
 u, v, w velocidade do vento instantânea longitudinal, lateral e vertical, respectivamente.

O desvio padrão das componentes da velocidade flutuante do vento também pode ser obtido através da equação 5.

$$\sigma_{u,v,w}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S(n) df \quad \text{equação 5}$$

Onde:

$\sigma_{u,v,w}^2$ variância das flutuações longitudinais, laterais e verticais, respectivamente;
 S(n) densidade espectral de potência.

A velocidade do vento varia aleatoriamente no tempo e no espaço. Isso pode ser representado pelos fenômenos em que turbilhões de diversos tamanhos são transportados pelo escoamento médio do vento. Um turbilhão de grande magnitude resulta em uma flutuação de longo período (baixa frequência), enquanto um turbilhão de pequena magnitude resulta em uma flutuação de curto período (alta frequência). A distribuição de energia cinética contida nas flutuações do vento em função da frequência de turbulência pode ser descrita por uma função de densidade espectral, normalmente identificada por espectro de potência. Blessmann (2013) apresenta as expressões para determinação dos espectros de potência da componente longitudinal da

turbulência propostos por Davenport (1961), Harris (1970), von Kármán (1956, *apud* ESDU, 2001)¹ e Kaimal (1973). Essas expressões podem ser simplificadas de acordo com a equação 6.

$$\frac{n \cdot S_u(n)}{\bar{u}'^2} = \frac{A \cdot \left(\frac{n \cdot L_u}{\bar{V}(z)}\right)^m}{\left[B + C \cdot \left(\frac{n \cdot L_u}{\bar{V}(z)}\right)^k\right]^N} \quad \text{equação 6}$$

Onde:

- n frequência;
- $S_u(n)$ densidade espectral de potência da componente da velocidade u ;
- \bar{u}'^2 variância da parcela flutuante da componente da velocidade u ;
- L_u escala da componente longitudinal da turbulência;
- $\bar{V}(z)$ velocidade média do vento na altura de interesse.

Os valores dos parâmetros numéricos para a determinação dos espectros de potência são dados na Tabela 1. As curvas dos espectros correspondentes às equações de cada pesquisador são apresentadas na Figura 12.

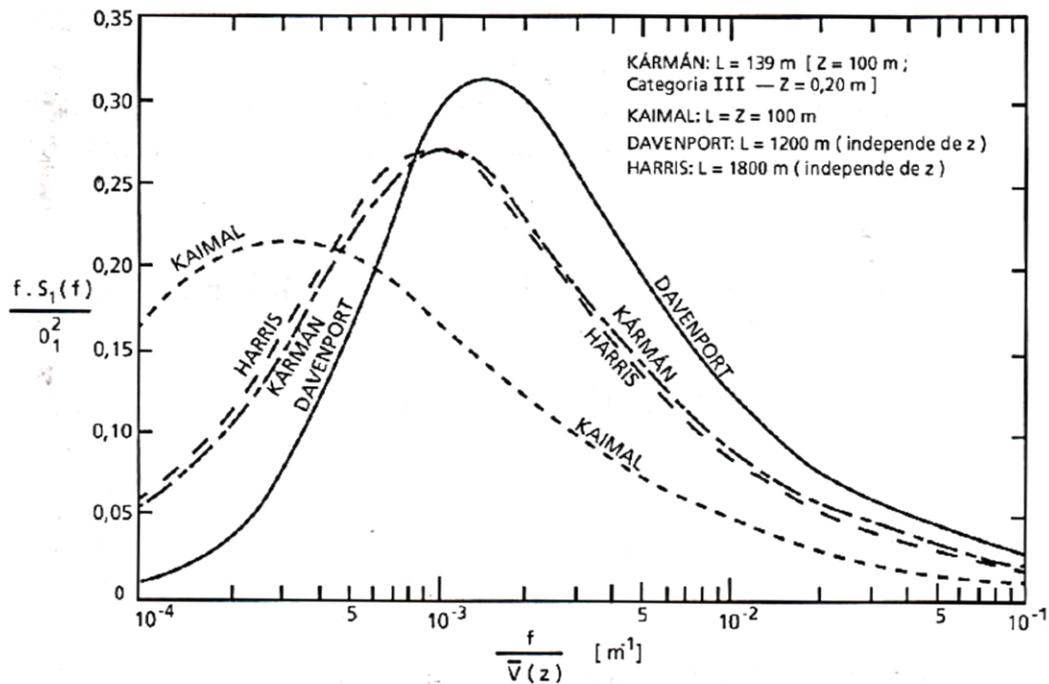
Tabela 1 - Parâmetros para determinação dos espectros de potência

Autor	Parâmetros numéricos						L_u para $z = 100\text{m}$	Notas
	A	B	C	m	N	k		
Davenport	2/3	1	1	2	4/3	2	1200 m	Independente de z
Harris	0,6	2	1	1	5/6	2	1800 m	Independente de z
Kármán	0,4	1	70,78	1	5/6	2	139 m	$L_u = 25 \cdot z^{0,35} \cdot z_0^{-0,603}$; $z_0 = 0,20 \text{ m}$
Kaimal	100/3	1	50	1	5/3	1	100m	$L_u = z$

(fonte: adaptado de BLESSMANN, 2013)

¹ KÁRMÁN, T. von. **Aerodynamic**. Genebra, Interavia, 1956.

Figura 12 - Espectros de Harris, Davenport, Kármán e Kaimal



(fonte: adaptado de BLESSMANN, 2013)

2.2 FORÇAS DEVIDAS AO VENTO

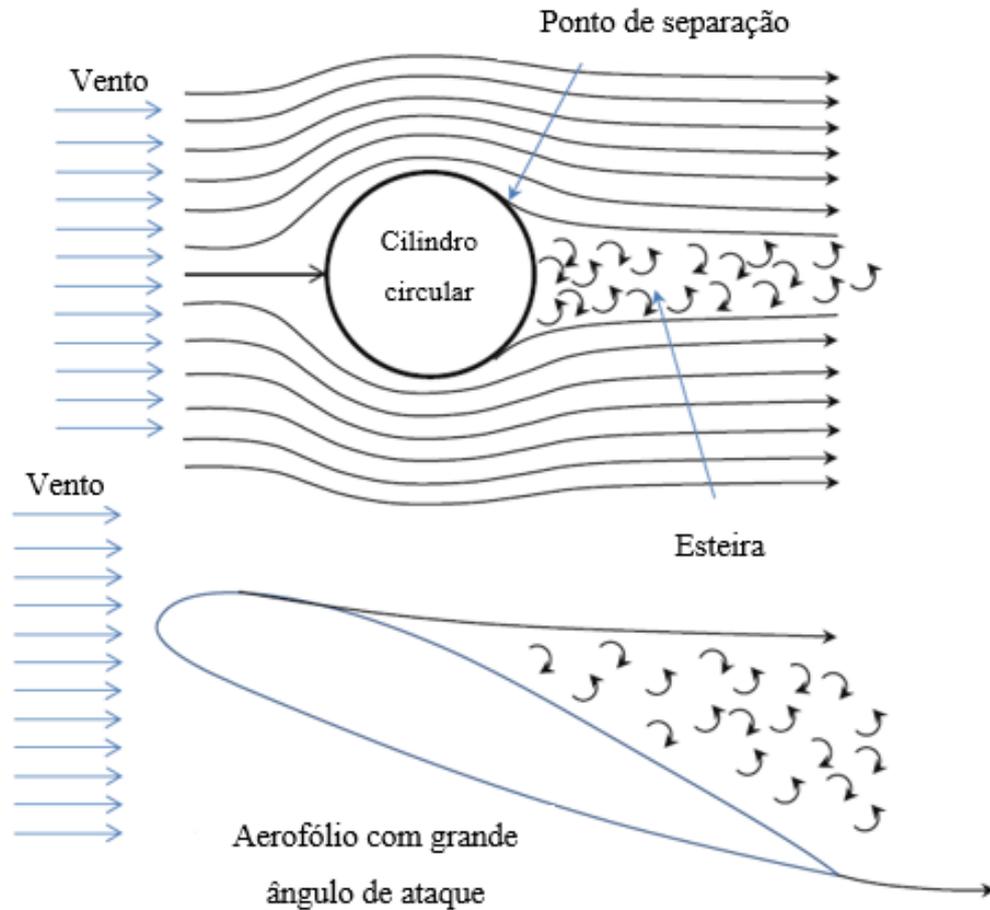
De acordo com Cook (1985), um corpo é considerado aerodinamicamente rombudo quando as linhas de escoamento não seguem a superfície do corpo que, ao se separarem, formam uma região de esteira. O oposto de corpos rombudo é denominado corpo aerodinâmico, no qual o escoamento permanece tangencial à superfície em qualquer ponto mantendo-se aderido ao corpo e gerando uma esteira estreita, o que diminui o arrasto.

Balendra (1993) afirma que para corpos de seção retangular (rombudos) a separação do escoamento ocorre nos cantos a barlavento. Nestas regiões, fortes tensões de cisalhamento impõem movimentos rotacionais às partículas do fluido, formando os vórtices. Se o corpo é alongado, as linhas de escoamento que se separam nos cantos a barlavento, recolam no corpo formando uma esteira mais estreita, diminuindo o arrasto.

Segundo Cao (2013), a separação do escoamento depende do número de Reynolds, da rugosidade da superfície e da turbulência. A região separada atrás de um corpo rombudo é denominada esteira. A separação do escoamento para corpos aerodinâmicos ocorrerá para altos

ângulos de incidência (acima de 15°). A seguir, na Figura 13, é mostrada a separação do escoamento em corpos rombudos e corpos aerodinâmicos.

Figura 13 - Escoamento em corpos rombudos e corpos aerodinâmicos



(fonte: adaptado de CAO, 2013)

Balendra (1993) diz que, quando um corpo rombudo está imerso em um escoamento, ele está sujeito a forças na direção do escoamento (força de arrasto) e a forças perpendiculares ao escoamento (forças de sustentação). Além disso, quando uma força resultante é excêntrica ao centro elástico, o corpo será sujeito à momentos torcionais. Essas forças e momentos por unidades de comprimento do objeto são determinadas de acordo com as equação 7 à equação 9.

$$F_A = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_A \cdot A \cdot \bar{V}^2 \quad \text{equação 7}$$

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_L \cdot A \cdot \bar{V}^2 \quad \text{equação 8}$$

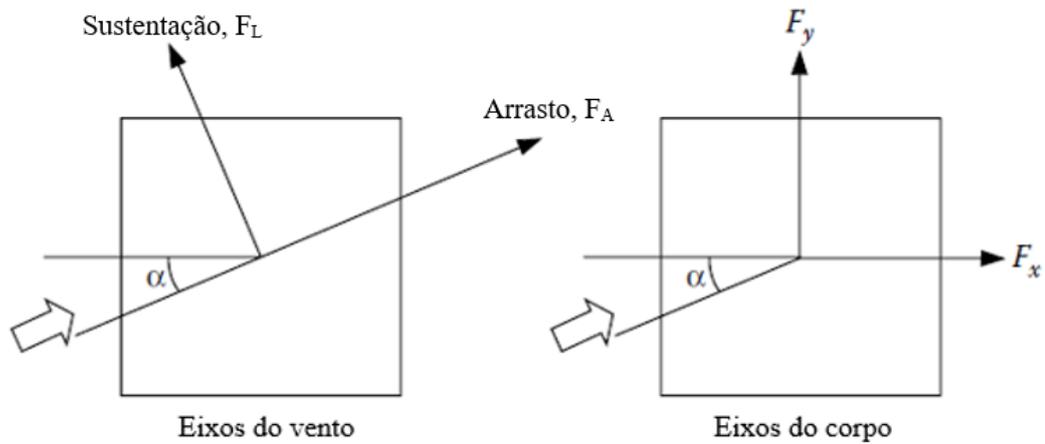
$$T_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_T \cdot A \cdot H \cdot \bar{V}^2 \quad \text{equação 9}$$

Onde:

F_A	força de arrasto;
F_L	força lateral (ou de sustentação);
T_z	torção;
\bar{V}	velocidade média do escoamento;
ρ	massa específica do ar;
C_A	coeficiente de arrasto;
C_L	coeficiente lateral (ou de sustentação);
C_T	coeficiente torcional;
A	área de referência;
H	altura de referência;

Holmes (2015) explica que as forças aerodinâmicas são, convencionalmente, decompostas em duas forças ortogonais entre si. Essas forças podem ser paralelas e perpendiculares à direção do vento (força de arrasto e força de sustentação, já mencionadas), neste caso os eixos são referidos como eixos do vento; ou paralelas e perpendiculares à geometria do corpo (força no sentido x e força no sentido y), neste caso os eixos são referidos eixos do corpo. Esses eixos são mostrados na Figura 14. As forças em x e em y por unidade de comprimento são determinadas pelas equação 10 e equação 11 a seguir.

Figura 14 - Eixos do vento e eixos do corpo



(fonte: adaptado de HOLMES, 2015)

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot B \cdot \bar{V}^2 \quad \text{equação 10}$$

$$F_y = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_y \cdot B \cdot \bar{V}^2 \quad \text{equação 11}$$

Onde:

F_x	força no eixo x ;
F_y	força no eixo y ;
\bar{V}	velocidade média do vento;
ρ	massa específica do ar;
C_x	coeficiente de força em x ;
C_y	coeficiente de força em y ;
B	dimensão característica.

De acordo com Lawson (1980) um carregamento puramente estático devido ao vento é muito difícil de ocorrer. Só acontecerá em estruturas extremamente rígidas, que possua superfícies lisas e cantos arredondados, em um vento absolutamente estável, e, ainda que ocorra, em uma

limitada gama de ângulos de incidência. Como essas condições geralmente não ocorrem na prática, é melhor considerar o carregamento do vento como sendo sempre de natureza flutuante.

Em vento turbulento, a velocidade do vento na direção longitudinal é descrita conforme a equação 12 a seguir.

$$V(t) = \bar{V} + v(t) \quad \text{equação 12}$$

Onde;

- $V(t)$ velocidade do vento instantânea;
 \bar{V} velocidade média do vento;
 $v(t)$ componente longitudinal da flutuação do vento.

A força de arrasto variável ao longo do tempo por unidade de comprimento é obtida substituindo \bar{V} por $V(t)$ na equação 7. Como a razão $v(t)/\bar{V}$ raramente excede 0,2 para extensões práticas de intensidades de turbulências, a força de arrasto dependente do tempo pode ser expressa como a equação 13.

$$f_A(t) = \bar{f}_A + \bar{f}'_A(t) \quad \text{equação 13}$$

Onde:

- $f_A(t)$ força de arrasto instantânea;
 \bar{f}_A força de arrasto média por unidade de comprimento;
 $\bar{f}'_A(t)$ força de arrasto flutuante por unidade de comprimento.

Lawson (1980) afirma que há quatro razões principais para a natureza flutuante do escoamento no entorno e das forças (e momentos) nas edificações. Elas são:

- a) tipo da edificação (rombuda ou aerodinâmica);
- b) tipo de vento (suave ou turbulento);

- c) rigidez da edificação;
- d) rugosidade da superfície da edificação.

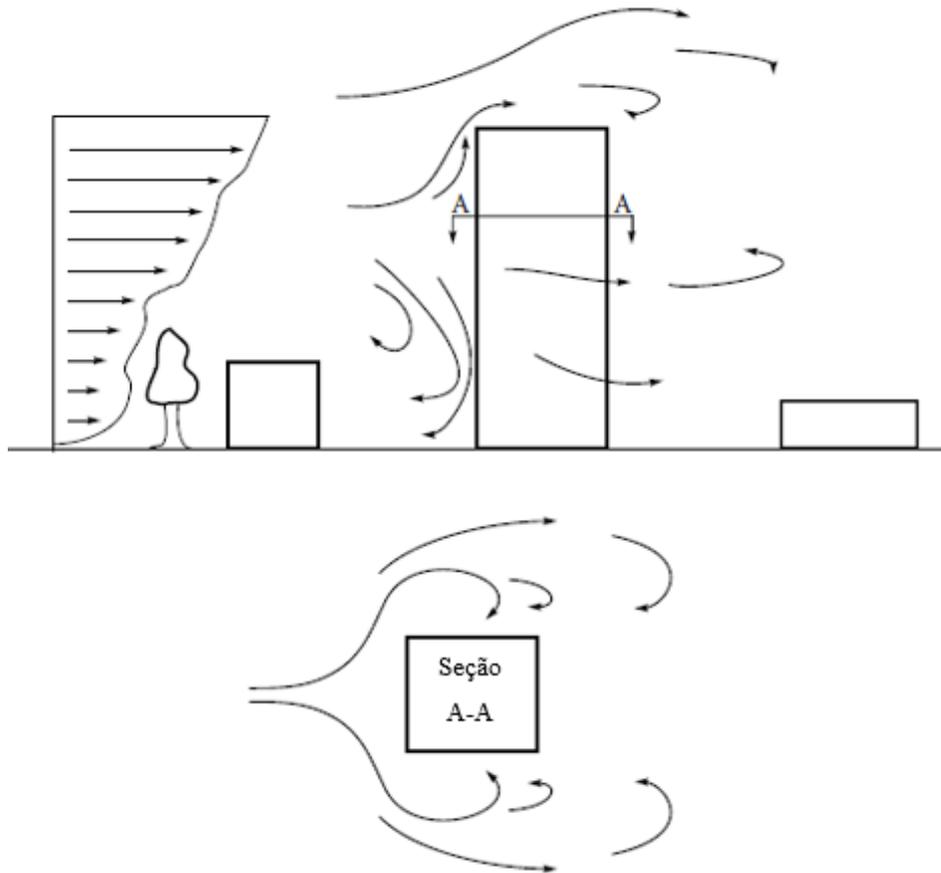
Como é admitido que as edificações são rombudas e, geralmente, com superfícies rugosas, restam duas razões para as forças flutuantes: o tipo de vento e a rigidez da edificação. Combinações desses parâmetros definem os tipos de carregamento nas estruturas.

Além disso, Holmes (2015) ainda destaca a importância da forma da seção transversal do edifício bem como do amortecimento estrutural na natureza flutuante do escoamento em torno das edificações.

2.3 RESPOSTA DE EDIFÍCIOS ALTOS FRENTE À AÇÃO DO VENTO

Edifícios altos são corpos rombudos de média a grandes proporções de altura. Os aspectos básicos do escoamento em torno de corpos rombudos e suas características foram mostradas anteriormente. Holmes (2015) explica que na face a barlavento dos edifícios altos há um forte escoamento descendente abaixo do ponto de estagnação, que ocorre a uma altura de 70-80% da altura total do edifício. O escoamento descendente pode muitas vezes causar problemas na base dos edifícios, pois o ar em alta velocidade dos níveis superiores é reduzido ao nível da rua. Separação e recolamento nas paredes laterais estão associadas a altas pressões locais. A face traseira é uma região de pressão média negativa e baixo nível de pressões flutuantes. A Figura 15 mostra o escoamento do vento em torno de um edifício alto.

Figura 15 - Escoamento em torno de edifício alto



(fonte: adaptado de HOLMES, 2015)

As respostas de edifícios altos frente à ação do vento são divididas em três categorias: resposta longitudinal, resposta transversal e resposta torcional. Esta terminologia refere-se ao caso em que a velocidade média do vento é paralela a um eixo principal da seção transversal horizontal do edifício.

2.3.1 Resposta longitudinal

Kwok (2013) explica que a turbulência do vento natural causa choque de turbilhões de vento que produzem forças flutuantes longitudinais em uma estrutura imersa no escoamento. As velocidades de vento flutuantes, as forças induzidas pelo vento e suas conseqüentes respostas são aleatórias por natureza. A magnitude das cargas flutuantes é função da intensidade de turbulência e sua escala de comprimento. A intensidade de turbulência determina a magnitude

local das forças de flutuação, enquanto a escala do comprimento de turbulência, em relação ao tamanho da estrutura, determina quão bem as flutuações se correlacionam com a estrutura.

Kwok (2013) ainda explica que a fim de determinar a relação entre o vento turbulento e a carga de vento na estrutura, é conveniente pensar em termos de comprimento de onda e frequências. Por exemplo, se o vento médio a uma altura z é $\bar{u}(z)$, então pode-se associar um comprimento de onda $\lambda = \bar{u}(z)/n$, com a componente da frequência n , onde λ é a medida linear do tamanho das rajadas ou turbilhões produzindo flutuações no carregamento a uma frequência n . A eficácia de uma rajada em termos de produção de carga em uma grande estrutura depende em grande parte do tamanho da rajada em relação ao tamanho da estrutura, seja b . No caso de componente de alta frequência, $\lambda/b \ll 1$, as pressões ou forças produzidas são bem correlacionadas ou organizadas em apenas pequenas áreas da estrutura. O efeito total produzido por essas componentes de alta frequência é pequeno porque em algumas áreas elas tendem a produzir uma grande força enquanto, ao mesmo tempo, em outras áreas da estrutura produzirão cargas baixas. Por outro lado, as componentes de frequências baixas, onde $\lambda/b \gg 1$, atuam em toda, ou em grande parte, da estrutura simultaneamente.

2.3.2 Resposta transversal

De acordo com Melbourne (1975), os mecanismos das respostas transversais de edifícios altos podem ser divididos em duas categorias:

- a) excitações devido à esteira, em particular o desprendimento de vórtices alternados;
- b) excitações devido à turbulência no escoamento.

2.3.2.1 *Excitações devido à esteira: desprendimento de vórtices alternados*

A causa mais comum de excitação lateral em estruturas frente à ação do vento é o desprendimento de vórtices alternados (chamados vórtices de Kármán), sendo é comumente usado o termo excitação de vórtices. Para a maioria das estruturas, o desprendimento de vórtices possui uma frequência dominante n_s que é definida pelo Número de *Strouhal*, mostrado na equação 14:

$$St = \frac{n_s \cdot B}{\bar{V}}$$

equação 14

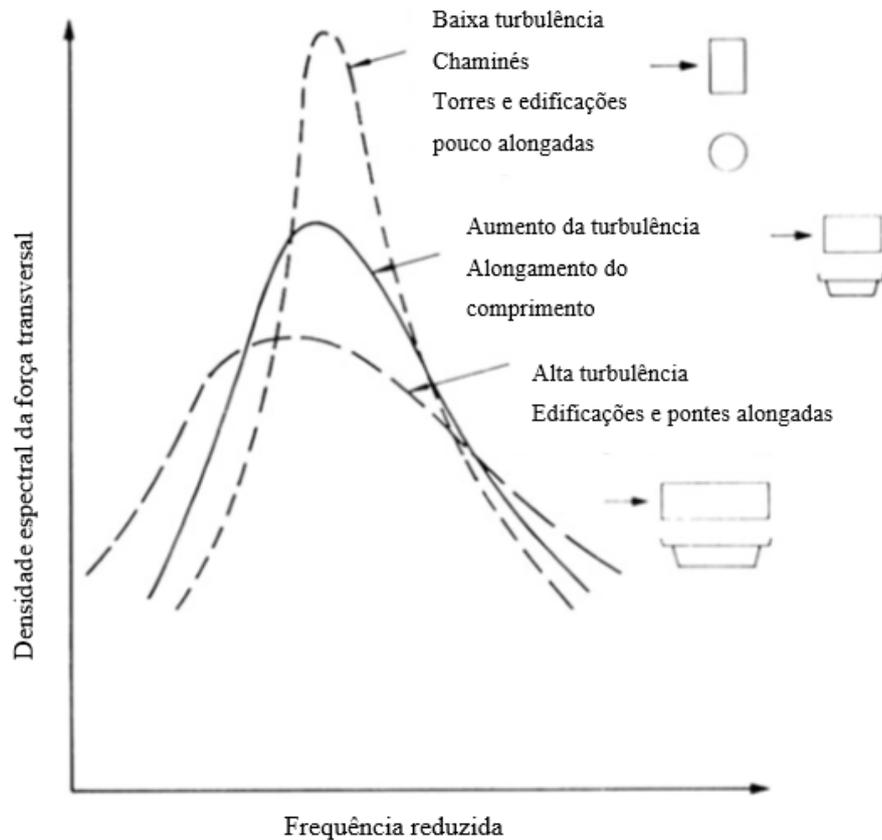
Onde:

St	número de <i>Strouhal</i> ;
n_s	frequência do desprendimento de vórtices alternados;
B	dimensão característica;
\bar{V}	velocidade média do vento.

O Número de *Strouhal* é tipicamente da ordem de 0,1-0,4 e é função do número de Reynolds, formato da seção transversal, rugosidade da superfície e turbulência do escoamento. Durante o desprendimento de vórtices, a estrutura é sujeita a forças laterais periódicas. Se a frequência natural da estrutura coincidir com a frequência do desprendimento de vórtices, ocorrem as respostas ressonantes, comumente referidas à velocidade crítica do vento. As oscilações de chaminés pouco amortecidas em seu modo fundamental a uma velocidade crítica do vento é o exemplo mais conhecido de vibração ressonante.

As excitações transversais devido ao desprendimento de vórtices foram estudadas extensivamente para diversas estruturas e turbulências do escoamento. Apesar de algumas diferenças significativas na abordagem experimental, a distribuição dessas forças pode ser resumida nos espectros da Figura 16:

Figura 16 – Espectros de estruturas com desprendimentos de vórtices



(fonte: adaptado de MELBOURNE, 1975)

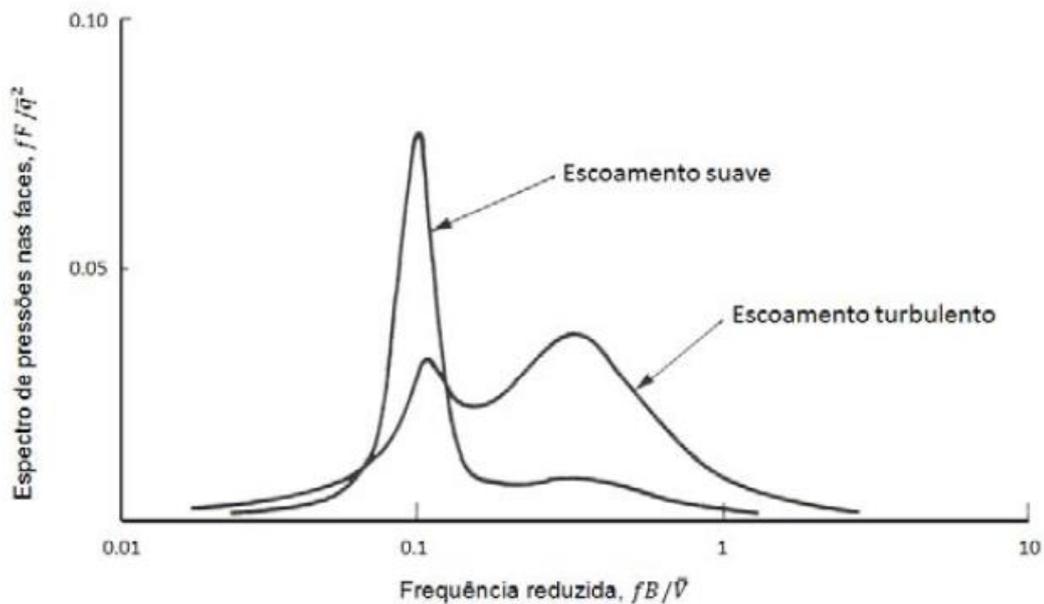
2.3.2.2 Excitações devido à turbulência no escoamento

A turbulência no vento natural dá origem a mudanças na velocidade e na direção do vento incidente, o que induz diretamente ao arrasto flutuante e as forças do vento transversal nas estruturas. A importância da turbulência do vento na resposta transversal depende da capacidade da turbulência incidente de gerar uma força de vento transversal na estrutura em função da velocidade longitudinal do vento e do ângulo de incidência do vento médio. A turbulência incidente pode excitar um ou mais modos de vibração ou a estrutura pode responder a uma rajada discreta bem correlacionada. Uma abordagem espectral quase constante, similar àquela usada para determinar a resposta longitudinal das estruturas ao vento, é considerada aplicável ao cálculo da resposta transversal do vento de estruturas devido à turbulência incidente.

Cook (1985) investigou o efeito da turbulência no escoamento sobre um modelo de seção quadrada, com altura igual a três vezes a largura B da base, utilizando turbulência gerada por

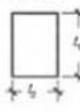
grelhas. A Figura 17 apresenta o espectro das flutuações de pressão medidas nas faces do modelo. Para escoamento suave há um grande pico na frequência reduzida $fB/V = 0,12$ que indica desprendimento de vórtices para o número de *Strouhal* esperado para uma seção quadrada (ver Quadro 1). No entanto, para escoamento turbulento, com escala aproximadamente igual à largura B do modelo, a contribuição do desprendimento de vórtices para o espectro é drasticamente reduzida. O desprendimento de vórtices ordenado é substituído por desprendimento aleatório de vórtices para uma faixa larga de frequências mais altas. Isto ocorre porque os turbilhões presentes no escoamento incidente interferem no ciclo de desprendimento causando o desprendimento prematuro dos vórtices, também porque a vorticidade das camadas de cisalhamento nas laterais do corpo é dissipada como turbulência aleatória na esteira.

Figura 17 - Efeito da turbulência do vento no desprendimento de vórtices alternados em uma torre de base quadrada



(fonte: adaptado de COOK, 1985)

Quadro 1 - valores do número de *Strouhal* para diversas seções

Direção do vento	Forma da secção	s_f
Qualquer	 Círculo $Re = 70\,000 \bar{V}d$ (\bar{V} sobre 10 min)	$10^3 \leq Re \leq 2 \times 10^5$ 0,20
		$Re \geq 10^6$ 0,28 (interpoliar linearmente)
→	 Placa	0,16
		↓
→	 Retângulo	$l1/l2 = 0,5$ 0,15
		1,0 0,12
		1,5 0,09
		2,0 0,07
		2,5 0,07
		3,0 0,15
		4,0 0,13
4,5 0,12		
→	 $t = a/25$	0,12
		↓
↓	 $\begin{cases} 2a : t = a/25 \\ 4a : t = a/8 \end{cases}$	0,14
↓	 $t = a/25$	0,14
		↑
↓	 $t = a/12,5$	0,15
		↑
←	 $t = a/50$	0,15
		↑
↙	 $t = a/50$	0,15
		←
←	 $t = a/25$	0,13
		↑
↘	 $t = a/25$	0,14
		→
→	 $t = a/25$	0,11
		↑
→	 $t = a/25$	0,12
		↓
→	 $t = a/25$	0,14
		↓
↓	 $t = a/12,5$	0,15

(fonte: BLESSMANN, 2005)

2.3.3 Resposta torcional

Tallin e Ellingwood (1985, *apud* LYTHER e SURRY, 1990)² explicam que, no projeto de edifícios altos, métodos analíticos para o cálculo das cargas longitudinais devidas ao vento são bem desenvolvidos e confiáveis. Para carregamento torcional devido ao vento, entretanto, não

² TALLIN, A. ELLINGWOOD, B. **Wind induced lateral-torsional motion of buildings.** Journal of Structural Engineering, vol.111, no 10, paper no. 2009, 1985.

é o caso. Na verdade, em muitos países o carregamento torcional devido ao vento não é considerado em suas normas e são considerados apenas em situações excepcionais. Essa negligência de cargas torcionais surgem na premissa assumida por essas mesmas normas que o carregamento do vento é uniformemente distribuído em suas fachadas e que a força cortante devido ao vento atua na direção do vento; entretanto, isso raramente acontece. Forças torcionais podem ser causadas por fatores como o vento atuante em ângulo oblíquo à fachada da estrutura, seção transversal do edifício não simétrica ou escoamento do vento perturbado causado por obstruções à barlavento.

Um tipo de instabilidade aerodinâmica no eixo de torção é a divergência torcional que é explicado por Simiu e Scanlan (1996) como sendo um efeito de segunda ordem. Uma estrutura sob a ação do vento será submetida a forças de arrasto e sustentação, e um momento torçor. Este momento cresce à medida que a velocidade do vento incidente aumenta, o que causa uma rotação e, portanto, uma deformação na estrutura. Esta deformação aumenta o ângulo de ataque do vento sobre a estrutura, causando mais um incremento no momento torçor. O aumento da velocidade do vento leva a estrutura a uma condição instável até que atinge a ruptura.

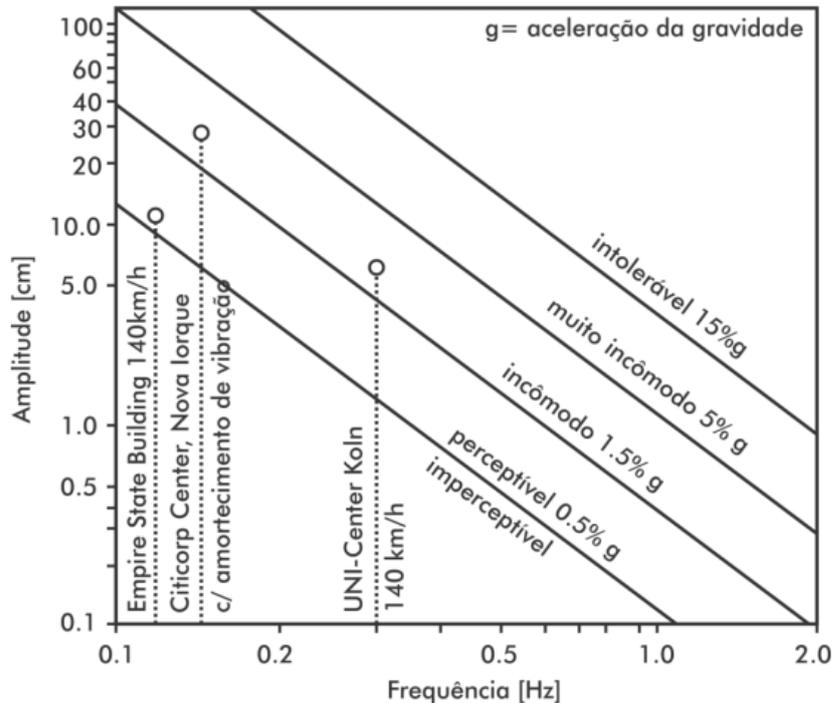
2.3.4 Conforto de usuários e aceleração limite

A percepção humana do movimento da construção dentro da qual se encontra deve-se quase que inteiramente à componente flutuante deste movimento. Isto é, a deflexão estática é de importância secundária; a percepção está ligada à vibração da estrutura, seja por flexão, seja por torção (BLESSMANN, 2005).

Bachmann et al. (1995) afirma que os efeitos de vibrações de baixa frequência nas pessoas são: incômodo, apreensão em relação à segurança estrutural do prédio, perda de concentração e mal-estar. Nenhum desses efeitos é considerado prejudicial para a segurança das pessoas, mas devido ao fator de incômodo, os edifícios com problemas de vibração podem receber mais queixas do que outros. Não há casos conhecidos, no entanto, onde tais vibrações tenham prejudicado a segurança estrutural de um edifício.

CHANG (1967, *apud* BACHMANN et al., 1995)³ apresenta os níveis de conforto dos usuários frente a vibrações em termos de aceleração da gravidade conforme Figura 18:

Figura 18 - Percepção humana de vibrações



(fonte: adaptado de BACHMANN et al., 1995)

2.4 EFEITOS DE VIZINHANÇA

Edificações localizadas próximas umas das outras podem apresentar efeitos de vizinhança bastante significativos, em alguns casos podendo ser favoráveis, porém em outros, geram um aumento nas pressões exercidas nas edificações.

Hui et al. (2013) explicam que, os efeitos de vizinhança entre um grupo de edificações situadas próximas umas das outras, como ocorrem nas grandes cidades, alteram as características do escoamento incidente em cada uma das edificações. Estes efeitos alteram os carregamentos médios e flutuantes devidos ao vento em relação aqueles observados em situações isoladas.

³ CHANG, F. K. **Wind and movement of tall buildings**. Journal of ASCE, Structural Division, p. 70-72, 1967.

Os procedimentos normativos para determinação dos carregamentos devidos ao vento proporcionam estimativas conservadoras para o cálculo desses carregamentos, no entanto, em certos casos, os efeitos de vizinhança presentes em um grupo de edifícios podem ser benéficos às estruturas.

Nos itens a seguir serão apresentados alguns fenômenos do vento nas edificações causados por efeitos de vizinhança.

2.4.1 Martelamento

Blessmann (2005) explica o martelamento como sendo um efeito em que uma edificação situada na esteira de uma ou poucas edificações vizinhas é “martelada” compassadamente por turbilhões gerados pela vizinhança com uma frequência predominante. Assim sendo, essa força excitadora periódica causará efeitos dinâmicos de maior ou menor intensidade. Estes efeitos podem atingir grandes valores quando uma das frequências naturais da edificação coincidir com a frequência dominante nos turbilhões gerados.

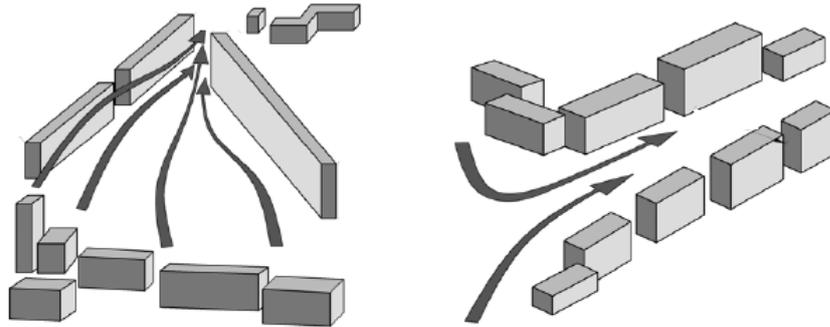
Além da frequência, também influirá na vibração a intensidade de turbulência do vento incidente. Se esta intensidade for pequena, a turbulência do vento incidente pouco influirá na relativamente bem organizada esteira das edificações a barlavento, com vórtices que se desprendem cadenciadamente (vórtices de Kármán) e que vão incidir também cadenciadamente na edificação em estudo, dando origem a uma força excitadora aproximadamente periódica: o espectro de energia é estreito. Se a intensidade de turbulência incidente for grande, haverá uma desorganização dos turbilhões, com a energia passando a se distribuir em uma gama maior de frequências: o espectro de energia é largo e as vibrações serão de menor amplitude.

2.4.2 Efeito Venturi

A formação do efeito Venturi é observada principalmente onde há orientação regular dos efeitos de vizinhança, formando um caminho propício para a ocorrência de uma aceleração no escoamento do ar, conseqüentemente alterando a distribuição das pressões desenvolvidas. Este efeito é bastante comum entre paredes confrontantes de edificações vizinhas, observadas

corriqueiramente nas ruas e avenidas de regiões urbanas onde há afunilamento nas vias de escoamento do vento. A Figura 19 ilustra o efeito Venturi.

Figura 19 - Efeito Venturi

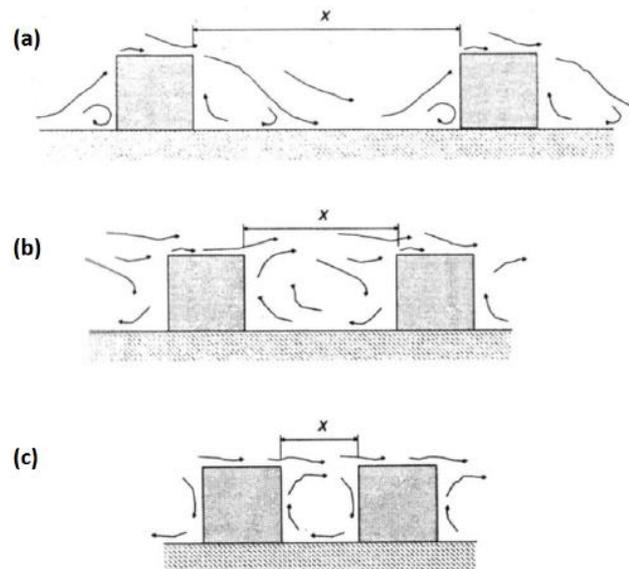


(fonte: adaptado de CARPEGGIANNI, 2004)

2.4.3 Turbulência de Esteira

Cook (1990) explica que edificações alinhadas à barlavento uma da outra, podem definir três padrões distintos de regimes de escoamentos de acordo com a Figura 20.

Figura 20 - Regimes de escoamento



(fonte: adaptado de COOK, 1990)

- a) Regime de escoamento de corpo isolado: neste regime, os corpos estão afastados a uma distância igual a qual permite a reorganização do padrão de escoamento do vento dado pela CLA atuante antes de atingir o outro corpo à sotavento do elemento de interferência. Os fenômenos desenvolvidos na esteira são pequenos ou nulos e os esforços do vento sobre a estrutura à sotavento dá-se parecido ao caso isolado;
- b) Regime de escoamento de interferência na esteira: neste regime, há uma tentativa de reconstituição da CLA entre as edificações, que não ocorre, devido a maior aproximação entre eles, tornando o escoamento turbulento o suficiente para formulação descompassada de vórtices incidentes na estrutura à sotavento;
- c) Regime de escoamento deslizante: neste regime, representa uma elevação da CLA dada pela proximidade entre os corpos, traduzindo-se em um escoamento deslizante sobre a superfície deles. Nota-se um forte efeito de proteção às ações do vento entre as estruturas envolvidas no processo.

2.4.4 Fator de Vizinhança

A NBR-6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988) explica que não é possível indicar valores numéricos para efeitos de vizinhança de um modo genérico e normativo. Contudo, estes efeitos podem ser determinados por ensaios em túnel de vento, em que se reproduzem as condições de vizinhança e as características do vento natural que possam influir nos resultados. O fator de vizinhança é definido conforme a equação 15 a seguir:

$$FV = \frac{C_{na \text{ edificação com vizinhança}}}{C_{na \text{ edificação isolada}}} \quad \text{equação 15}$$

Onde:

FV fator de vizinhança;
 C coeficiente aerodinâmico.

Uma aproximação dos aumentos que podem sofrer os coeficientes aerodinâmicos por efeitos de vizinhança é dado a seguir:

Seja:

s afastamento entre os planos das faces confrontantes de duas edificações altas vizinhas, sendo $a \times b$ as dimensões em planta das edificações ($a \times b$ entre 1×1 e 4×1);

d^* a menor das duas dimensões: – lado menor b
 – semidiagonal $\frac{1}{2}\sqrt{a^2 + b^2}$

Os valores representativos de FV para coeficientes de arrasto, coeficientes de forma, e para o valor médio dos coeficientes de pressão em paredes confrontantes (paralelas ao vento) são:

$$s/d^* \leq 1,0 \dots \dots \dots FV = 1,3$$

$$s/d^* \geq 3,0 \dots \dots \dots FV = 1,0$$

Para valores intermediários de s/d^* , o FV deve ser interpolado linearmente e, além disso, os fatores vizinhança somente são considerados até a altura do topo dos edifícios vizinhos. Além disso, os efeitos de vizinhança no coeficiente de torção, C_T , são considerados no item que trata das excentricidades das forças de arrasto da NBR-6123. Para o caso de muitos edifícios vizinhos nestas condições, os fatores de vizinhança geralmente são menores, podendo ficar abaixo de 1,0. Entretanto, pode haver incidências do vento que causem valores de FV próximos aos indicados anteriormente, principalmente quando há “vazios” nas vizinhanças do edifício em estudo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988).

2.4.5 Fator de Martelamento

O fator de martelamento é definido por Blessmann (2005) como sendo a razão entre os valores de determinados efeitos dinâmicos medidos no prédio em estudo com a presença de vizinhança e os valores dos mesmos efeitos medidos no prédio isolado. Estes efeitos podem ser a amplitude de oscilação, aceleração, momentos de tombamento, momentos de torção, em seus valores médios, máximos ou desvio padrão.

2.5 ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO DE EDIFÍCIOS ALTOS

Muitos edifícios altos foram estudados em túneis de vento ao longo de várias décadas. Esses estudos incluem a determinação das cargas globais e das respostas das estruturas, pressões de revestimento e outros efeitos do vento, como condições ambientais do vento no nível do solo. Apesar disso, foram realizadas poucas comparações de referência para promover a confiança nos projetistas estruturais de que os estudos para determinação das cargas de vento são consistentes e repetíveis para um mesmo edifício por diferentes grupos em diferentes instalações. Uma tentativa inicial disso foi o modelo de edifício alto padrão *CAARC*, estudado na década de 1970 – os resultados foram resumidos por Melbourne (1980). No entanto, as medições realizadas e as técnicas utilizadas foram relativamente primitivas em comparação com as atualmente disponíveis.

Segundo *The Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory* (2007), a resposta dinâmica devido ao vento da maioria dos edifícios altos é principalmente o resultado dos movimentos de flexão e torção em seus modos de vibração fundamentais com relativamente pequena contribuição de modos maiores. A função de transferência mecânica (admitância mecânica), relacionando a função de carga à resposta, é direta. Por outro lado, a função de transferência aerodinâmica (admitância aerodinâmica), relacionando a estrutura das rajadas às forças induzidas pelo vento, é difícil de determinar sem ensaios em túnel de vento. Uma complicação adicional existe se os efeitos de movimento do corpo interagem com a função de carga (amortecimento aerodinâmico). Resultados de estudos recentes referentes à determinação das funções de admitâncias aerodinâmicas podem ser encontradas em Scharnberg (2018) e Vogado (2018).

Ainda de acordo com *The Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory* (2007), existem três técnicas principais para a determinação dos efeitos dinâmicos devido ao vento em edifícios altos: ensaios de pressões, ensaios utilizando balança de força de alta frequência e modelagem aeroelástica.

2.5.1 Ensaios de pressões

The Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory (2007) explica que o desenvolvimento de transdutores de pressão, que permitem a medição instantânea de pressões em muitos pontos da

superfície de um modelo de edifício em escala reduzida, possibilitam a determinação das respostas dinâmicas a partir da combinação de um modelo teórico-numérico do sistema estrutural do edifício com carregamentos dinâmicos definidos em túnel de vento (HFPI – *High Frequency Pressure Integration*). A técnica permite o cálculo direto das forças modais que atuam em qualquer número de modos de vibração do edifício. De forma similar à técnica da balança de força de alta frequência, a amplificação ressonante devido às propriedades dinâmicas da estrutura é derivada analiticamente para cada modo usando métodos de análise de vibração e os resultados são, posteriormente, usados para fornecer estimativas da resposta do edifício em escala real.

2.5.2 Balança de força de alta frequência

American Society of Civil Engineers (1999) cita que a resposta dinâmica induzida pelo vento de edifícios altos é predominantemente nas flexões fundamentais e no modo de vibração torcional. As cargas de vento que excitam esses três modos fundamentais podem ser avaliadas com o uso de uma balança de força de alta frequência (HFBB – *High Frequency Base Balance*). Conseqüentemente, esta técnica tornou-se a regra para estudo de túneis de vento para cargas de vento estruturais e respostas para edifícios altos. No entanto, os modelos aeroelásticos continuam a ser usados em situações em que os efeitos aeroelásticos e, em particular, o amortecimento aerodinâmico, são preocupantes, ou em que o sistema estrutural é incomumente complexo, resultando em formas modais não convencionais.

A técnica proposta originalmente por Tschanz (1982) envolve testar uma representação geométrica leve, rígida do prédio em uma balança de força ultrasensível. A técnica permite medições diretas de boas aproximações às forças modais que atuam nos modos fundamentais de flexão e torção do edifício. As respostas dinâmicas, incluindo a amplificação ressonante nas frequências naturais do edifício, são derivadas analiticamente para cada modo utilizando método de análise de vibração aleatória e, posteriormente, usado para estimar as respostas em escala real do edifício. Como resultado, este método é muito adaptável a mudanças nas propriedades estruturais após o ensaio, uma vez que o procedimento analítico pode ser simplesmente repetido usando os mesmos resultados experimentais, que permanecem aplicáveis desde que as características aerodinâmicas do edifício permaneçam as mesmas.

2.5.3 Modelagem aeroelástica

American Society of Civil Engineers (1999) explica que modelos aeroelásticos equivalentes com sistemas de massa concentrada são usados para estudar a ação do vento em edifícios altos. Um modelo de dois graus de liberdade, do tipo “*stick*” (haste rígida instalada em uma rótula) que simula a resposta de edifícios em seus dois modos fundamentais de vibração, é eficaz para edifícios altos de seção transversal compacta, onde as respostas longitudinais e transversais são dominantes. Modelos com vários graus de liberdade são necessários quando é preciso examinar a resposta do edifício em seu modo fundamental de torção e nos modos mais elevados de vibração. Dependendo da complexidade do edifício, esses modelos podem conter 4 a 7 massas discretas cada, com dois graus de liberdade de translação e um de rotação (torção). Edifícios altos tendem a ter geometrias com quinas, e os resultados dos ensaios podem ser prontamente transformados em escala real.

Trein (2005) elaborou, construiu e testou um dispositivo aeroelástico para ensaios de edifícios altos frente à ação dinâmica do vento. O dispositivo é composto por uma parte mecânica, que reproduz as características dinâmicas da edificação, e por uma casca externa, que reproduz a envoltória da edificação a ser estudada.

Em seu trabalho, Oliveira (2009) desenvolveu uma balança dinâmica de três graus de liberdade (BD3GDL) que permite a rotação de três eixos ortogonais entre si em torno de um mesmo ponto. O mecanismo ainda possibilita a regulagem do momento de inércia de massa, da rigidez rotacional e do amortecimento estrutural de cada um dos três movimentos. As rigidezes rotacionais dos modelos e, por consequência, suas frequências de vibração podem ser ajustadas em cada grau de liberdade individualmente, ou seja, a regulagem feita em um movimento em nada afeta as frequências e rigidezes dos outros dois.

3 ESTUDO EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO

Os primeiros ensaios para a determinação das forças desenvolvidas pelo vento em edificações datam do fim do século XIX. Foram desenvolvidas uma série de pesquisas sobre pequenos modelos de cubos, pirâmides, cones, cilindros, esferas, torres, chaminés, telhados, vigas de alma cheia, vigas em treliça etc. Os ensaios foram feitos na Universidade de Melbourne em um pequeno túnel aerodinâmico, sendo o vento artificial gerado por um ventilador (BLESSMANN, 2011).

Com o passar dos anos, os estudos em túneis de vento se aperfeiçoaram e os túneis ficaram mais sofisticados. Seu uso, que era quase exclusivamente aeronáutico, se voltou para a ação do vento em edificações e em pessoas.

3.1 EDIFÍCIO ESTUDADO

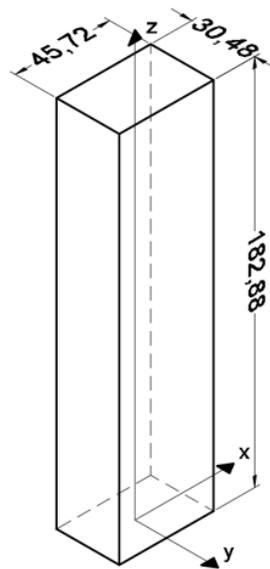
Melbourne (1980) explica que após uma reunião do *Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council Coordinators* no *Field of Aerodynamics* em 1969, Wardlaw e Moss (1970)⁴ propuseram a especificação de um modelo de edifício alto padrão para comparação de ensaios com simulação do vento natural em túneis de vento, o *CAARC Standard Tall Building*. Um modelo simples experimental foi proposto para comparação entre as técnicas que estão sendo estabelecidas em diversos túneis de vento. Esperava-se que a comparação direta entre a resposta dinâmica do modelo e as medições de pressões ajudasse no desenvolvimento de melhores técnicas e levasse a uma maior confiança nos dados obtidos em ensaios de túnel de vento.

3.1.1 Geometria do edifício

Foi especificada uma forma prismática retangular com dimensões em escala real de 30,48 x 45,72 x 182,88 metros com 60 pavimentos. As paredes externas do prédio são planas, sem paraquitos ou sacadas. As dimensões do edifício são mostradas na Figura 21:

⁴ WARDLAW, R. L.; MOSS, G. F. **A standard tall building model for the comparison of simulated natural winds in wind tunnels**, C.A.A.R.C. Tech. 25, 1970

Figura 21 - CAARC Standard Tall Building Basic



Dimensões em [m]

(fonte: elaborado pelo autor)

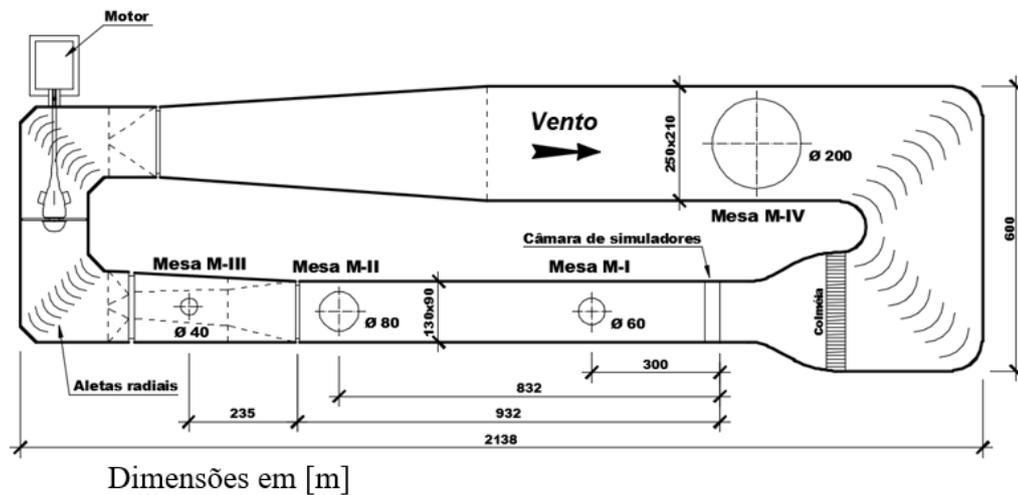
3.1.2 Propriedades dinâmicas

O edifício possui massa específica média de 160 kg/m^3 com formas modais lineares para suas frequências fundamentais, que são $n_x = 0,2 \text{ Hz}$, $n_y = 0,2 \text{ Hz}$ e $n_\theta = 0,3 \text{ Hz}$ em torno dos eixos x e y, e para a torção, respectivamente. As formas modais não possuem acoplamento entre si. Além disso, o amortecimento estrutural, medido pela razão de amortecimento crítico, deve ser considerado $\zeta = 1,0 \%$.

3.2 TÚNEL DE VENTO PROF. JOAQUIM BLESSMANN

Blessmann (1982) explica que o Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) permite a correta simulação da camada limite atmosférica. O túnel de vento possui quatro câmaras de ensaios, compostas por mesas giratórias para diferentes ângulos de incidência do vento sobre os modelos, cada uma delas projetadas para uma aplicação específica com diferentes tipos de modelos e escoamentos. A Figura 22 apresenta o circuito aerodinâmico do túnel de vento, localizando as quatro câmaras de ensaios e suas dimensões principais.

Figura 22 - Circuito aerodinâmico do Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann



(fonte: adaptado de OLIVEIRA, 2009)

A mesa M-II cuja seção transversal possui dimensões de 1,30m x 0,90m tem por característica a sua utilização para ensaios aplicados à engenharia civil. Blessmann (2011) explica que, nesta câmara de ensaio, a velocidade do escoamento chega a seu valor máximo, ultrapassando 46 m/s para vento uniforme e suave, quando não há modelos no túnel. A relação comprimento/altura nesta seção é superior a 10, sendo ideal para a formação completa da camada limite. Desse modo, utilizando os blocos no piso do túnel de vento e geradores de turbulência na câmara de simuladores, os ensaios estáticos e dinâmicos podem ser realizados com a correta simulação do vento natural.

3.3 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL

Armitt e Counihan (1968) explicam que muitos problemas de engenharia requerem um entendimento do escoamento do vento natural para sua solução. Por isso, é necessária uma correta simulação em escala reduzida do vento atmosférico em ensaios em túnel de vento. Uma técnica utilizada é simular um longo trecho de terreno a barlavento do modelo para a turbulência e o perfil natural de velocidades se formarem naturalmente.

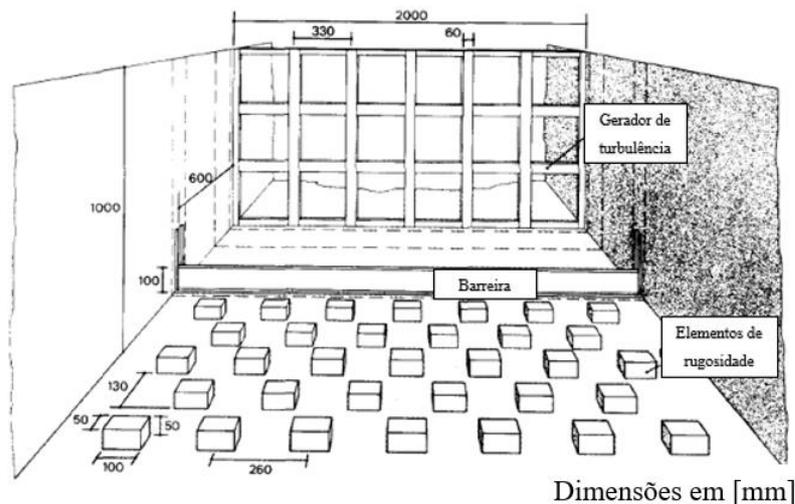
Conforme Melbourne (1977), para alcançar a completa similaridade das condições do escoamento, é necessário manter sem distorção as similaridades geométricas, comprimento de escala do escoamento, similaridade cinemática das velocidades médias e turbulências do

escoamento, além das similaridades dinâmicas mantendo constante certos parâmetros adimensionais como: números de *Reynolds*, *Richardson*, *Prandtl*, *Eckert* e *Rossby*. Entretanto, para a modelagem do vento natural em túneis de vento de camada limite é necessário manter apenas a similaridade geométrica e cinemática junto com o número de *Reynolds*, que deve ser suficientemente grande para garantir as escalas de turbulência.

Cook (1978) explica que os túneis de vento de camada limite gerada por rugosidade natural foram adotados como um bom padrão. Entretanto, um impedimento de gerar a camada limite suficientemente espessa é o comprimento do túnel. Com um comprimento de quase 25 metros, o *Boundary Layer Wind Tunnel* na Universidade de Western Ontario está entre os maiores já construídos, e ainda assim, a espessura de sua camada limite é de apenas 900 milímetros para a simulação de terrenos urbanos e de 380mm para a simulação de áreas rurais.

Cook (1978) mostra uma combinação típica de simulação do vento natural de área suburbana em túnel de vento na Figura 23. O papel da rugosidade é o mesmo que em uma camada limite que cresce naturalmente; ela representa a rugosidade da superfície terrestre em escala real. Sendo assim, ela é o componente mais importante na simulação. A barreira e o dispositivo de turbulência são a parte “artificial” da simulação. O papel da barreira é gerar um déficit inicial de momento e profundidade à camada limite que é misturado à turbulência gerada pelo dispositivo de turbulência.

Figura 23 - Combinação típica de dispositivos de simulação do vento natural



(fonte: adaptado de COOK, 1978)

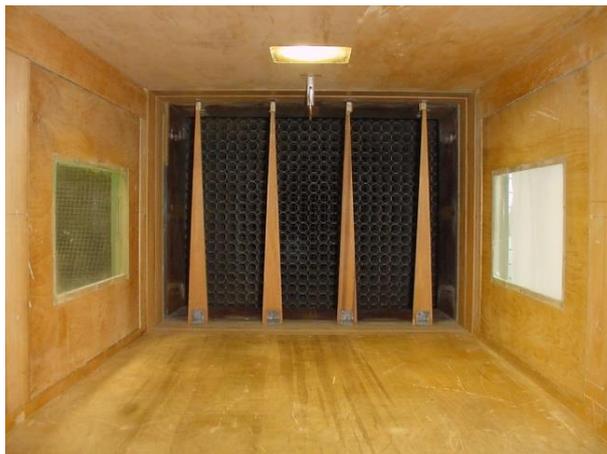
Counihan (1969) desenvolveu um método que acelera a taxa de crescimento da camada limite, formando um perfil de velocidades e turbulência plenamente desenvolvidos a uma distância de três a quatro vezes a altura da seção transversal do túnel de vento. O método envolve o uso de dispositivos geradores de vórtices triangular e uma barreira posicionada a barlavento deles.

Para a realização dos ensaios deste trabalho foram simulados dois tipos de vento natural:

- a) o tipo de vento que possui o perfil vertical de velocidades médias com o expoente $p = 0,11$ para a lei de potência descrita pela equação 1. Este vento corresponde à categoria I da NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988), isto é, representa um terreno aberto e sem obstáculos;
- b) o tipo de vento que possui o perfil vertical de velocidades médias com o expoente $p = 0,26$ para a lei de potência descrita pela equação 1. Este vento corresponde à categoria IV da NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988), isto é, representa um terreno com obstáculos numerosos e pouco espaçados;

Na Figura 24 e na Figura 25 são mostrados os dispositivos utilizados no túnel de vento para a simulação dos dois perfis de velocidade média do vento natural:

Figura 24 - Dispositivos utilizados para simular perfil de vento com expoente $p = 0,11$



(fonte: LOREDO-SOUZA, 2004)

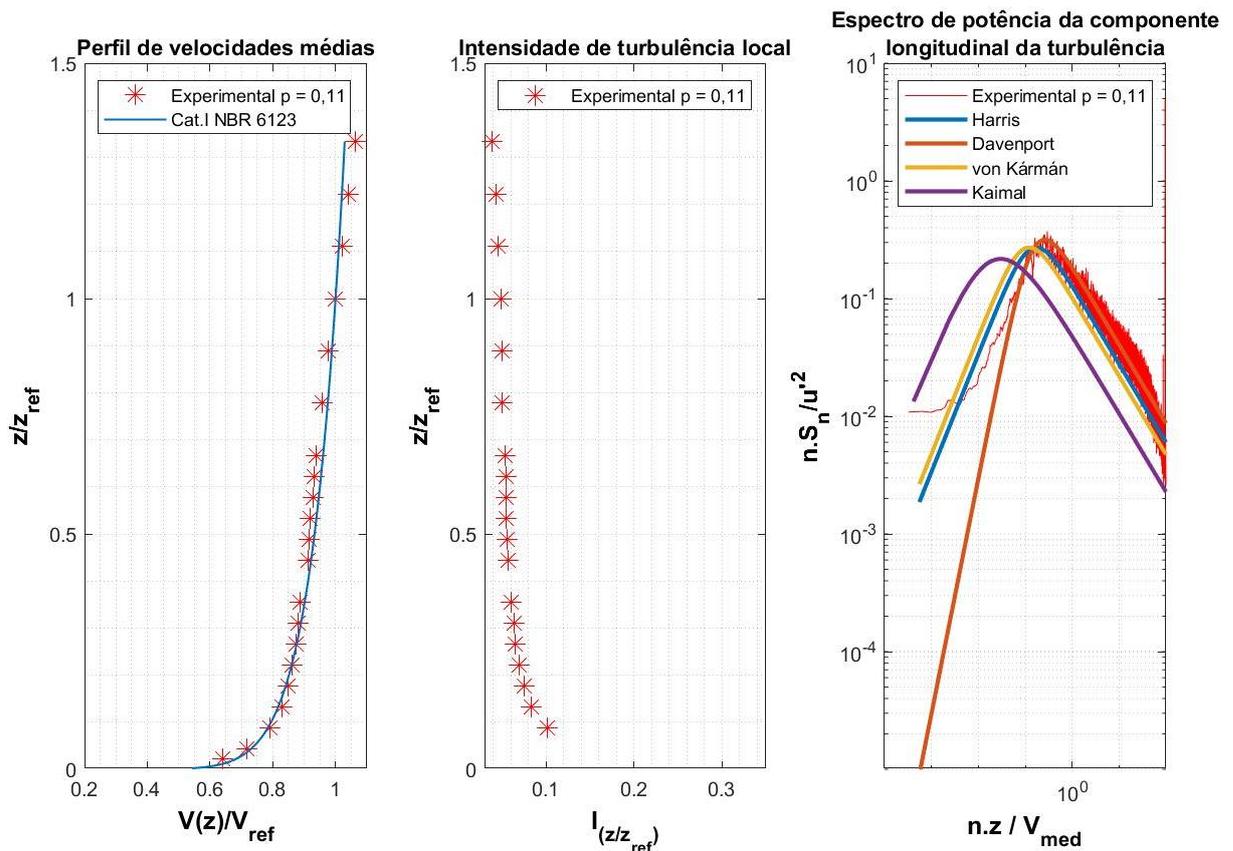
Figura 25 - Dispositivos utilizados para simular perfil de vento com expoente $p = 0,26$



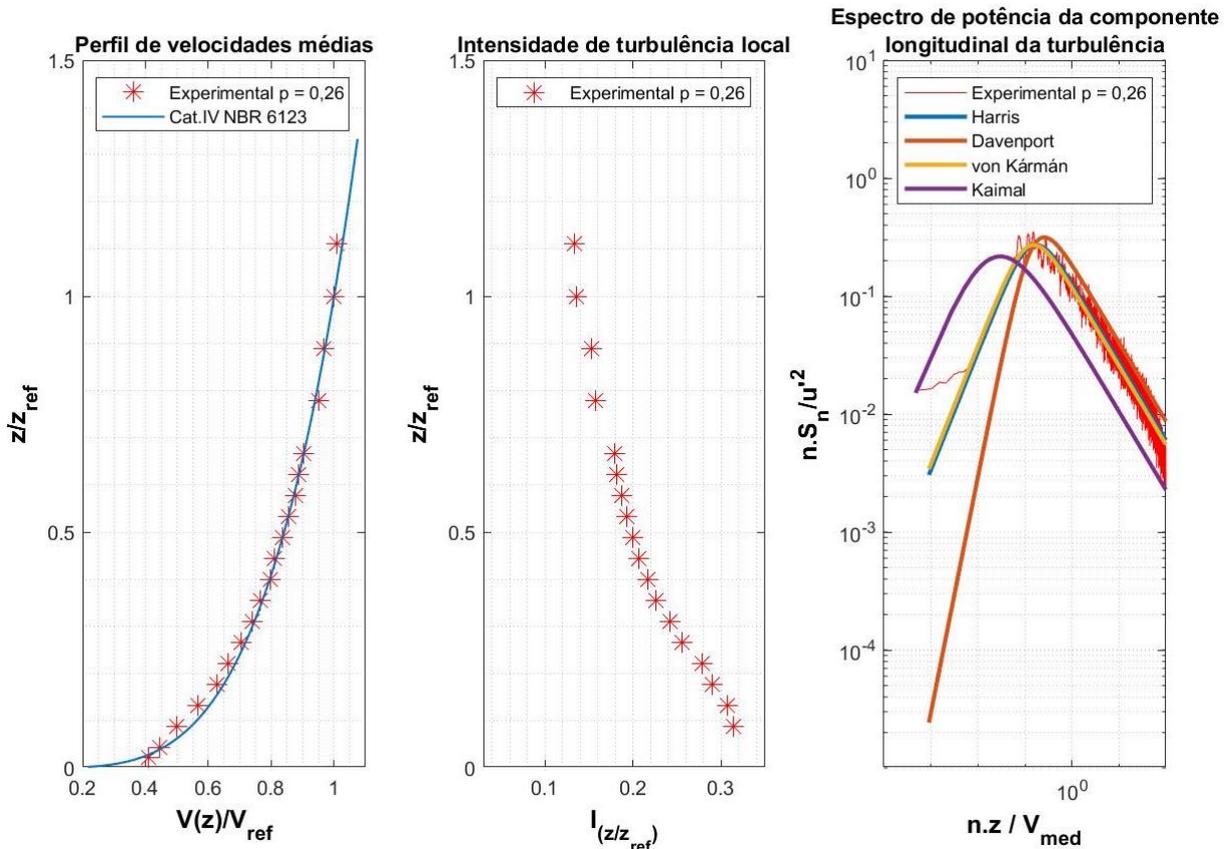
(fonte: elaborado pelo autor)

As principais características dos ventos simulados normalizados pela altura no topo do edifício estudado são mostradas na Figura 26 e na Figura 27, sendo, respectivamente: perfil de velocidades médias; intensidade de turbulência local e espectro de potência da componente longitudinal da turbulência do vento no eixo do túnel comparado com os espectros da equação 6 e parâmetros da Tabela 1.

Figura 26 - Características do vento simulado com expoente $p = 0,11$



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 27 - Características do vento simulado com expoente $p = 0,26$ 

(fonte: elaborado pelo autor)

3.4 CONFIGURAÇÕES DE VIZINHANÇA

American Society of Civil Engineers (1999) explica que estruturas e topografias modificam substancialmente o escoamento em torno da edificação em estudo e, por isso, devem ser incluídas como parte do modelo para a correta simulação do vento em um local específico. Em ambientes urbanos, a modelagem desse campo próximo à edificação em estudo requer a reprodução em escala de todos os principais edifícios e estruturas a cerca de 300 a 800 metros do local e, geralmente, cobre toda a mesa giratória do túnel de vento. O grau de detalhamento dessa vizinhança pode ser reduzido com o aumento da distância para o local de interesse e as representações gerais dos edifícios são aceitáveis.

Os ensaios do modelo do *CAARC Standard Tall Building* foram realizados para o modelo isolado e para outras duas configurações de vizinhança. As configurações de vizinhança são:

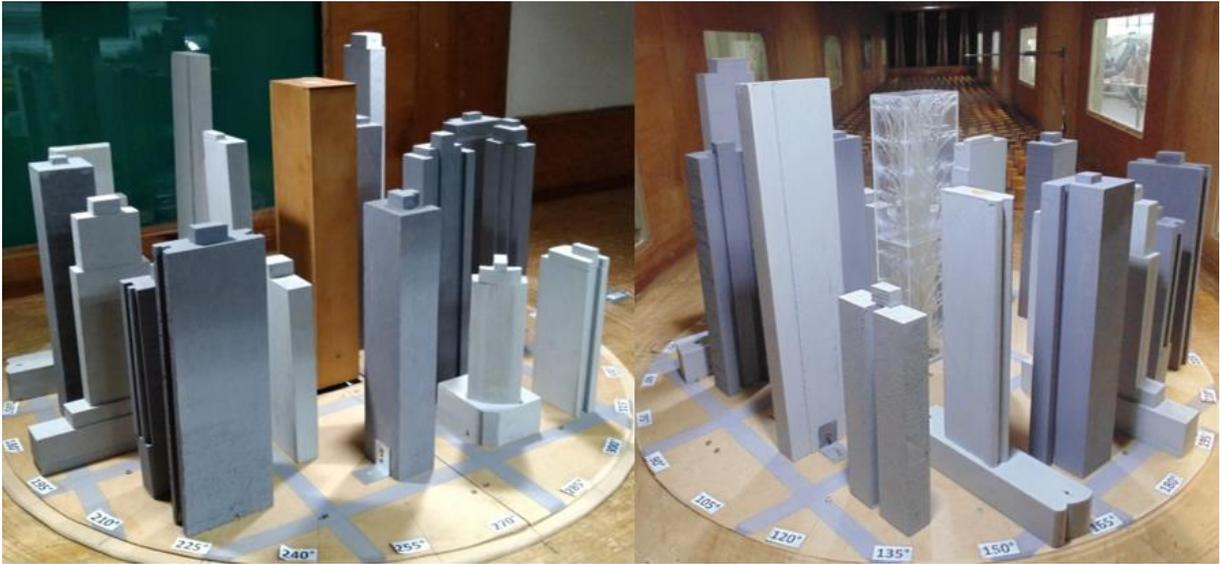
- a) Configuração A: vizinhança no entorno de altura média aproximadamente igual à metade da altura do *CAARC Standard Tall Building*. Os modelos da vizinhança foram dispostos de forma aleatória na mesa giratória de ensaios do túnel de vento simulando uma condição de vizinhança real de um centro urbano relativamente denso. A Configuração A de vizinhança é mostrada na Figura 28;
- b) Configuração B: vizinhança no entorno de altura média aproximadamente igual a altura do *CAARC Standard Tall Building*. Assim como na Configuração A, os modelos da vizinhança foram dispostos de forma aleatória na mesa giratória de ensaios do túnel de vento simulando uma condição de vizinhança real de um centro urbano muito denso. A Configuração B de vizinhança é mostrada na Figura 29.

Figura 28 - Configuração A de vizinhança



(fonte: elaborado pelo autor)

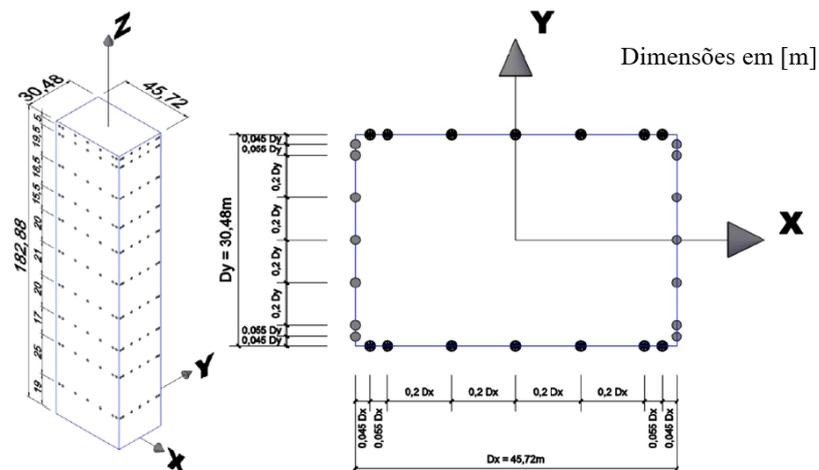
Figura 29 - Configuração B de vizinhança



(fonte: elaborado pelo autor)

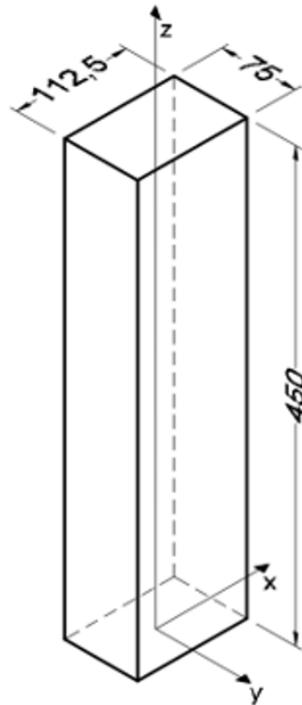
3.5 ENSAIOS ESTÁTICOS

Os ensaios estáticos foram realizados utilizando o modelo do *CAARC Standard Tall Building* utilizado por Oliveira (2009). O modelo foi construído na escala 1:406,4 utilizando chapas de acrílico e instrumentado com 280 tomadas de pressão distribuídas em 10 linhas horizontais de 28 tomadas. A Figura 30 mostra a distribuição das tomadas de pressão no *CAARC Standard Tall Building* e a Figura 31 mostra suas dimensões em escala reduzida.

Figura 30 - Distribuição das tomadas de pressão no *CAARC Standard Tall Building*

(fonte: OLIVEIRA, 2009)

Figura 31 - Dimensões do modelo *CAARC Standard Tall Building*



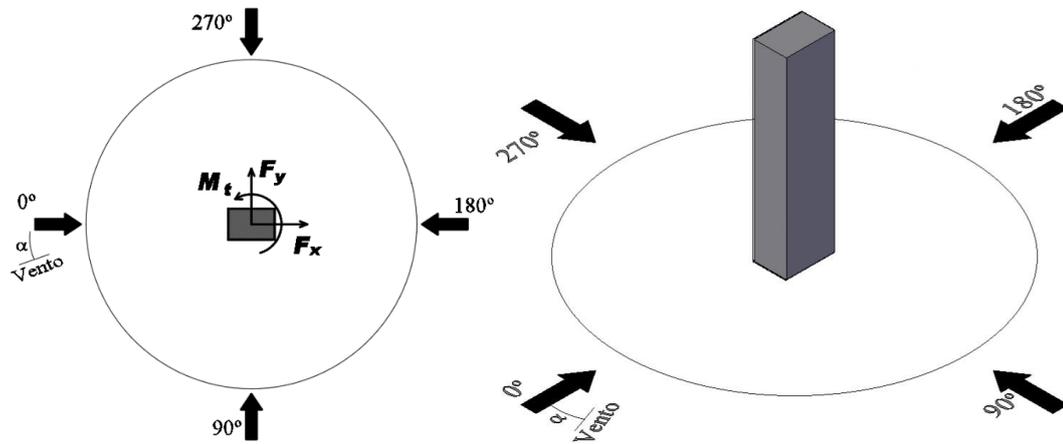
Dimensões em [mm]

(fonte: elaborado pelo autor)

As pressões em cada tomada foram adquiridas utilizando transdutores elétricos de pressão da marca *Scanivalve* a uma taxa de aquisição de aproximadamente 500 Hz durante 16 segundos, totalizando 8.192 medidas de pressão por tomadas para cada aquisição.

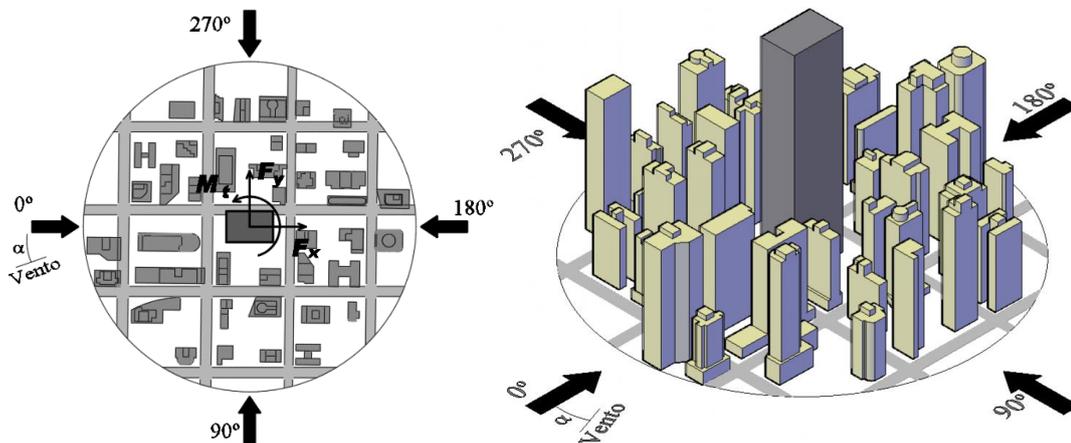
Foram ensaiados 24 ângulos de incidência do vento variando de 0° a 345° para as Configurações A e B já mencionadas e para a situação de modelo isolado utilizando os dois perfis de vento natural cujos expoentes na equação 1 são iguais a $p = 0,11$ e $p = 0,26$. As referências para ângulos de incidência do vento para as diferentes configurações de vizinhança são mostradas na Figura 32 à Figura 34.

Figura 32 - Referência de ângulo de incidência do vento - Isolado



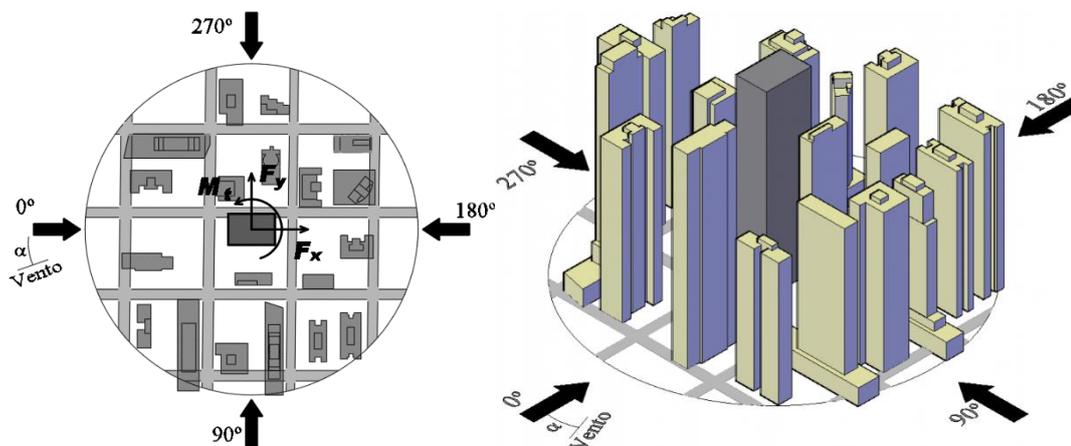
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 33 - Referência de ângulo de incidência do vento - Configuração A



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 34 - Referência de ângulo de incidência do vento - Configuração B



(fonte: elaborado pelo autor)

A partir dos registros das séries temporais das pressões devidas ao vento, foram calculados os coeficientes de pressão externa média nas faces do modelo, definidos pela equação 16:

$$\bar{c}_p = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad \text{equação 16}$$

Onde:

\bar{c}_p	coeficiente de pressão média;
$p(t)$	pressão instantânea na superfície da edificação, medida em relação à pressão estática de referência;
t	tempo;
T	período de amostragem;
q	pressão dinâmica de referência.

Os coeficientes de pressão média calculados permitem a determinação de coeficientes de forma externos através da integração numérica, aplicáveis a uma superfície plana de área A , sendo definidos pelo desenvolvimento da equação 17:

$$C_e = \frac{F}{q \cdot A} = \frac{1}{q \cdot A} \int_A \bar{c}_p q dA = \frac{1}{A} \int_A \bar{c}_p dA \quad \text{equação 17}$$

Onde:

C_e	coeficiente de forma externo;
F	força resultante;
q	pressão dinâmica;
A	área de influência.

Sendo assim, o coeficiente de forma externo pode ser decomposto em dois coeficientes de força globais nas direções X e Y, conforme equação 18:

$$C_{x,y} = \frac{F_{x,y}}{q \cdot B_{x,y} \cdot H} \quad \text{equação 18}$$

Onde:

- $C_{x,y}$ coeficiente de força nas direções x e y ;
 $F_{x,y}$ força resultante em x e y ;
 q pressão dinâmica de referência;
 $B_{x,y}$ dimensão de referência em x e y ($B_x = 45,72 \text{ m}$ e $B_y = 30,48 \text{ m}$);
 H altura de referência ($H = 182,88 \text{ m}$).

Da mesma forma, é possível calcular o coeficiente de torção de acordo com a equação 19:

$$C_t = \frac{M_t}{q \cdot B_x \cdot B_y \cdot H} \quad \text{equação 19}$$

Onde:

- C_t coeficiente de torção;
 $M_t = F \cdot e$ momento torçor em relação ao ponto de origem dos eixos x e y ;
 e excentricidade em relação ao ponto de origem dos eixos x e y ;
 q pressão dinâmica;
 $B_{x,y}$ dimensão de referência em x e y ($B_x = 45,72 \text{ m}$ e $B_y = 30,48 \text{ m}$);
 H altura de referência ($H = 182,88 \text{ m}$).

Para o cálculo dos coeficientes aerodinâmicos definidos nas equação 16 a equação 19, a pressão dinâmica de referência q foi determinada a partir da velocidade média do vento na altura do topo do modelo de forma indireta. Utilizando um micro manômetro eletrônico, foram feitas medidas da diferença de pressão estática entre dois anéis piezométricos posicionados nos extremos do convergente, no começo da câmara de ensaios. Então, através da equação 20, foi possível calcular a pressão dinâmica na altura de interesse.

$$q = k_0 \cdot \Delta Pa \quad \text{equação 20}$$

Onde:

q pressão dinâmica;

k_0 fator que relaciona a pressão dinâmica no local de interesse com a diferença de pressão entre os anéis piezométricos no túnel de vento;

ΔPa diferença de pressão estática medida entre os anéis piezométricos situados nos extremos do convergente do túnel de vento.

Barlow et al. (1999) explicam que a relação de bloqueio, definida como a área projetada do modelo e sua vizinhança em estudo e a área da seção transversal do túnel de vento, deve ser menor que 10%. O efeito de compressão do escoamento das paredes do túnel de vento com relações de bloqueio muito altas leva a padrões do vento não verdadeiramente representativos em escala real. Nos casos em que a relação de bloqueio supere 10%, devem ser feitas correções de bloqueio para a pressão dinâmica medida durante os ensaios, conforme a equação 21 a seguir.

$$q_c = q \cdot \left(1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{A_b}{A_t}\right)^2 \quad \text{equação 21}$$

Onde:

q_c pressão dinâmica corrigida pela relação de bloqueio;

q pressão dinâmica;

A_b área frontal do modelo e vizinhança;

A_t área da seção transversal do túnel de vento.

As áreas frontais de bloqueio de cada configuração de ensaio foram determinadas utilizando o software AutoCAD. Assim, sabendo as dimensões da seção transversal do túnel de vento (1300x900 mm), as relações de bloqueio foram calculadas e são apresentadas na Tabela 2 a seguir. Com esses valores foi possível fazer as devidas correções da pressão dinâmica quando a relação de bloqueio supera 10%.

Tabela 2 - Relações de bloqueio por configuração de ensaio

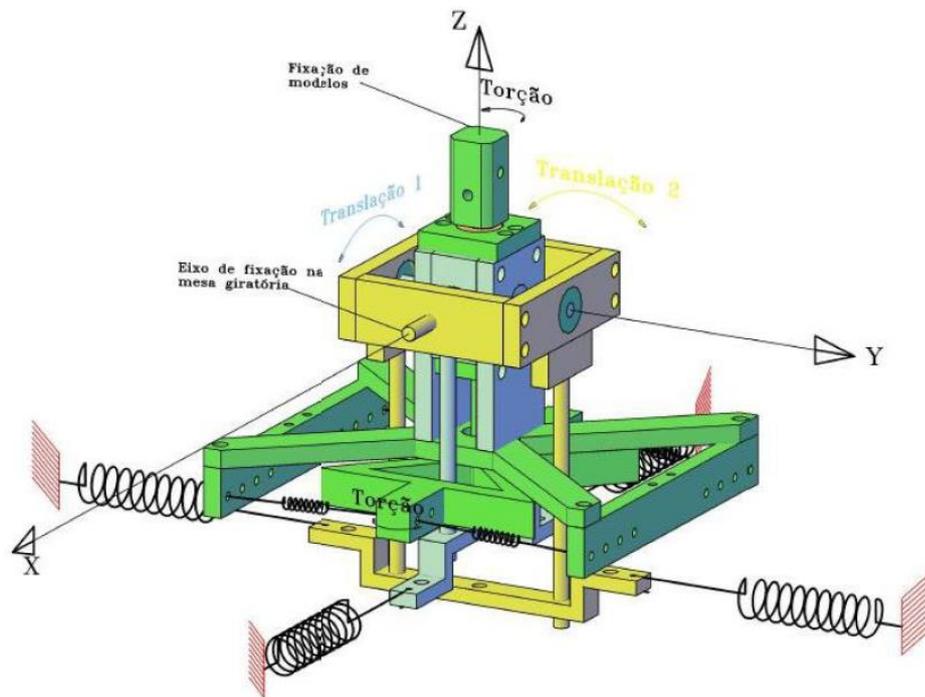
Ângulo de incidência do vento	Isolado	Configuração A	Configuração B
0°	2,9%	11,7%	21,0%
15°	3,9%	15,4%	24,3%
30°	4,7%	16,5%	25,4%
45°	5,1%	16,3%	25,6%
60°	5,2%	16,2%	25,1%
75°	4,9%	17,3%	22,7%
90°	4,3%	15,3%	19,1%
105°	4,9%	17,6%	23,7%
120°	5,2%	16,7%	24,9%
135°	5,1%	16,5%	24,8%
150°	4,7%	15,9%	25,2%
165°	3,9%	14,8%	23,1%
180°	2,9%	11,7%	21,0%
195°	3,9%	15,4%	24,3%
210°	4,7%	16,5%	25,4%
225°	5,1%	16,3%	25,6%
240°	5,2%	16,2%	25,1%
255°	4,9%	17,3%	22,7%
270°	4,3%	15,3%	19,1%
285°	4,9%	17,6%	23,7%
300°	5,2%	16,7%	24,9%
315°	5,1%	16,5%	24,8%
330°	4,7%	15,9%	25,2%
345°	3,9%	14,8%	23,1%

(fonte: elaborado pelo autor)

3.6 ENSAIOS DINÂMICOS

Os ensaios dinâmicos foram realizados utilizando a balança dinâmica de três graus de liberdade (BD3GDL) desenvolvida por Oliveira (2009). Este equipamento permite a determinação da resposta do edifício em termos de suas componentes médias e flutuantes para deslocamentos longitudinais, transversais e torcionais do edifício estudado. A BD3GDL, ilustrada na Figura 35, possui dois graus de liberdade em flexão, admitidos ortogonais entre si e aproximados de forma linear, e um grau de liberdade em torção, aproximado de forma constante.

Figura 35 - Balança dinâmica de três graus de liberdade



(fonte: OLIVEIRA, 2009)

A BD3GDL permite o ajuste do momento de inércia de massa, da rigidez rotacional e do amortecimento estrutural de cada um dos três movimentos, independentemente. O ajuste dos momentos de inércia de massa é feito através da adição de massas e da regulação da distância dessas massas em relação ao centro de giro no mecanismo de cada grau de liberdade. O ajuste da rigidez rotacional de cada grau de liberdade é feito através da escolha da constante elástica das molas de tração utilizada para cada movimento. O amortecimento para os movimentos de translação é regulado através da imersão de pás (fixadas no mecanismo de cada movimento) em líquido de viscosidade adequada, enquanto para o ajuste do amortecimento da torção utilizou-se uma fita adesiva fixando a parte móvel da balança responsável pelo movimento de torção a uma parte fixa do equipamento.

Para a medição dos deslocamentos foram utilizados três sensores ópticos de posição biaxiais fixados a balança, enquanto o sistema de iluminação que incide sobre os sensores é proveniente de diodos emissores de luz.

O sistema de aquisição de dados foi o mesmo utilizado por Oliveira (2009). O sinal elétrico de tensão gerado pelos sensores ópticos de posição durante o ensaio foi submetido a um

condicionador de sinal, no qual o sinal foi filtrado e amplificado vinte vezes. O sinal elétrico amplificado foi, então, adquirido em um computador equipado com uma placa de aquisição de dados.

Para a aquisição do sinal, utilizou-se um programa no sistema de aquisição de dados *LabView*. Este programa foi desenvolvido pelo LAC e permite a aquisição do sinal em três canais (um para cada sensor óptico), com período e taxa de aquisição ajustáveis. Nos ensaios realizados neste trabalho foi utilizada uma taxa de 1024 Hz para um tempo de aquisição de 64 segundos.

Os ensaios dinâmicos foram realizados para os quatro ângulos de incidência do vento perpendiculares às fachadas do edifício, 0°, 90°, 180° e 270°. E, assim como os ensaios estáticos, foram utilizadas as Configurações A e B de vizinhança, além da situação de modelo isolado, para os dois perfis de vento natural com $p = 0,11$ e $p = 0,26$.

A velocidade média do vento durante os ensaios foi determinada utilizando a mesma metodologia para cálculo da pressão dinâmica na equação 20. Além das medidas da diferença de pressão estática entre os dois anéis piezométricos, também foram adquiridas durante os ensaios medidas de temperatura do escoamento e de pressão atmosférica. Com isso, utilizando a equação 22 a seguir, foi possível calcular a velocidade média do vento na altura de interesse.

$$\bar{V} = \sqrt{\frac{2 \cdot k_0 \cdot \Delta Pa \cdot (273,15 + T_{túnel})}{0,0474 \cdot P_{atm}}} \quad \text{equação 22}$$

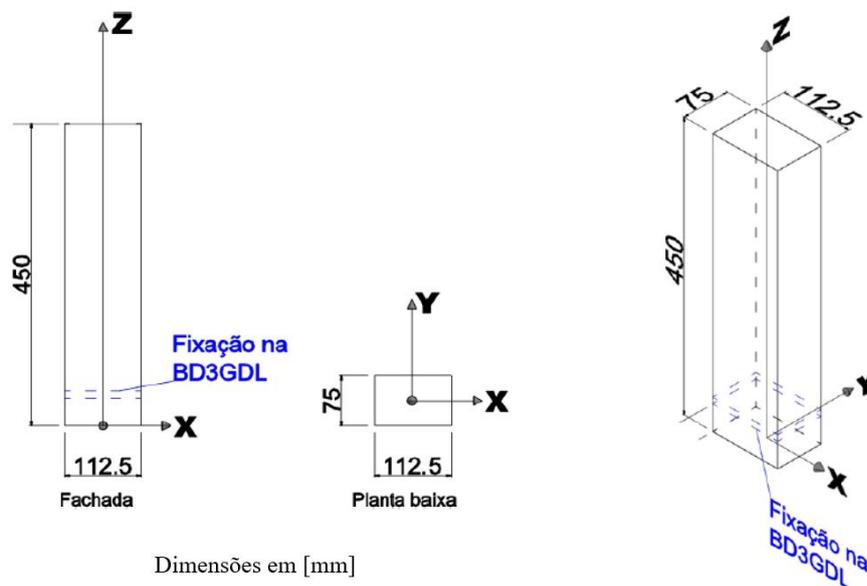
Onde:

\bar{V}	velocidade média do vento [m/s];
k_0	fator que relaciona a pressão dinâmica no local de interesse com a diferença de pressão entre os anéis piezométricos no túnel de vento [adim];
ΔPa	diferença de pressão estática medida entre os anéis piezométricos situados nos extremos do convergente do túnel de vento [mmH ₂ O];
$T_{túnel}$	temperatura do escoamento no túnel de vento [°C];
P_{atm}	pressão atmosférica [mmHg].

3.6.1 Modelo construído

O modelo utilizado para a realização dos ensaios deste trabalho foi o mesmo utilizado por Oliveira (2009) e Bênia (2013). As chapas coladas entre si que formam o modelo são de madeira compensada de pinho coladas com espessura de 3 mm. O modelo foi fixado à BD3GDL por uma chapa embutida na base do modelo. A Figura 36 mostra as dimensões do modelo, os eixos adotados e sua posição de fixação.

Figura 36 - Modelo do CAARC *Standard Tall Building* e sua fixação à BD3GDL



Dimensões em [mm]

(fonte: OLIVEIRA, 2009)

3.6.2 Projeto do modelo dinâmico

Oliveira (2009) explica que para a modelagem aeroelástica em túnel de vento deve-se simular o escoamento do vento natural e as relações de características geométricas e dinâmicas das estruturas dos edifícios real e do modelo, essas relações são chamadas fatores de escala.

3.6.2.1 Escala de comprimento

A escala de comprimento é a razão entre o comprimento do modelo e o comprimento do edifício em escala real e é dada pela equação 23. No modelo construído foi adotado um fator de escala de comprimento de 1:406,4, conforme mencionado anteriormente.

$$\lambda_L = \frac{L_m}{L_p} = \frac{1}{406,4} \quad \text{equação 23}$$

Onde:

- λ_L escala de comprimento;
 L_m dimensão do modelo;
 L_p dimensão do edifício em escala real.

3.6.2.2 Escala de momento de inércia de massa

A escala de massa é determinada pela razão entre a massa do modelo e a massa do edifício em escala real. Porém, a massa do modelo construído não foi representada em escala, optou-se por simular o momento de inércia de massa em escala. *American Society of Civil Engineer* (1987 *apud* OLIVEIRA, 2009)⁵ explica que para técnicas que utilizam modelos rígidos em torno da base não é necessário simular a massa e sua distribuição em escala, basta simular o momento de inércia de massa em torno de qualquer eixo em que possa ocorrer a rotação em escala correta. A escala de momento de inércia de massa é dada pela equação 24.

$$\lambda_{Im} = \left(\frac{\rho_m \cdot L_m^5}{\rho_p \cdot L_p^5} \right) = \lambda_\rho \cdot \lambda_L^5 = \frac{1}{1,109 \times 10^{13}} \quad \text{equação 24}$$

Onde:

- λ_{Im} escala de momento de inércia de massa;
 ρ_m massa específica no modelo;
 ρ_p massa específica no edifício em escala real;
 λ_ρ escala de massa específica.

⁵ AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Wind Tunnel Model Studies of Buildings and Structures. **ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 67**. New York: 1987.

O momento de inércia de massa do edifício em escala real foi calculado por Oliveira (2009). Aplicando-se o fator da escala de momento de inércia de massa, obtém-se o momento de inércia de massa para os três eixos do modelo.

$$\lambda_{Imx} = \frac{457.745.475.861 \text{ kg}, m^2}{1,109 \times 10^{13}} = 4,14 \times 10^{-5} \text{ kg}, m^2$$

$$\lambda_{Imy} = \frac{461.691.557.550 \text{ kg}, m^2}{1,109 \times 10^{13}} = 4,17 \times 10^{-5} \text{ kg}, m^2$$

$$\lambda_{Imz} = \frac{10.259.812.390 \text{ kg}, m^2}{1,109 \times 10^{13}} = 9,28 \times 10^{-7} \text{ kg}, m^2$$

3.6.2.3 Escala de frequência

A escala de frequência é dada pela razão entre a frequência do modelo e frequência do edifício em escala real, conforme equação 25.

$$\lambda_f = \frac{f_m}{f_p} \quad \text{equação 25}$$

Onde:

- λ_f escala de frequência;
- f_m frequência no modelo;
- f_p frequência no edifício em escala real.

Oliveira (2009) explica que a escolha de escala de frequência é livre. Entretanto, a frequência do modelo depende diretamente do momento de inércia de massa do modelo, do número de molas utilizadas no mecanismo da BD3GDL, da rigidez e posição de instalação das molas. Assim sendo, devido à faixa de velocidade possível de ser ensaiada no túnel de vento e características das molas, determinou-se que as frequências em torno dos eixos X e Y deveriam ser 7 Hz e 11 Hz em torno do eixo Z.

Ainda conforme Oliveira (2009), a rigidez rotacional K_θ de cada grau de liberdade depende do número de molas de tração utilizado, da constante elástica de cada uma dessas molas e da geometria do mecanismo, sendo determinada pela soma das rigidezes rotacionais fornecidas para cada mola componente do movimento em questão. Assim, sabendo o número de molas utilizadas em cada grau de liberdade, determina-se a constante elástica das molas a serem utilizadas. A dedução e o desenvolvimento da equação 26, a seguir, é explicada por Oliveira (2009) em seu trabalho.

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{N \cdot r^2 \cdot K}{I_m}} \quad \text{equação 26}$$

Onde:

f_m	frequência do modelo;
N	número de molas utilizadas;
r	distância perpendicular entre o vetor da força da mola e o centro de giro;
K	constante elástica da mola;
I_m	momento de inércia de massa do modelo.

Assim, sabendo que seriam utilizadas duas molas para os movimentos em torno dos eixos X e Y e quatro molas para o movimento em torno do eixo Z; e que a distância r para os movimentos em X e Y é igual a 92,9 mm e 55 mm para a torção, a rigidez das molas necessárias para a realização dos ensaios pode ser determinada.

Para este trabalho, foram utilizadas as molas encomendadas pelo Prof. José Luis Vital de Brito da UnB à empresa TECNOMOLA. Segundo os laudos de fabricação das molas, exibidos na Figura 37 e na Figura 38, a constante elástica média das molas usadas em torno dos eixos X e Y ficou em torno de 0,46 kgf/mm (4511,1 N/m). Para as molas do movimento em torno do eixo Z o valor ficou em torno de 0,033325 kgf/mm (326,8 N/m).

Figura 37 - Laudo de fabricação das molas utilizadas - Eixos X e Y

TECNOMOLA		RELATÓRIO DE INSPEÇÃO DE AMOSTRA	GQ 035
			50117 / 2018
DADOS GERAIS			
CLIENTE:	JOSE LUIS VITAL DE BRITO		RELAT. Nº: 50117 / 2018
DESENHO:	21315-1,80x11,3x89	Rev.: -	NOTA FISCAL Nº: 53313
REF. TECNOMOLA:	FV 155281		DATA ENTREGA: 20/03/18
ORDEM DE COMPRA:	E-MAIL		QUANTIDADE: 12 pçs
MATÉRIA-PRIMA			
PROCEDÊNCIA:		BELGO BEKAERT ARAMES LTDA	CORRIDA: D833900 (Seq.76853)
DIMENSIONAL			
CARACTERÍSTICA		ESPECIFICADO	ENCONTRADO
(1) Ø DO ARAME	(mm)	1,8	1,8
(2) NORMA DO MATERIAL		AÇO MOLA	AÇO MOLA (DIN 17223/ C)
(3) DIÂMETRO EXTERNO	(mm)	11,3	11,2 - 11,3
(4) COMPRIMENTO LO	(mm)	89	88,4 - 88,9
(5) ESPIRAS TOTAIS	(mm)	27	27
(6) CONSTANTE ELÁSTICA	(Kgf/mm)	0,474 ± 10%	0,41 - 0,51
(7) ACABAMENTO		OLEADO	OLEADO
VISUAL			
CÓDIGO INTERNO:		155281	TIPO DE MOLA: TRAÇÃO

(fonte:elaborado pelo autor)

Figura 38 - Laudo de fabricação das molas utilizadas - Eixo Z

TECNOMOLA		RELATÓRIO DE INSPEÇÃO DE AMOSTRA	GQ 035
			50118 / 2018
DADOS GERAIS			
CLIENTE:	JOSE LUIS VITAL DE BRITO		RELAT. Nº: 50118 / 2018
DESENHO:	21314-0,9x10,8x35,2	Rev.: -	NOTA FISCAL Nº: 53313
REF. TECNOMOLA:	FV 155298		DATA ENTREGA: 20/03/18
ORDEM DE COMPRA:	E-MAIL		QUANTIDADE: 12 pçs
MATÉRIA-PRIMA			
PROCEDÊNCIA:		BELGO BEKAERT ARAMES LTDA	CORRIDA: C574405 (Seq.68914)
DIMENSIONAL			
CARACTERÍSTICA		ESPECIFICADO	ENCONTRADO
(1) Ø DO ARAME	(mm)	0,9	0,9
(2) NORMA DO MATERIAL		AÇO MOLA	AÇO MOLA (DIN 17223/ C)
(3) DIÂMETRO EXTERNO	(mm)	10,8	10,8 - 10,9
(4) COMPRIMENTO LO	(mm)	35,2	35,3 - 35,8
(5) ESPIRAS TOTAIS	(mm)	18	19
(6) CONSTANTE ELÁSTICA	(Kgf/mm)	0,0339 ± 10%	0,0331 - 0,0334
(7) ACABAMENTO		OLEADO	OLEADO
VISUAL			
CÓDIGO INTERNO:		155298	TIPO DE MOLA: TRAÇÃO

(fonte:elaborado pelo autor)

A frequência de cada grau de liberdade pode, finalmente, ser calculada considerando as constantes elásticas das molas fabricadas, os braços de alavanca das forças aplicadas pelas molas e os valores de momento de inércia de massa para o modelo nos eixos X, Y e Z.

$$f_x = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2 \cdot (0,0929)^2 \cdot 4511,1 \text{ N/m}}{0,041291 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}} = 6,91 \text{ Hz}$$

$$f_y = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2 \cdot (0,0929)^2 \cdot 4511,1 \text{ N/m}}{0,041647 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}} = 6,88 \text{ Hz}$$

$$f_z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4 \cdot (0,055)^2 \cdot 326,8 \text{ N/m}}{0,000925 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}} = 10,41 \text{ Hz}$$

Assim, foi possível calcular as escalas de frequência em torno de cada eixo:

$$\lambda_{fx} = \frac{f_{mx}}{f_{px}} = \frac{6,91}{0,2} = 34,56 \quad \lambda_{fy} = \frac{f_{my}}{f_{py}} = \frac{6,88}{0,2} = 34,41 \quad \lambda_{fz} = \frac{f_{mz}}{f_{pz}} = \frac{10,41}{0,3} = 34,69$$

3.6.2.4 Escala de tempo

A escala de tempo é, simplesmente, o inverso da escala de frequência, conforme equação 27.

$$\lambda_T = \frac{1}{\lambda_f} \quad \text{equação 27}$$

Onde:

λ_T escala de tempo.

Assim, para cada grau de liberdade, a escala de tempo pode ser calculada:

$$\lambda_{Tx} = \frac{1}{\lambda_{fx}} = \frac{1}{34,56} = 0,0289 \quad \lambda_{Ty} = \frac{1}{\lambda_{fy}} = \frac{1}{34,41} = 0,0291 \quad \lambda_{Tz} = \frac{1}{\lambda_{fz}} = \frac{1}{34,69} = 0,0288$$

3.6.2.5 Escala de velocidade

A escala de velocidade é determinada, após análise dimensional, pelo produto da escala de comprimento pela escala de frequências conforme equação 28.

$$\lambda_V = \frac{V_m}{V_p} = \frac{L_m/t_m}{L_p/t_p} = \frac{\lambda_L}{\lambda_T} = \lambda_L \cdot \lambda_f \quad \text{equação 28}$$

Onde:

- λ_V escala de velocidade;
- V_m velocidade no modelo;
- V_p velocidade no edifício em escala real.

A escala de velocidade para cada grau de liberdade pode, então, ser calculada:

$$\lambda_{Vx} = \lambda_L \cdot \lambda_{fx} = \frac{1}{406,4} \cdot 34,56 = 0,0850$$

$$\lambda_{Vy} = \lambda_L \cdot \lambda_{fy} = \frac{1}{406,4} \cdot 34,41 = 0,0847$$

$$\lambda_{Vz} = \lambda_L \cdot \lambda_{fz} = \frac{1}{406,4} \cdot 34,69 = 0,0854$$

3.6.2.6 Escala de amortecimento

A razão de amortecimento crítico, por se tratar de uma grandeza adimensional, deve ser igual tanto do modelo quando do edifício em escala real, ou seja, $\zeta_m = \zeta_p$. Assim, como a razão de amortecimento crítico do edifício *CAARC Standard Tall Building* é igual a 1%, o modelo deve ter o mesmo valor.

3.6.3 Ajuste das frequências e amortecimento

As frequências em cada grau de liberdade são determinadas através de ensaios de vibração livre com aplicação de cargas do tipo impulso na direção de cada grau de liberdade e a medição da frequência pelo programa de aquisição de dados. O ajuste das frequências é feito através da regulagem do momento de inércia de massa do modelo em torno de cada eixo. Esse ajuste é feito adicionando ou retirando massa do mecanismo da BD3GDL até chegar a valores de frequências próximos dos determinados no item 3.6.2.3.

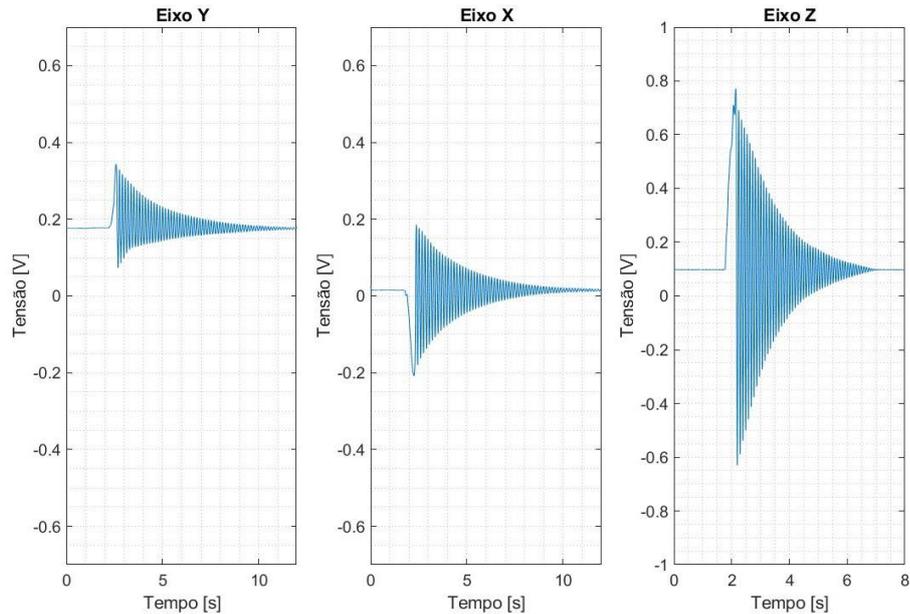
Assim como para as frequências, o amortecimento é determinado a partir da razão do amortecimento crítico através de ensaios de vibração livre do modelo com cargas do tipo impulso em cada grau de liberdade. O cálculo da razão de amortecimento crítico é feito com base na envoltória da variação temporal dos deslocamentos medidos. Utilizando uma rotina desenvolvida em MATLAB pelo LAC, uma curva do tipo da equação 29 foi ajustada à envoltória para determinação do coeficiente b , que representa o produto da razão de amortecimento crítico ξ pela frequência angular ω_n .

$$y(t) = a \cdot e^{-bt} \quad \text{equação 29}$$

O ajuste do amortecimento foi feito através da imersão de pás fixadas ao mecanismo da BD3GDL em um recipiente com óleo, simulando um amortecimento viscoso. Foram encontrados valores satisfatórios de amortecimento apenas elevando o nível de óleo no recipiente até certo nível das pás utilizadas por Oliveira (2009) e Bênia (2013), sem a necessidade de alteração no tamanho ou formato das pás.

Após serem ajustadas as frequências e os amortecimentos, foram feitos cinco ensaios de vibração livre para a determinação da média dos valores. Um exemplo da aquisição de vibração livre em cada grau de liberdade é mostrado na Figura 39. Na Tabela 3, a seguir, são mostradas as frequências e as razões de amortecimento crítico medidas.

Figura 39 - Registro de vibração livre



(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 3 - Frequências e razões de amortecimento crítico medidos

Ensaio Vibração Livre	Eixo X		Eixo Y		Eixo Z	
	f_x [Hz]	ζ_x [%]	f_y [Hz]	ζ_y [%]	f_z [Hz]	ζ_z [%]
1	6,82	0,89	6,71	0,95	10,75	1,02
2	6,90	0,99	6,82	0,71	10,75	1,12
3	6,87	1,02	6,75	0,74	10,73	1,11
4	6,89	0,89	6,69	0,83	10,75	0,94
5	6,90	0,91	6,76	0,91	10,76	1,01
Média	6,88	0,94	6,75	0,83	10,75	1,04

(fonte: elaborado pelo autor)

3.6.4 Calibração dos sensores ópticos

Os dados adquiridos durante os ensaios foram processados em rotinas no software MATLAB. Este processamento converte o sinal elétrico em deslocamentos horizontais (eixos X e Y) e angulares (eixo Z) no topo do modelo, considerando funções de transferência obtidas na calibração da BD3GDL. Estas funções são conhecidas através da calibração de cada sensor óptico medindo deslocamentos conhecidos impostos no topo do modelo utilizando um relógio comparador. Foram feitas aquisições de 2 segundos para cada deslocamento conhecido, a uma taxa de aquisição 1.024 Hz. A função linear de melhor ajuste para esses pontos é a função de

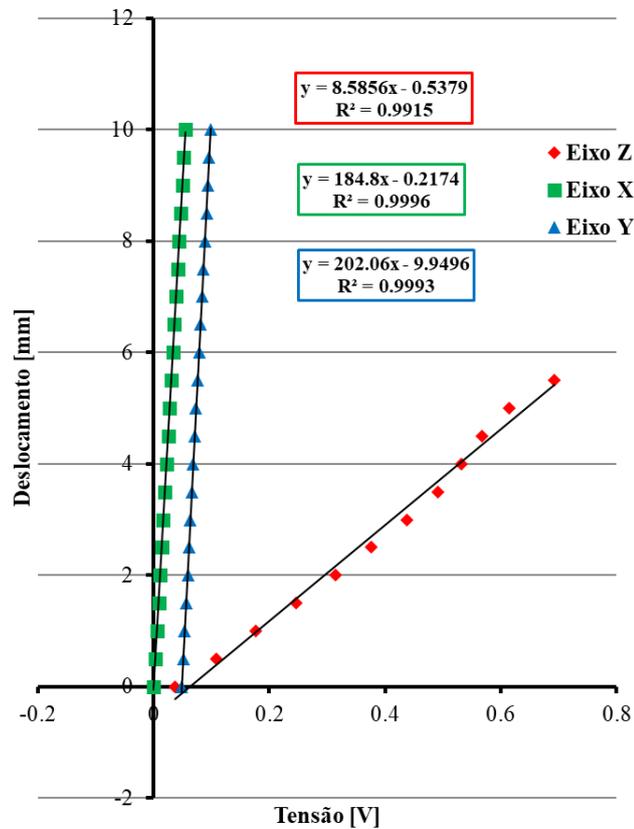
transferência para cada sensor óptico. A Figura 40 mostra o sistema utilizado na calibração dos sensores ópticos e a Figura 41, a seguir, mostra as curvas de calibração de cada sensor para cada eixo.

Figura 40 - Sistema utilizado na calibração dos sensores ópticos



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 41 - Curvas de calibração dos sensores ópticos



(fonte: elaborado pelo autor)

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios estáticos e dinâmicos para as configurações A e B de vizinhança, além do modelo isolado, para os dois tipos de vento simulado, $p = 0,11$ e $p = 0,26$.

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS ESTÁTICOS

Nos itens a seguir serão apresentados os coeficientes de pressão média, os coeficientes de força global e coeficientes de torção calculados para 24 ângulos de incidência do vento.

4.1.1 Coeficientes de pressão

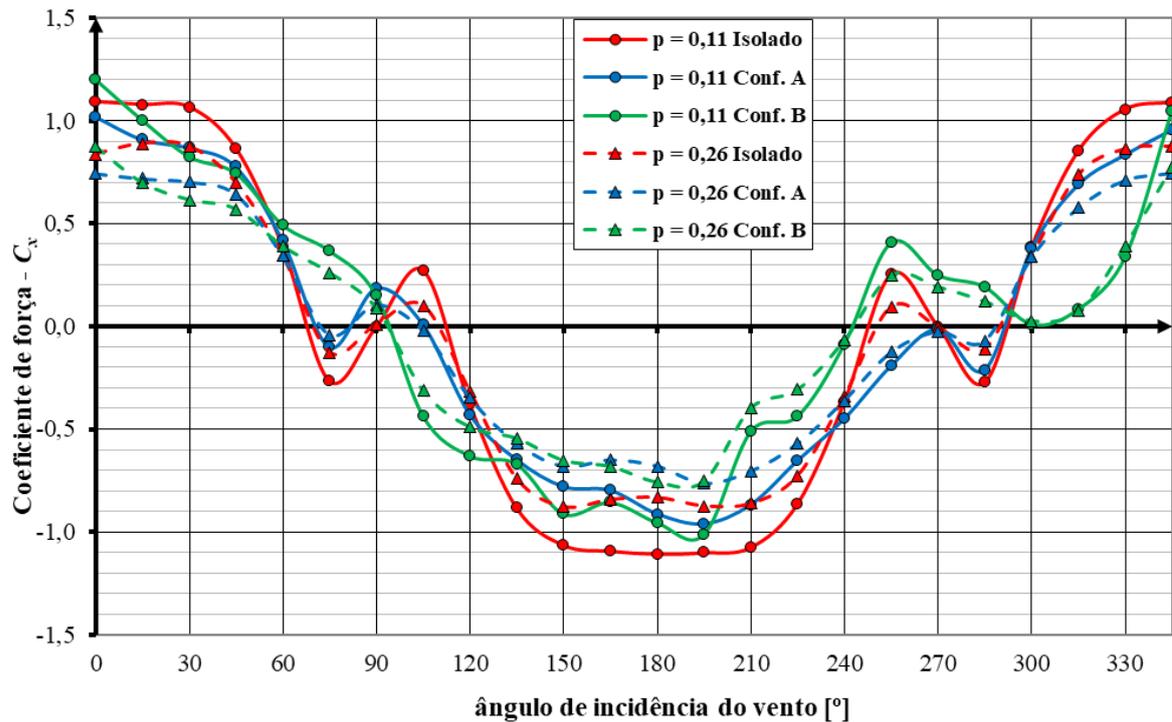
Os coeficientes de pressão média \bar{c}_p para cada tomada de pressão foram calculados utilizando a equação 16. As distribuições dos coeficientes de pressão médios nas fachadas do CAARC para cada uma das configurações de vizinhança e ângulo de incidência do vento são apresentadas nos Apêndices, conforme a seguir:

- a) **APÊNDICE A:** Distribuição dos coeficientes de pressão média para o modelo isolado e vento incidente com expoente $p = 0,11$;
- b) **APÊNDICE B:** Distribuição dos coeficientes de pressão média para o modelo isolado e vento incidente com expoente $p = 0,26$;
- c) **APÊNDICE C:** Distribuição dos coeficientes de pressão média para a Configuração A de vizinhança e vento incidente com expoente $p = 0,11$;
- d) **APÊNDICE D:** Distribuição dos coeficientes de pressão média para a Configuração A de vizinhança e vento incidente com expoente $p = 0,26$;
- e) **APÊNDICE E:** Distribuição dos coeficientes de pressão média para a Configuração B de vizinhança e vento incidente com expoente $p = 0,11$;
- f) **APÊNDICE F:** Distribuição dos coeficientes de pressão média para a Configuração B de vizinhança e vento incidente com expoente $p = 0,26$;

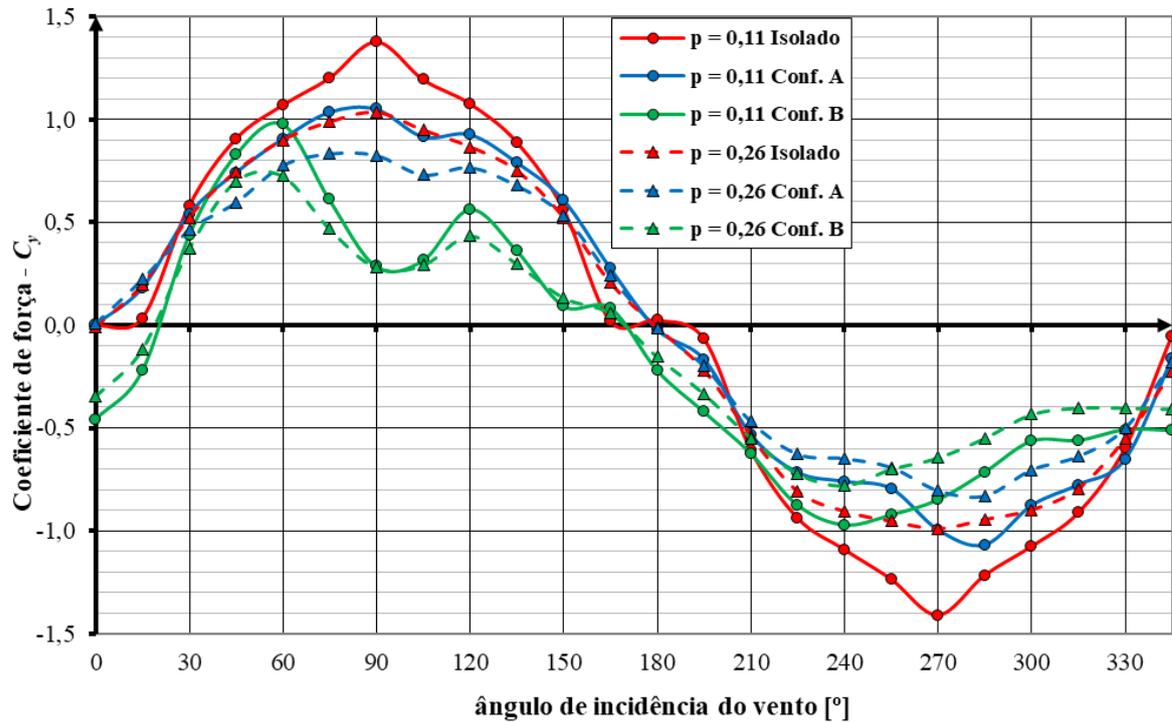
4.1.2 Coeficientes de força

A partir dos ensaios, também foram calculados os coeficientes de forças em duas direções C_x e C_y para as configurações de ensaios utilizando a equação 18. Os resultados dos coeficientes de força obtidos nos ensaios são apresentados no APÊNDICE G e mostrados pelas Figura 42 e Figura 43 a seguir.

Figura 42 - Coeficientes de força C_x por ângulo de incidência do vento



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 43 - Coeficientes de força C_y por ângulo de incidência do vento

(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando os coeficientes de força C_x , observa-se uma coerência no sentido que, para todas as configurações de vizinhança e situação de modelo isolado, os valores absolutos de coeficientes de força para o vento simulado incidente mais turbulento (expoente $p = 0,26$) são ligeiramente menores que para o vento natural incidente mais suave (expoente $p = 0,11$) se comparados com as mesmas configurações de vizinhança para ambos os ventos incidentes.

Assim como nos coeficientes de força C_x , há uma coerência nos valores de coeficientes de força C_y a respeito da influência do vento simulado incidente, quanto mais turbulento o vento incidente, menor o valor do coeficiente de força em módulo se comparado com a mesma configuração de vizinhança.

Para a análise dos fatores de vizinhança, os valores representativos de coeficientes de força globais foram admitidos a partir do maior registro de coeficientes de força para cada configuração de vizinhança e tipo de vento incidente (expoente $p = 0,11$ ou expoente $p = 0,26$); e então foram comparados com o registro de coeficiente de força para o mesmo ângulo de incidência do vento da configuração isolado.

A seguir são apresentados, na Tabela 4, os valores representativos obtidos de C_x e C_y nos ensaios da Configuração A e modelo isolado para os ventos incidentes com expoente $p = 0,11$ e expoente $p = 0,26$, os ângulos de incidência do vento em que ocorrem e o fator de vizinhança calculado de acordo com a equação 15.

Tabela 4 - Valores de representativos de C_x e C_y , ângulos de ocorrência e fator de vizinhança - Configuração A

expoente p	Coeficientes de força	Configuração		ângulo de incidência do vento	FV
		Com vizinhança	Isolado		
0,11	C_x	1,02	1,09	0°	0,94
	C_y	1,07	1,22	285°	0,88
0,26	C_x	0,76	0,87	195°	0,87
	C_y	0,83	0,94	285°	0,88

(fonte: elaborado pelo autor)

A partir da metodologia de cálculo indicada pela NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988) no item 2.4.4, foi possível calcular o fator de vizinhança teórico apresentado utilizando os parâmetros na Tabela 5, adotando 20 metros como afastamento entre o edifício em estudo e o vizinho mais próximo.

Neste trabalho, optou-se por utilizar a parte da metodologia que resulta em valores de fator de vizinhança maiores ou iguais a 1,0, ainda que as configurações de vizinhança ensaiadas possuam muitos edifícios vizinhos de alturas semelhantes. Essa opção deveu-se pelo fato de os ensaios serem realizados em diversos ângulos de incidência do vento, podendo, assim haver “vazios” nas vizinhanças do edifício em estudo.

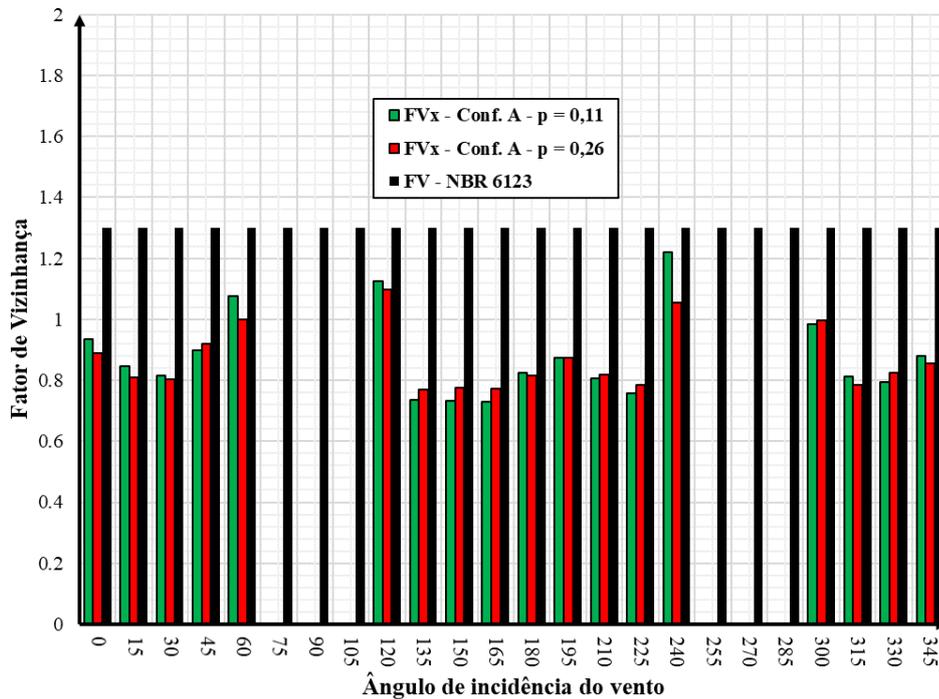
Tabela 5 - Parâmetros para cálculo do fator de vizinhança a partir da NBR 6123 - Configuração A

a [m]	b [m]	semidiagonal [m]	s [m]	d* [m]	s/d*	FV
45,72	30,48	27,47	20,00	27,47	0,728	1,30

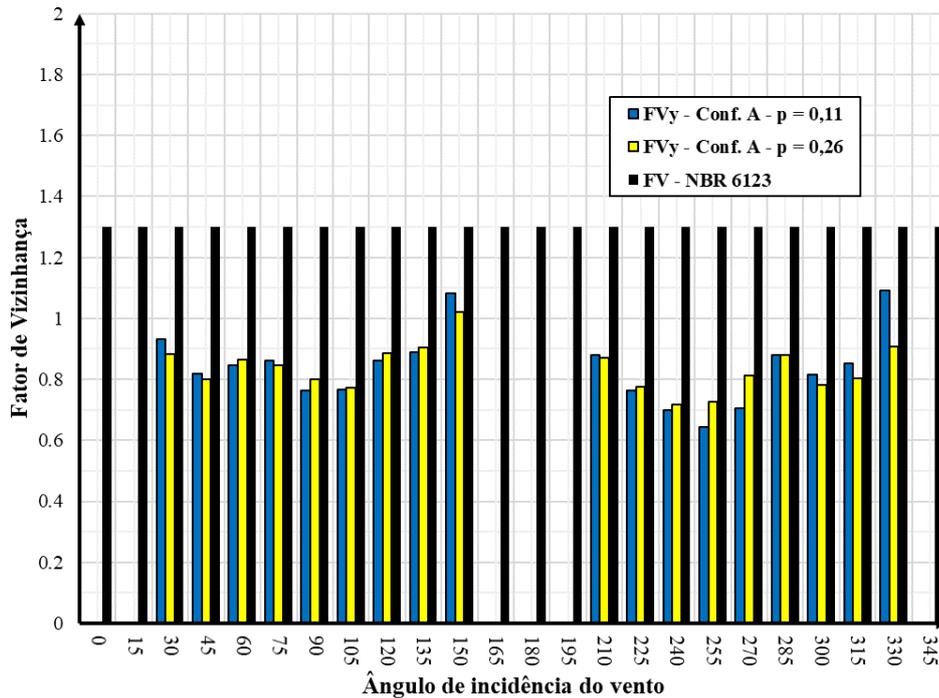
(fonte: elaborado pelo autor)

Os fatores de vizinhança calculados a partir dos ensaios realizados para cada ângulo de incidência do vento considerando a Configuração A, bem como o valor de fator de vizinhança indicado pela NBR 6123, são mostrados na Figura 44 para C_x e na Figura 45 para C_y . Valores muito elevados do fator de vizinhança não podem ser considerados por apresentarem coeficientes na configuração isolada muito próximos a zero no ângulo em análise, desta forma, não são representativos para este estudo.

Figura 44 - Fator de vizinhança para C_x por ângulo de incidência do vento – Conf. A



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 45 - Fator de vizinhança para C_y por ângulo de incidência do vento – Conf. A

(fonte: elaborado pelo autor)

Observa-se que, considerando os coeficientes de força representativos para a Configuração A de vizinhança, em grande parte dos ângulos de incidência do vento ensaiados, o fator de vizinhança é menor que 1, tanto para o coeficiente de força C_x quanto para o coeficiente de força C_y . Isso demonstra que a presença da Configuração A de vizinhança influi de forma positiva para a edificação em estudo, ocasionando uma diminuição nas cargas estáticas devidas ao vento atuantes no edifício.

A seguir são apresentados, na Tabela 6, os valores representativos obtidos de C_x e C_y nos ensaios da Configuração B e modelo isolado para os ventos incidentes com expoente $p = 0,11$ e expoente $p = 0,26$, os ângulos de incidência do vento em que ocorrem e o fator de vizinhança calculado.

Tabela 6 - Valores representativos de C_x e C_y , ângulos de ocorrência e fator de vizinhança - Configuração B

expoente p	Coeficientes de força	Configuração		ângulo de incidência do vento	FV
		Com vizinhança	Isolado		
0,11	C_x	1,20	1,09	0°	1,10
	C_y	0,98	1,07	60°	0,92
0,26	C_x	0,87	0,84	0°	1,04
	C_y	0,78	0,90	240°	0,86

(fonte: elaborado pelo autor)

A partir da metodologia de cálculo indicada pela NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988) no item 2.4.4, foi possível calcular o fator de vizinhança teórico apresentado utilizando os parâmetros na Tabela 7, adotando 13 metros como afastamento entre o edifício em estudo e o vizinho mais próximo.

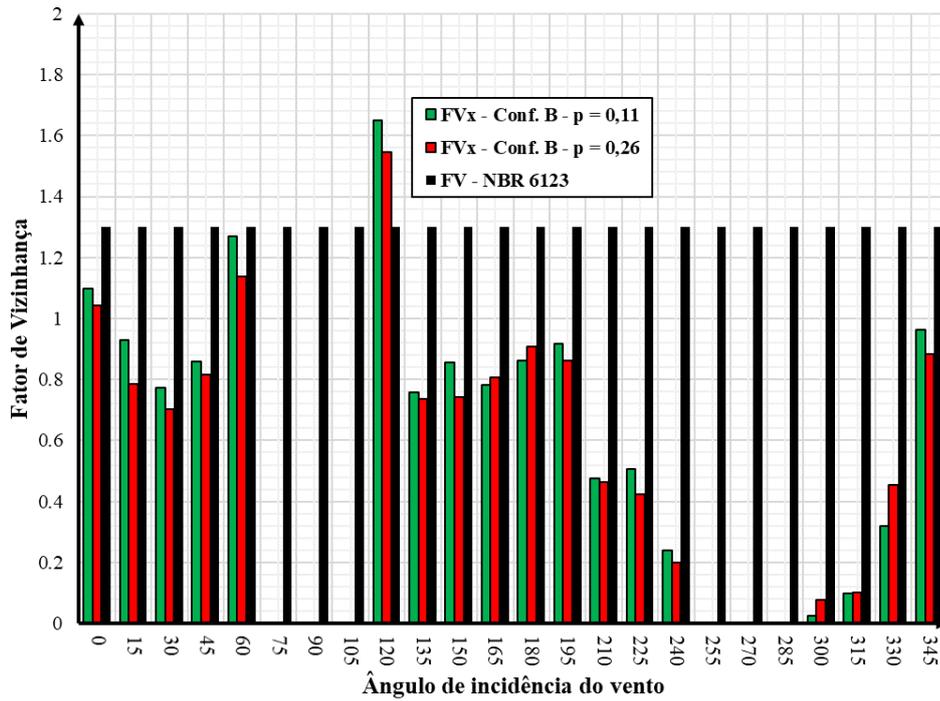
Tabela 7 - Parâmetros para cálculo do fator de vizinhança a partir da NBR 6123 - Configuração B

a [m]	b [m]	semidiagonal [m]	s [m]	d* [m]	s/d*	FV
45,72	30,48	27,47	13,00	27,47	0,473	1,30

(fonte: elaborado pelo autor)

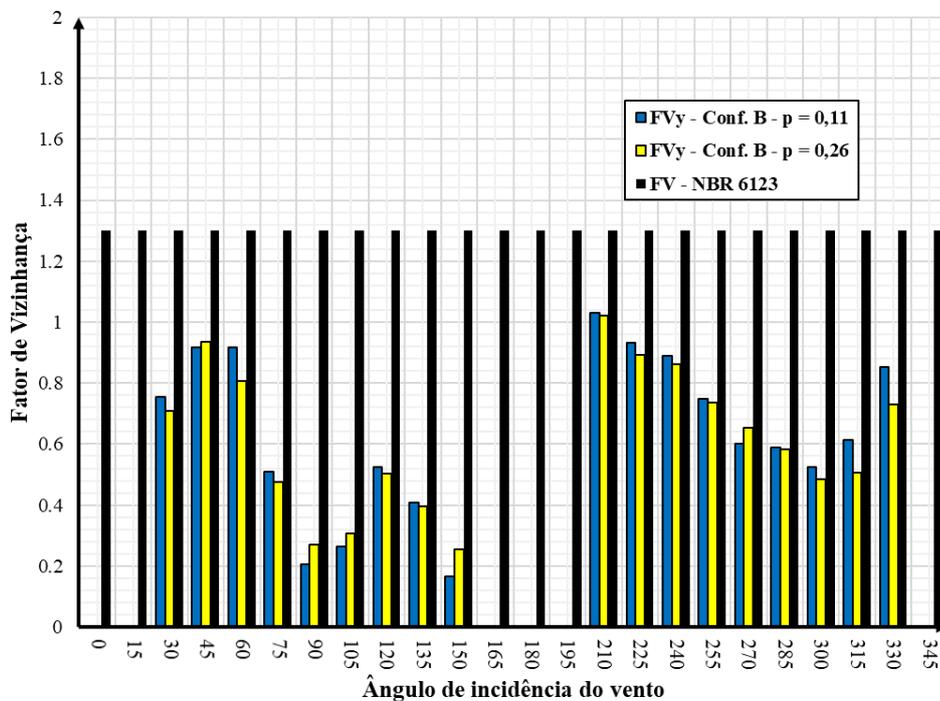
Os fatores de vizinhança calculados a partir dos ensaios realizados para cada ângulo de incidência do vento considerando a Configuração B, bem como o valor de fator de vizinhança indicado pela NBR 6123, são mostrados na Figura 46 para C_x e na Figura 47 para C_y . Valores muito elevados do fator de vizinhança não podem ser considerados por apresentarem coeficientes na configuração isolada muito próximos a zero no ângulo em análise, desta forma, não são representativos para este estudo e não serão mostrados nas figuras que mostram os fatores de vizinhança por ângulo de incidência do vento.

Figura 46 - Fator de vizinhança para C_x por ângulo de incidência do vento – Conf. B



(fonte: elaborado pelo autor)]

Figura 47 - Fator de vizinhança para C_y por ângulo de incidência do vento – Conf. B



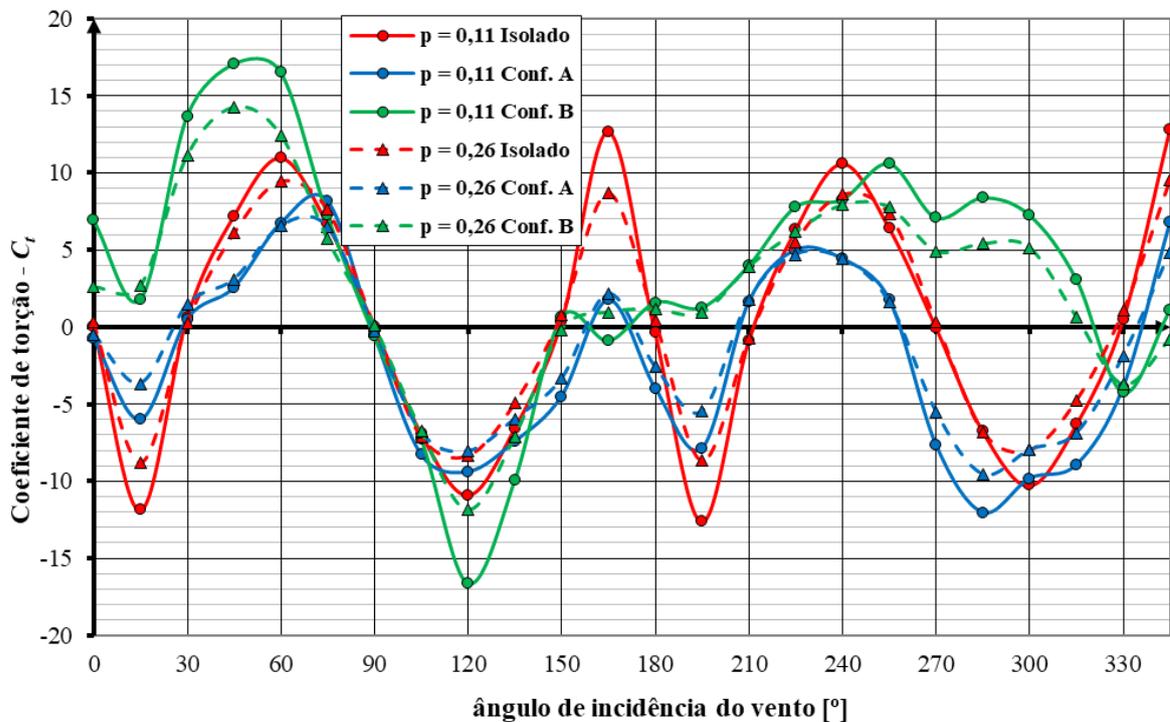
(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando os fatores de vizinhança dos coeficientes de força C_x e C_y para a Configuração B de vizinhança, nota-se que, na maioria dos ângulos de incidência do vento, os valores ficam abaixo de 1, indicando que a vizinhança age de forma favorável, diminuindo os carregamentos. Entretanto, os valores de fatores de vizinhança representativos, indicados na Tabela 6 indicam que para o coeficiente de força C_x no ângulo de incidência a 0° , o fator de vizinhança é igual a 1,10, indicando que a vizinhança influi de forma negativa no edifício em estudo, causando um aumento considerável das cargas devidas ao vento. Mesmo assim, os fatores de vizinhança representativos de coeficientes de força calculados pelos ensaios em túnel de vento ficaram abaixo dos fatores de vizinhança indicados para uso pela NBR 6123 em sua maioria.

4.1.3 Coeficientes de torção

Utilizando a equação 19, foi possível calcular os coeficientes de torção C_t por ângulo de incidência do vento para cada configuração de ensaio. Os resultados obtidos são apresentados no APÊNDICE H e mostrados na Figura 48 a seguir.

Figura 48 - Coeficientes de torção C_t por ângulo de incidência do vento



(fonte: elaborado pelo autor)

Como era de se esperar, para os coeficientes de torção C_t também há uma coerência nos valores dos coeficientes a respeito da influência do vento simulado incidente, assim como nos coeficientes de força C_x e C_y : os valores absolutos dos coeficientes de torção C_t para o vento incidente mais turbulento (expoente $p = 0,26$) são ligeiramente menores que para o vento incidente mais suave (expoente $p = 0,11$). Além disso, observa-se que a Configuração B de vizinhança possui influência significativa nos coeficientes de torção C_t , ora aumentando seu valor absoluto ora diminuindo ora alternando seu sentido, se comparado com a Configuração A de vizinhança e com a situação de modelo isolado. Entretanto, uma análise mais aprofundada sobre os coeficientes de torção C_t é muito difícil de ser feita devido à complexidade do escoamento em edificações inseridas em uma vizinhança.

Assim como para os coeficientes de força, os valores representativos de coeficientes de torção foram admitidos a partir do maior registro de coeficientes de torção para cada configuração de vizinhança e tipo de vento incidente (expoente $p = 0,11$ ou expoente $p = 0,26$); e então foram comparados com o registro de coeficiente de torção para o mesmo ângulo de incidência do vento da configuração isolado.

A seguir, na Tabela 8, são apresentados os valores representativos de C_t para os ensaios das Configurações A e B, bem como para o modelo isolado, para os diferentes ventos incidentes, os ângulos de incidência do vento em que ocorrem e o fator de vizinhança calculado.

Tabela 8 - Valores representativos de C_t , ângulos de ocorrência e fatores de vizinhança

expoente p	Configuração de vizinhança	Coeficiente de torção C_t		ângulo de incidência do vento	FV
		Com vizinhança	Isolado		
0,11	Configuração A	12,04	6,76	285°	1,78
	Configuração B	17,08	7,21	45°	2,37
0,26	Configuração A	9,56	6,78	285°	1,41
	Configuração B	14,25	6,09	45°	2,34

(fonte: elaborado pelo autor)

Para o cálculo do fator de vizinhança teórico dos coeficientes de torção pela NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988) foram utilizados os valores de excentricidade da força de arrasto dados no item 6.6 da respectiva norma:

6.6 Excentricidade das forças de arrasto

6.6.1 Devem ser consideradas, quando for o caso, os efeitos de excentricidades da força de arrasto.

6.6.2 Para o caso de edificações paralelepípedicas, o projeto deve levar em conta:

- as forças devidas ao vento agindo perpendicularmente a cada uma das fachadas, de acordo com as especificações desta Norma;

- as excentricidades causadas pelo vento agindo obliquamente ou por efeitos de vizinhança. Os esforços de torção daí oriundos são calculados considerando estas forças agindo, respectivamente, com as seguintes excentricidades, em relação ao eixo vertical geométrico:

- edificações sem efeitos de vizinhança:

$$e_a = 0,075 \cdot a \quad \text{e} \quad e_b = 0,075 \cdot b$$

- edificações com efeitos de vizinhança:

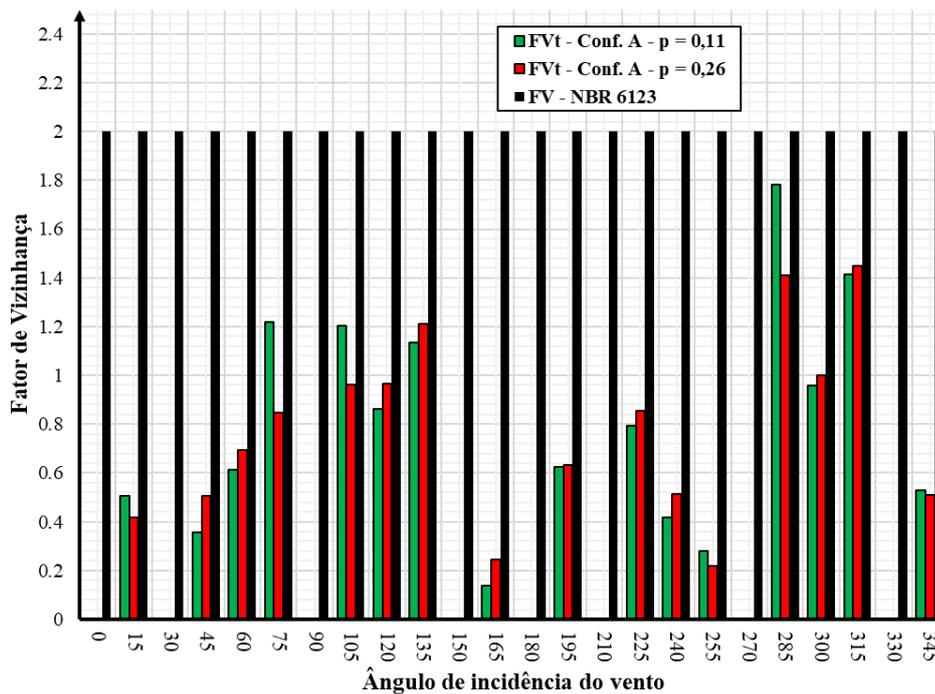
$$e_a = 0,15 \cdot a \quad \text{e} \quad e_b = 0,15 \cdot b$$

Sendo e_a medido na direção do lado maior, a , e e_b medido na direção do lado menor, b .

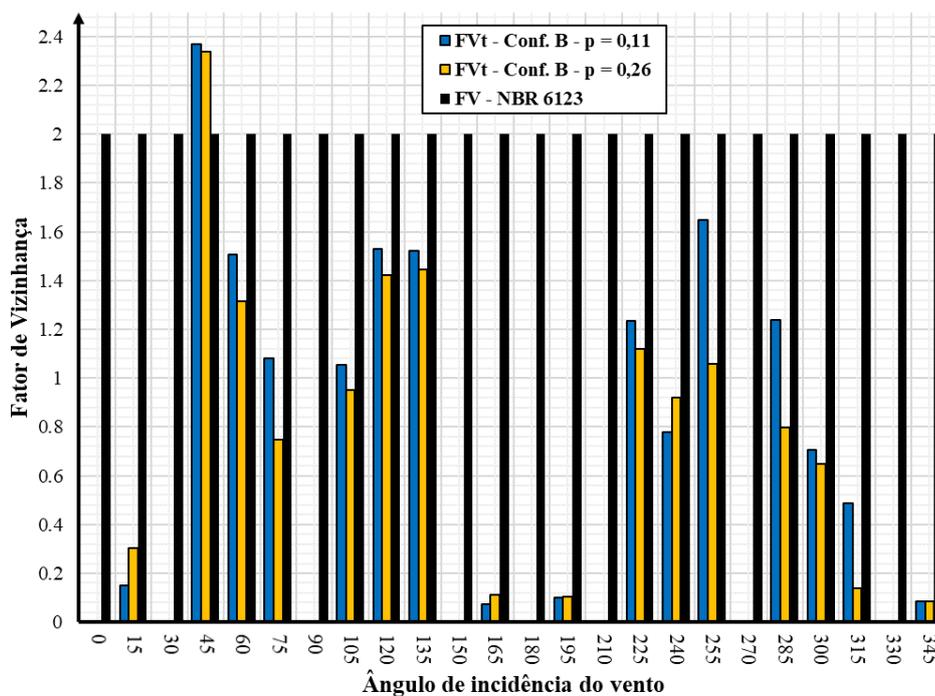
Desse modo, foi possível calcular o fator de vizinhança para os coeficientes de torção seguindo o desenvolvimento da equação a seguir:

$$FV = \frac{C_t \text{ com efeitos de vizinhança}}{C_t \text{ sem efeitos de vizinhança}} = \frac{C_f \cdot e_{a,b} \text{ com efeitos de vizinhança}}{C_f \cdot e_{a,b} \text{ sem efeitos de vizinhança}} = \frac{0,15 \cdot a, b}{0,075 \cdot a, b} = 2$$

Os fatores de vizinhança dos ensaios realizados para cada ângulo de incidência do vento, bem como o valor de fator de vizinhança indicado pela NBR 6123, são mostrados na Figura 49 para Configuração A e na Figura 50 para Configuração B.

Figura 49 - Fator de vizinhança para C_t por ângulo de incidência do vento – Conf. A

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 50 - Fator de vizinhança para C_t por ângulo de incidência do vento – Conf. B

(fonte: elaborado pelo autor)

Assim como para os coeficientes de torção C_t , a análise dos fatores de vizinhança dos coeficientes de torção C_t é muito complexa de ser realizada. Desse modo, nota-se que os fatores de vizinhança representativos ficam acima de 1 em todas as configurações ensaiadas, indicando que as vizinhanças agem de forma desfavorável, aumentando o carregamento torcional devido ao vento na edificação em estudo. Além disso, os valores representativos de fator de vizinhança para coeficiente de torção C_t calculados pelos ensaios em túnel de vento ficaram até 19% maiores que o valor de fator de vizinhança indicado para uso pela NBR 6123.

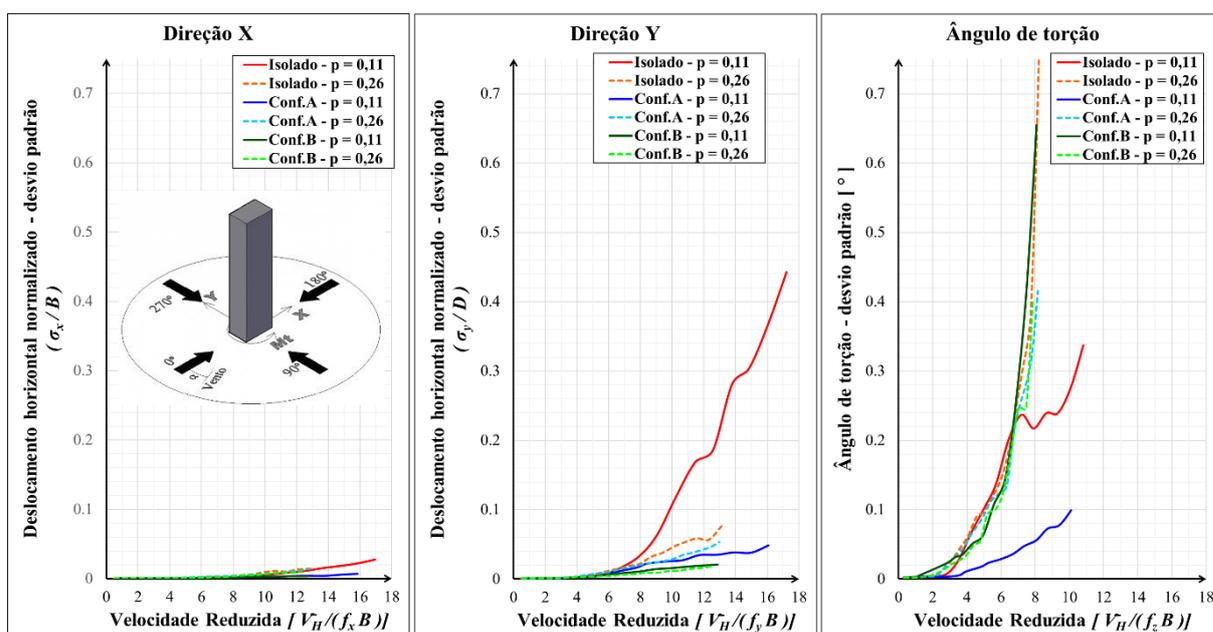
4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DINÂMICOS

A seguir serão apresentadas as respostas flutuantes longitudinal, transversal e ângulo de torção em termos de deslocamento no topo do modelo normalizadas pela dimensão do modelo na direção do deslocamento em função da velocidade do vento reduzida para os ângulos de incidência do vento perpendiculares às fachadas do edifício considerando as mesmas configurações de vizinhança e perfis de vento simulados que os ensaios estáticos. Além disso, serão analisados os fatores de martelamento para cada ângulo de incidência do vento.

4.2.1 Incidência do vento 0°

Os resultados dos ensaios dinâmicos para o vento incidindo a 0°, de acordo com as referências de ângulos das Figura 32 à Figura 34, ou seja, perpendicularmente à uma das fachadas de menor área, são apresentados na Figura 51 a seguir.

Figura 51 - Deslocamento flutuante para as direções X, Y e Angular - Incidência 0°



(fonte: elaborado pelo autor)

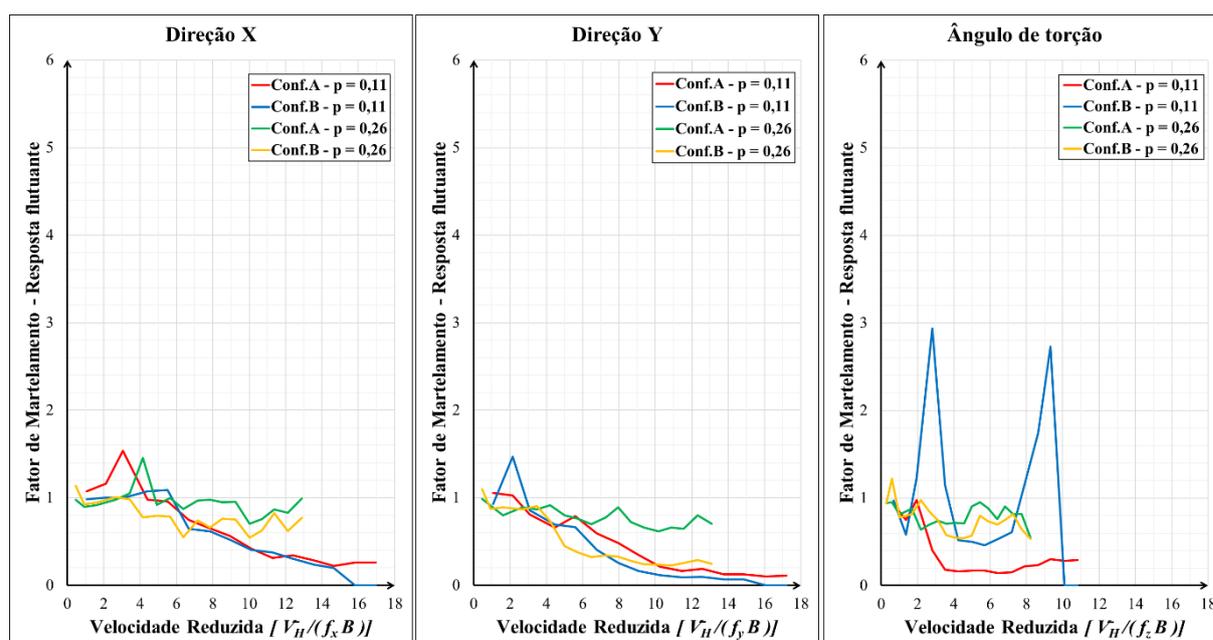
Analisando os deslocamentos flutuantes na direção X para o ângulo de incidência do vento 0° notam-se valores muito próximos a zero, tanto para a situação de modelo isolado quanto para as Configurações A e B de vizinhança. Esses valores são esperados pois a direção X é paralela à direção do vento tanto para o ângulo 0° quanto para o ângulo 180°, e nessa situação as forças devidas ao vento agem quase que de forma estática nas edificações, a não ser por martelamento de rajadas devido à turbulência do vento oriunda da vizinhança no entorno próximo ou do próprio vento incidente.

Os deslocamentos flutuantes na direção Y para os ângulos de incidência do vento 0° e 180° são transversais à direção do vento e, por isso, na situação de modelo isolado começam a surgir valores elevados de deslocamento flutuantes na direção Y a partir de determinadas velocidades do vento, tanto para o vento incidente com expoente $p = 0,11$ quanto para $p = 0,26$. Esses valores elevados de deslocamento transversal flutuantes devem-se ao fato de a velocidade do vento atingir velocidades críticas de desprendimento de vórtices alternados para a forma do edifício em estudo. Isso fica muito mais evidente na situação em que o vento incidente é menos turbulento pois o escoamento em torno do edifício consegue formar os vórtices ao longo da altura da edificação de maneira sincronizada, o que não acontece em escoamentos mais turbulentos.

Assim como nos ensaios estáticos, a análise sobre a resposta em torção em configurações de vizinhança é muito complexa de ser realizada. Entretanto, observa-se que na situação de modelo isolado, diferentemente dos outros parâmetros analisados até o momento, o deslocamento flutuante em torção atinge um valor mais elevado no vento incidente com expoente $p = 0,26$ em uma velocidade do vento mais baixa do que a mesma situação com vento incidente menos turbulento. Isso deve-se à turbulência do escoamento causando uma assimetria no escoamento através das rajadas atuantes no modelo.

A seguir, na Figura 52, são exibidos os fatores de martelamento das respostas flutuantes do edifício em estudo para as Configurações A e B de vizinhança para o ângulo de incidência do vento 0° .

Figura 52 - Fatores de martelamento para a resposta flutuante para ângulo de incidência do vento a 0°



(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando o fator de martelamento na direção longitudinal ao escoamento para o ângulo de incidência 0° (direção X), percebe-se que, tanto para a Configuração A quanto para a Configuração B de vizinhança, a partir da velocidade reduzida 5, o fator de martelamento é menor que 1. Isso significa que as vizinhanças no entorno agem de maneira positiva na edificação, diminuindo os deslocamentos flutuantes longitudinais ao escoamento.

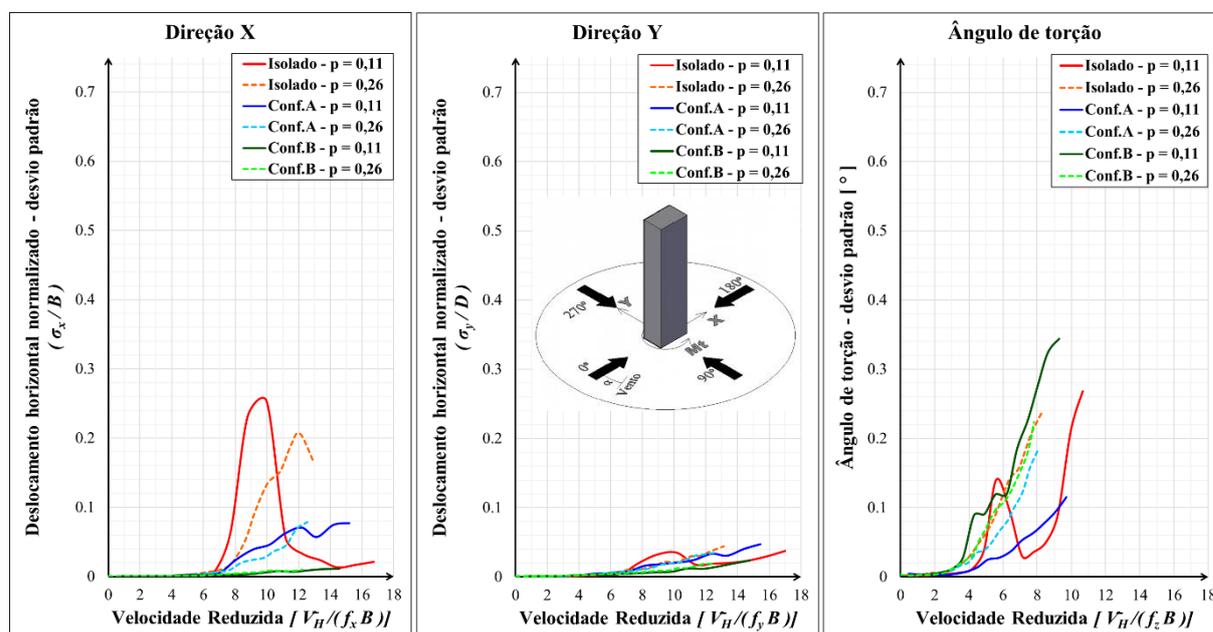
Assim como para a direção longitudinal ao escoamento, o fator de martelamento na direção transversal ao escoamento para o ângulo 0° (direção Y) está abaixo de 1 para todas as velocidades reduzidas acima de 3. Isto indica uma diminuição nos deslocamentos flutuantes transversais ao escoamento na presença das Configurações A e B de vizinhanças simuladas.

No que se refere à resposta torcional do edifício para o ângulo de incidência do vento 0° , nota-se claramente que somente a Configuração B para o vento incidente com expoente $p = 0,11$ os fatores de martelamento são maiores que 1. Os fatores de martelamento atingem picos de 2,9 e 2,7 para as velocidades reduzidas de 2,8 e 9,3, respectivamente.

4.2.2 Incidência do vento 90°

Os resultados dos ensaios dinâmicos para o vento incidindo a 90° são apresentados na Figura 53 a seguir.

Figura 53 - Deslocamento flutuante para as direções X, Y e Angular – Incidência 90°



(fonte: elaborado pelo autor)

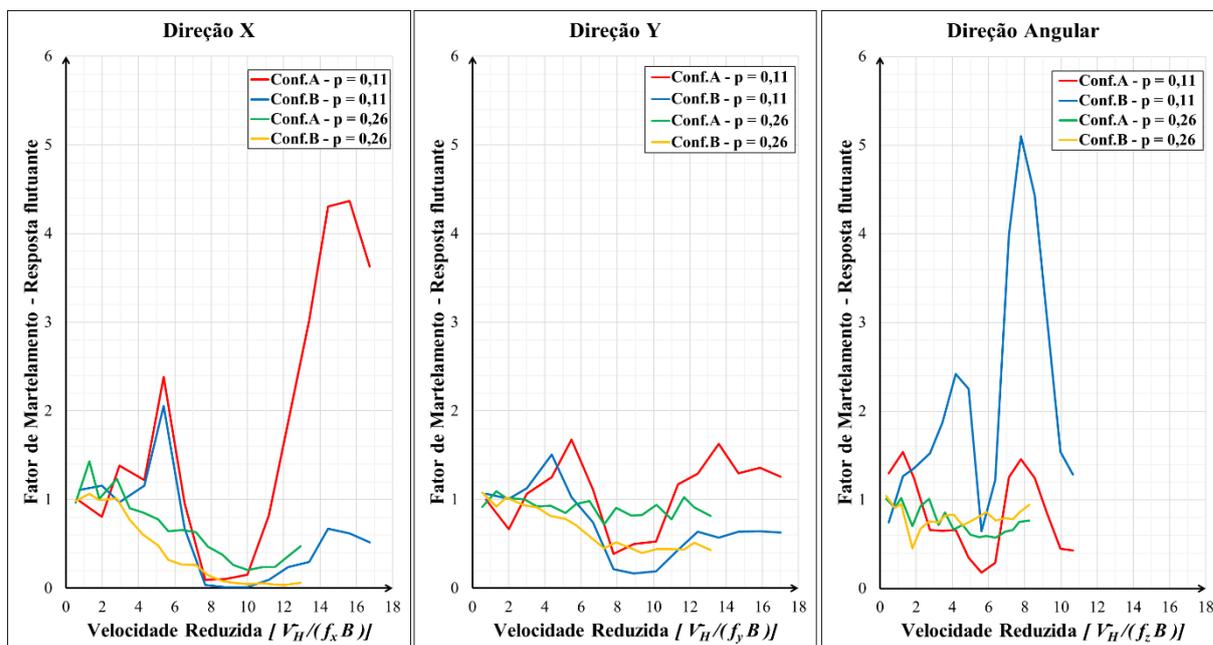
Assim como para o ângulo de incidência do vento 0° , os deslocamentos flutuantes na direção longitudinal ao vento para o ângulo 90° (direção Y), estão sempre muito próximos a zero, indicando que a força do vento nessa direção e sentido age quase que de forma estática.

No gráfico do deslocamento flutuante transversal à direção do vento (direção X) observam-se picos bem evidentes para a situação isolado, tanto para vento incidente com expoente $p = 0,11$, quanto para o vento incidente com expoente $p = 0,26$ nas velocidades reduzidas de 9,9 e 12,1, respectivamente. Esses valores mostram boa coerência com Oliveira (2009), que obteve um pico bem pronunciado no deslocamento flutuante transversal à direção do vento na velocidade reduzida 10,6. Essa diferença pode ser devido às intensidades da componente longitudinal de turbulência dos ventos simulados no topo do modelo deste trabalho (4,9% para o vento $p = 0,11$ e 13,6% para o vento $p = 0,26$) serem sensivelmente diferentes do vento simulado por Oliveira (2009) (7,1% para o vento $p = 0,34$). Além disso, é possível notar que os deslocamentos flutuantes transversais para a Configuração A possuem valores intermediários, enquanto para a Configuração B os valores são sensivelmente mais baixos, atuando de forma positiva na estrutura, diminuindo a vibração transversal.

Já no gráfico de deslocamento flutuante torcional, na situação de modelo isolado e vento incidente com expoente $p = 0,11$, é possível observar um pico inicial na velocidade reduzida 5,6 e o início da formação de um segundo pico de maior intensidade a partir da velocidade reduzida 10,6. Esses valores também apresentam uma boa concordância com os obtidos por Oliveira (2009) em seu trabalho. Entretanto, para a mesma situação de modelo isolado e vento incidente com $p = 0,26$, esse primeiro pico não é claramente formado. Novamente, essa diferença pode ser devido às diferenças de turbulências e dos perfis de velocidades médias dos ventos simulados.

A seguir, na Figura 54, são exibidos os fatores de martelamento para as Configurações A e B de vizinhança para o ângulo de incidência do vento a 90° .

Figura 54 - Fatores de martelamento para a resposta flutuante para ângulo de incidência do vento a 90°



(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando os fatores de martelamento na direção X para o ângulo de incidência do vento 90° , sentido transversal ao escoamento, nota-se um valor muito próximo a zero no intervalo de velocidades reduzidas entre 7 e 10. Isso era de se esperar e deve-se à ressonância causada pelo despreendimento de vórtices alternados observados nos ensaios com modelo isolado. Além disso, é possível observar que a partir da velocidade reduzida 12, o fator de martelamento da Configuração A de vizinhança e vento incidente com expoente $p = 0,11$ apresenta valores elevados, chegando a 4,4 na velocidade reduzida 15,6.

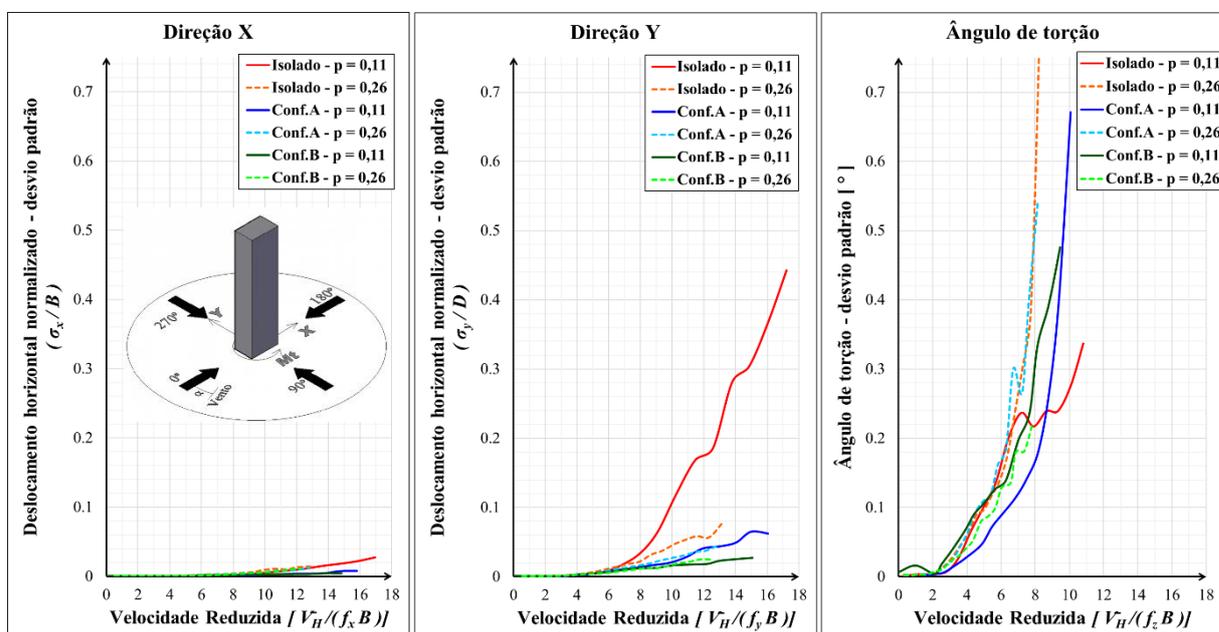
Quanto aos fatores de martelamento na direção Y, sentido longitudinal ao escoamento, é possível notar dois picos na velocidade reduzida de, aproximadamente, 5 para a Configuração A de vizinhança e ventos incidentes com expoente $p = 0,11$ e $p = 0,26$. Entretanto, isso deve-se ao fato de que as amplitudes dos deslocamentos na situação de modelo isolado são próximas a zero, e não porque as diferenças entre os deslocamentos com e sem vizinhança sejam grandes em valores absolutos. Além disso, a partir da velocidade reduzida 11,3, a Configuração A de vizinhança e vento incidente com expoente $p = 0,11$ apresenta fatores de martelamento sempre maiores que 1, chegando a 1,6 na velocidade reduzida 13,6.

Quanto aos fatores de martelamento da resposta torcional flutuante, observam-se valores elevados para a Configuração B de vizinhança e vento incidente com expoente $p = 0,11$. O maior valor chega a 5,1 na velocidade reduzida 7,8.

4.2.3 Incidência do vento 180°

Os resultados dos ensaios dinâmicos para o vento incidindo a 180° são apresentados na Figura 55 a seguir.

Figura 55 - Deslocamento flutuante para as direções X, Y e Angular - Incidência 180°

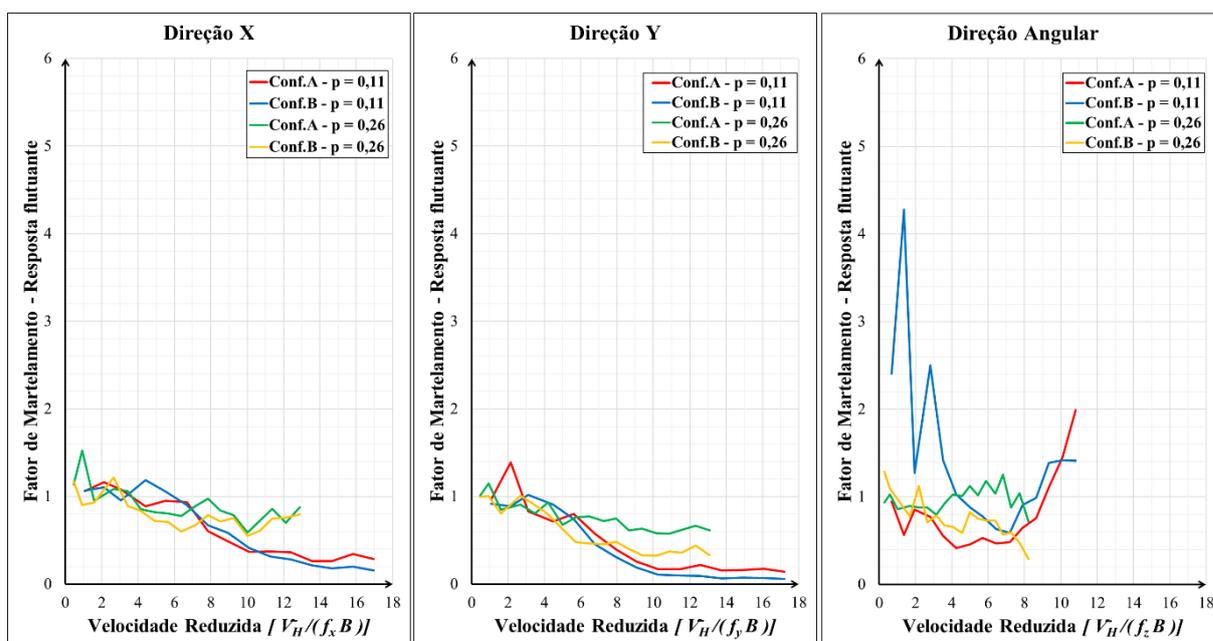


(fonte: elaborado pelo autor)

Assim como para o ângulo de incidência do vento 0°, os deslocamentos flutuantes na direção X para o ângulo de incidência do vento 180°, que também é uma direção longitudinal ao vento, são muito próximos a zero, mesmo para as configurações com vizinhança. Além disso, analisando o deslocamento flutuante transversal ao vento no ângulo de incidência 180° (direção Y), é notável como a presença das Configurações A e B de vizinhança impedem a formação dos picos de deslocamento flutuantes presentes na situação de modelo isolado.

A seguir, na Figura 56, são exibidos os fatores de martelamento das respostas flutuantes do edifício em estudo para as Configurações A e B de vizinhança para o ângulo de incidência do vento a 180° .

Figura 56 - Fatores de martelamento para a resposta flutuante para ângulo de incidência do vento a 180°



(fonte: elaborado pelo autor)

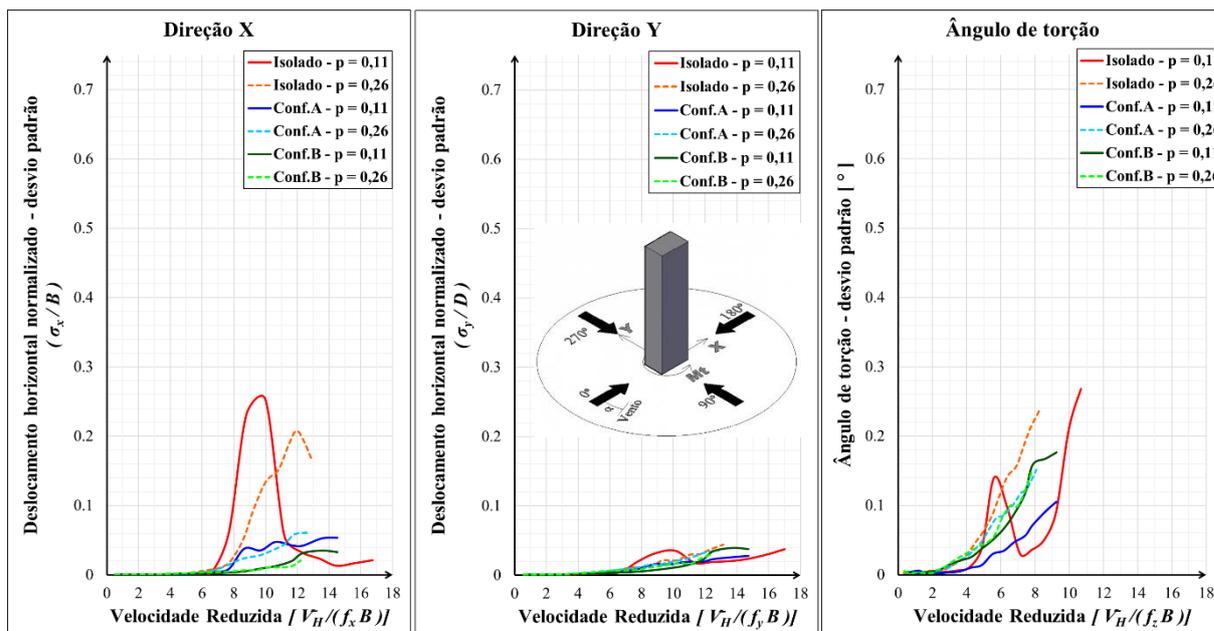
Nos fatores de martelamento para a resposta flutuante na direção X e ângulo de incidência do vento 180° observa-se um comportamento semelhante ao ângulo 0° : até aproximadamente a velocidade reduzida 5 os valores são próximos de 1, e então, para velocidades maiores os valores de fator de martelamento ficam sempre bem abaixo de 1. Novamente, isso significa que as vizinhanças no entorno agem de maneira positiva na edificação, diminuindo os deslocamentos flutuantes longitudinais ao escoamento.

No que se refere aos fatores de martelamento da resposta torcional flutuante para o ângulo de incidência do vento 180° , notam-se dois picos para a Configuração B de vizinhança e vento com expoente $p = 0,11$, o primeiro possui valor 4,3 na velocidade reduzida 1,4 e o segundo é 2,5 na velocidade reduzida 2,8. Além disso, para as velocidades reduzidas mais altas é possível observar um aumento no fator de martelamento para as Configurações A e B de vizinhança e vento com expoente $p = 0,11$.

4.2.4 Incidência do vento 270°

Os resultados dos ensaios dinâmicos para o vento incidindo a 270° são apresentados na Figura 57 a seguir.

Figura 57 - Deslocamento flutuante para as direções X, Y e Angular - Incidência 270°

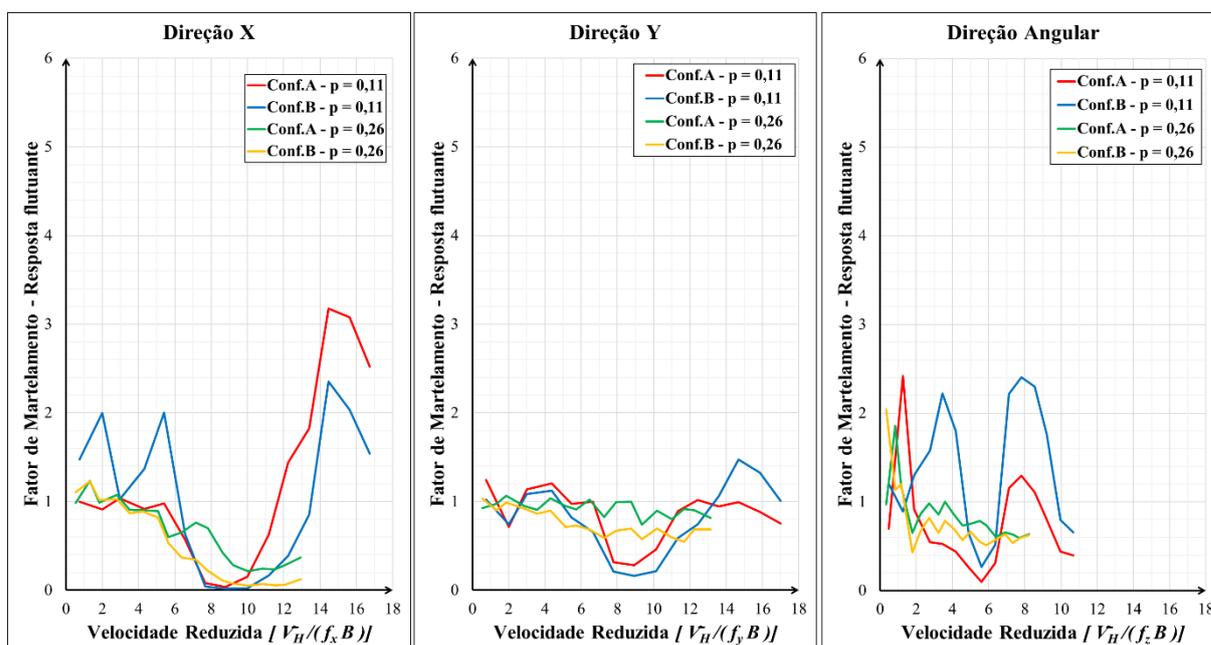


(fonte: elaborado pelo autor)

A análise dos deslocamentos flutuantes para o ângulo de incidência 270° é semelhante à análise dos deslocamentos flutuantes para o ângulo de incidência 90°: as Configurações de vizinhança A e B agem de forma positiva na edificação em estudo para o deslocamento transversal à direção do vento diminuindo as vibrações na estrutura e os deslocamentos flutuantes longitudinais são próximos a zero.

A seguir, na Figura 58, são exibidos os fatores de martelamento das respostas flutuantes do edifício em estudo para as Configurações A e B de vizinhança para o ângulo de incidência do vento a 270°.

Figura 58 - Fatores de martelamento para a resposta flutuante para ângulo de incidência do vento a 270°



(fonte: elaborado pelo autor)

Os fatores de martelamento na direção X para o ângulo de incidência do vento 270° são semelhantes aos do ângulo 90° : valores próximos a zero no intervalo de velocidades reduzidas entre 7 e 10 devido à ressonância causada pelo desprendimento de vórtices alternados nos ensaios com modelo isolado e valores elevados de fatores de martelamento para a Configuração A de vizinhança e vento incidente com expoente $p = 0,11$. Entretanto, é possível notar que para este ângulo de incidência do vento a Configuração B de vizinhança também possui picos bem pronunciados nas velocidades reduzidas 2,0, 5,4 e 14,5.

Quanto aos fatores de martelamento na direção Y, nota-se que os valores se mantêm sempre em torno de 1 para todas as velocidades reduzidas, exceto para o intervalo de velocidades entre 7 e 11, onde tanto para a Configuração A quanto para a Configuração B de vizinhança e vento incidente com expoente $p = 0,11$, há valores de fator de martelamento próximos a zero.

Os fatores de martelamento da resposta torcional e ângulo de incidência do vento 270° apresentam picos para ambas as Configurações de vizinhança e vento incidente com expoente $p = 0,11$. Os valores chegam a 2,2 e 2,4 nas velocidades reduzidas 3,4 e 7,8, respectivamente. Esse comportamento não é observado para o vento incidente com expoente $p = 0,26$.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a realização de ensaios estáticos, através da medição de pressões na superfície do modelo, e dinâmicos, utilizando uma balança dinâmica de três graus de liberdade (BD3GDL) de um edifício alto padrão (*CAARC Standard Tall Building*) para duas configurações de vizinhança distintas e dois tipos de vento natural incidente, pode-se concluir que:

- a) Há uma coerência no sentido que, para todas as configurações de vizinhança e modelo isolado, os valores absolutos dos coeficientes de força C_x e C_y para o vento incidente mais turbulento (expoente $p = 0,26$) são ligeiramente menores que para o vento incidente menos turbulento (expoente $p = 0,11$);
- b) Os fatores de vizinhança dos coeficientes de força C_x e C_y representativos para a Configuração A de vizinhança ficaram sempre abaixo de 1, indicando que a presença da vizinhança atua de forma positiva na edificação diminuindo as forças estáticas devidas ao vento;
- c) Desconsiderando os valores muito elevados de fator de vizinhança dos coeficientes de força C_x e C_y por ângulo de incidência do vento por apresentarem coeficientes na configuração isolada muito próximos a zero, o valor indicado para uso pela NBR 6123 sempre esteve acima dos determinados pelos ensaios em túnel de vento para a Configuração A de vizinhança;
- d) Os fatores de vizinhança dos coeficientes de força representativos para a Configuração B de vizinhança ficaram acima de 1 para C_x e abaixo de 1 para C_y , indicando que a vizinhança atua de forma negativa na edificação na direção X, aumentando o carregamento estático devido ao vento, e positiva na direção Y;
- e) Embora alguns valores de fator de vizinhança dos coeficientes de força C_x e C_y para a Configuração B de vizinhança por ângulo de incidência do vento tenham ficado acima de 1, os fatores de vizinhança representativos de coeficientes de força calculados pelos ensaios em túnel de vento sempre ficaram abaixo dos fatores de vizinhança indicados para uso pela NBR 6123;

- f) Assim como para os coeficientes de força C_x e C_y , também há uma coerência nos valores dos coeficientes de torção C_t a respeito da influência da turbulência do vento incidente: os valores absolutos dos coeficientes de torção C_t para o vento incidente mais turbulento (expoente $p = 0,26$) são ligeiramente menores que para o vento incidente menos turbulento (expoente $p = 0,11$);
- g) A Configuração B de vizinhança possui influência significativa nos coeficientes de torção C_t , ora aumentando seu valor absoluto ora diminuindo ora alternando seu sentido, se comparado com a Configuração A de vizinhança e com a situação de modelo isolado para ambos os ventos incidentes;
- h) Os fatores de vizinhança dos coeficientes de torção C_t representativos para ambas as Configurações A e B de vizinhança ficaram acima de 1 e do valor indicado para uso pela NBR 6123, indicando que a vizinhança atua de forma negativa na edificação, aumentando o carregamento torcional na edificação em estudo;
- i) Uma análise mais aprofundada sobre os fatores de vizinhança por ângulo de incidência do vento dos coeficientes de torção C_t é muito difícil de ser feita devido à complexidade do escoamento em edificações inseridas em uma vizinhança;
- j) Nos ensaios dinâmicos, os valores medidos pela BD3GDL para as respostas flutuantes longitudinal, transversal e torcional dos ensaios isolados são coerentes de acordo com o formato da edificação, considerando as diferentes turbulências dos ventos incidentes durante os ensaios;
- k) Em todos os ângulos de incidência do vento nos ensaios dinâmicos, o vento incidente mais turbulento (expoente $p = 0,26$) afeta diretamente nos picos de deslocamento flutuante longitudinal, transversal e torcional do modelo em estudo com relação ao vento incidente menos turbulento (expoente $p = 0,11$), tanto para a amplitude dos picos, quanto para as velocidades reduzidas em que ocorrem;
- l) Para o ângulo de incidência do vento 0° dos ensaios dinâmicos, os fatores de martelamento para os deslocamentos flutuantes nas direções X e Y ficaram, em

quase todas as velocidades reduzidas, abaixo de 1. Enquanto para a resposta flutuante torcional apresentou fatores de martelamento significativos para a Configuração B de vizinhança nas velocidades reduzidas 2,8 e 9,3;

- m) Para o ângulo de incidência do vento 90° dos ensaios dinâmicos, as Configurações A e B de vizinhança para o vento incidente com expoente $p = 0,11$ apresentaram picos de fator de martelamento na direção X na velocidade reduzida de aproximadamente 5. Além disso, a partir da velocidade reduzida 12 o fator de martelamento da Configuração A de vizinhança e vento incidente com expoente $p = 0,11$ apresenta valores elevados, chegando a 4,4 na velocidade reduzida 15,6;
- n) Ainda para o ângulo de incidência do vento 90° , a Configuração B de vizinhança e vento incidente com expoente $p = 0,11$ apresentou picos elevados de fator de martelamento para a resposta flutuante torcional, chegando a 5,1 na velocidade reduzida 7,8;
- o) Para o ângulo de incidência do vento 180° dos ensaios dinâmicos, os fatores de martelamento para as respostas flutuantes nas direções X e Y possuem distribuição de valores semelhantes aos fatores de martelamento para o ângulo de incidência do vento 0° ;
- p) Também para o ângulo de incidência do vento 180° dos ensaios dinâmicos, os fatores de martelamento para a resposta flutuante torcional possui um pico de 4,3 na velocidade reduzida 1,4 para a Configuração B de vizinhança e vento incidente com expoente $p = 0,11$;
- q) Para o ângulo de incidência do vento 270° dos ensaios dinâmicos, os fatores de martelamento para as respostas flutuantes nas direções X e Y possuem distribuição de valores semelhantes aos fatores de martelamento para o ângulo de incidência do vento 90° ;
- r) Ainda para o ângulo de incidência do vento 270° dos ensaios dinâmicos, os fatores de martelamento para a resposta flutuante torcional apresentam picos bem pronunciado para as Configurações A e B para o vento incidente com expoente $p = 0,11$.

As conclusões acima expostas mostram as importâncias da consideração dos efeitos de vizinhança devidos ao vento nos edifícios altos e de estudos específicos em túnel de vento frente às dificuldades apresentadas. Por isso, algumas sugestões para trabalhos futuros seguindo a mesma linha de pesquisa realizada são dadas a seguir:

- a) Realizar ensaios com edifícios de formatos da seção transversal diferentes do *CAARC Standard Tall Building*, considerando formatos e proporções para edifícios mais esbeltos;
- b) Realizar um estudo específico de fator de vizinhança para as pressões locais;
- c) Realizar ensaios utilizando uma balança de força de alta frequência para as mesmas Configurações A e B de vizinhança e tipos de vento natural simulados;
- d) Realizar ensaios dinâmicos para ângulos oblíquos às fachadas;
- e) Variar o amortecimento estrutural.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Wind Loading and Wind Effects. In: _____. **Tall Building Criteria and Loading**, New York: cap. CL-3, p.144-248, 1980.

_____. **Wind tunnel studies of buildings and structures**. Reston: ASCE, 1999.

ARMITT, J.; COUNIHAN, J. The simulation of the atmospheric boundary layer in a wind tunnel. **Atmospheric Environment**, Londres, v. 2, p. 49-71, 1968.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.

BACHMANN, H; AMMANN, W. J.; DEISCHL, F.; EISENMANN, J.; FLOEGL, I.; HIRSCH, G. H.; KLEIN, G. K.; LANDE, G. J.; MAHREHOLTZ, O.; NATKE, H. G.; NUSSBAUMER, H.; PRETLOVE, A. J.; RAINER, J. H.; SAEMANN, E.; STEINBEISSER, L. **Vibration problems in structures: practical guidelines**. Basel: Birkhäuser Verlag, 1995.

BALENDRA, T. **Vibration of buildings to wind and earthquake loads**. London: Springer-Verlag, 1993.

BARLOW, J. B.; RAE, W. H.; POPE, A. **Low-speed wind tunnel testing**. Nova Iorque: 3 ed. Wiley-Interscience, 1999.

BENEKE, D. L.; KWOK, K. C. S. Aerodynamic effect of wind induced torsion on tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 50, p. 271-280, 1993.

BÊNIA, M. C. D. **Determinação dos efeitos de vizinhança na resposta dinâmica de edifícios altos sob a ação do vento**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

BÊNIA, M. C. D.; OLIVEIRA, M. G. K.; ROCHA, M. M.; LOREDO-SOUZA, A. M. Determinação dos efeitos de vizinhança na resposta dinâmica de edifícios altos sob a ação do vento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 56. 2014, Natal, RN. *Anais...* Natal: IBRACON, 2014.

BLESSMANN, J. The boundary layer wind tunnel of UFRGS. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v.10, p. 231-248, 1982.

_____. Buffeting effects on neighbouring tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 18, p. 105-110, 1985.

_____. Neighbouring wind effects on two tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 41-44, p. 1041-1052, 1992.

_____. **Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento**. Porto Alegre: 2. ed. Editora da UFRGS, 2005.

_____. **Aerodinâmica das construções**. Porto Alegre: 3. ed. Editora da UFRGS, 2011.

_____. **O vento na engenharia estrutural**. Porto Alegre: 2. ed. Editora da UFRGS, 2013.

CAO, S. Strong wind and their characteristics. In: TAMURA, Y.; KAREEM, A. **Advanced structural wind engineering**. Tokyo: Springer, 2013.

CARPEGGANI, E. A. **Determinação dos efeitos estáticos de torção em edifícios altos devidos à ação do vento**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

CARPEGGANI, E. A.; LOREDO-SOUZA, A. M.; NÚÑEZ, G. J. Z.; PALUCH, M. J. Determinação dos efeitos estáticos de torção em edifícios altos de concreto armado devidos à ação do vento In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 47. 2005, Olinda, PE. *Anais...* Olinda: IBRACON, 2005.

COOK, N. J. Wind tunnel simulation of the adiabatic atmospheric boundary layer by roughness, barrier and mixing-device methods. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 157, p. 157-176, 1978.

_____. **The designer's guide to wind loading of building structures**. Part 1: background, damage survey, wind data and structural classification, Londres: Butterworths, 1985.

_____. **The designer's guide to wind loading of building structures**. Part 2: static structures. Londres: Butterworths, 1990.

COUNIHAN, J. An improved method of simulation an atmospheric boundary layer in a wind tunnel. **Atmospheric Environment**, Londres, v. 3, p. 197-214, 1969.

DAVENPORT, A. G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Londres, v. 87, n. 372, p. 194-211, 1961.

ESDU 85020, **Characteristics of atmospheric turbulence near the ground. Part II: single point data for strong winds (neutral atmosphere)**, Londres, 2001.

HARRIS, R. I. The nature of the wind. In: **The Modern Design of Wind Sensitive Structures**, Londres, Construction Industry Research and Information Association, Paper 3, p. 29-55, 1970.

HOLMES, J. D. **Wind loading of structures**. London: 3rd. ed, CRC, 2015.

HUI, Y.; TAMURA, Y.; YOSHIDA, A. Mutual interference effects between two high-rise building models with different shapes on local peak pressure coefficients. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 104-106, p. 98-108, 2012.

HUI, Y.; TAMURA, Y.; YOSHIDA, A. KIKUCHI, H. Pressure and flow investigation of interference effects on external pressures between two high-rise buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 115, p. 150-161, 2013.

KAIMAL, J. C. Turbulence spectra, length scales and structure parameters in the stable surface layer. **Boundary-Layer Meteorological**, v. 4, p. 289–309, 1973.

KAREEM, A. The effect of aerodynamic interference on the dynamic response of prismatic structures. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 25, p. 365-372, 1987.

KIM, W.; TAMURA, Y.; YOSHIDA, A. Interference effects on aerodynamic wind forces between two buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 147, p. 186-201. 2015.

KWOK, K. C. S. Wind-induced vibrations of structures: with special reference to tall building aerodynamics. In: TAMURA, Y.; KAREEM, A. **Advanced structural wind engineering**. Tokyo: Springer, 2013.

LAWSON, T. V. **Wind effects on buildings**. Vol 1: Design applications. London: Applied Science, 1980.

LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHETTINI, E. B. C.; PALUCH, M. J. Simulação da Camada Limite Atmosférica em Túnel de Vento. In: MÖLER, S. V.; SILVESTRINI, J. H. (Org.). **Turbulência**. Porto Alegre: ABCM, 2004, v. 4, p. 137-163.

LOREDO-SOUZA, A. M.; MARANHÃO, G.; CARPEGGIANI, E. A.; NÚÑEZ, G. J. Z.; PALUCH, M. J. Estudo em túnel de vento dos efeitos de vizinhança sobre o empreendimento Blue Marlin Towers. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 49. 2007, Bento Gonçalves, RS. *Anais...* Bento Gonçalves: IBRACON, 2007.

LOREDO-SOUZA, A. M.; NÚÑEZ, G. J. Z.; OLIVEIRA, M. G. K.; SIQUEIRA, G. M.; BÊNIA, M. C. D.; Majorações e reduções nas cargas de vento em edifícios altos de concreto

armado: Influência de prédios vizinhos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 51. 2009, Curitiba, PR. *Anais...* Curitiba: IBRACON, 2009.

LOREDO-SOUZA, A. M.; OLIVEIRA, M. G. K.; CARPEGGIANI, E. A. Torsional loads due to vicinity effects and its consideration in the new Brazilian wind code. In: AMERICAS CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, 12. 2013, Seattle, Washington EUA. *Proceedings* ... Seattle: AAWE, 2013.

LYTHE, G. R.; SURRY, D. Wind-induced torsional loads on tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 36, p. 225-234, 1990.

MARA, T. G.; TERRY, B. K.; HO, T. C. E.; ISYUMOV, N. Aerodynamic and peak response interference factors for an upstream square building of identical height. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 133, p. 200-210, 2014.

MELBOURNE, M. H. Crosswind response of structures to wind action. In: EATON K. J. (ed) 4th International conference on wind effects on buildings and structures, Eathrow, 1975. **Proceedings...** Cambridge University Press, Cambridge, 1975.

_____. Development of natural wind models at Monash University. In: **6th Australasian Hydraulics and Fluid Mechanics Conference**, Adelaide, 1977.

_____. Comparison of measurements of CAARC standard tall building model in simulated wind flows. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v.6, p. 73-88, 1980.

OLIVEIRA, M. G. K. **Desenvolvimento de uma balança dinâmica de três graus de liberdade para estudos dos efeitos de flexo-torção em edifícios altos submetidos à ação do vento**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

SCHARNBERG, F. A. **Caracterização aerodinâmica de edifícios através do espectro das cargas totais medidas em túnel de vento**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

SIMIU, E.; SCANLAN, R. H. **Wind effects on structures: an introduction to wind engineering**. 3. ed. New York/USA: John Wiley & Sons, 1996.

STATHOPOULOS, T. Introduction to wind engineering, wind structure, wind-building interaction. In: **Wind effects on buildings and design of wind-sensitive structures**. New York: Springer, 2007.

THE BOUNDARY LAYER WIND TUNNEL LABORATORY. **Wind tunnel testing: a general outline**. Alan G. Davenport Wind Engineering Group. London, Ontario: 2007.

THEPMONGKORN, S.; WOOD, G. S.; KWOK, K. C. S. Interference effects on wind-induced coupled motion of a tall building. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 90, p. 1807-1815, 2002.

TREIN, C. **Modelagem dinâmica equivalente de edifícios altos submetidos à ação do vento**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

TSCHANZ, T. **The base balance measurement technique and applications to dynamic wind loading to structures**. 143 f. Thesis (Ph. D.) – The University of Western Ontario, Faculty of Engineering Science, London, Ontario: 1982.

VAN DER HOVEN, I. Power spectrum of horizontal wind speed in the Frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour. In: **Journal Of Meteorology**, v.14, p.160-164, 1956.

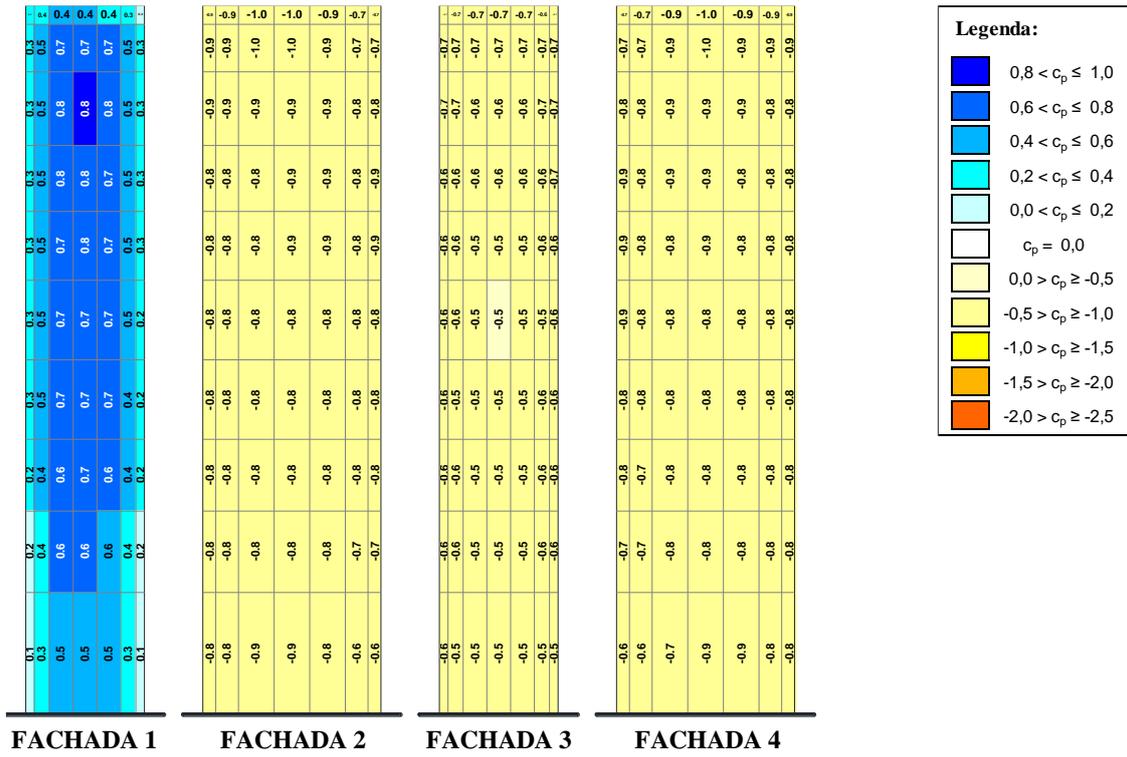
VIEIRA, G. S.; BRITO, J. L. V.; LOREDO-SOUZA, A. M. Experimental study of the neighborhood effects on the mean wind loading over two equivalent high-rise buildings. **Latin American Journal of Solids and Structures**, São Paulo, v. 15, no. 3, 2018.

VOGADO, M. W. **Caracterização aerodinâmica de edifícios altos com planta em formato de “V”**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

ZHANG, W. J.; XU, Y. L.; KWOK, K. C. S. Interference effects on aeroelastic torsional response of structurally asymmetric tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 57, p. 41-61, 1995.

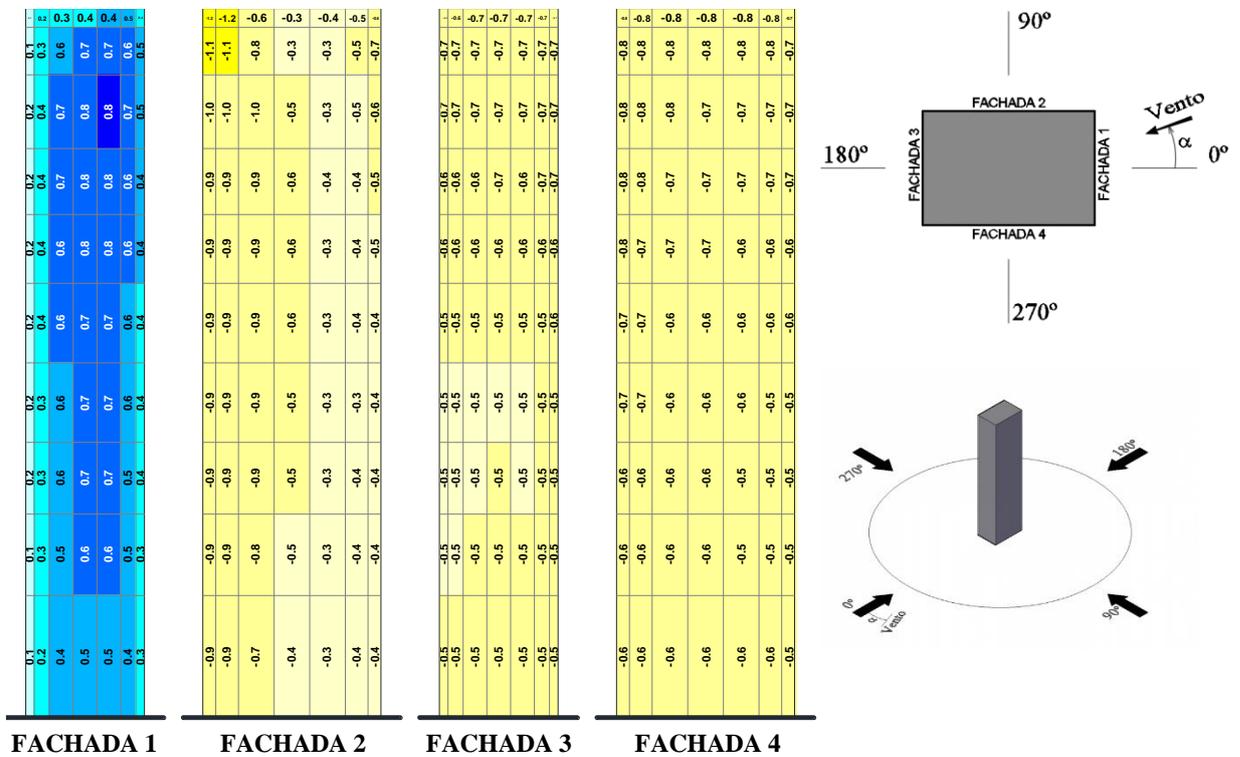
APÊNDICE A – Distribuição dos coeficientes de pressão média para o modelo isolado e vento incidente com expoente $p = 0,11$

Figura 59 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 0^\circ$



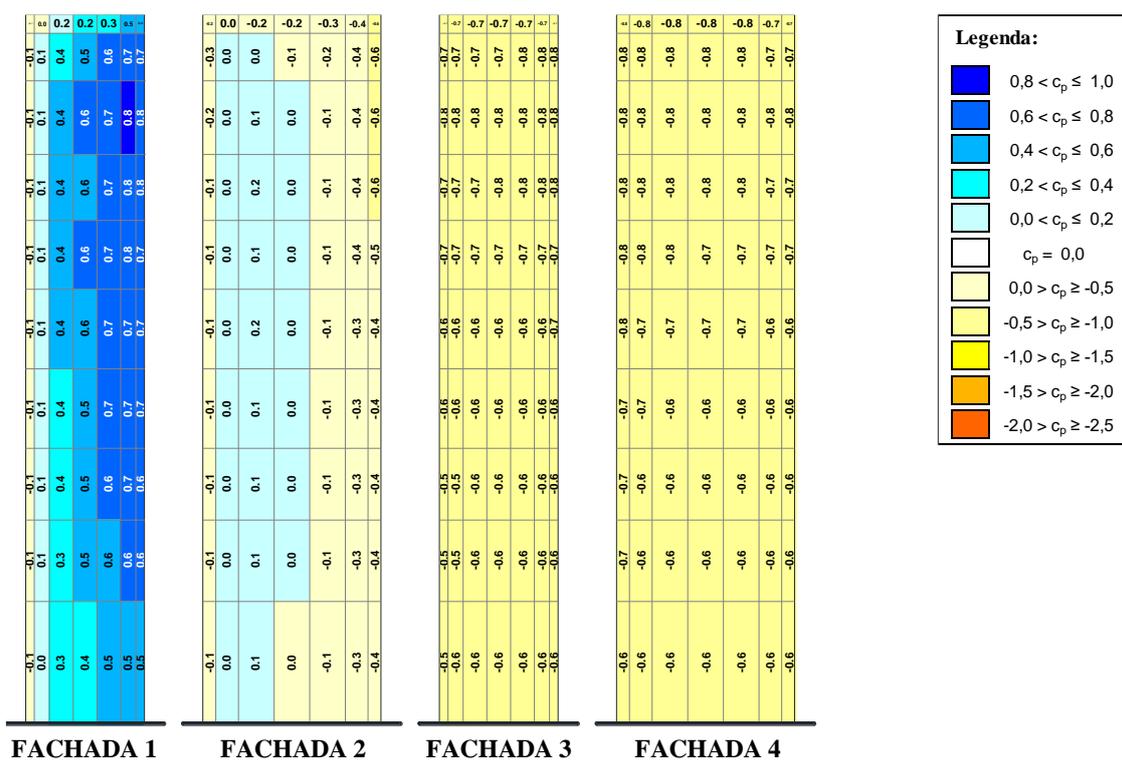
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 60 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 15^\circ$



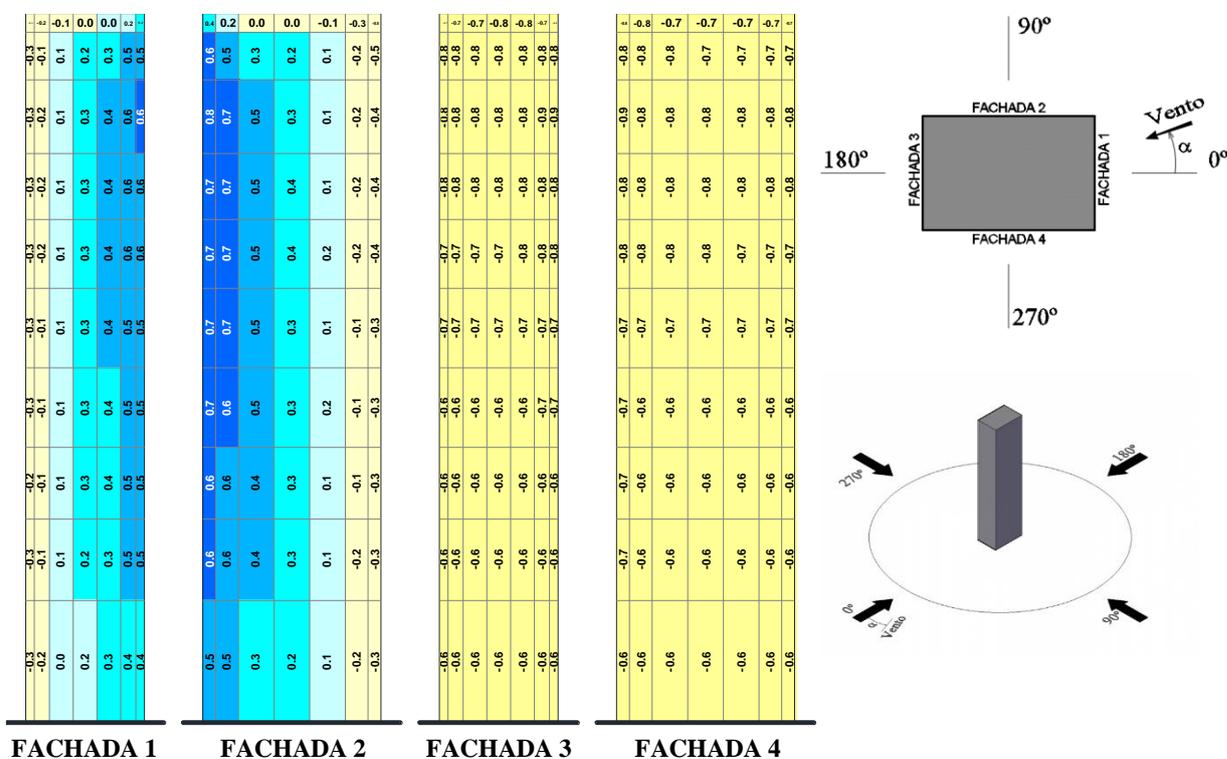
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 61 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 30^\circ$



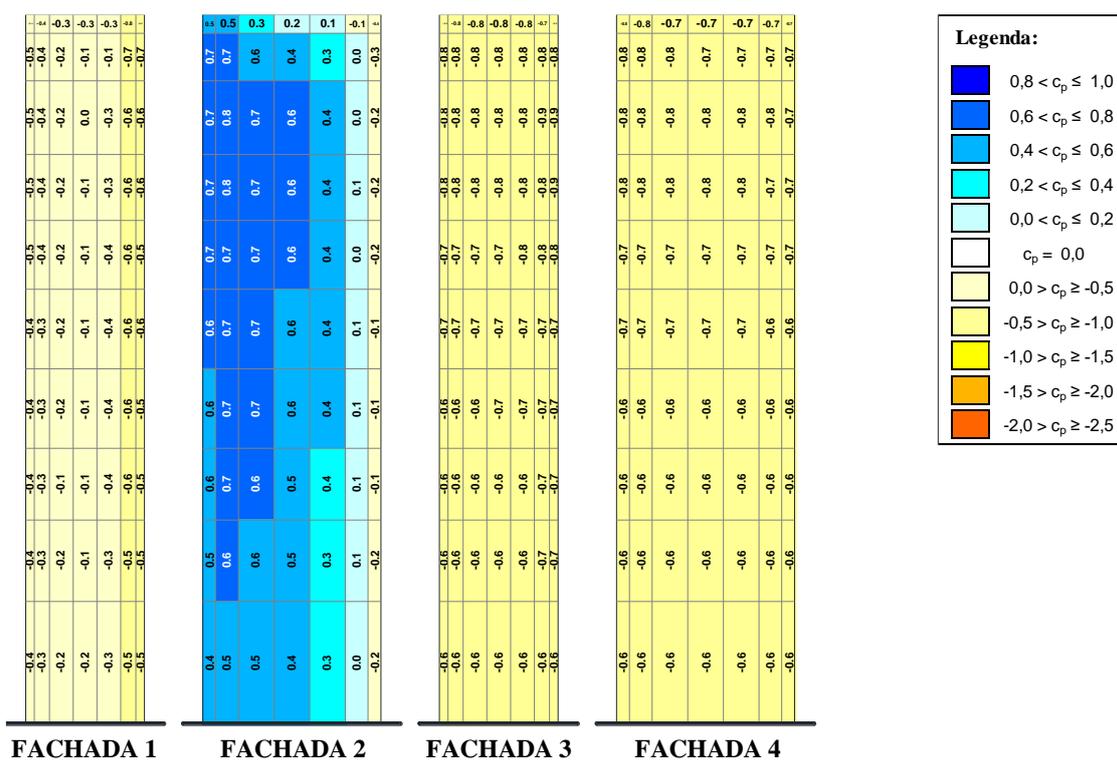
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 62 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 45^\circ$



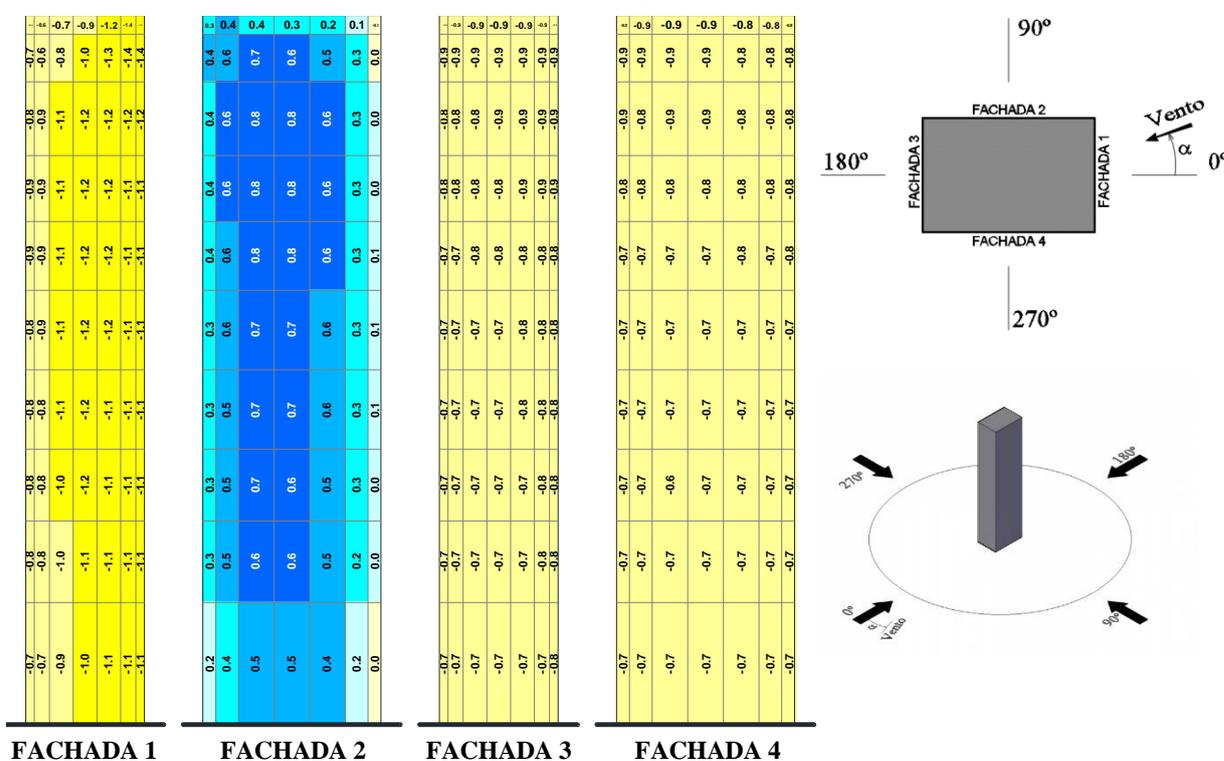
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 63 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 60^\circ$



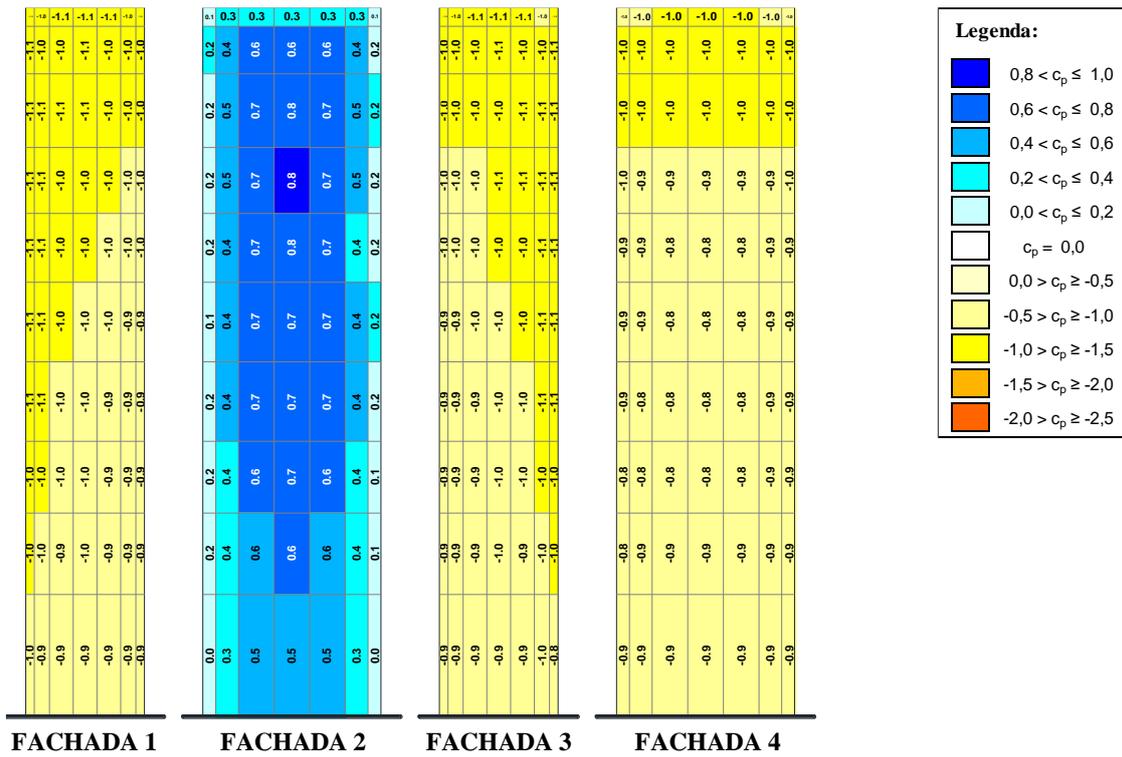
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 64 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 75^\circ$



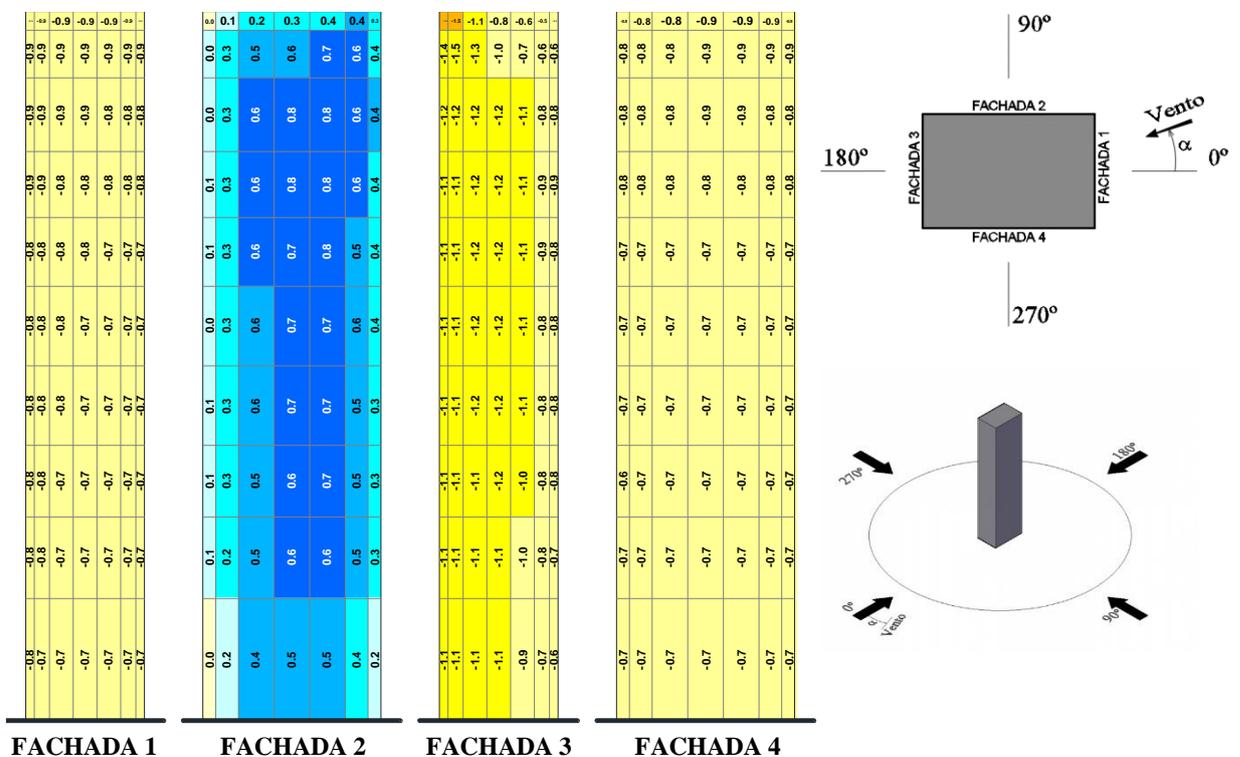
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 65 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 90^\circ$



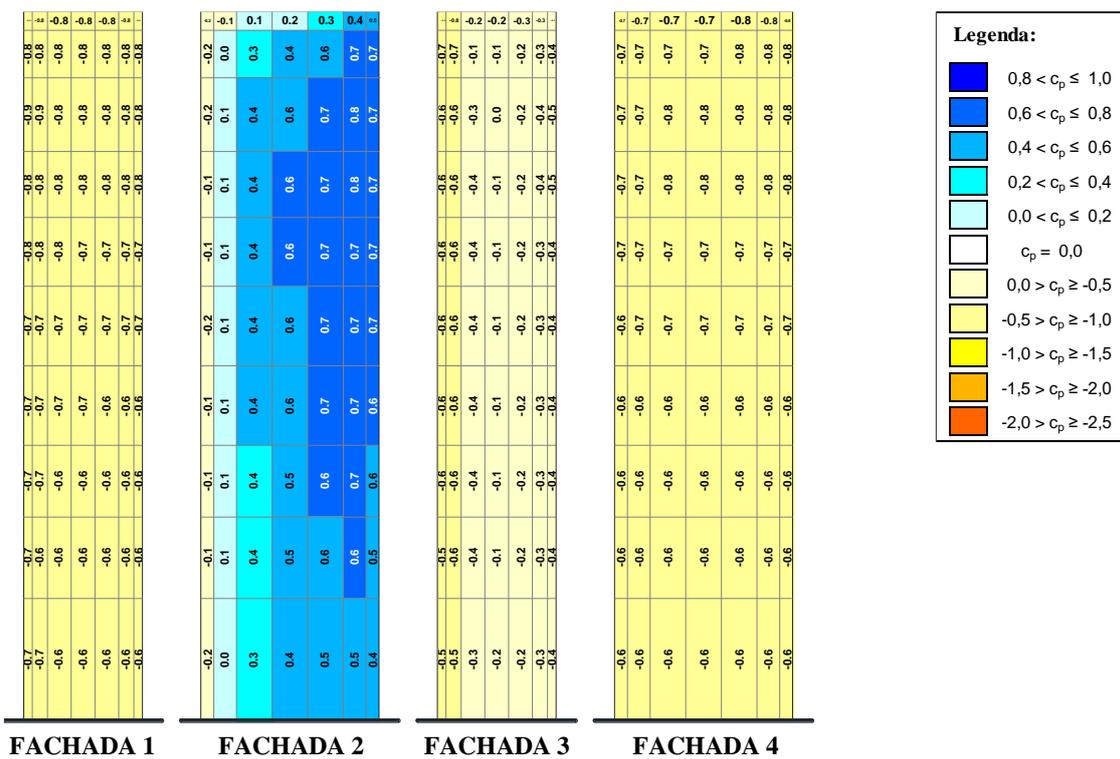
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 66 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 105^\circ$



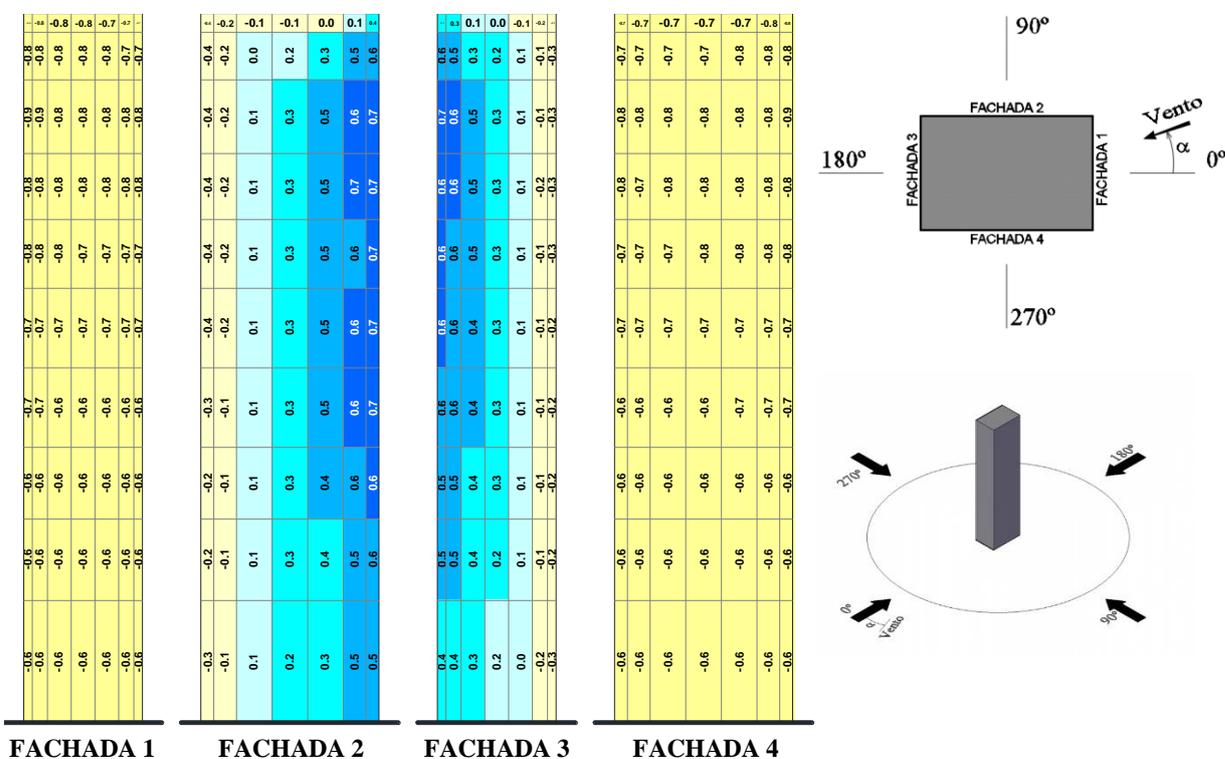
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 67 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 120^\circ$



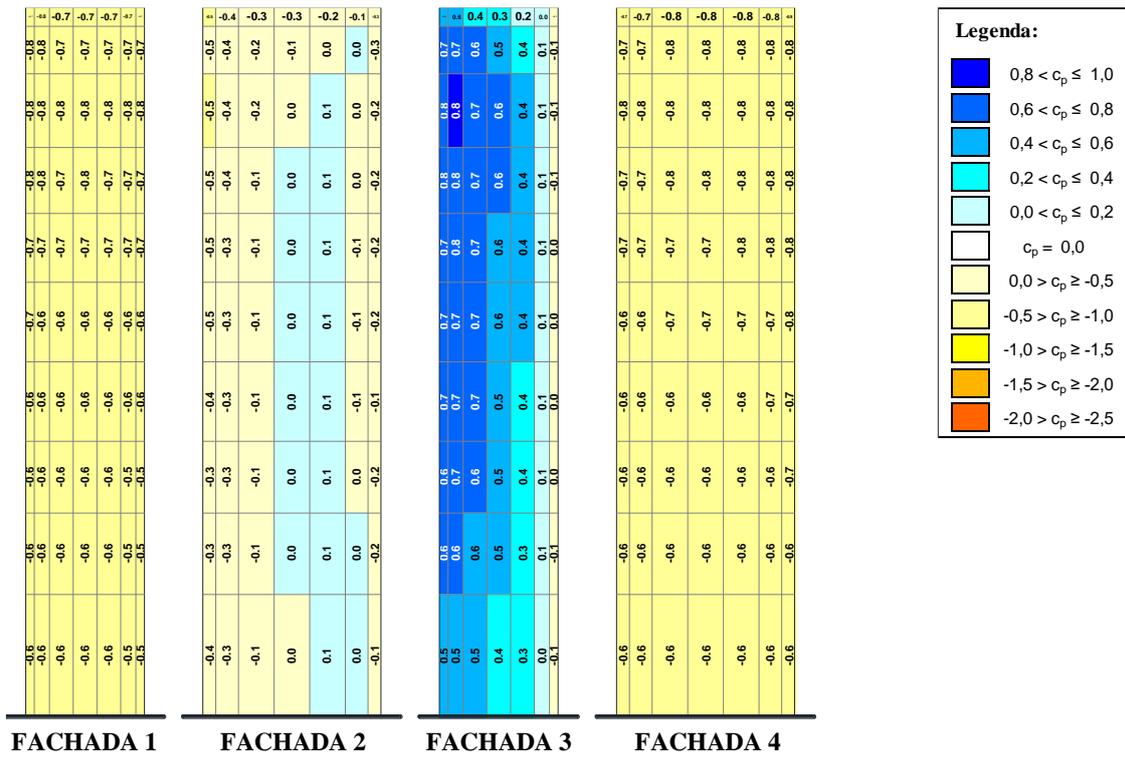
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 68 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 135^\circ$



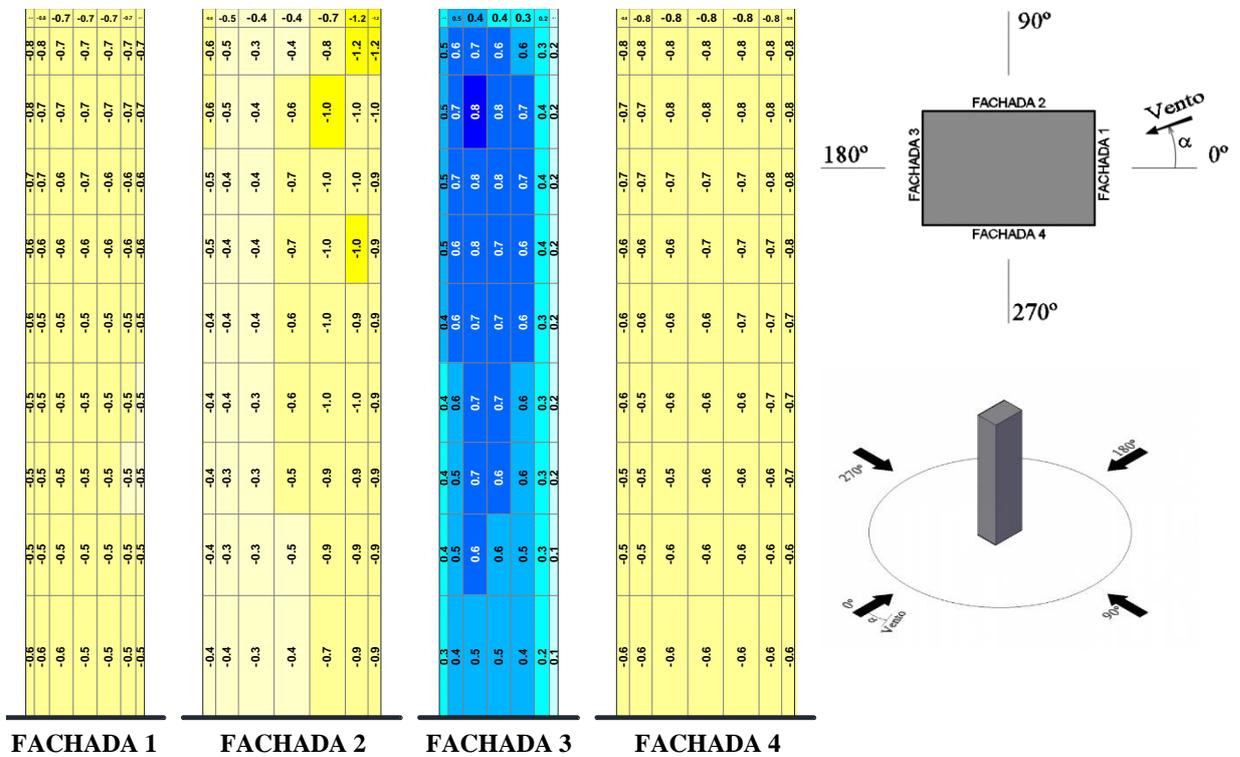
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 69 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 150^\circ$



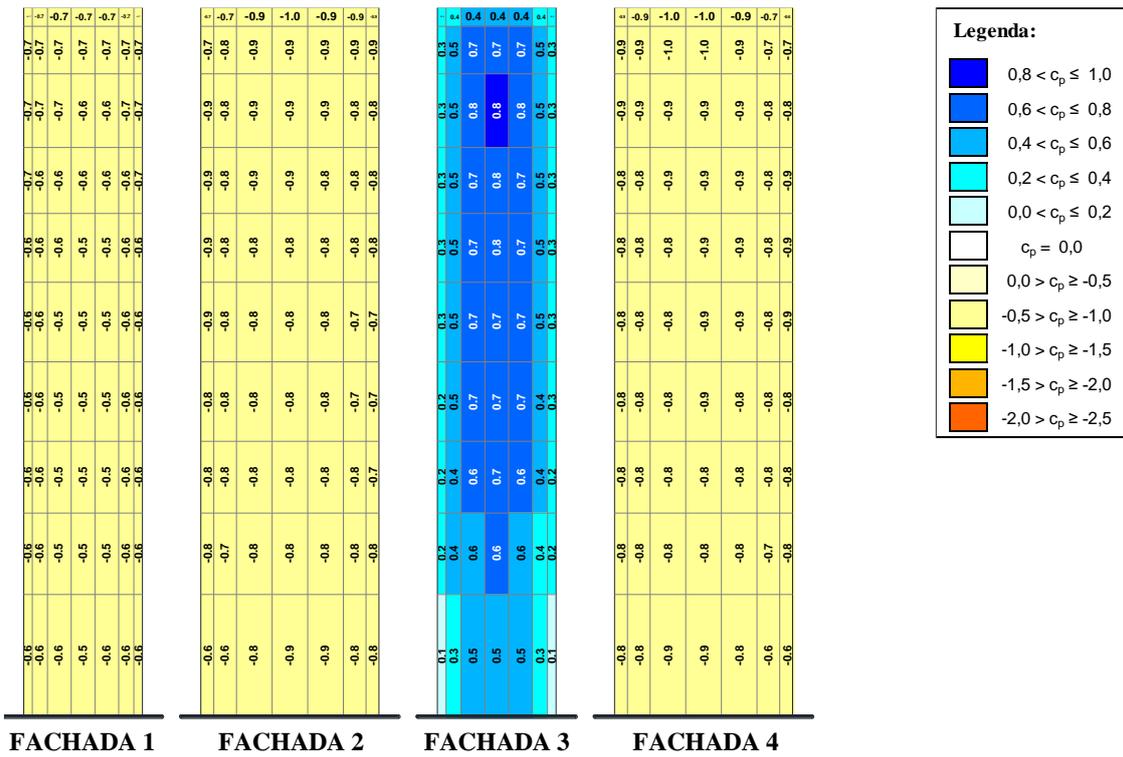
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 70 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 165^\circ$



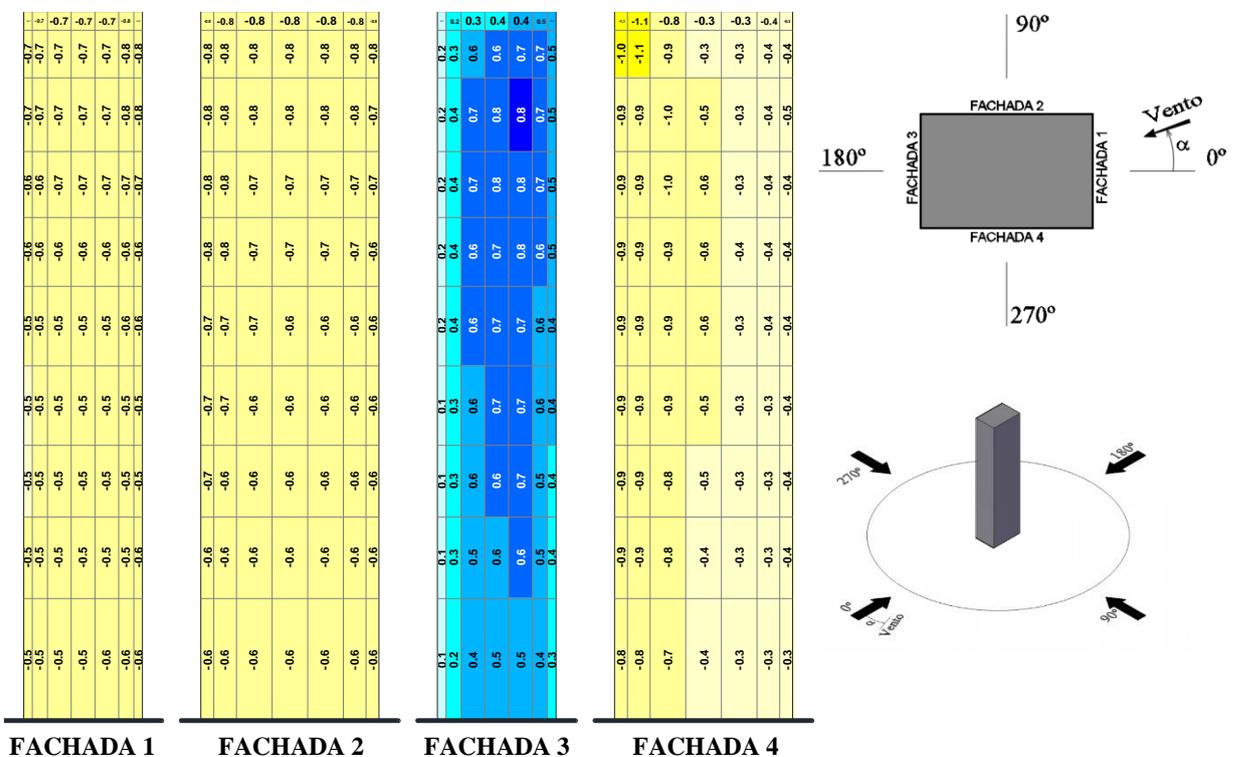
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 71 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 180^\circ$



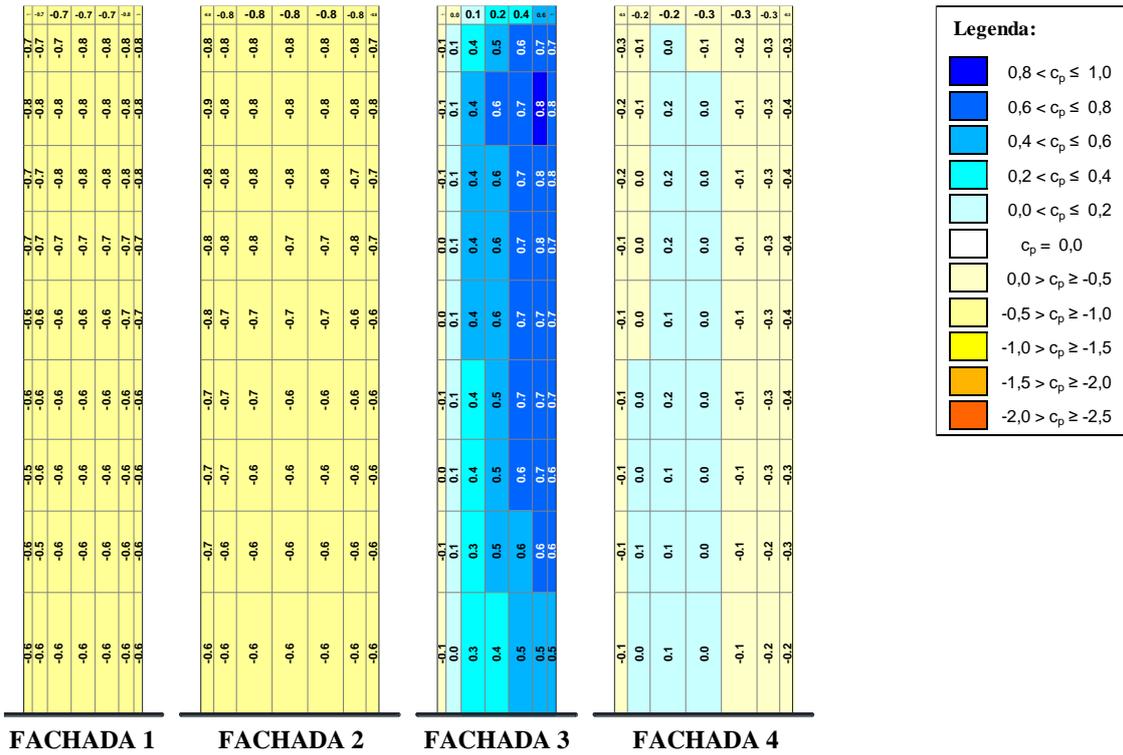
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 72 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 195^\circ$



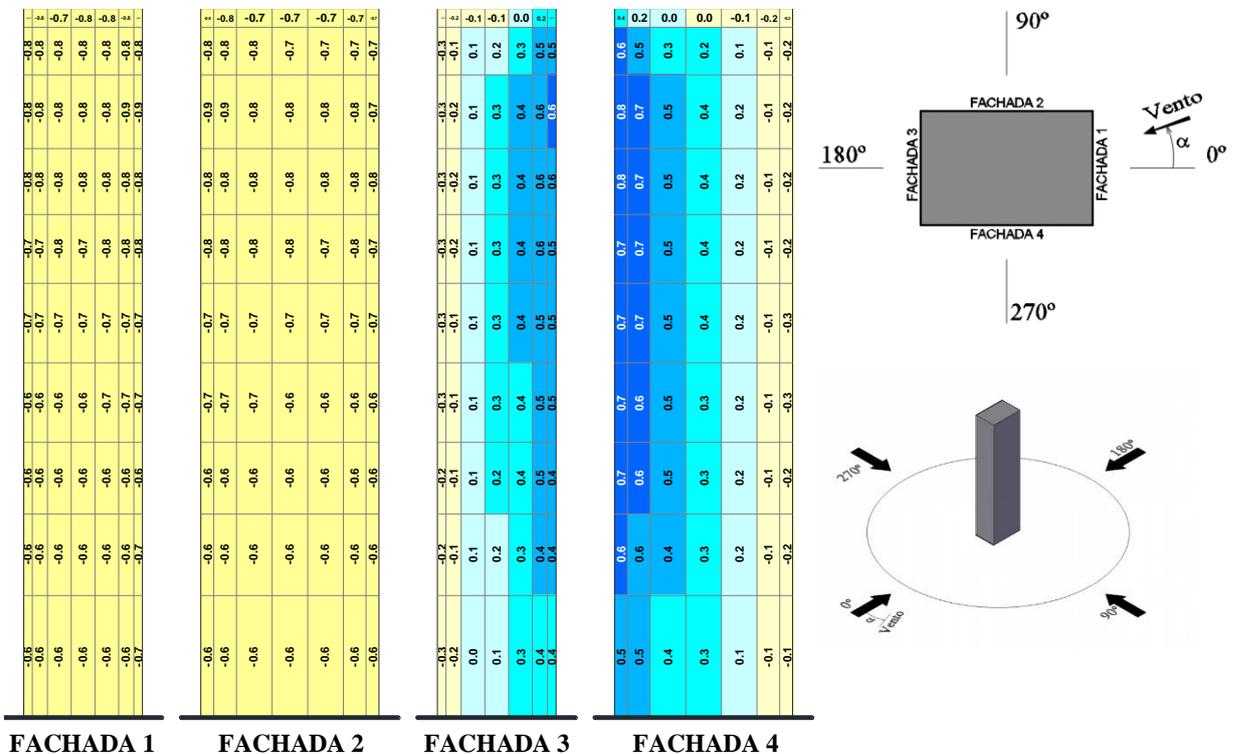
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 73 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 210^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

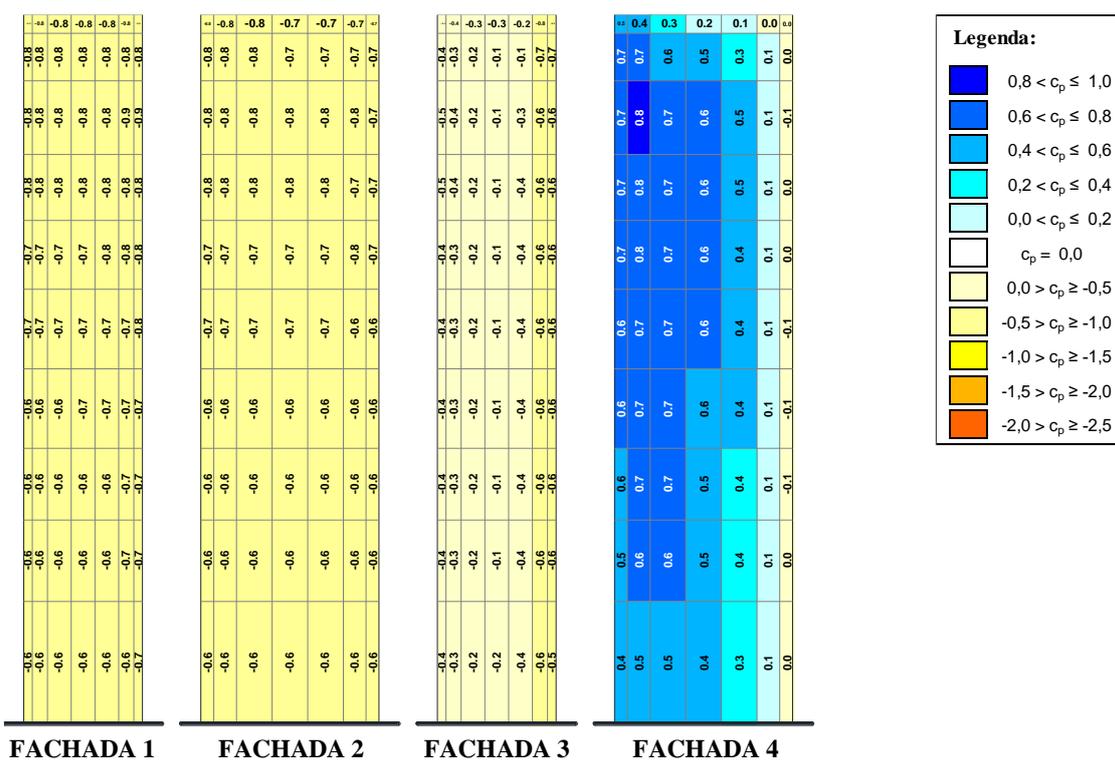
Figura 74 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 225^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

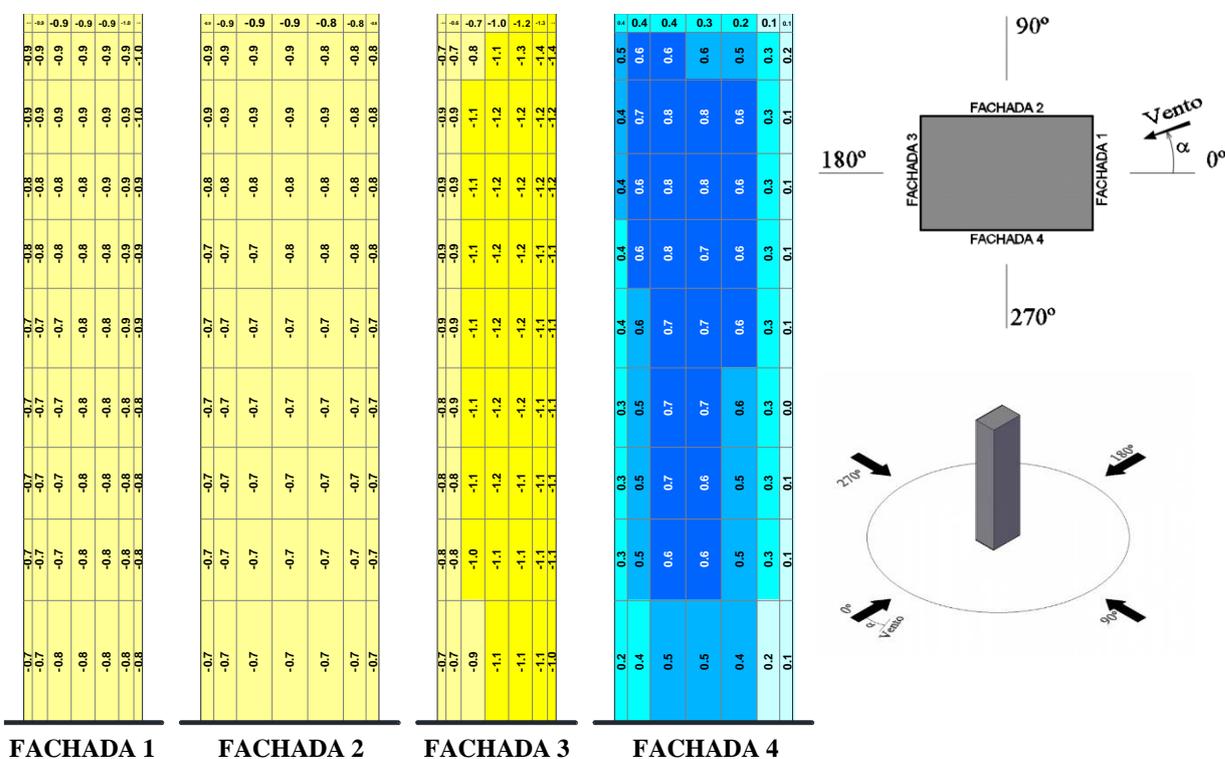
Determinação experimental em túnel de vento dos fatores de vizinhança estáticos e dinâmicos para um modelo de edifício alto em distintas condições de vizinhança

Figura 75 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 240^\circ$



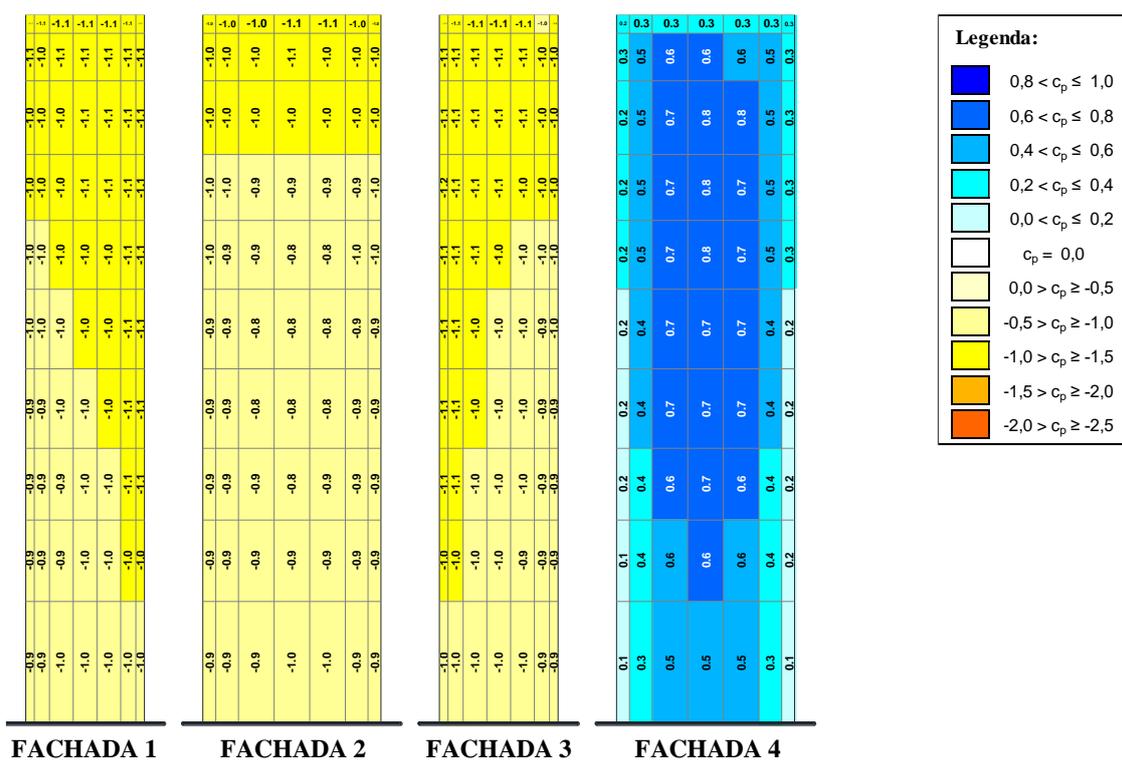
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 76 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 255^\circ$



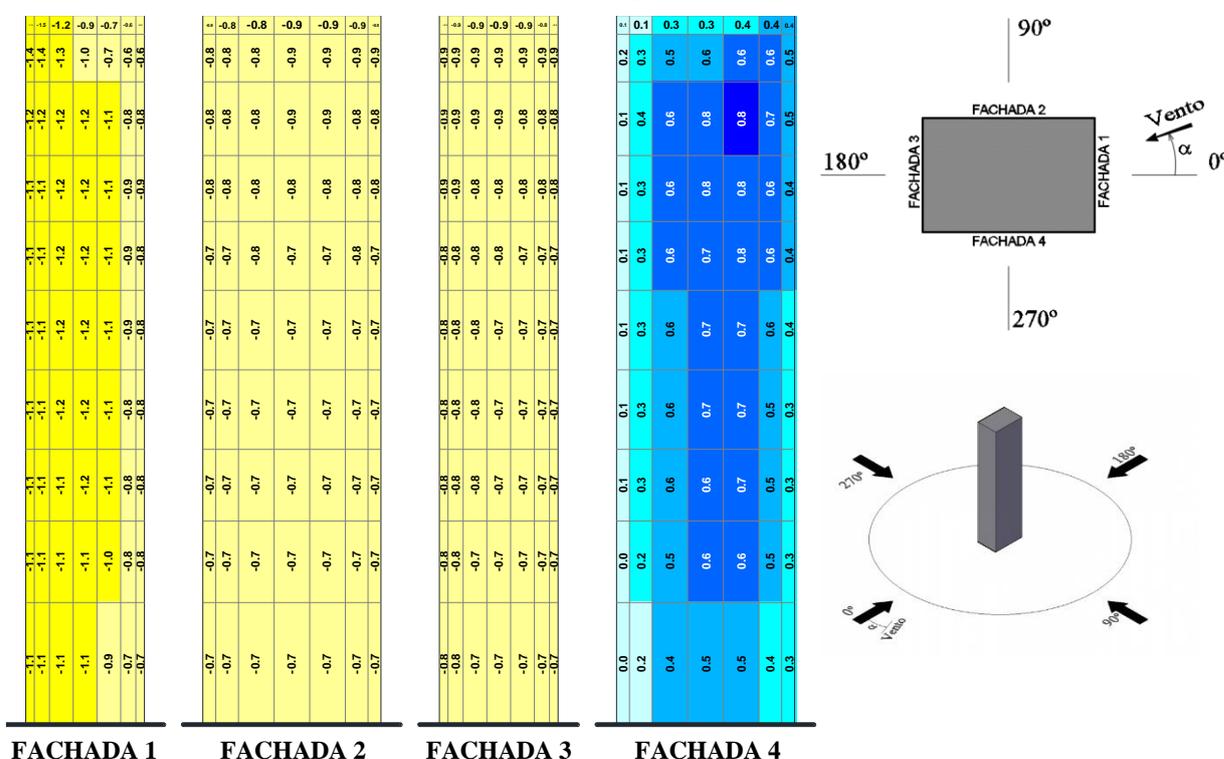
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 77 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 270^\circ$



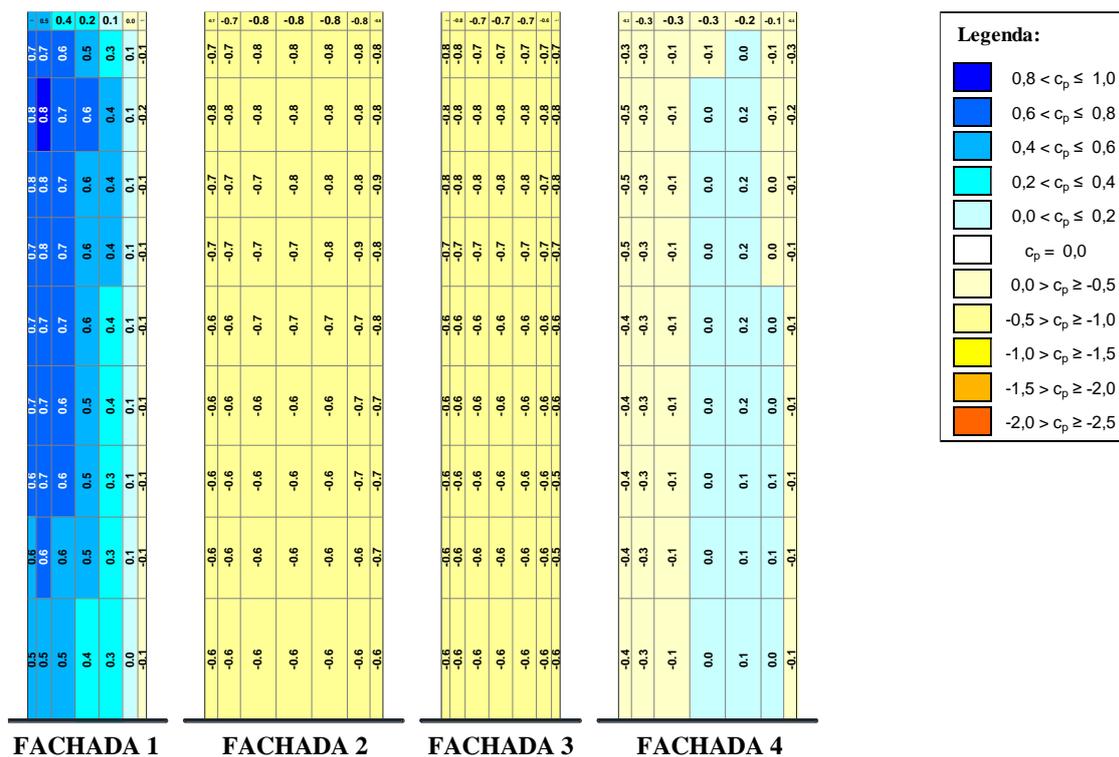
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 78 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 285^\circ$



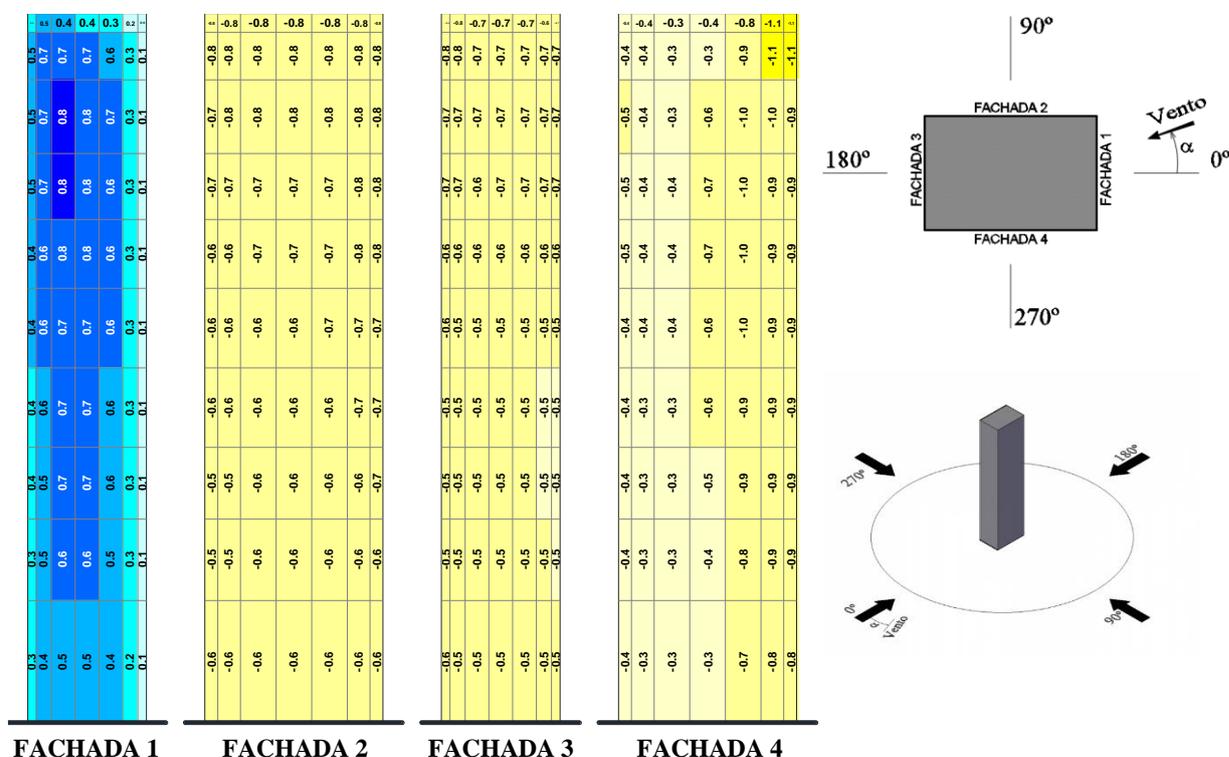
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 81 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 330^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 82 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,11 - 345^\circ$

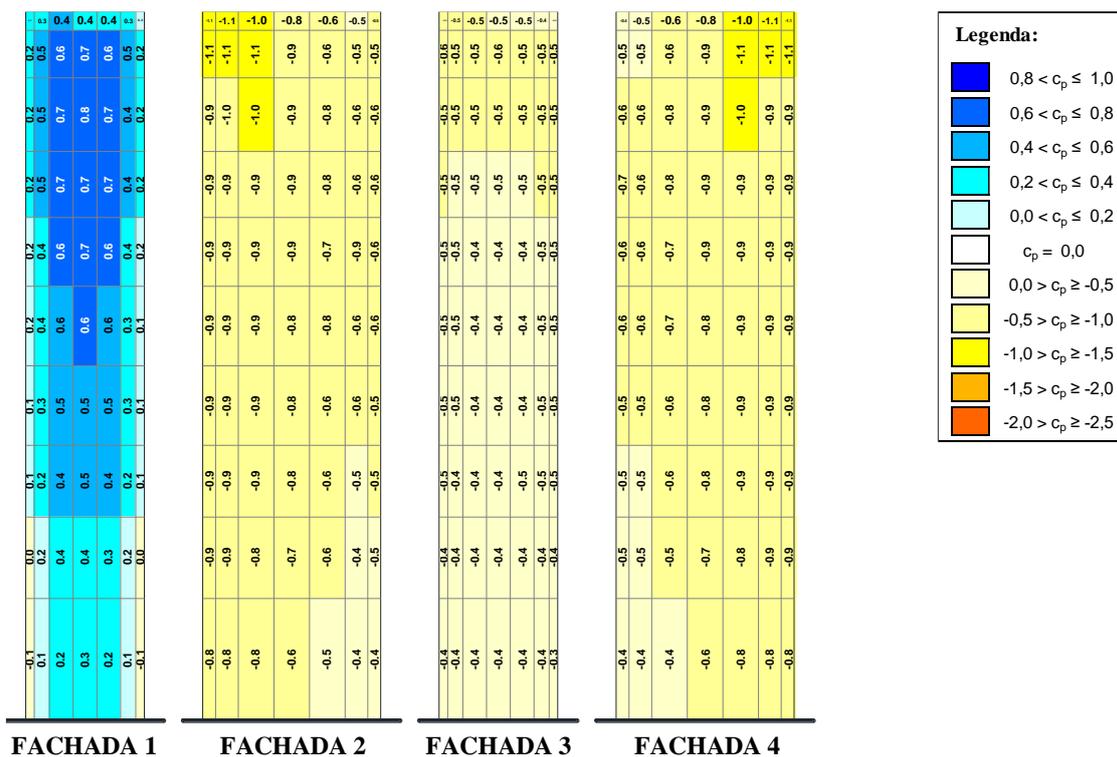


(fonte: elaborado pelo autor)

Determinação experimental em túnel de vento dos fatores de vizinhança estáticos e dinâmicos para um modelo de edifício alto em distintas condições de vizinhança

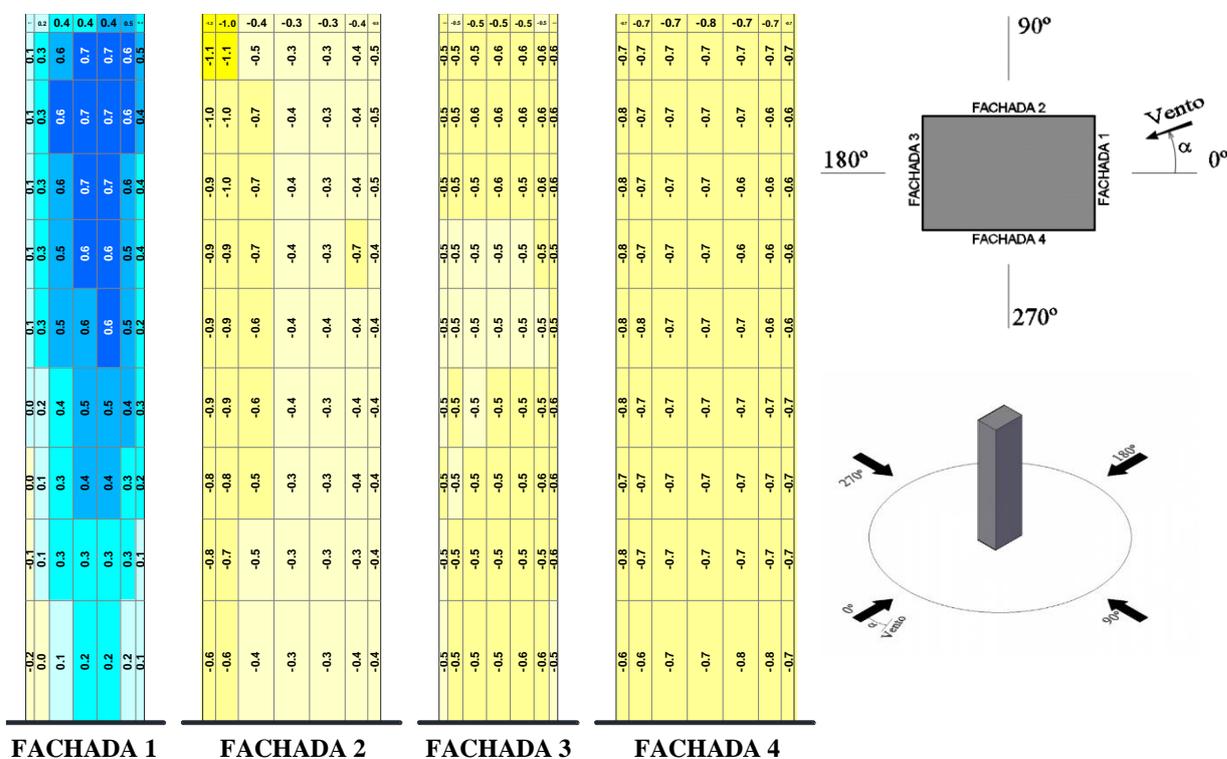
APÊNDICE B – Distribuição dos coeficientes de pressão média para o modelo isolado e vento incidente com expoente $p = 0,26$

Figura 83 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26 - 0^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

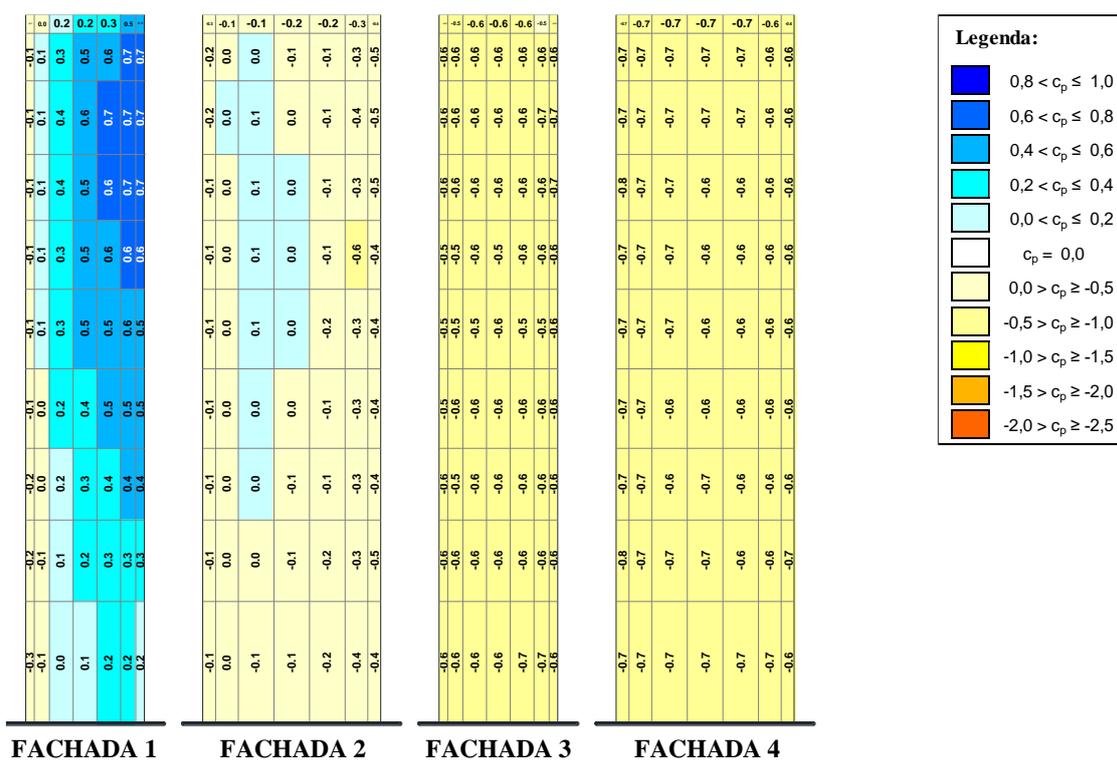
Figura 84 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26 - 15^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

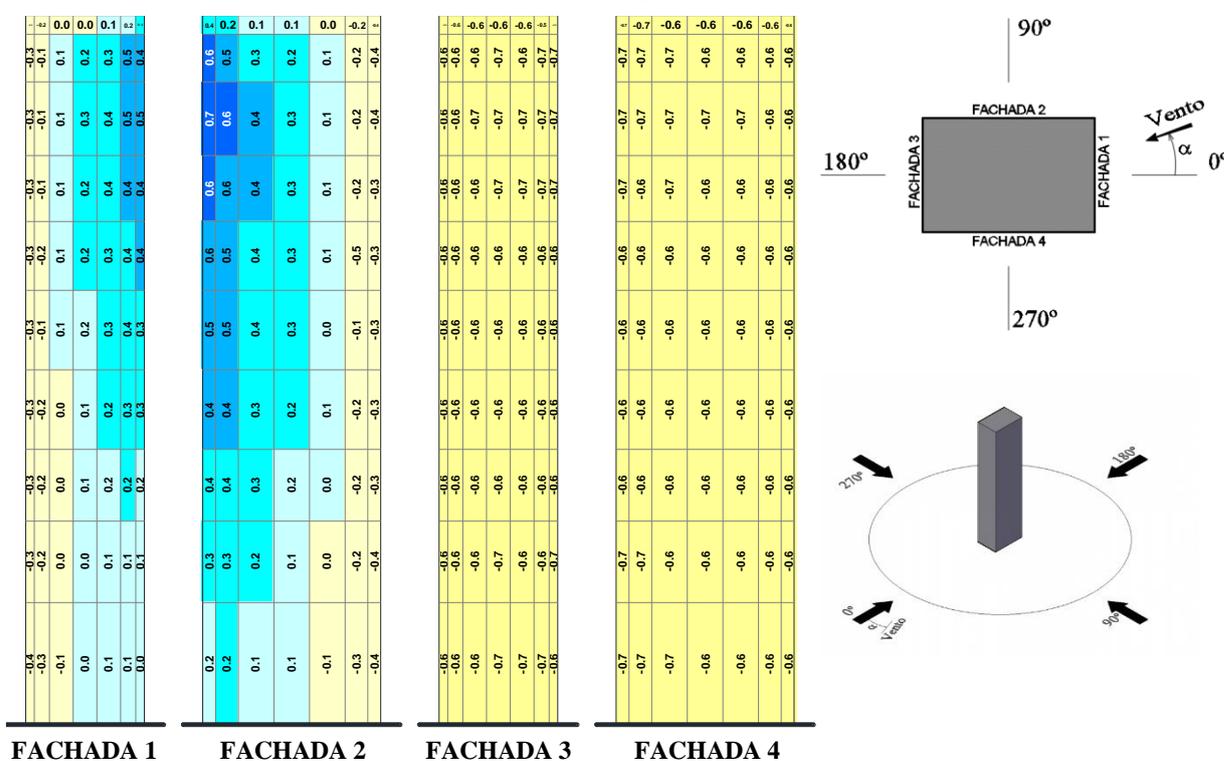
Determinação experimental em túnel de vento dos fatores de vizinhança estáticos e dinâmicos para um modelo de edifício alto em distintas condições de vizinhança

Figura 85 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26 - 30^\circ$



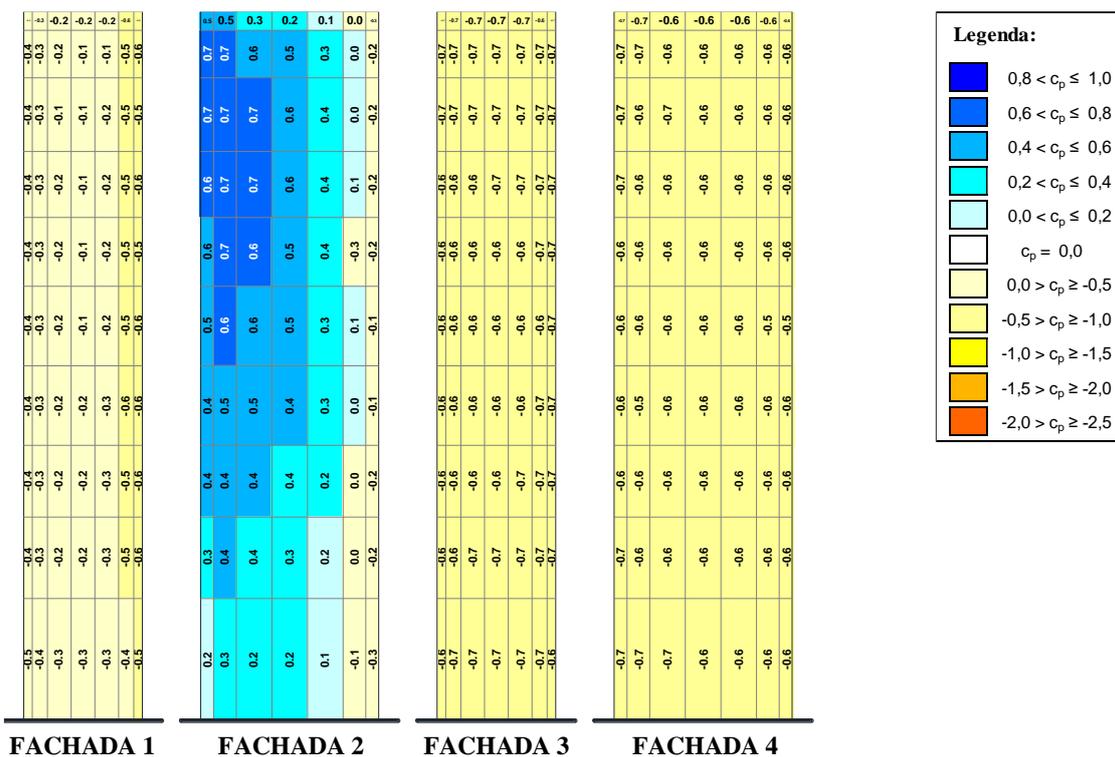
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 86 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26 - 45^\circ$



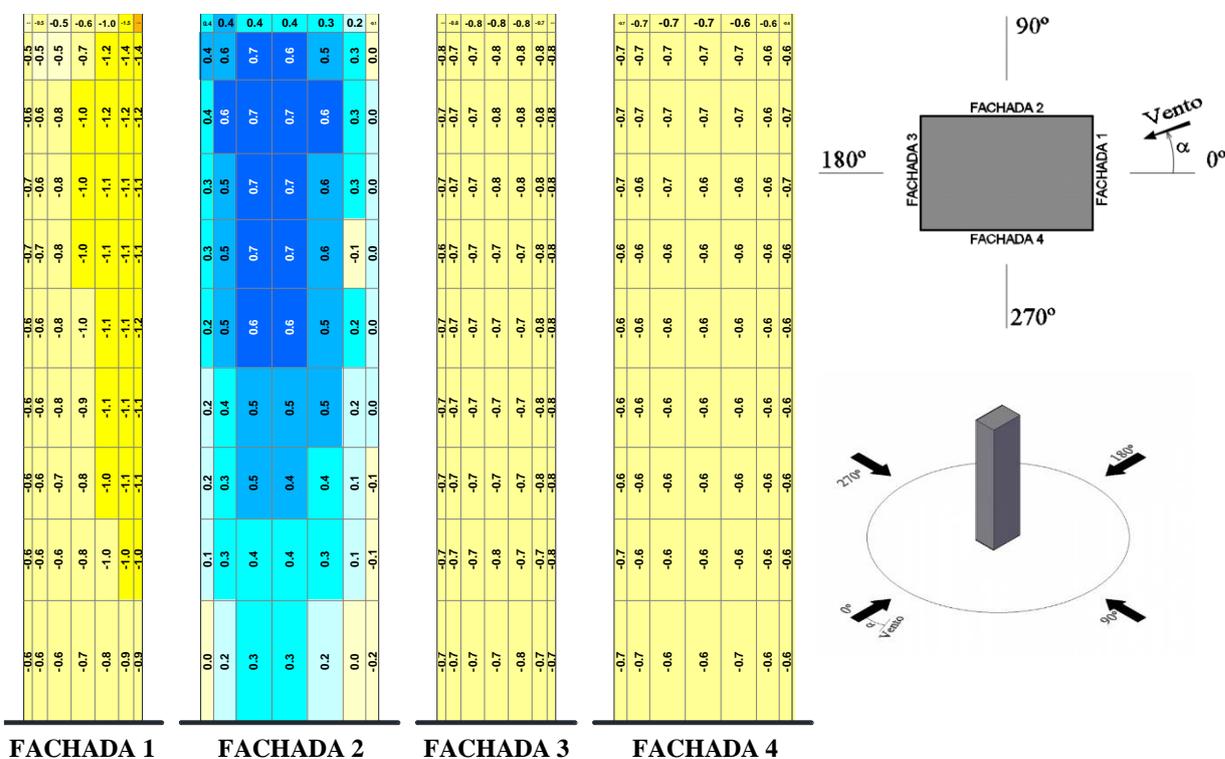
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 87 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26 - 60^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

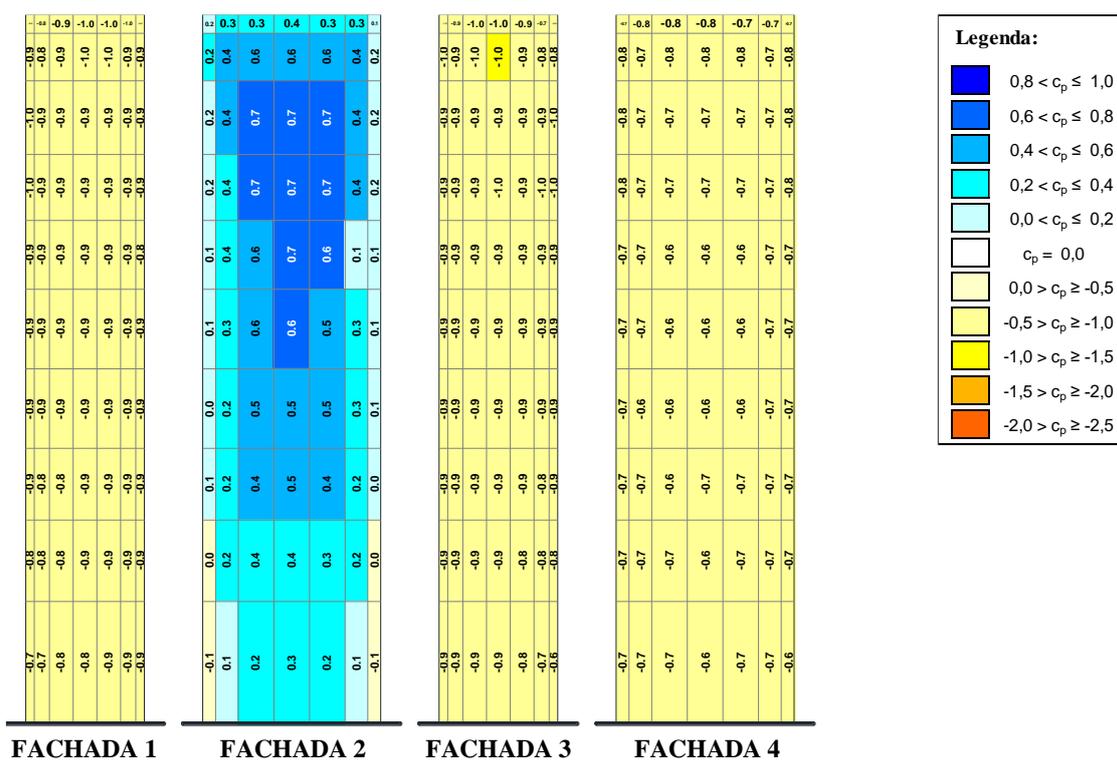
Figura 88 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26 - 75^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

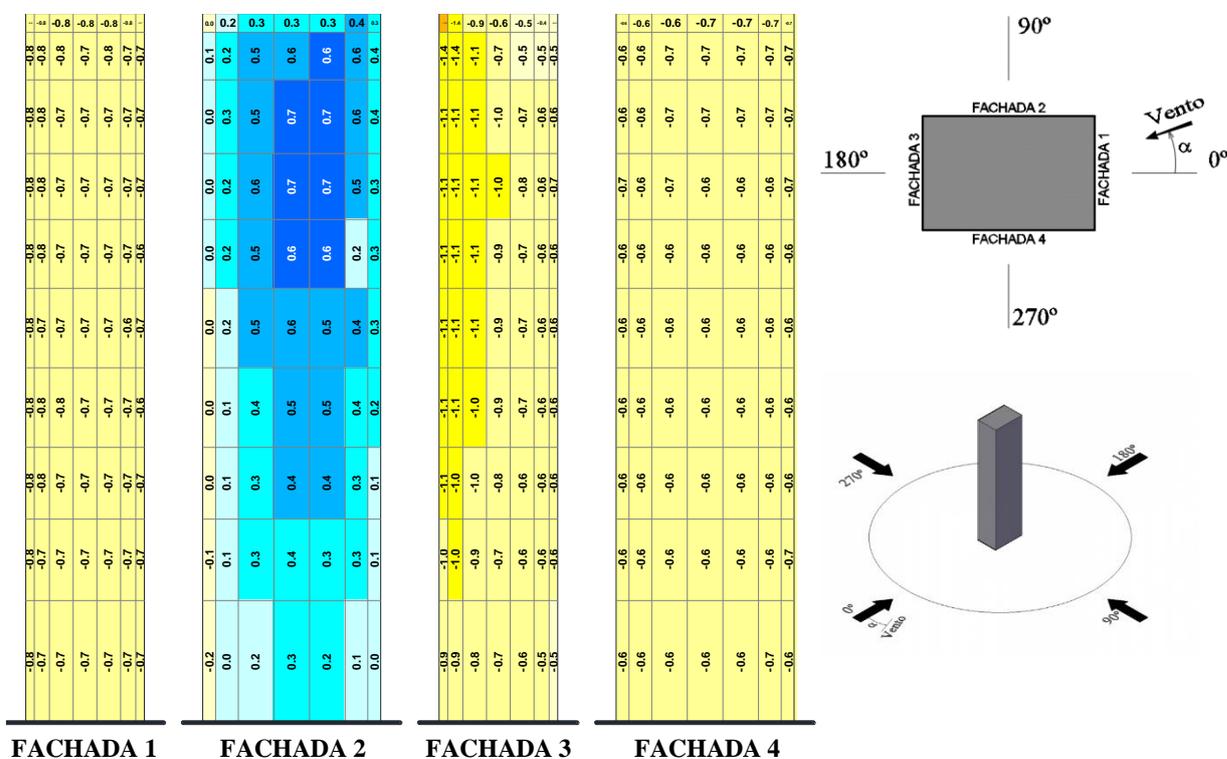
Determinação experimental em túnel de vento dos fatores de vizinhança estáticos e dinâmicos para um modelo de edifício alto em distintas condições de vizinhança

Figura 89 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26 - 90^\circ$



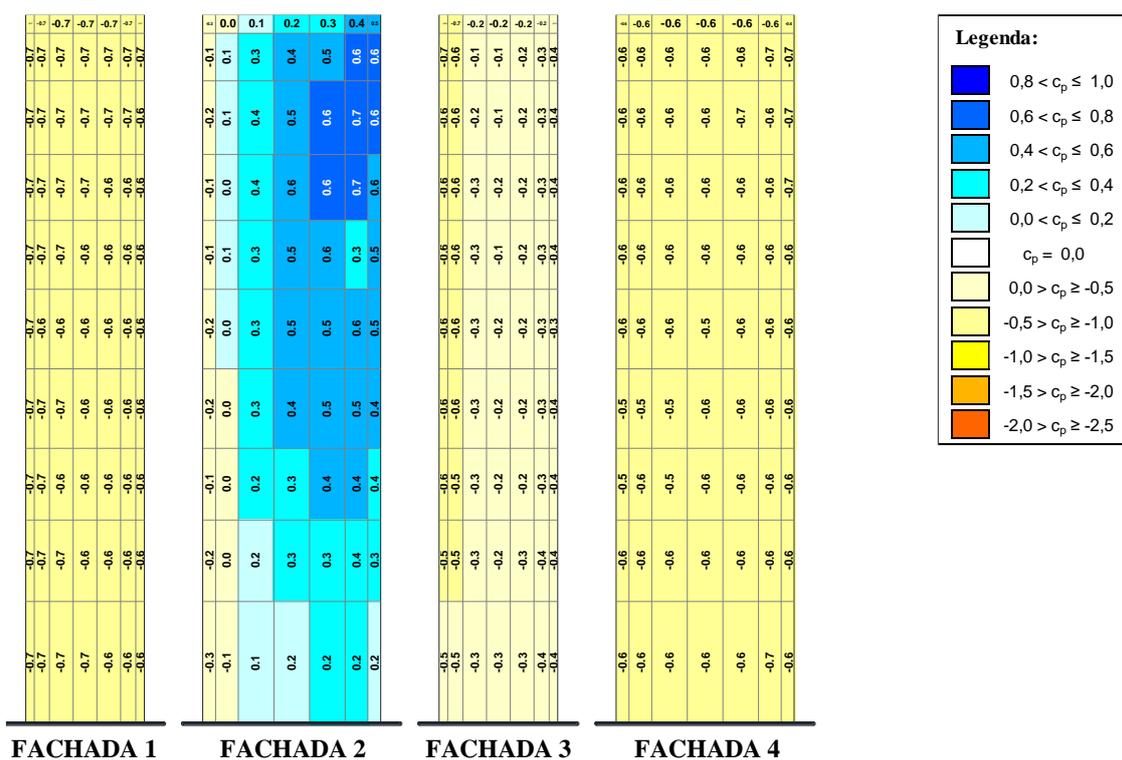
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 90 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26 - 105^\circ$



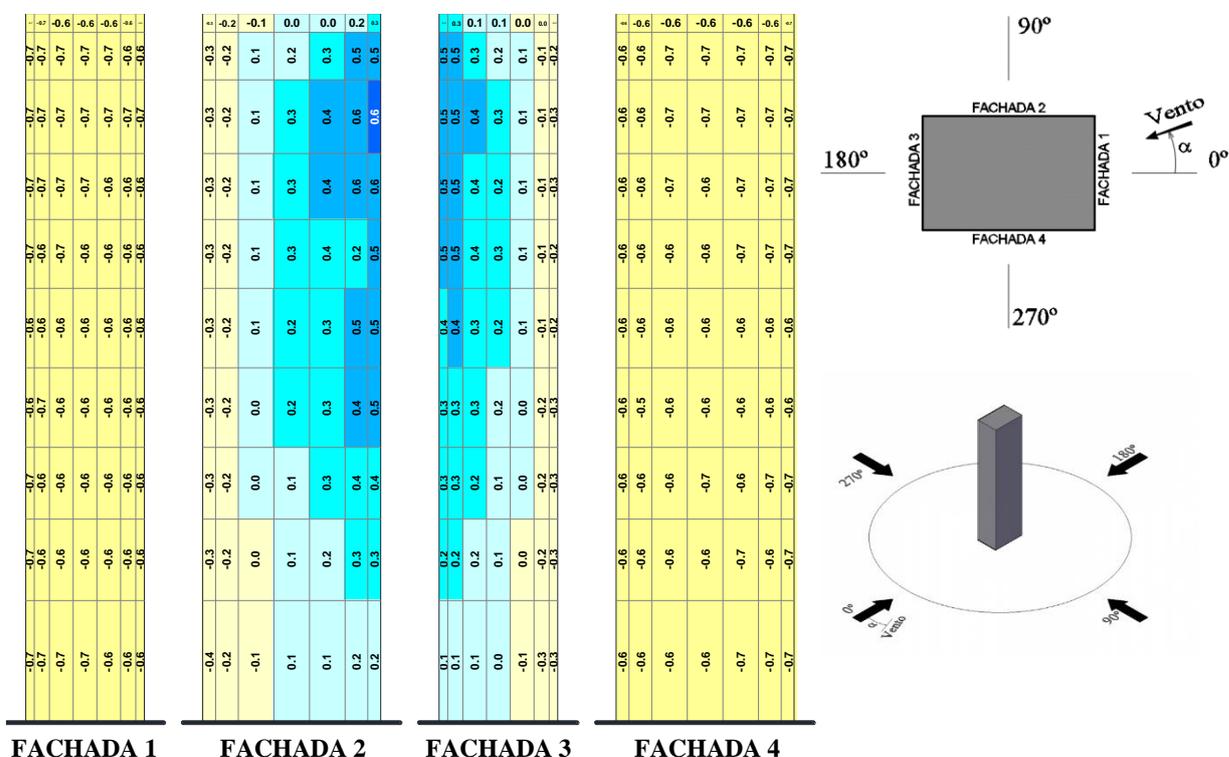
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 91 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26 - 120^\circ$



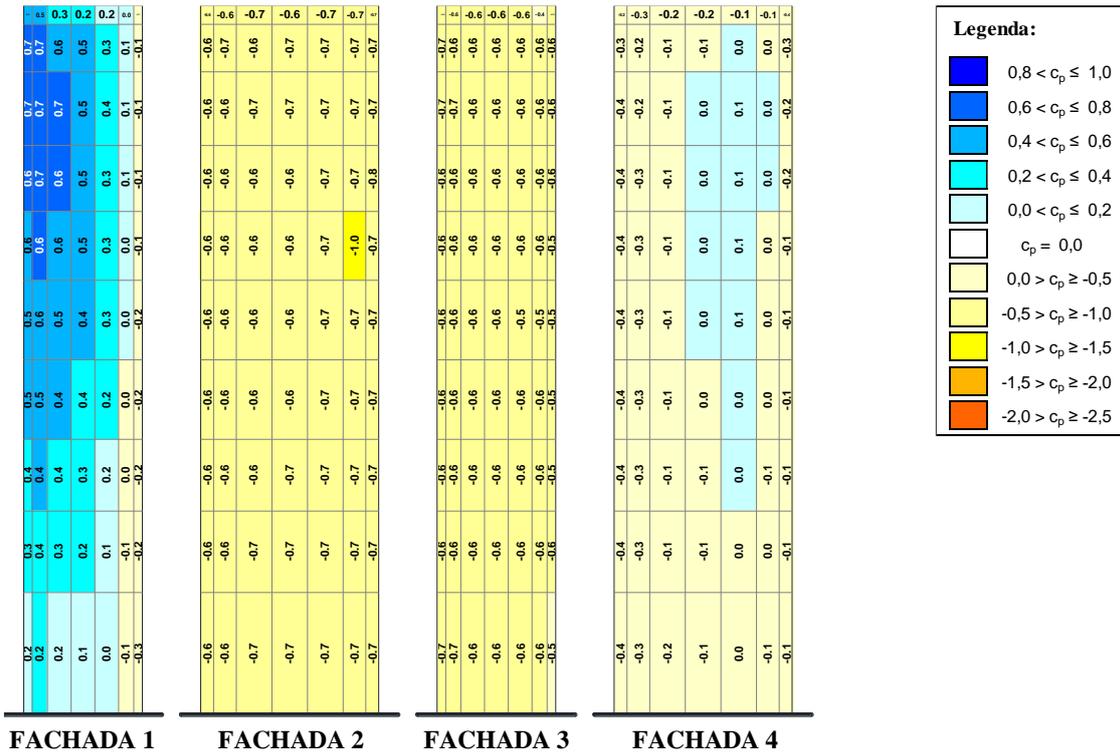
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 92 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26 - 135^\circ$



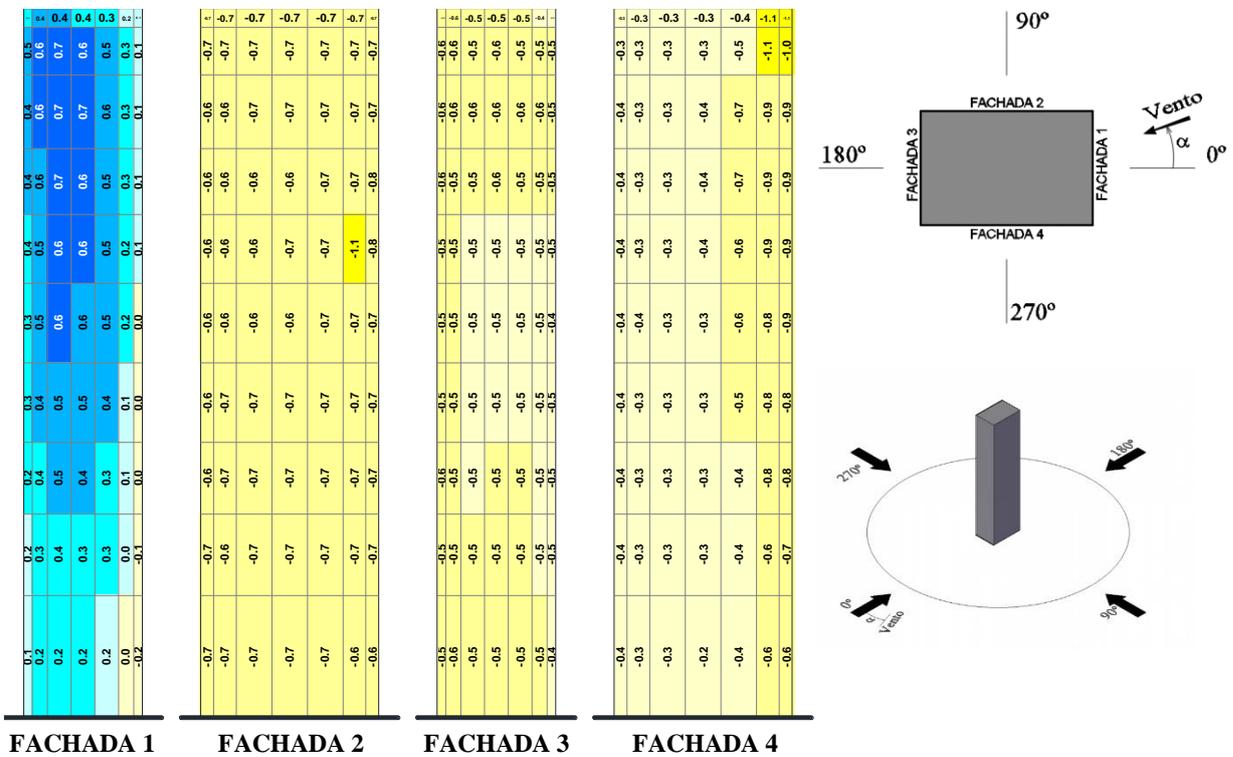
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 105 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26 - 330^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

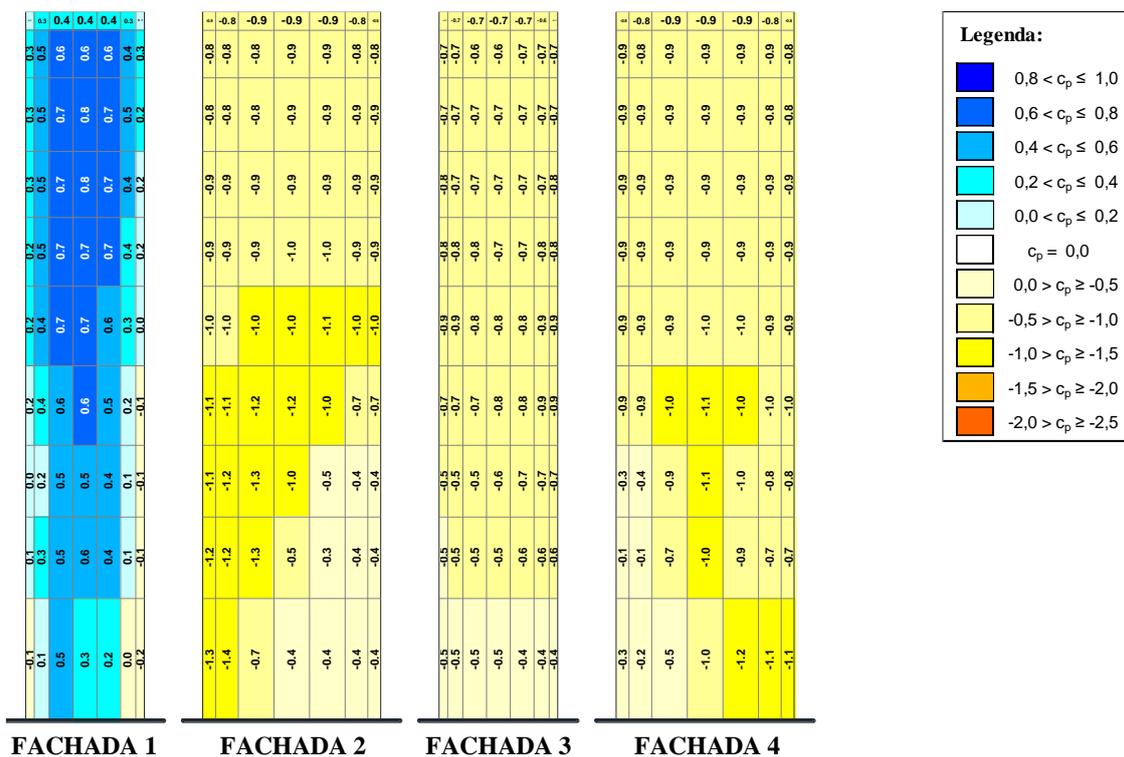
Figura 106 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Isolado - $p = 0,26 - 345^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

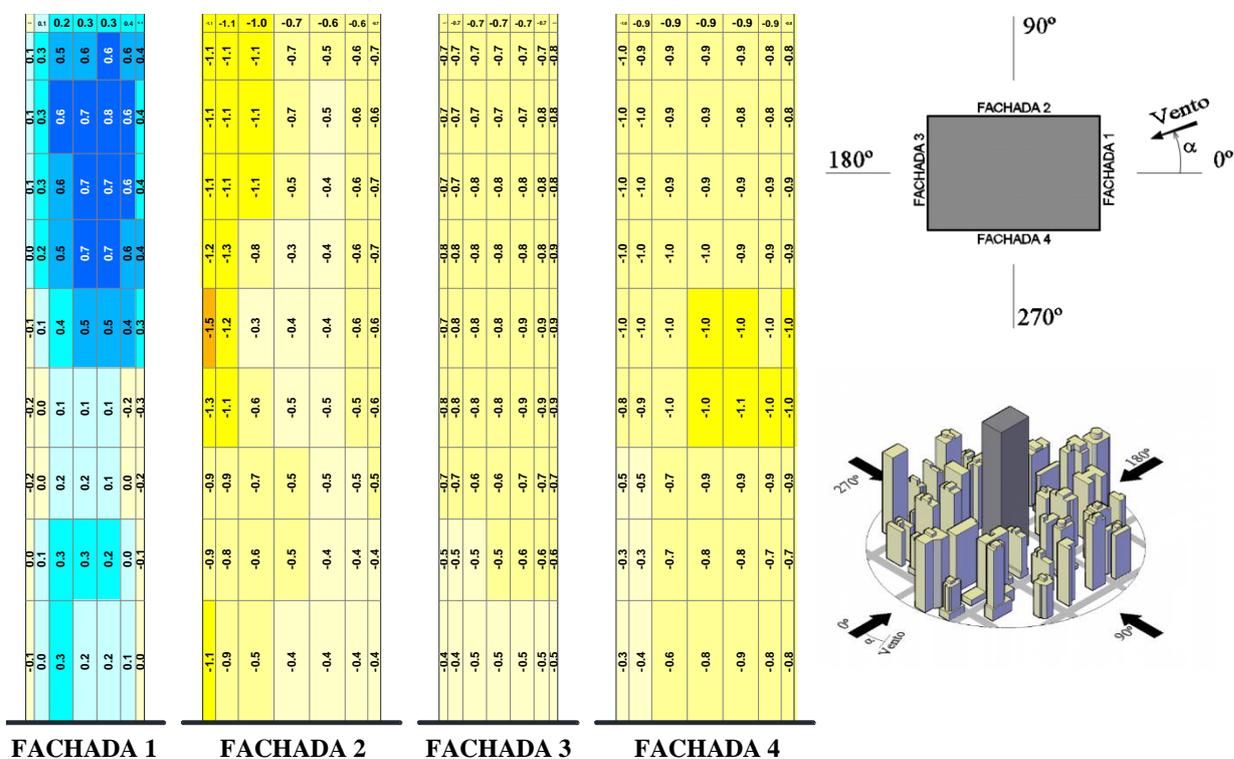
**APÊNDICE C – Distribuição dos coeficientes de pressão média para a
Configuração A de vizinhança e vento incidente com expoente $p = 0,11$**

Figura 107 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11 - 0^\circ$



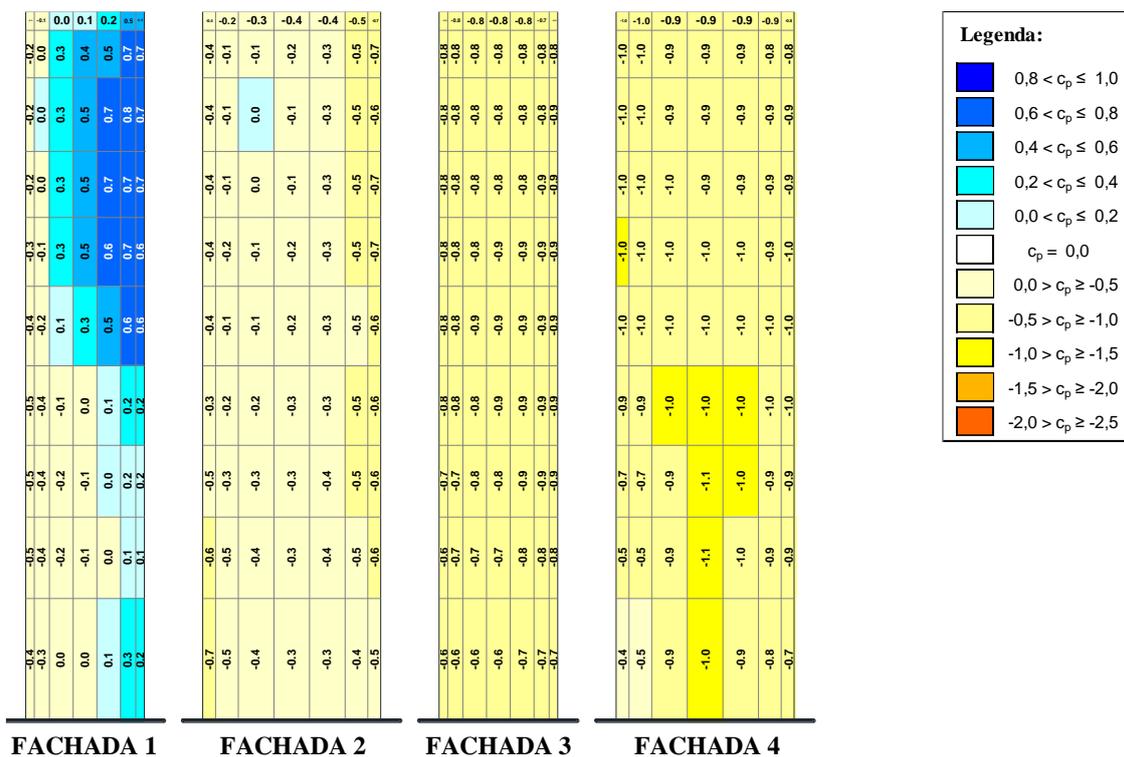
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 108 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11 - 15^\circ$



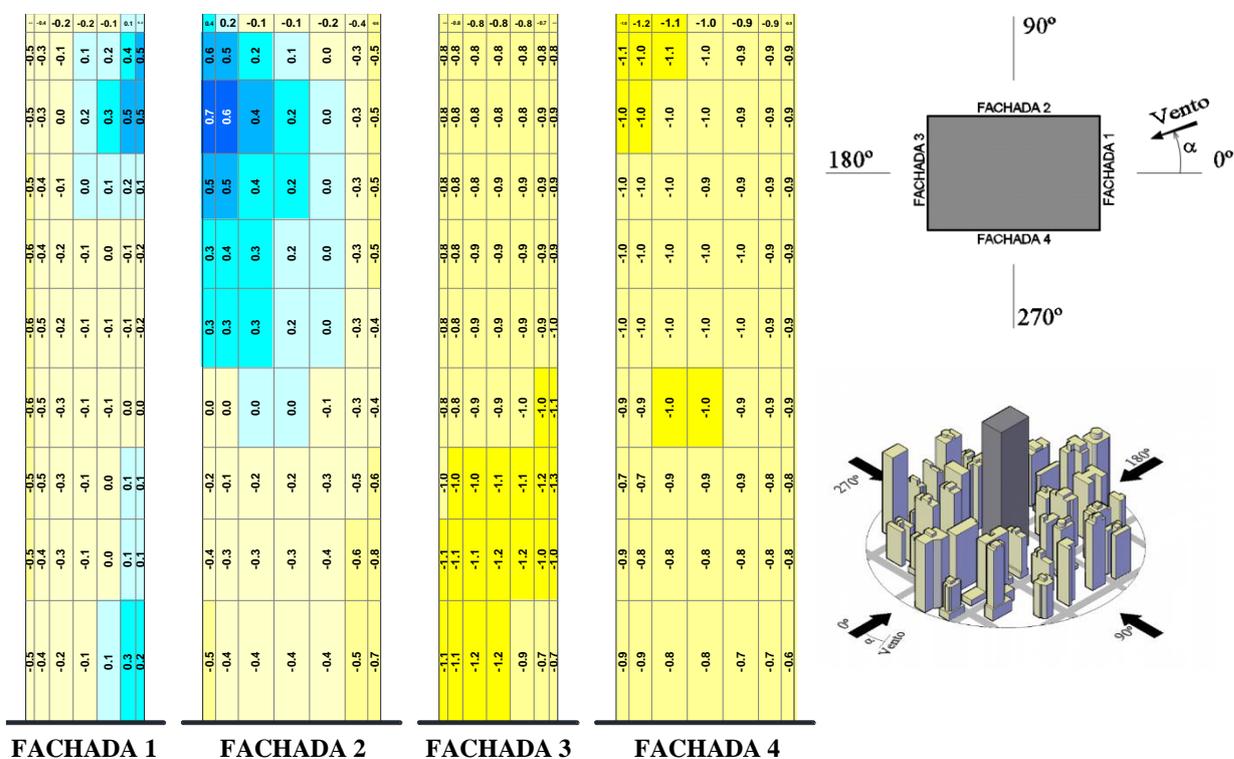
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 109 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11 - 30^\circ$



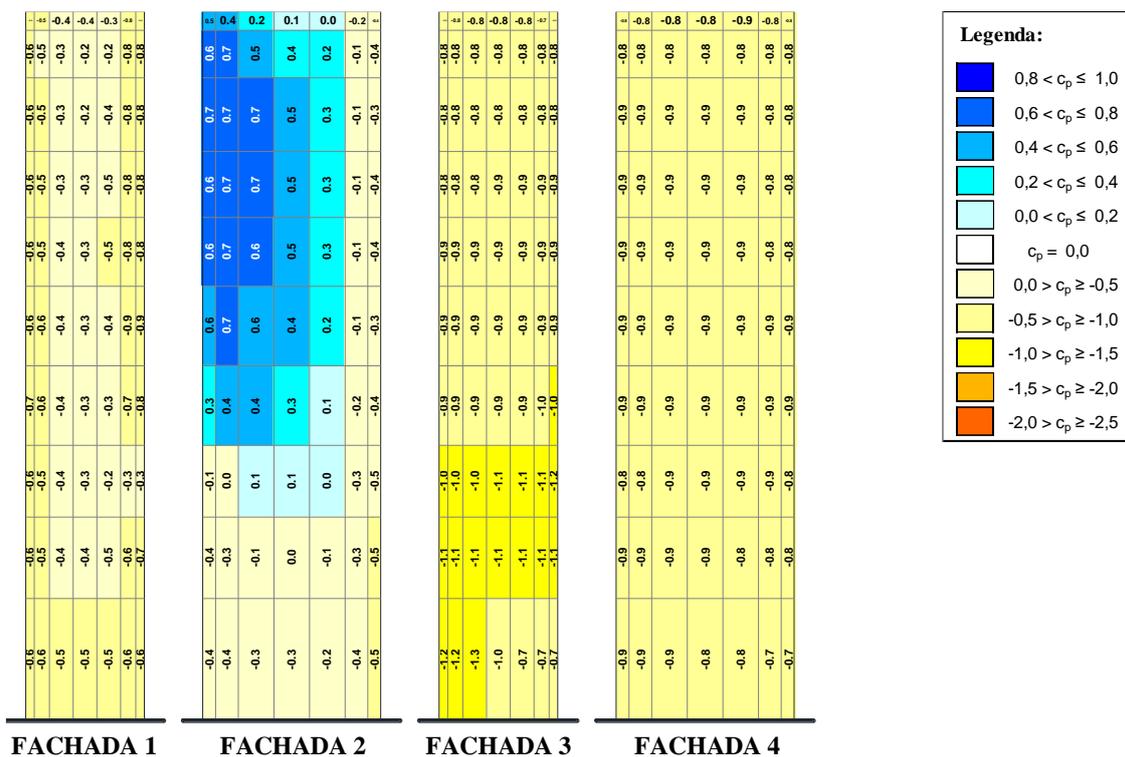
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 110 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11 - 45^\circ$



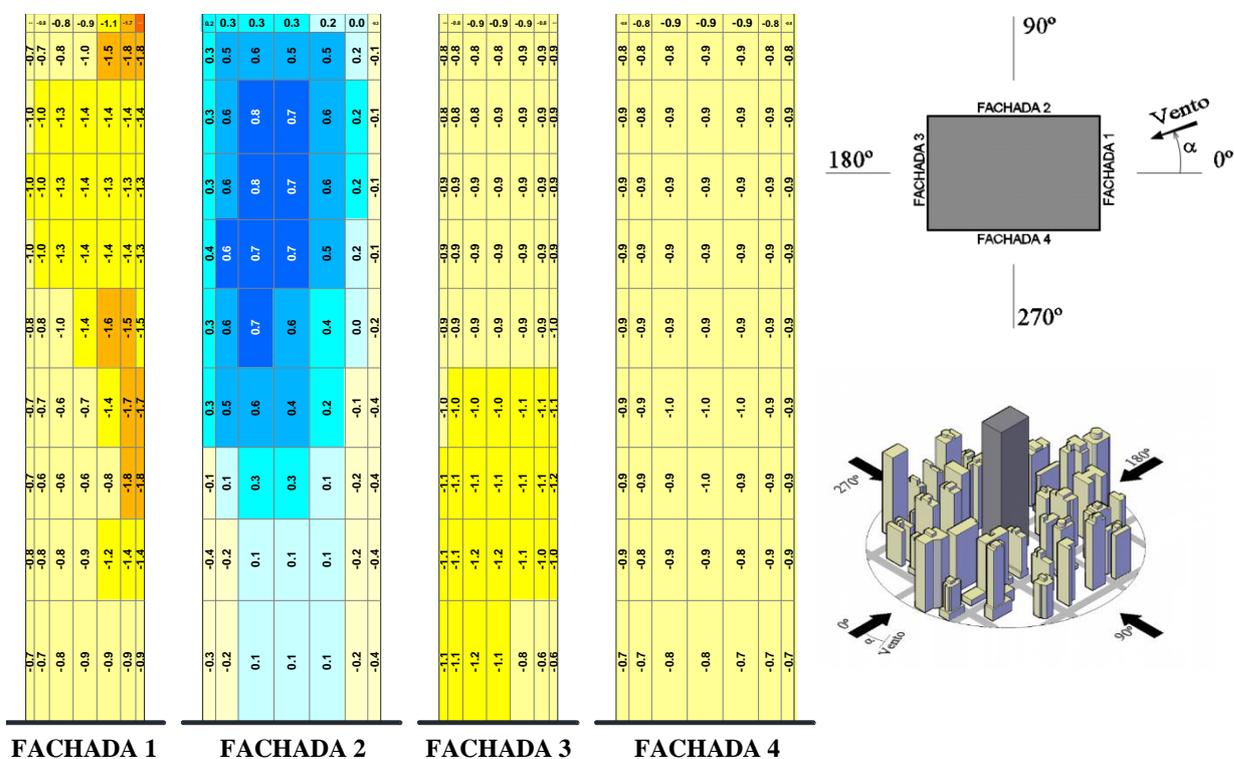
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 111 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11 - 60^\circ$



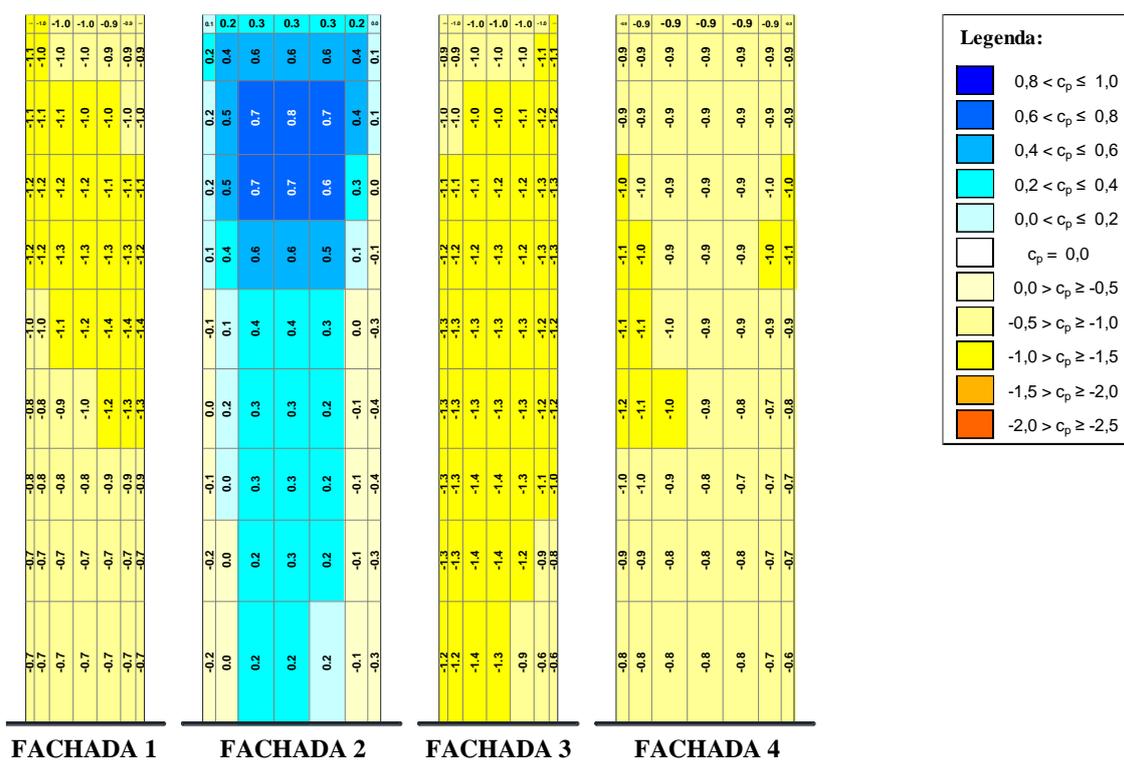
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 112 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11 - 75^\circ$



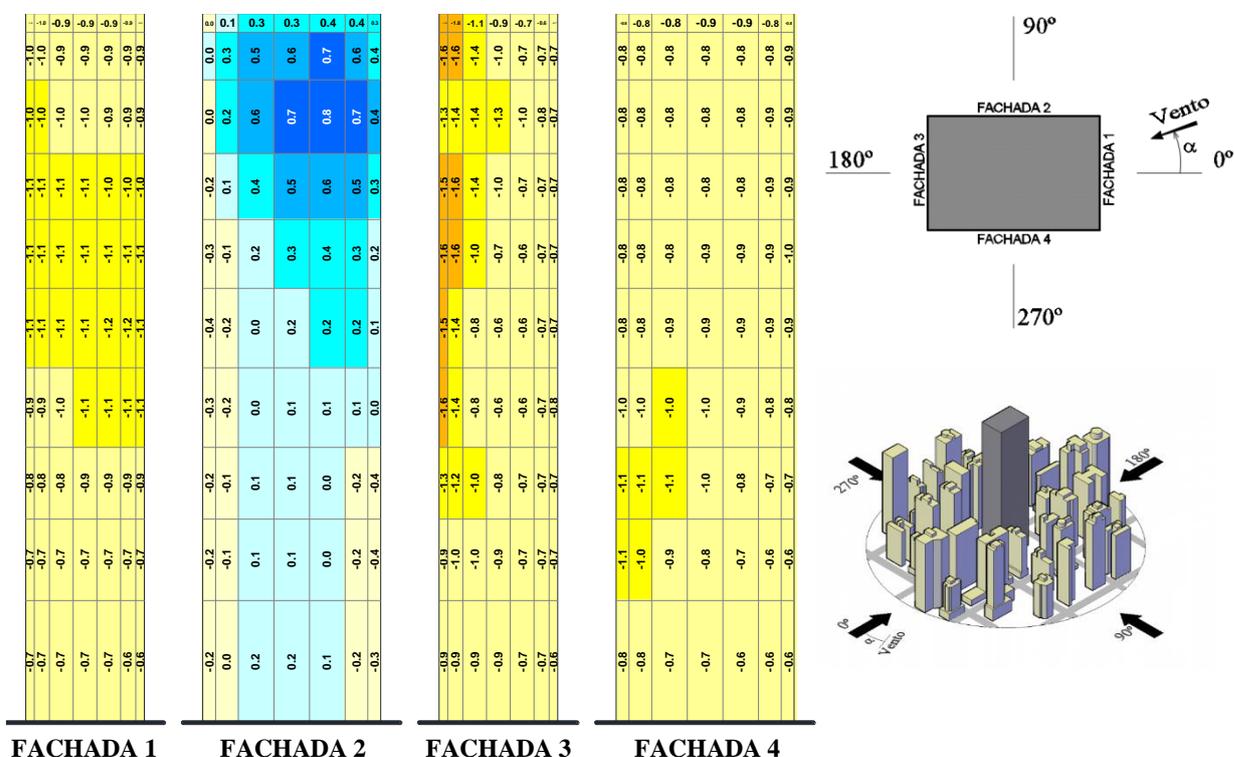
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 113 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11 - 90^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

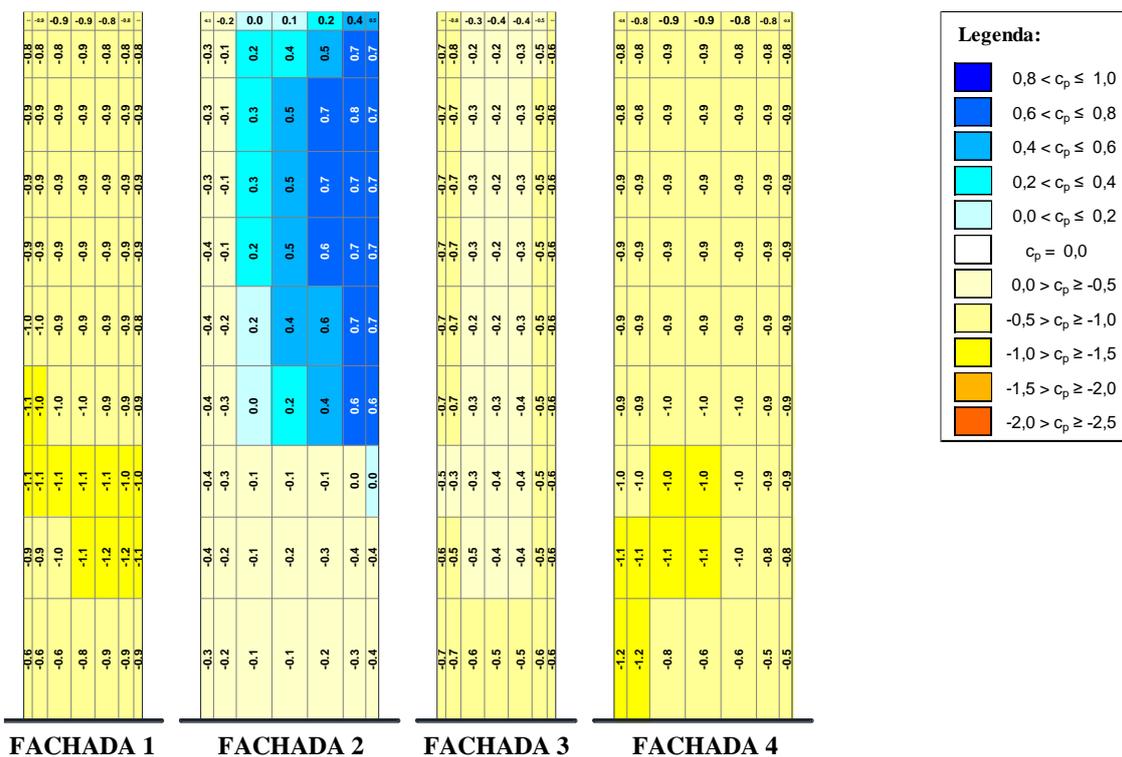
Figura 114 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11 - 105^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

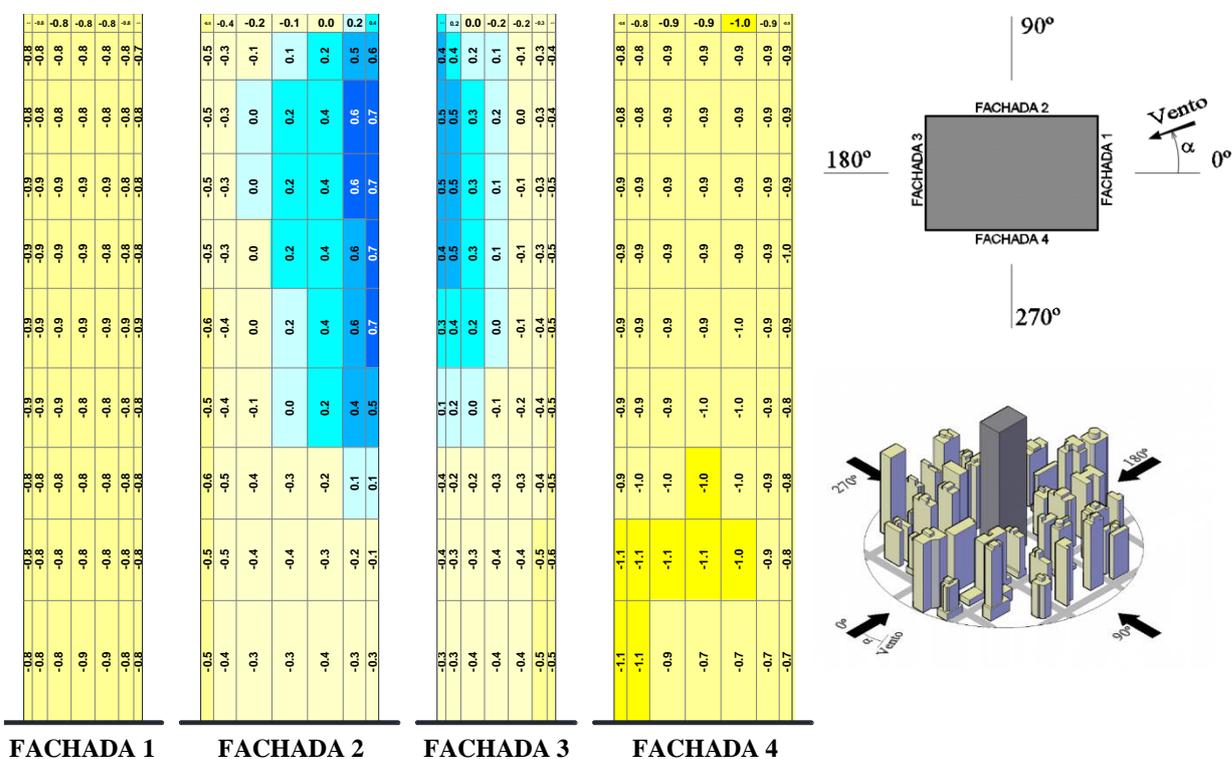
Determinação experimental em túnel de vento dos fatores de vizinhança estáticos e dinâmicos para um modelo de edifício alto em distintas condições de vizinhança

Figura 115 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11 - 120^\circ$



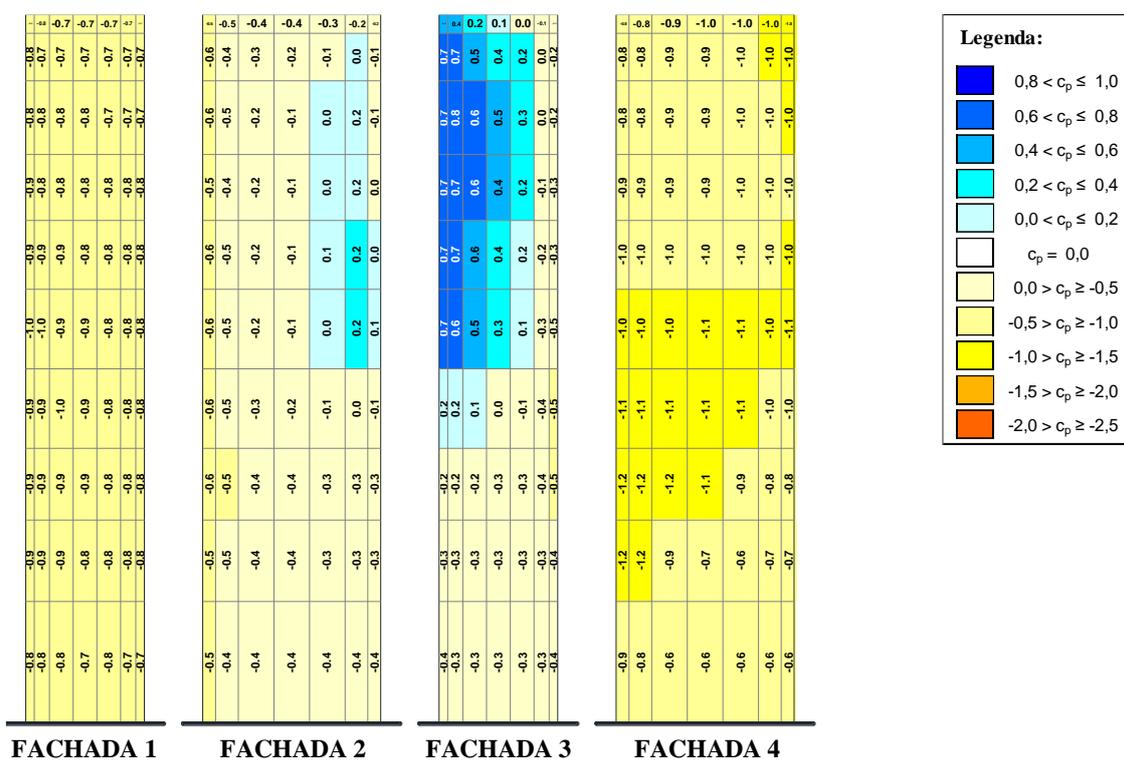
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 116 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11 - 135^\circ$



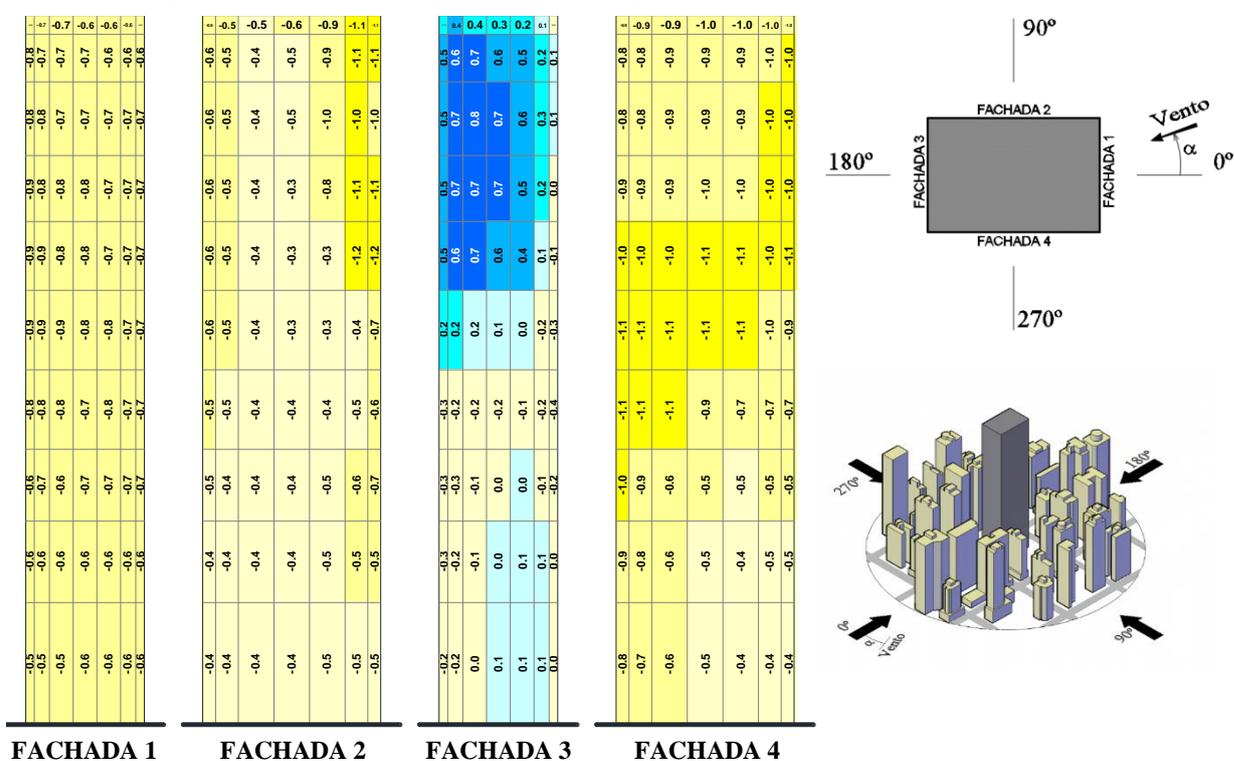
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 117 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11 - 150^\circ$



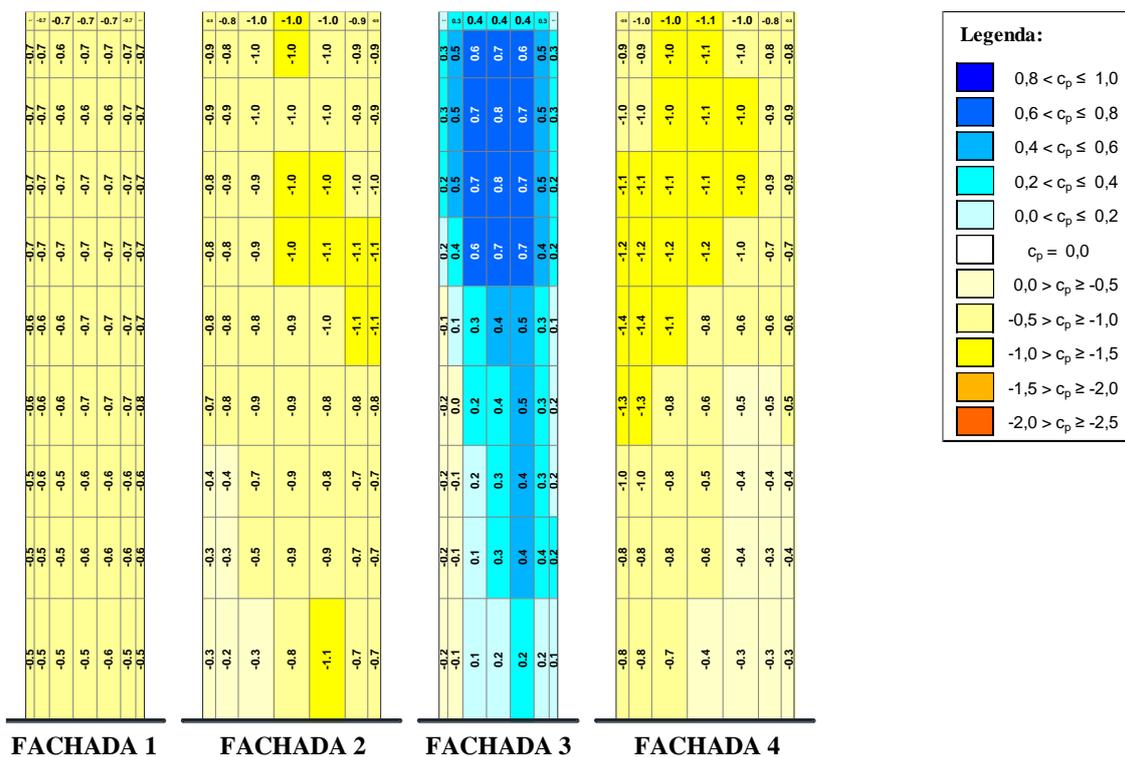
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 118 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11 - 165^\circ$



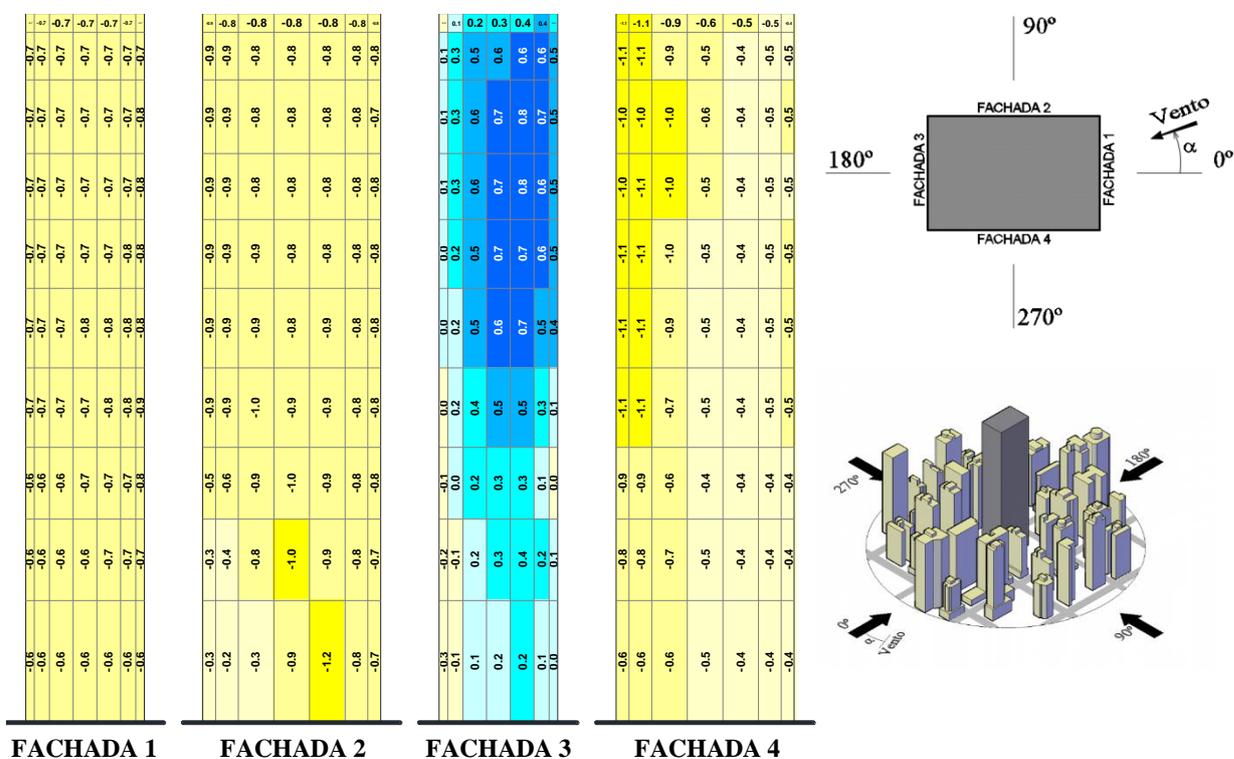
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 119 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11 - 180^\circ$



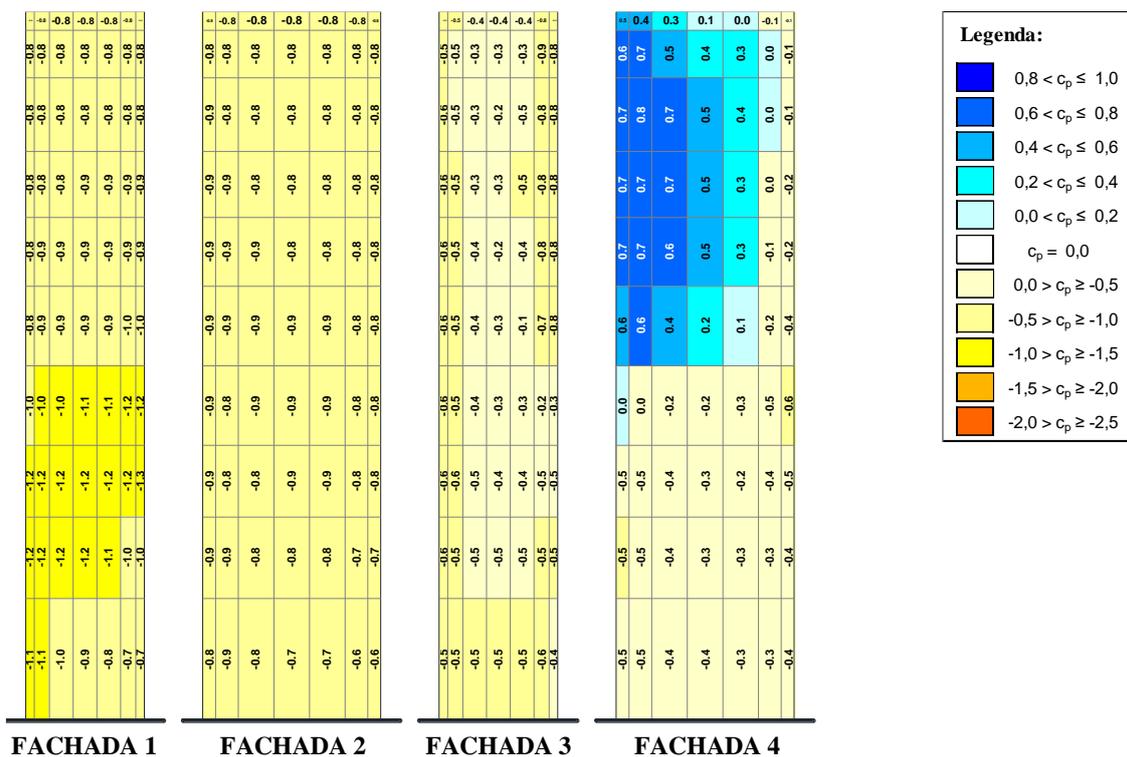
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 120 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11 - 195^\circ$



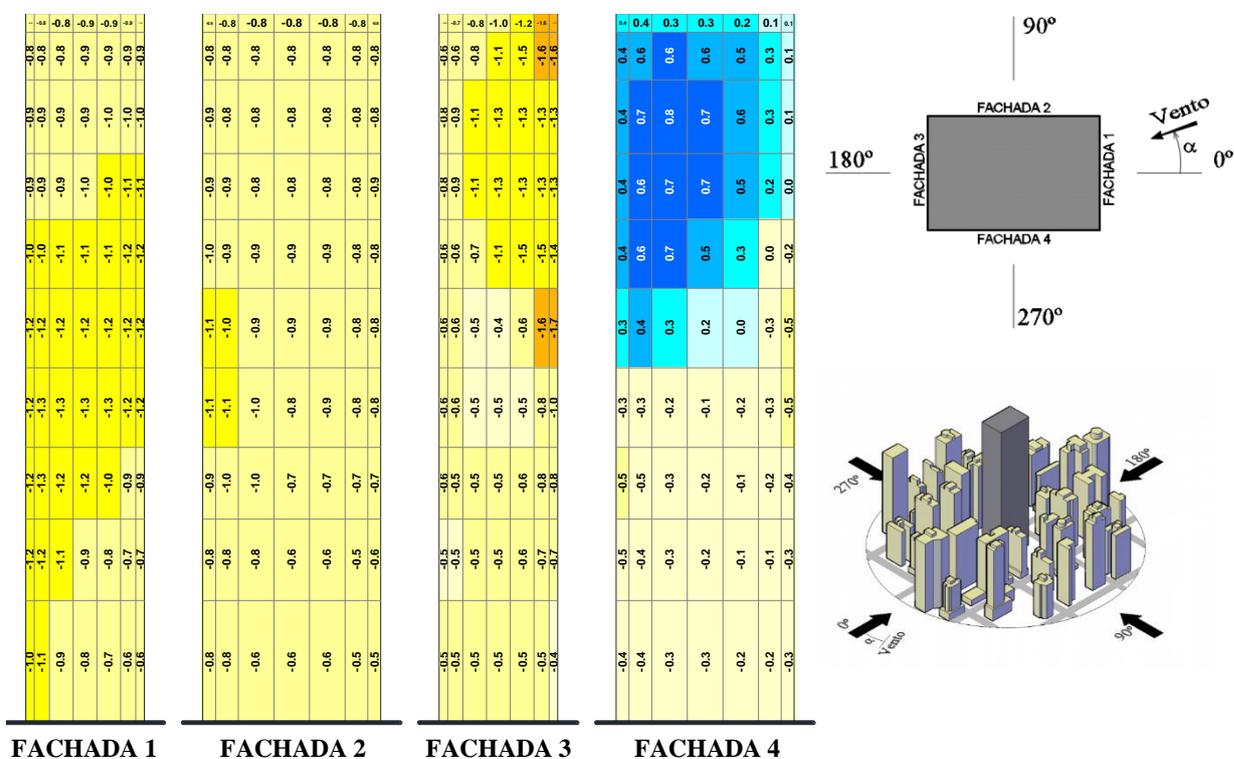
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 123 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11 - 240^\circ$



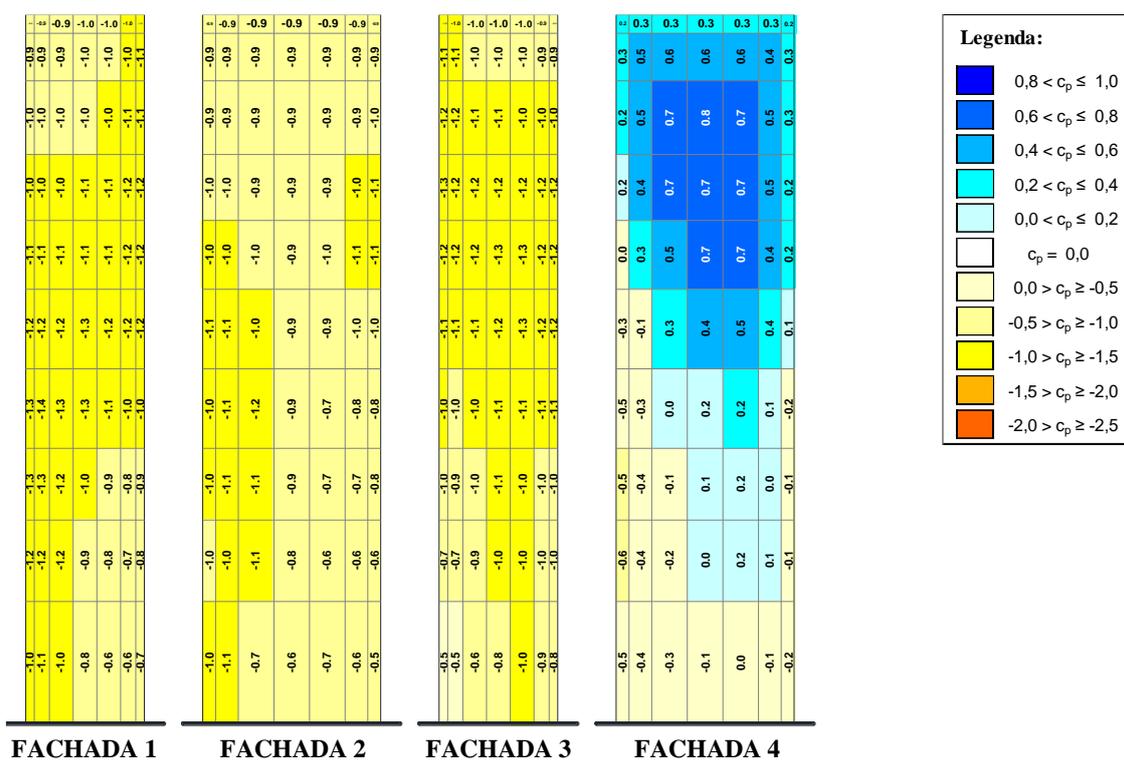
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 124 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11 - 255^\circ$



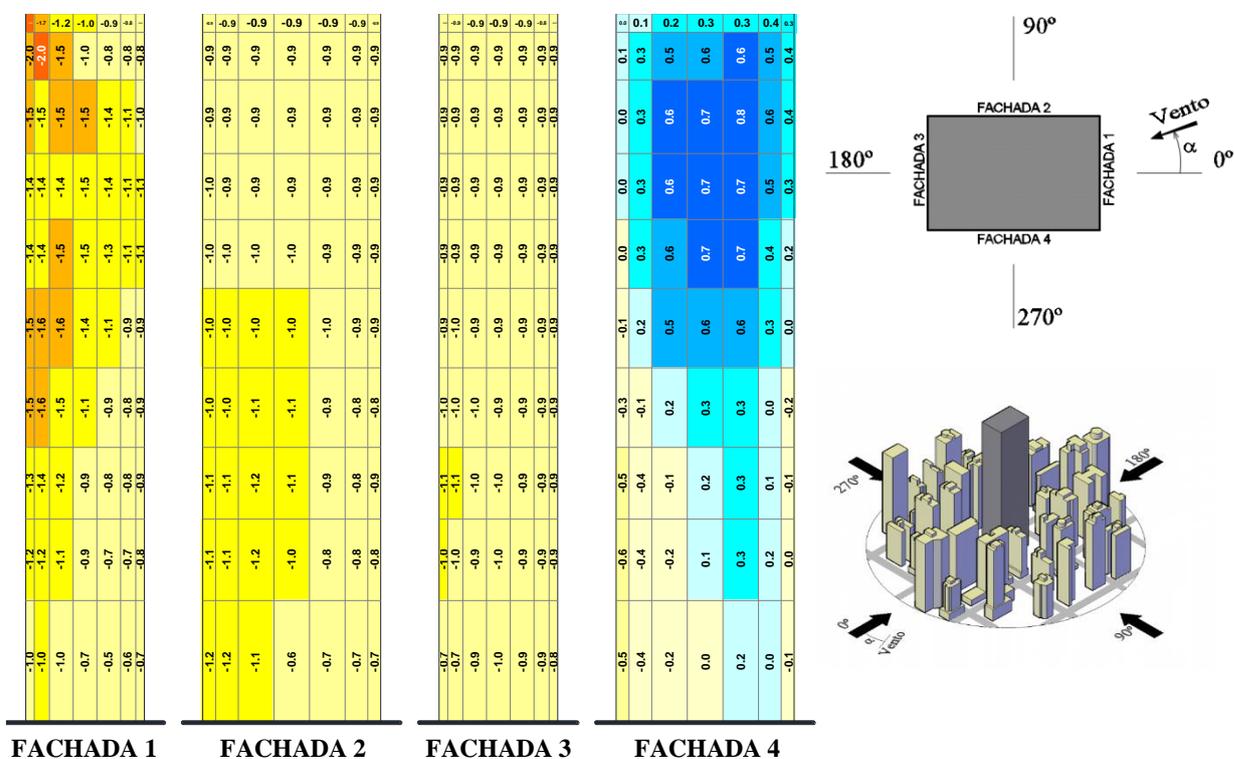
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 125 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11 - 270^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

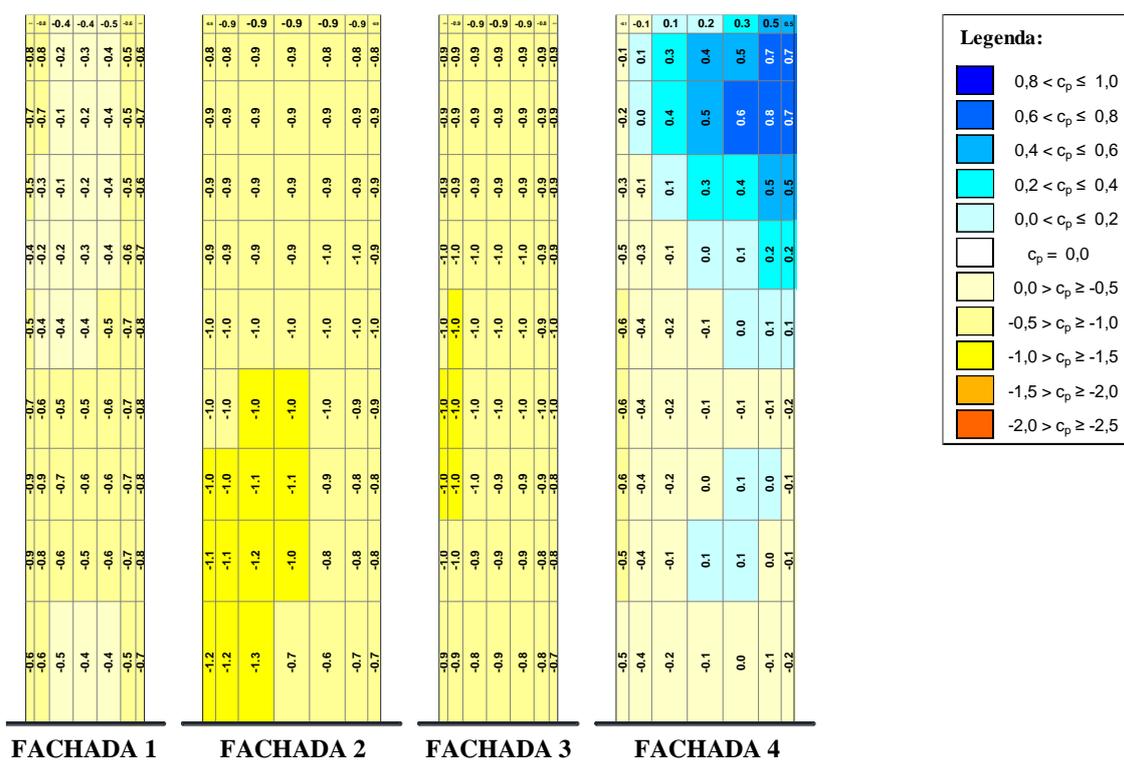
Figura 126 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11 - 285^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

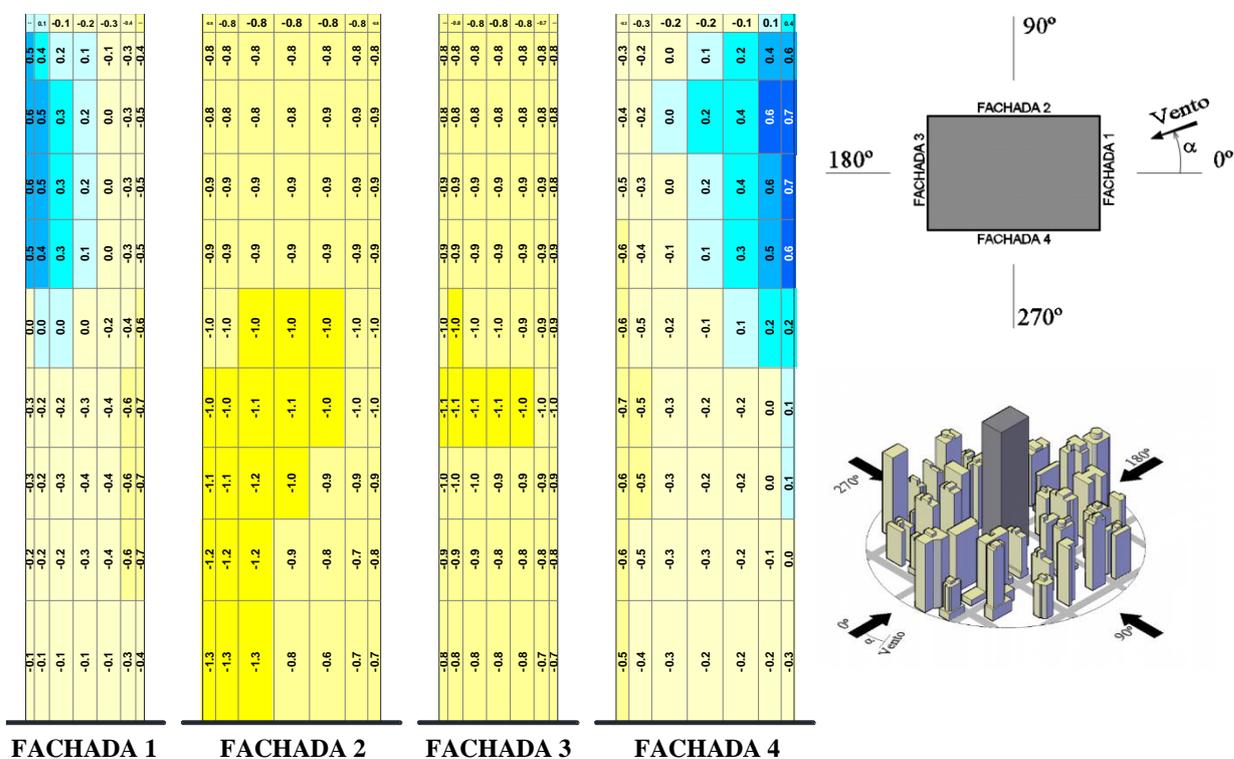
Determinação experimental em túnel de vento dos fatores de vizinhança estáticos e dinâmicos para um modelo de edifício alto em distintas condições de vizinhança

Figura 127 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11 - 300^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

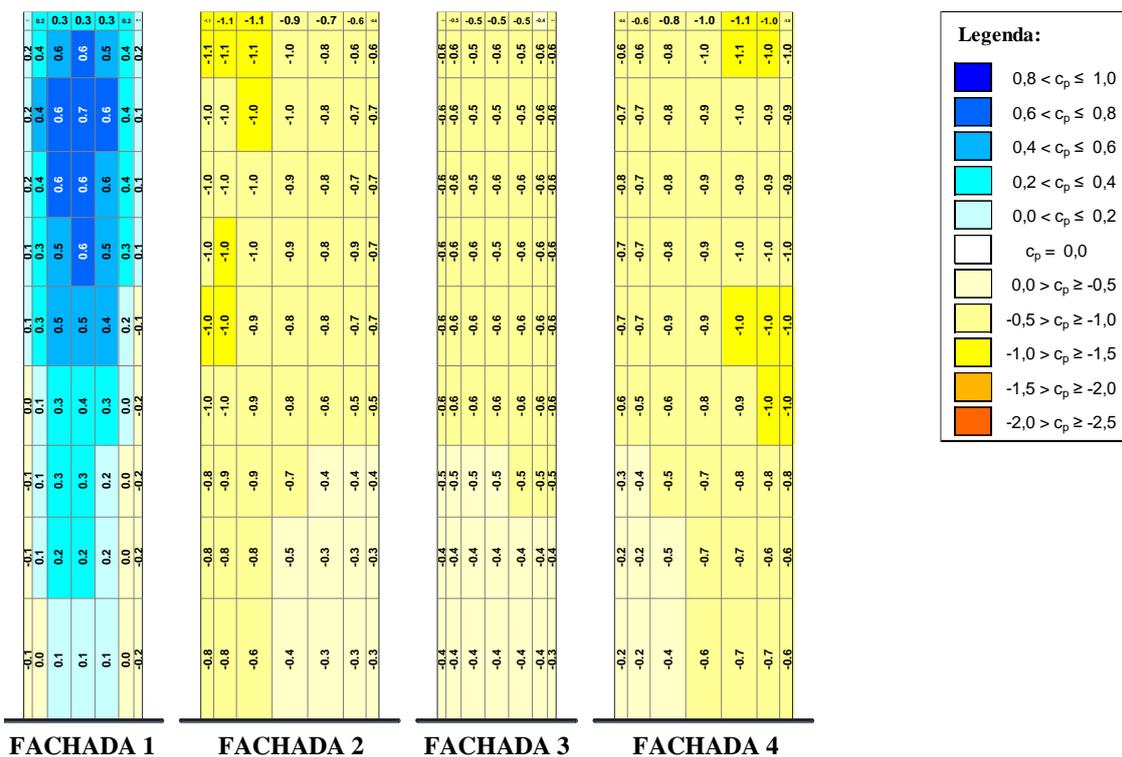
Figura 128 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,11 - 315^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

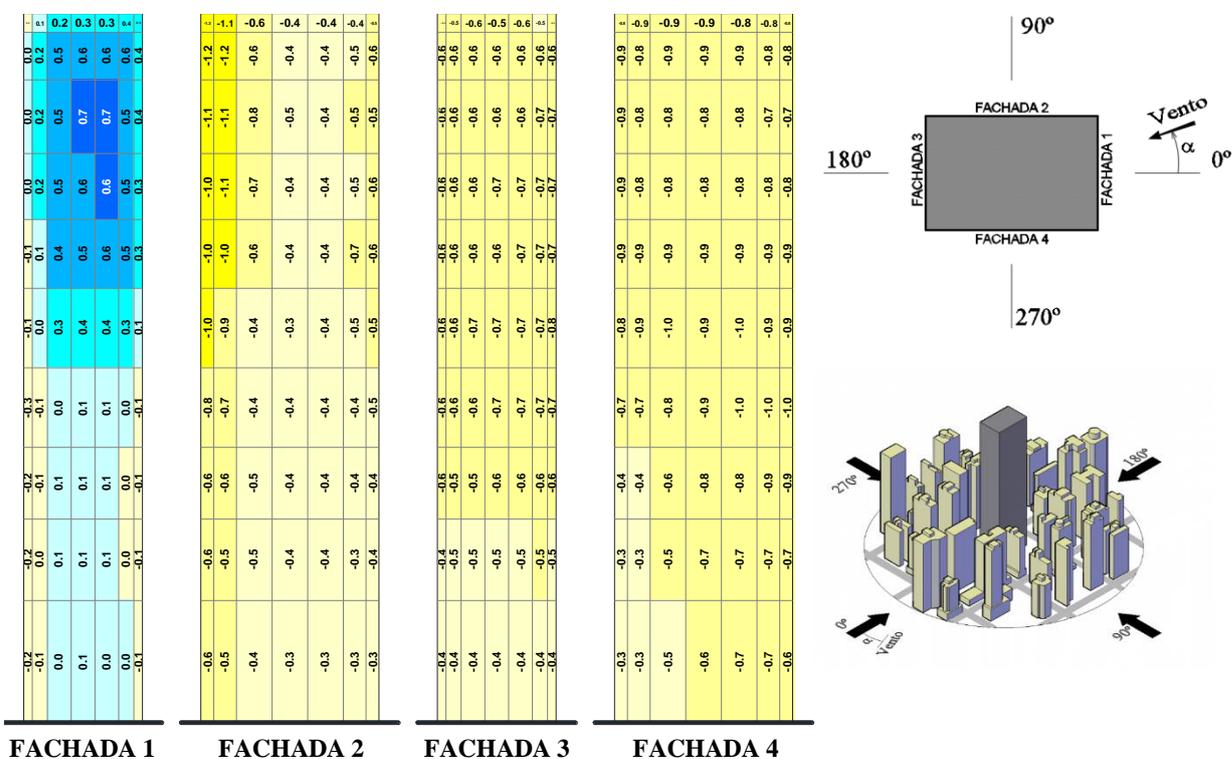
**APÊNDICE D – Distribuição dos coeficientes de pressão média para a
Configuração A de vizinhança e vento incidente com expoente $p = 0,26$**

Figura 131 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26 - 0^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

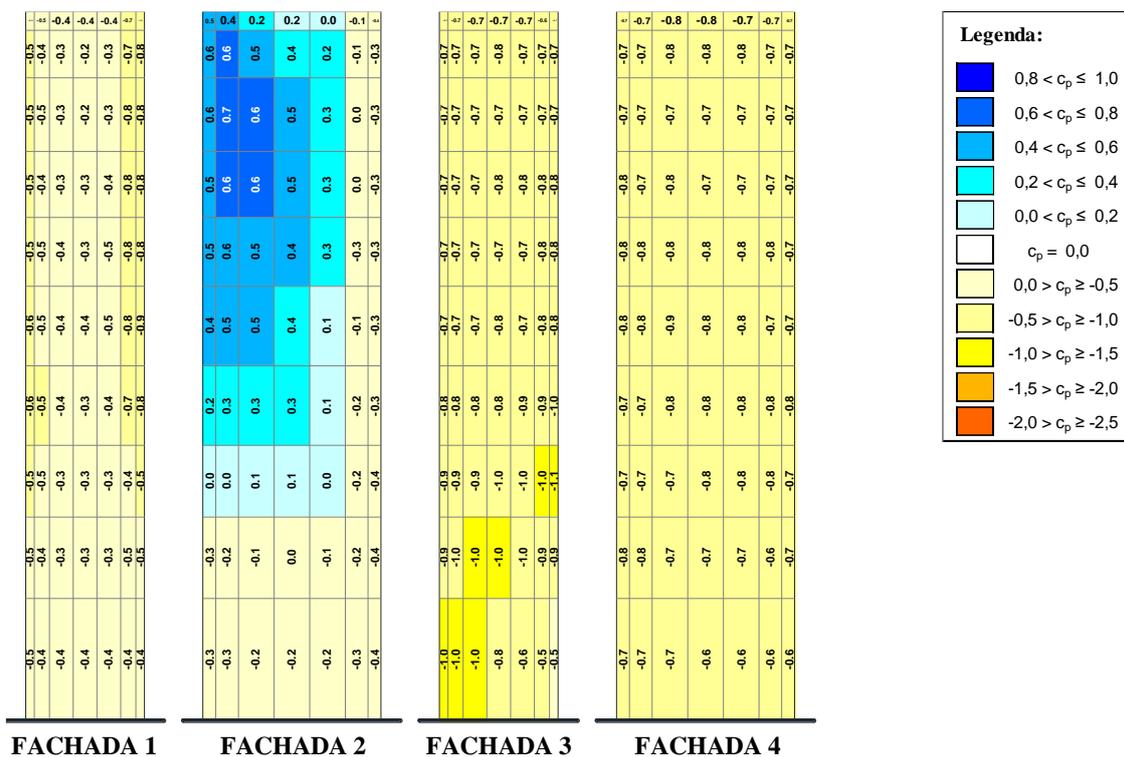
Figura 132 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26 - 15^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

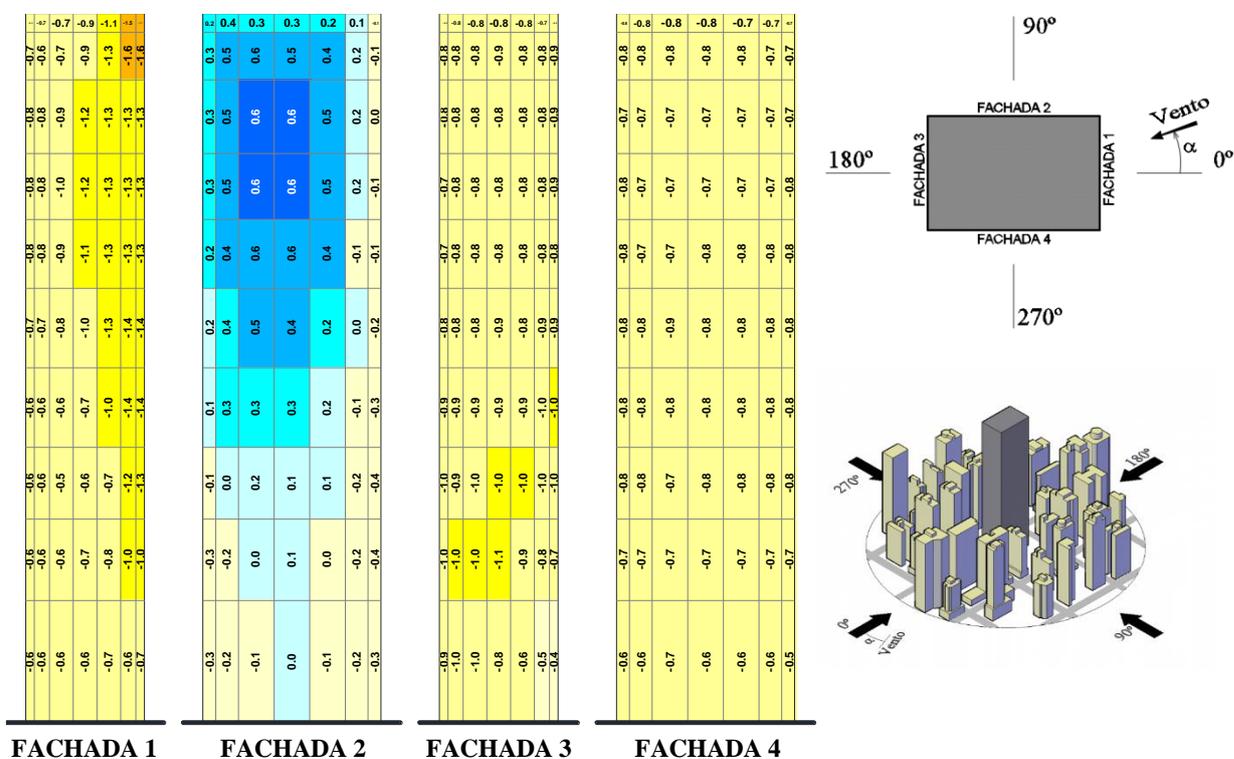
Determinação experimental em túnel de vento dos fatores de vizinhança estáticos e dinâmicos para um modelo de edifício alto em distintas condições de vizinhança

Figura 135 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26 - 60^\circ$



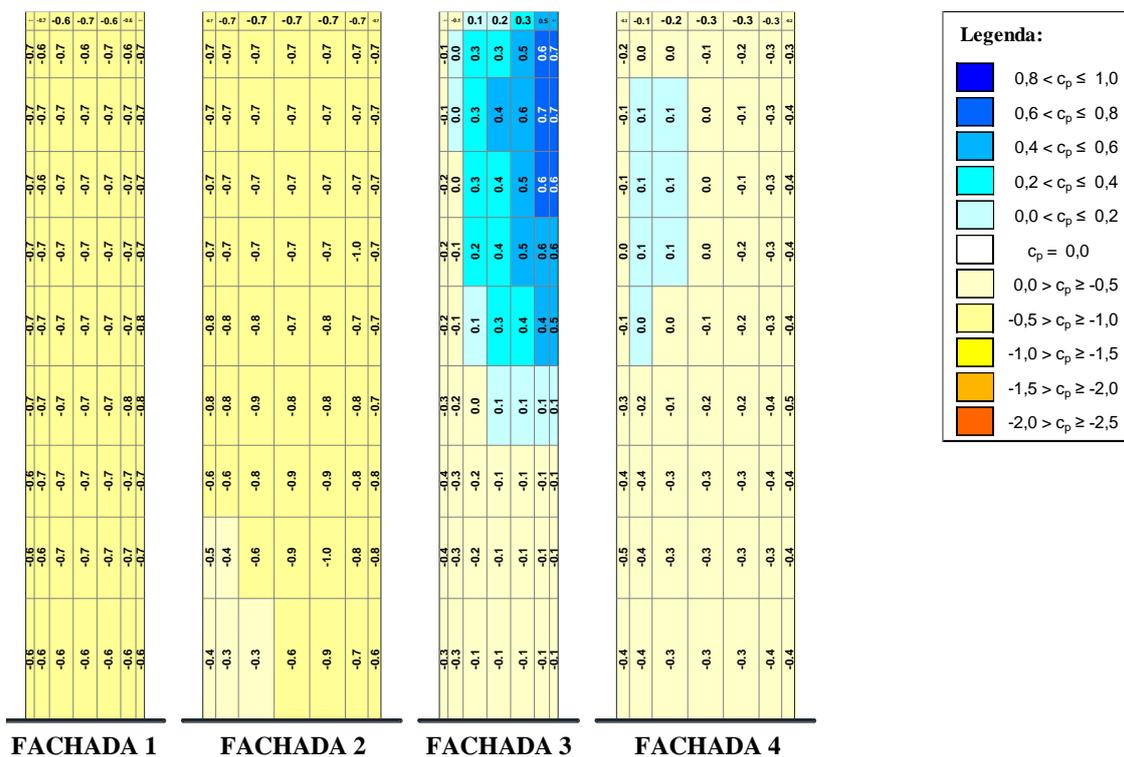
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 136 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26 - 75^\circ$



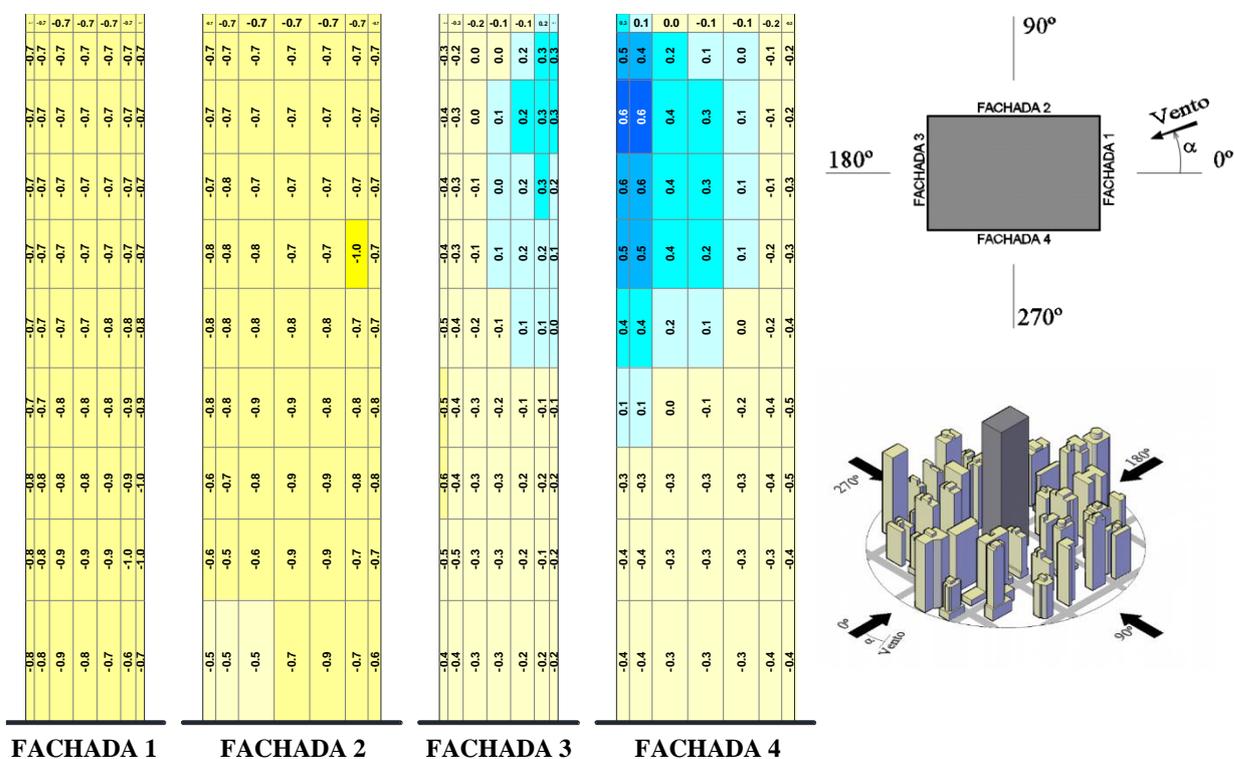
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 145 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26 - 210^\circ$



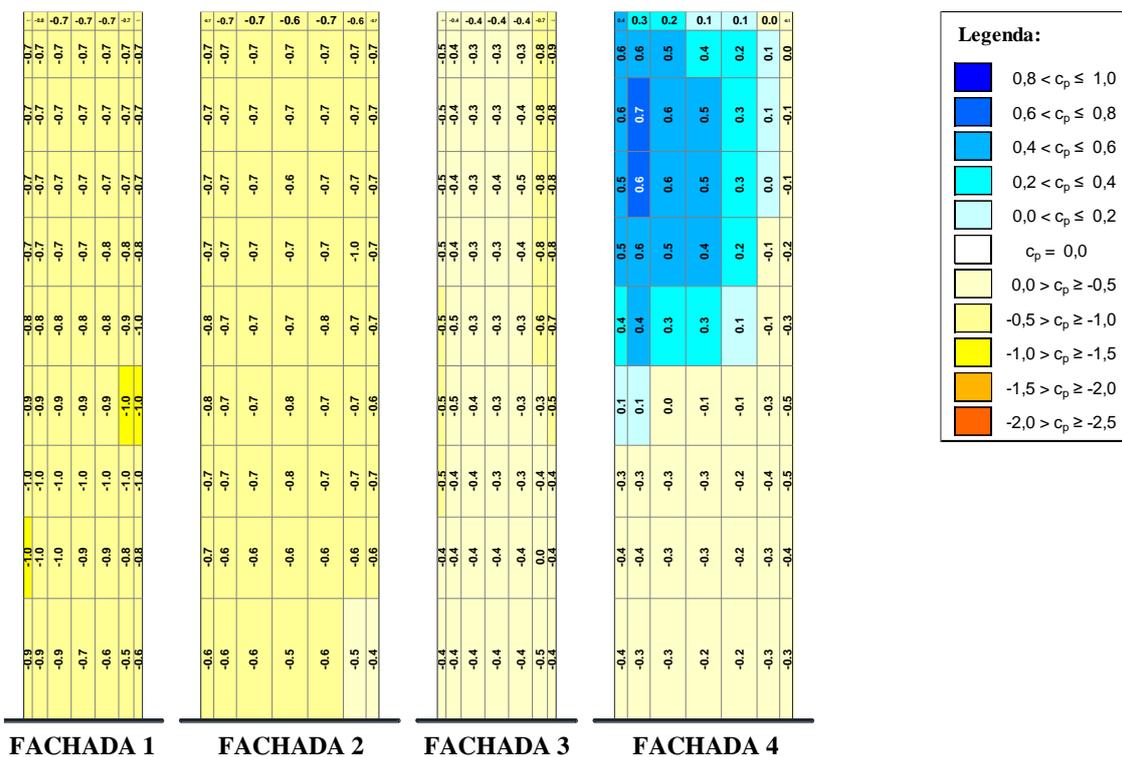
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 146 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26 - 225^\circ$



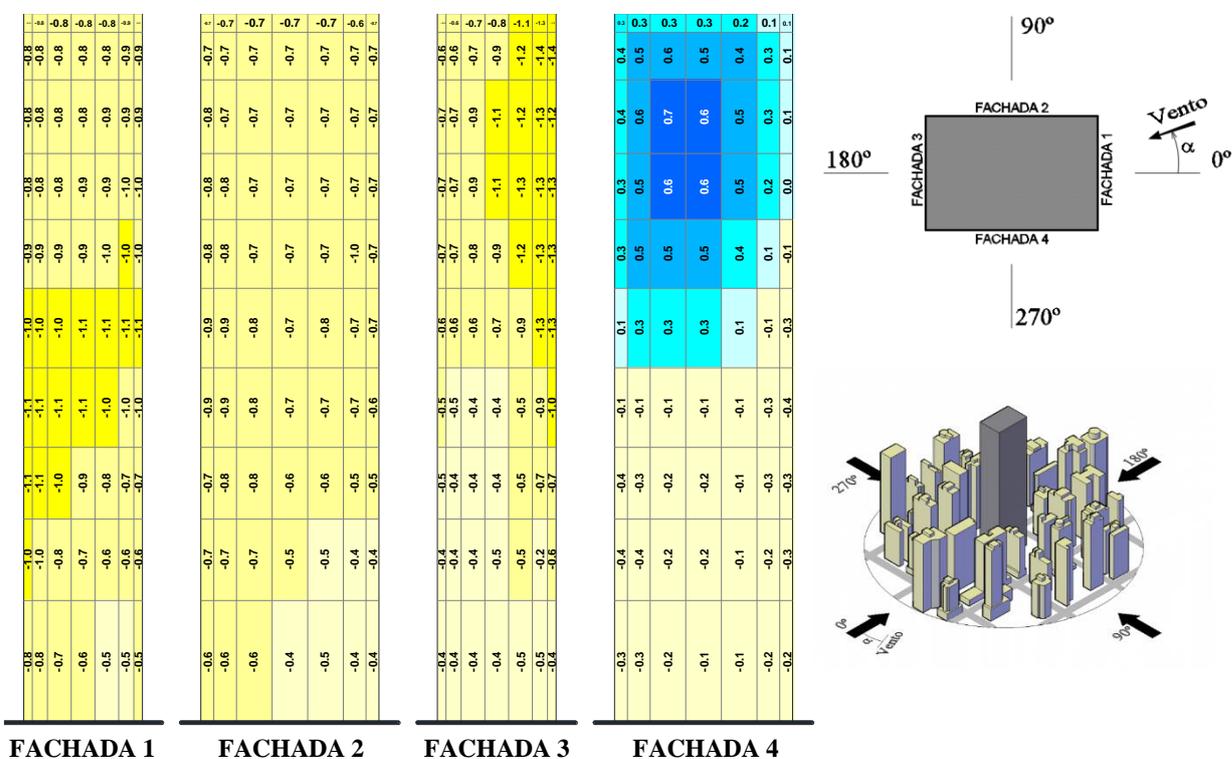
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 147 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26 - 240^\circ$



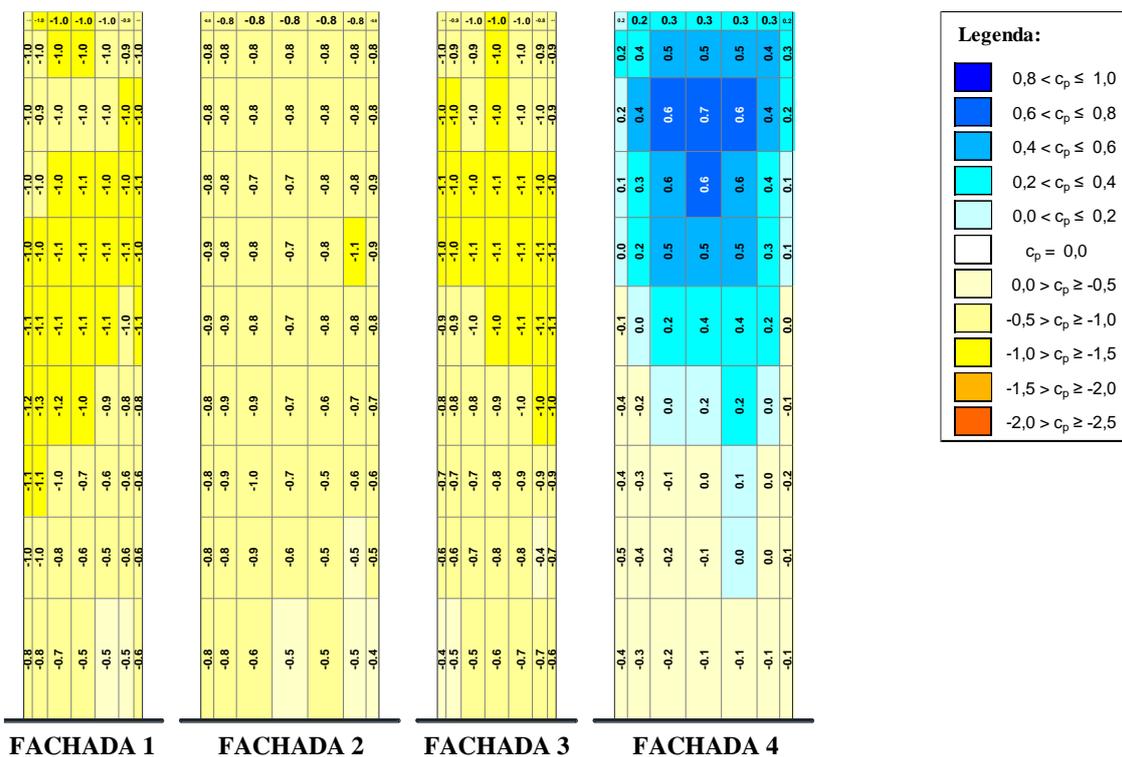
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 148 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26 - 255^\circ$



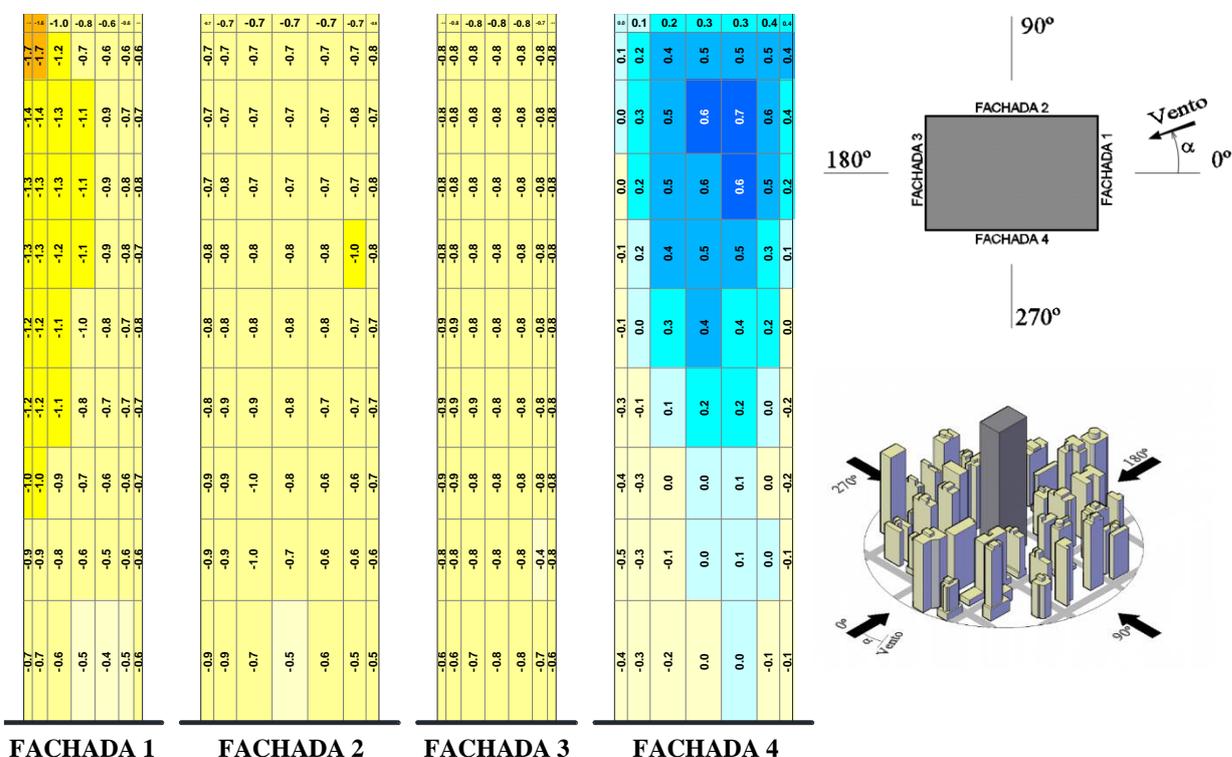
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 149 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26 - 270^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

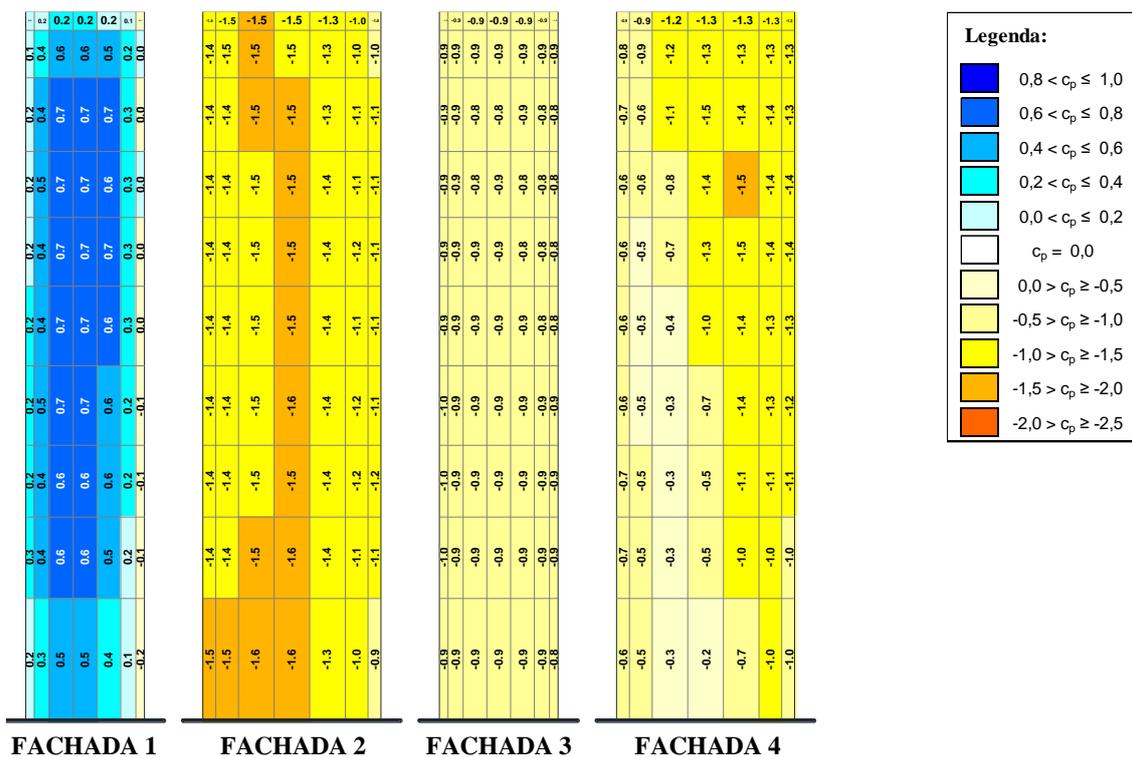
Figura 150 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. A - $p = 0,26 - 285^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

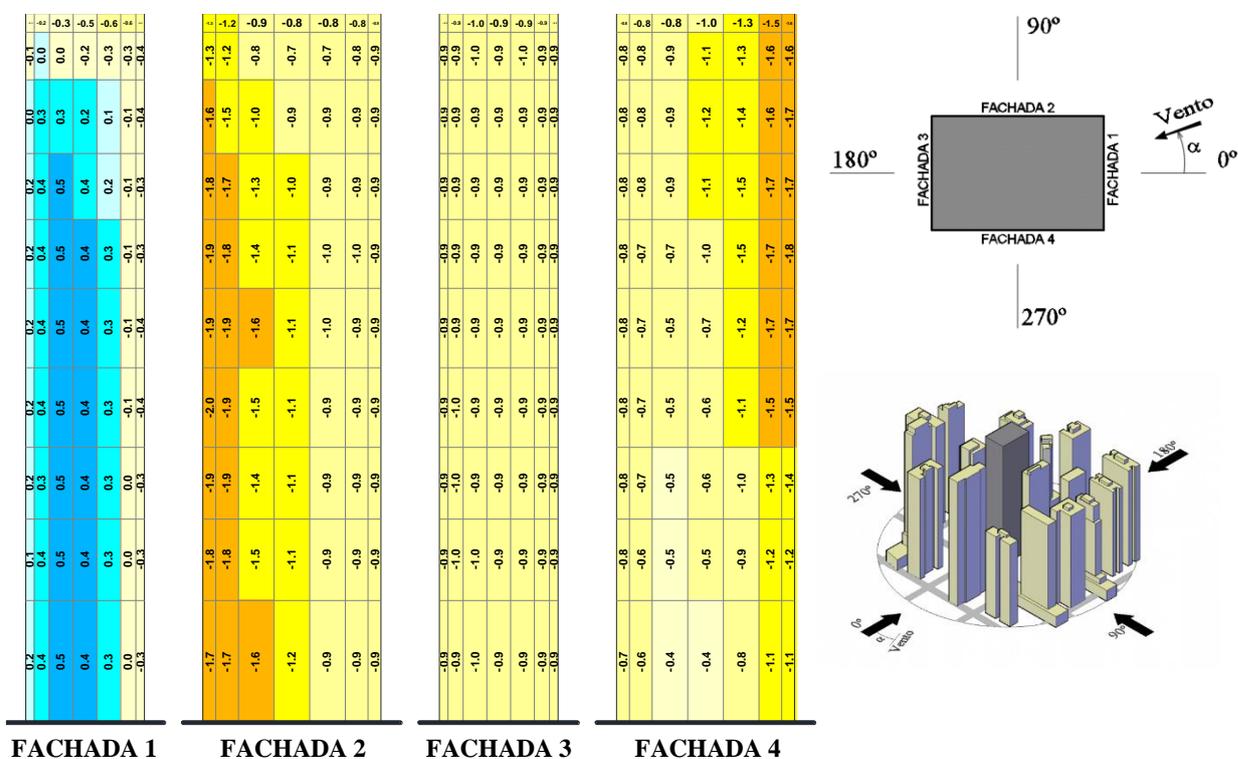
**APÊNDICE E – Distribuição dos coeficientes de pressão média para a
Configuração B de vizinhança e vento incidente com expoente $p = 0,11$**

Figura 155 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11 - 0^\circ$



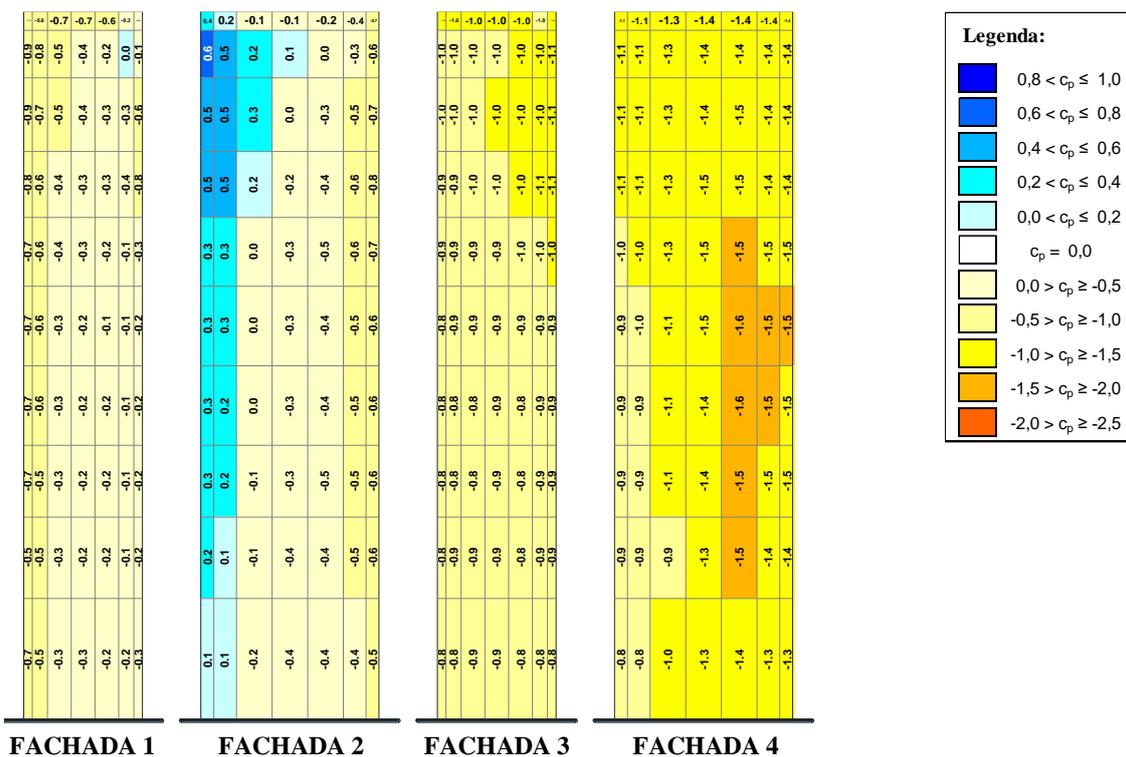
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 156 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11 - 15^\circ$



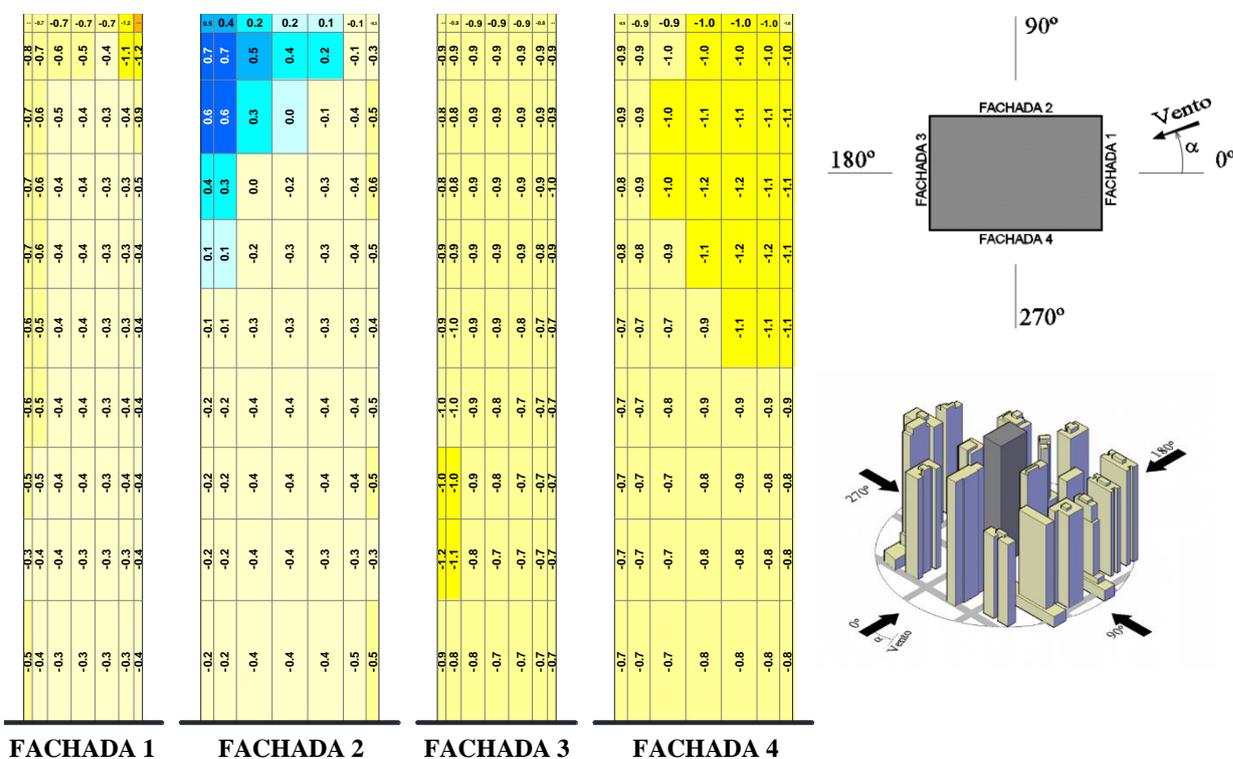
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 159 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11 - 60^\circ$



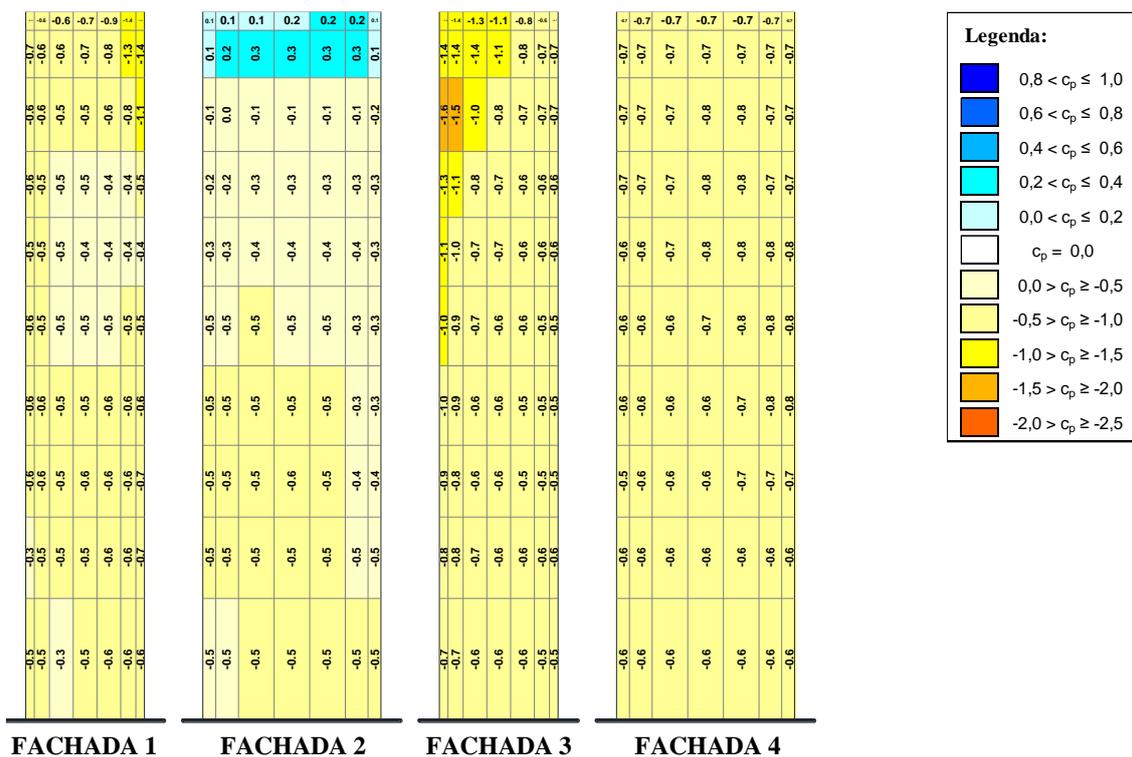
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 160 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11 - 75^\circ$



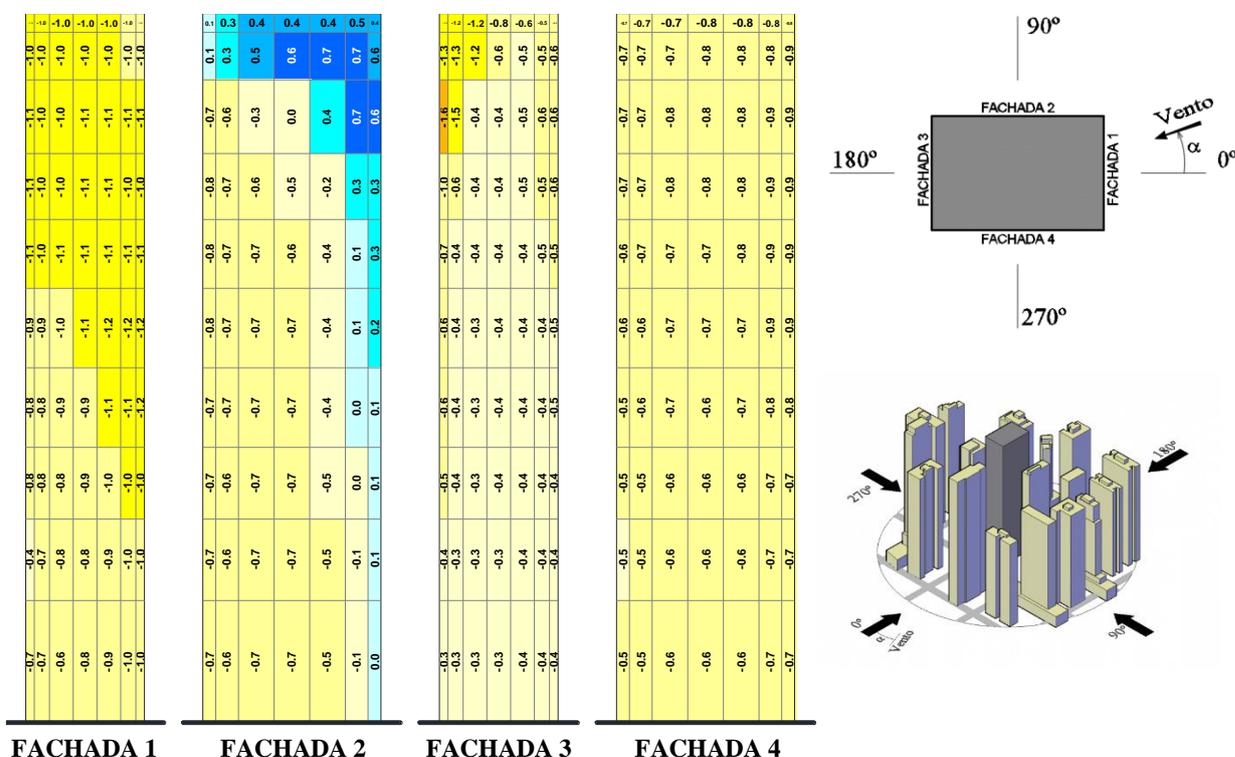
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 161 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11 - 90^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

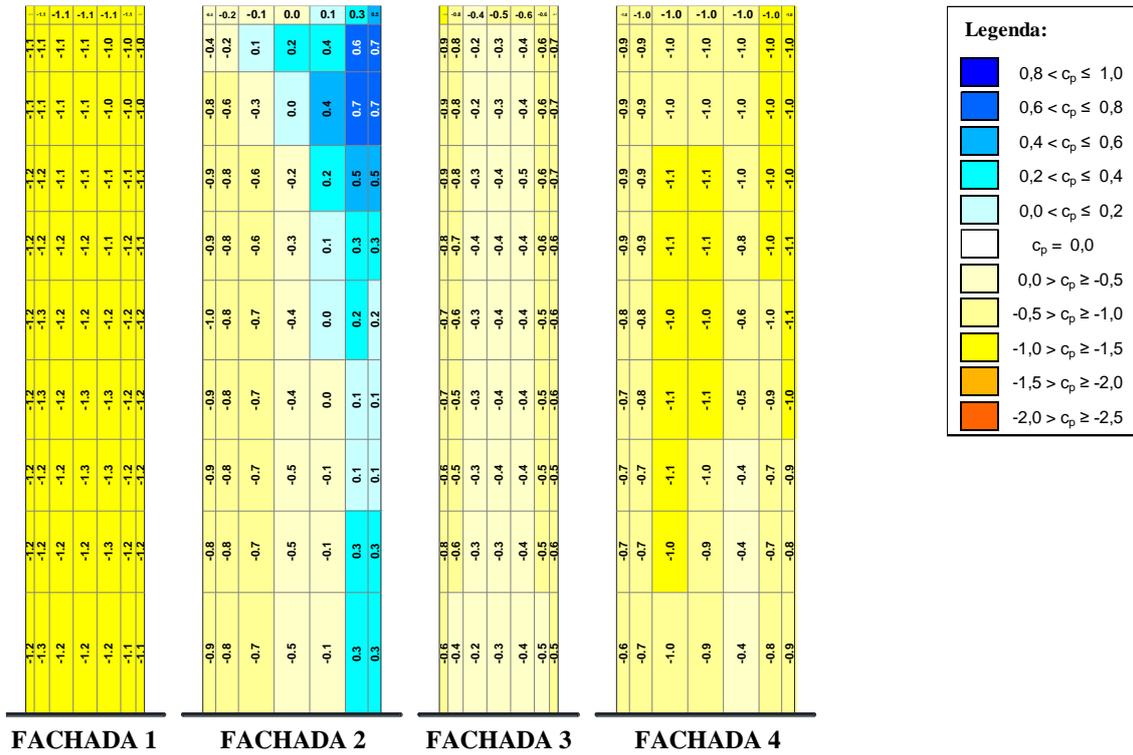
Figura 162 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11 - 105^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

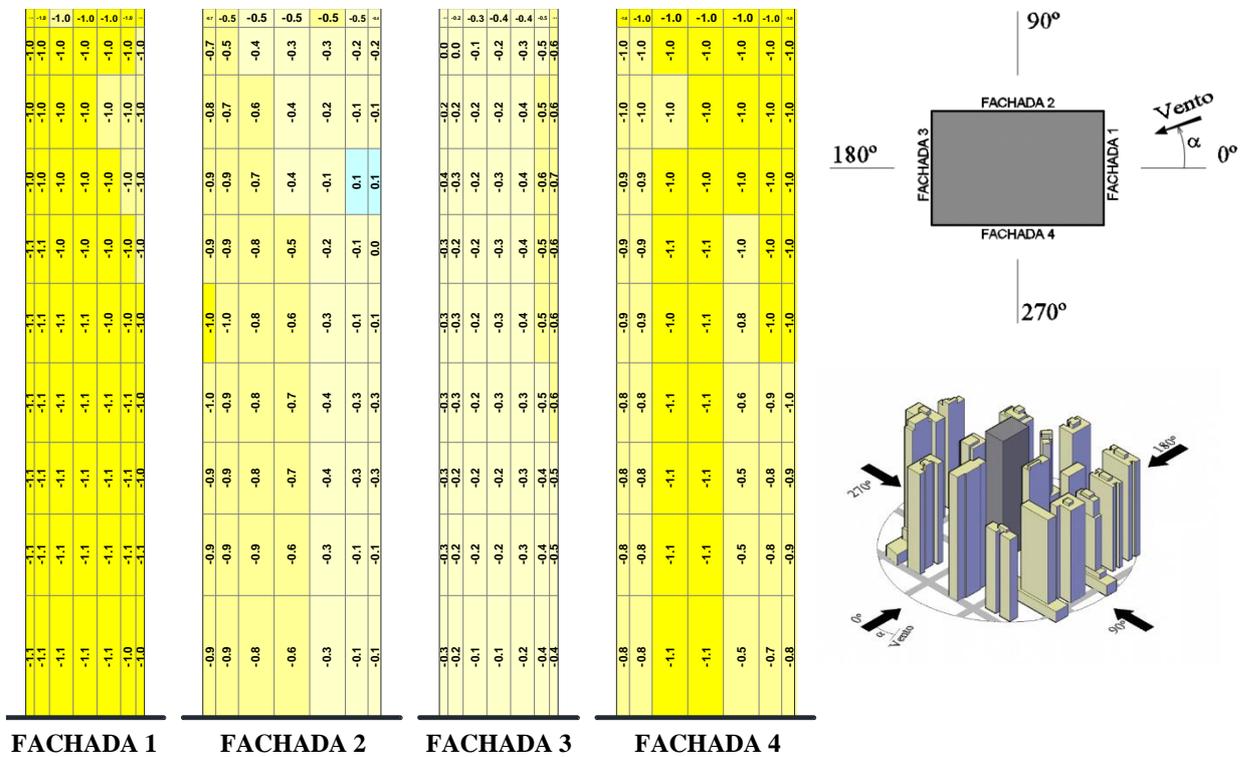
Determinação experimental em túnel de vento dos fatores de vizinhança estáticos e dinâmicos para um modelo de edifício alto em distintas condições de vizinhança

Figura 163 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11 - 120^\circ$



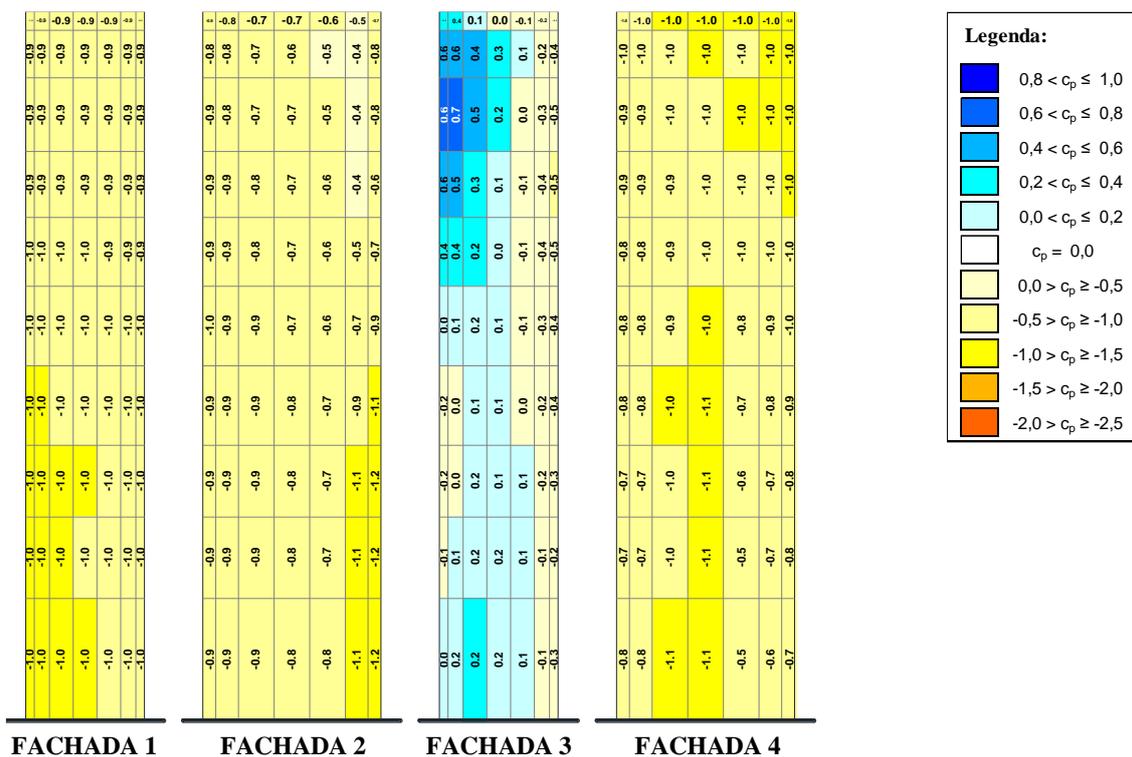
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 164 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11 - 135^\circ$



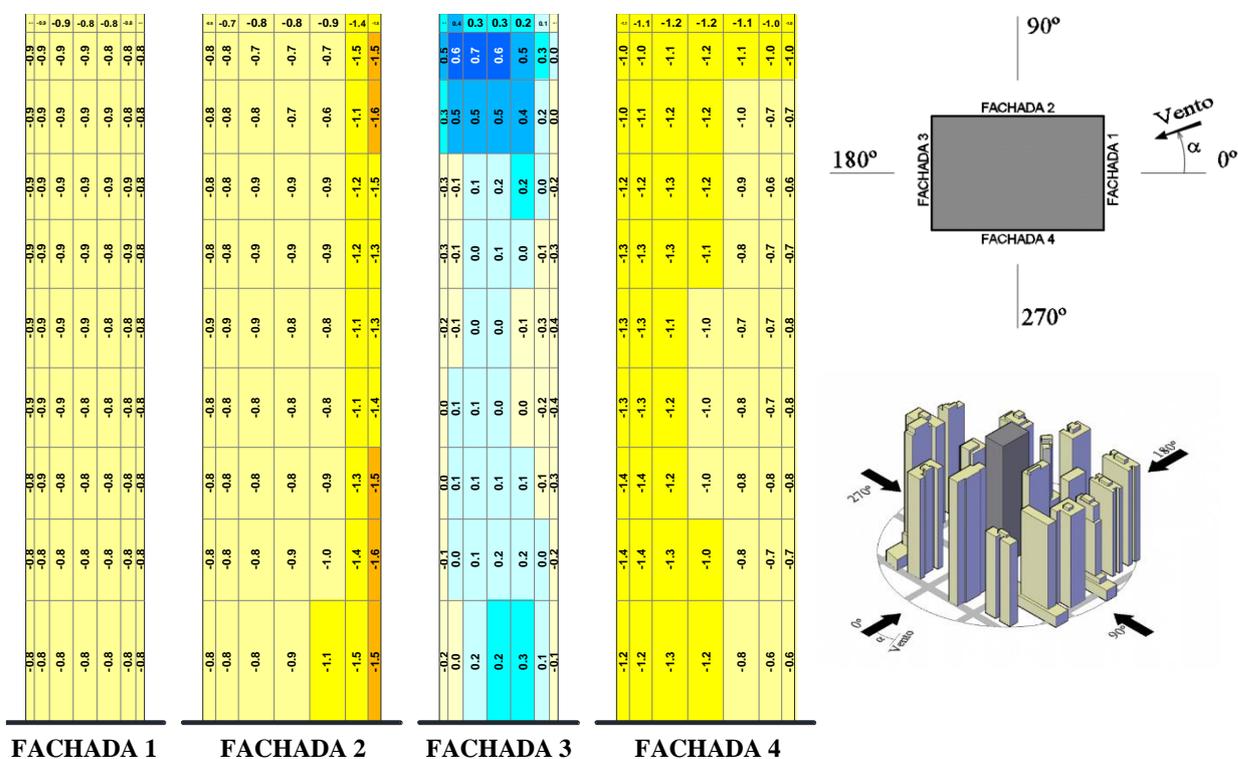
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 165 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11 - 150^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

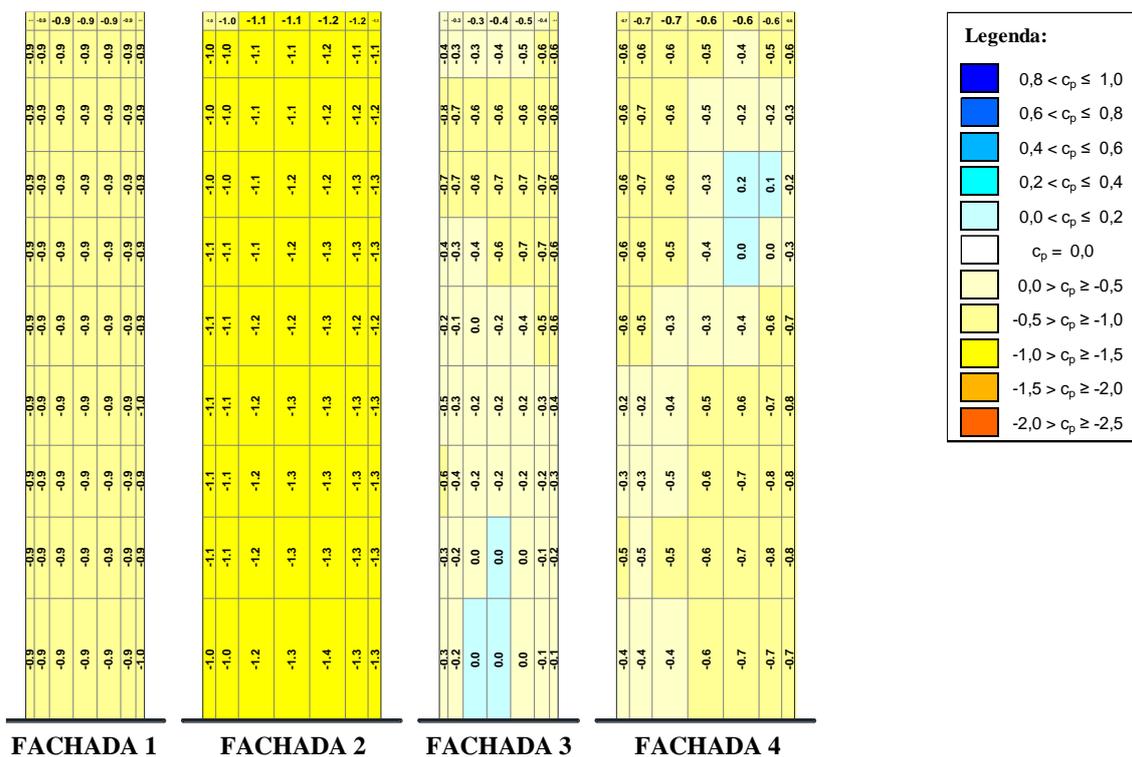
Figura 166 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11 - 165^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

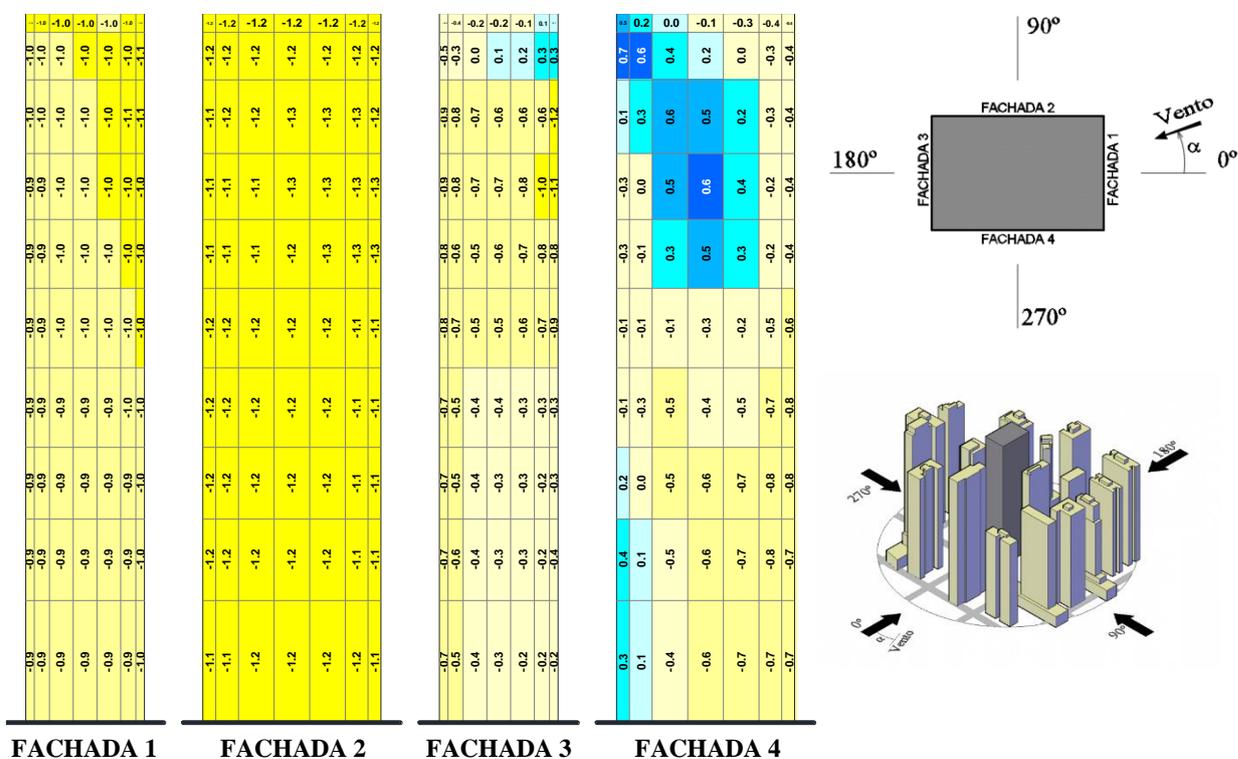
Determinação experimental em túnel de vento dos fatores de vizinhança estáticos e dinâmicos para um modelo de edifício alto em distintas condições de vizinhança

Figura 169 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11 - 210^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

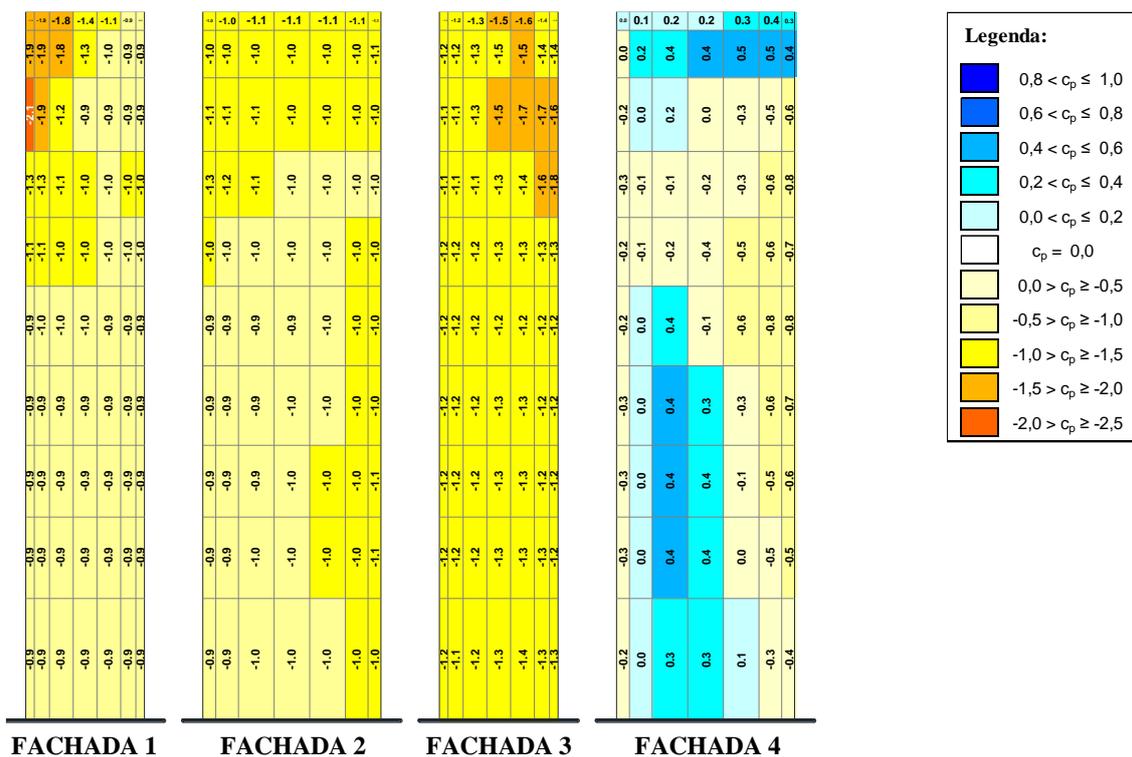
Figura 170 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11 - 225^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

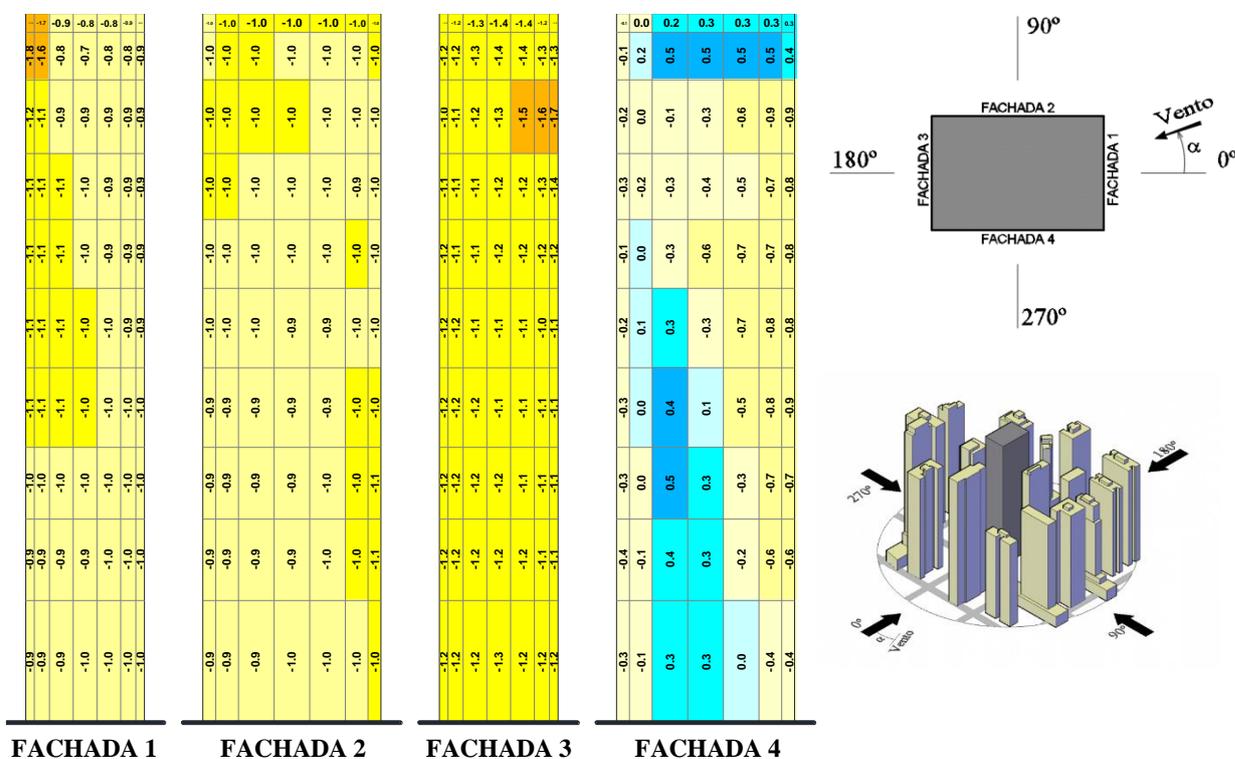
Determinação experimental em túnel de vento dos fatores de vizinhança estáticos e dinâmicos para um modelo de edifício alto em distintas condições de vizinhança

Figura 173 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11 - 270^\circ$



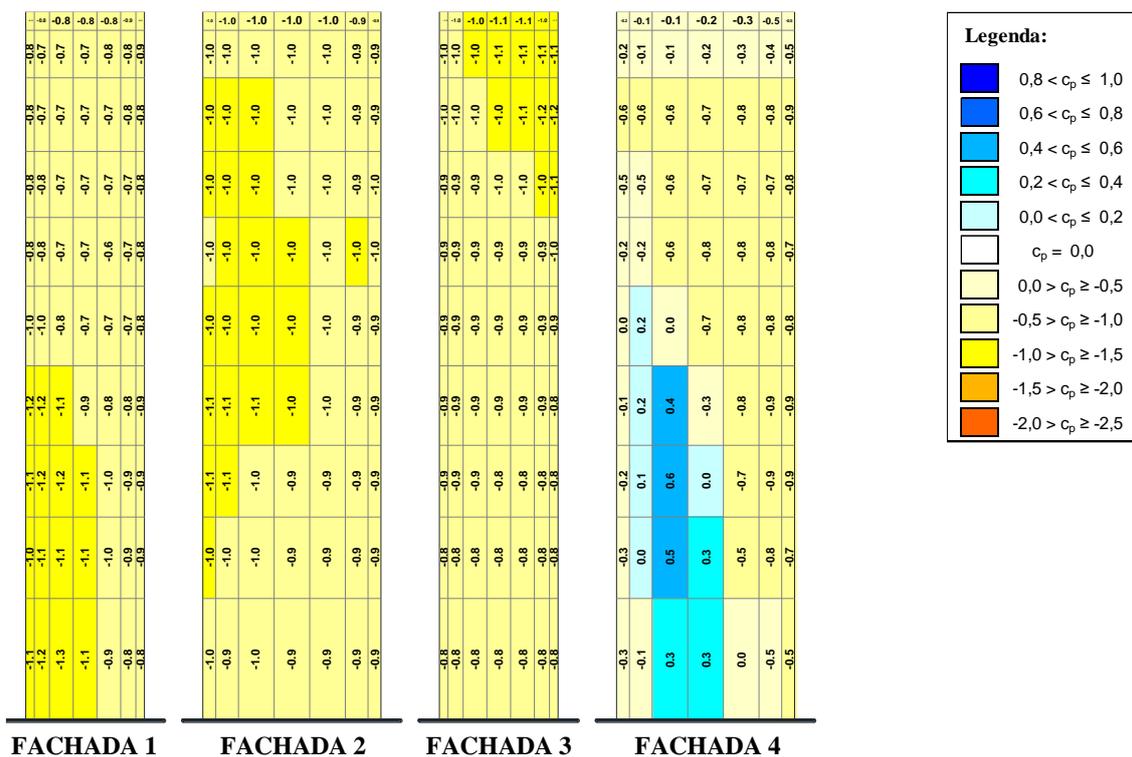
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 174 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11 - 285^\circ$



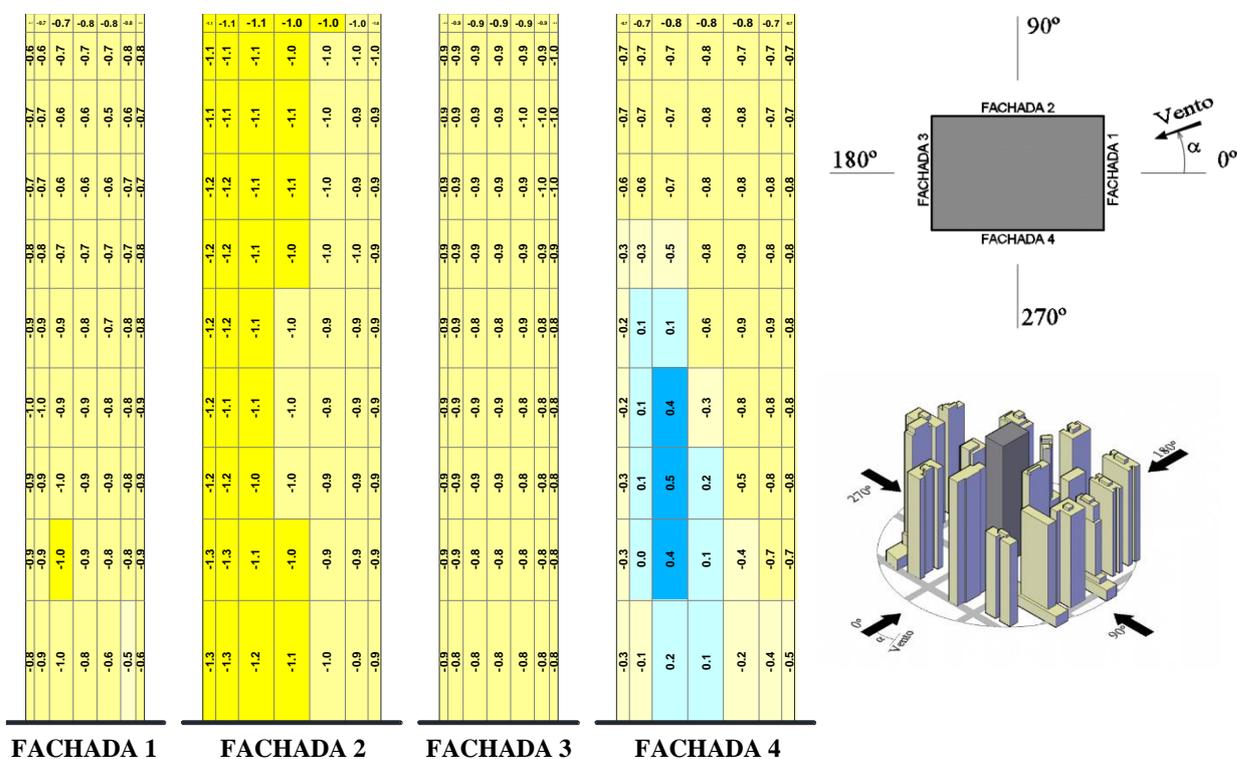
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 175 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11 - 300^\circ$



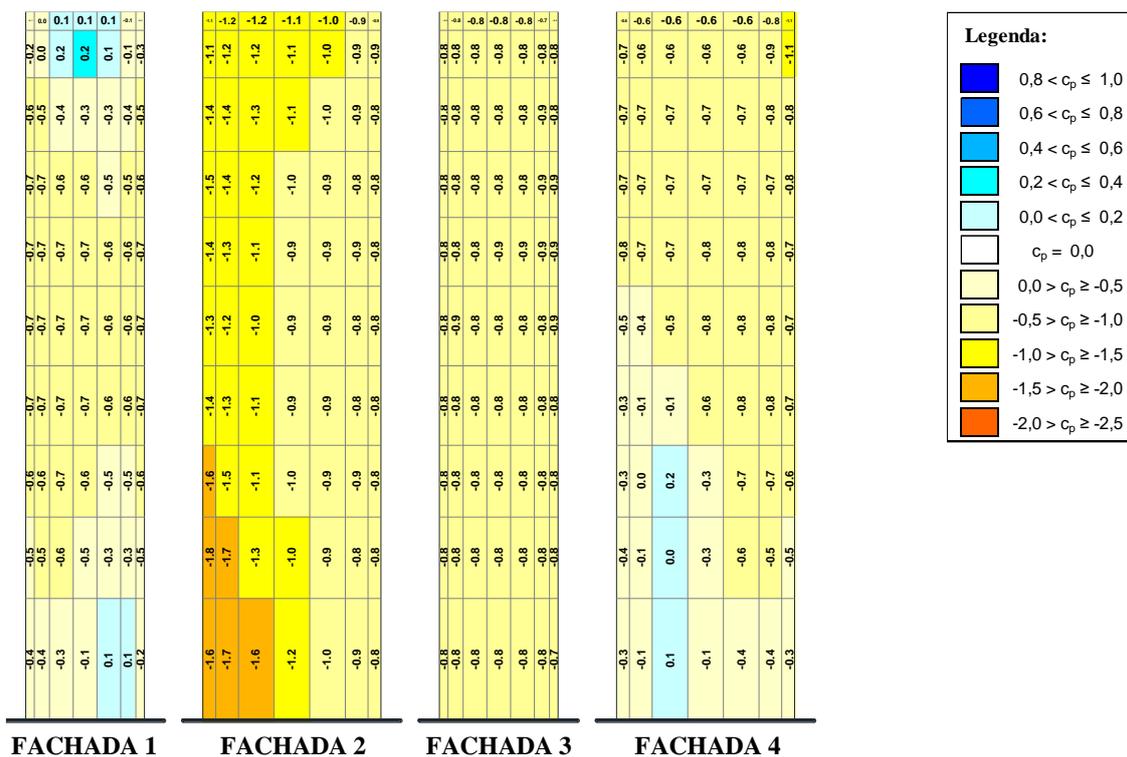
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 176 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11 - 315^\circ$



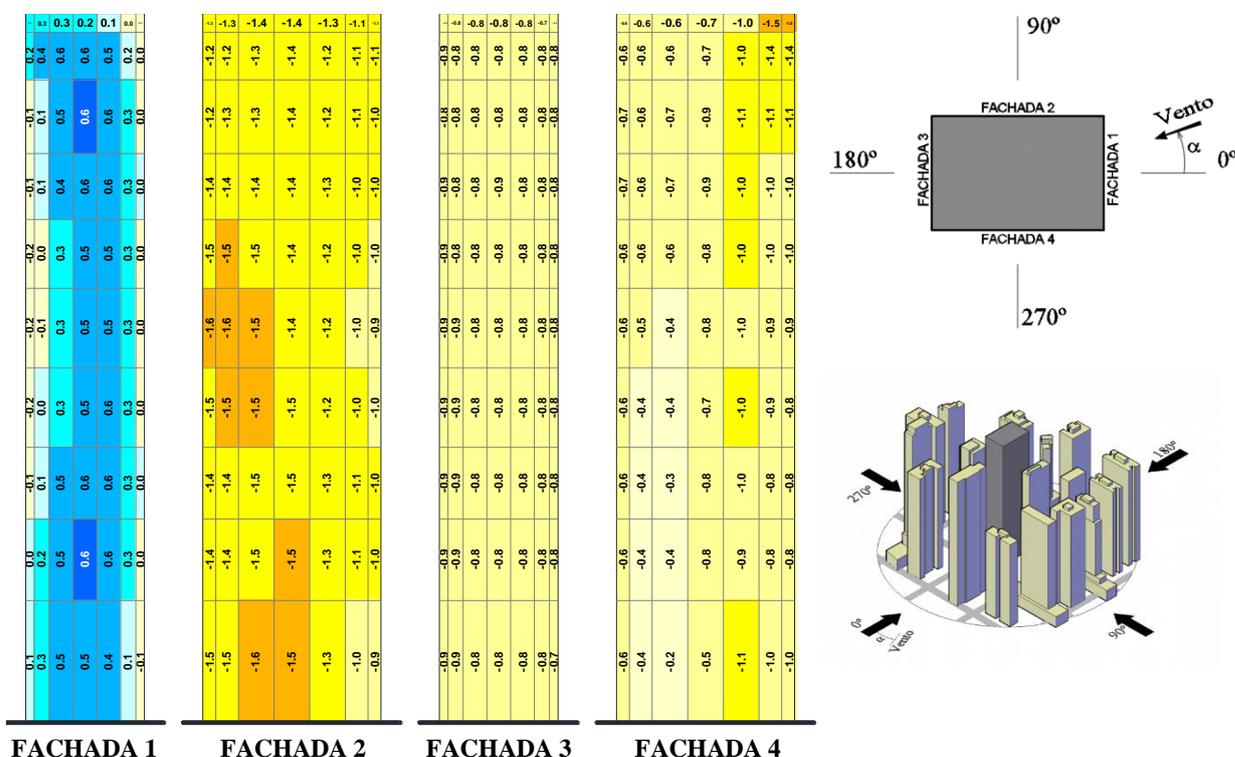
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 177 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11 - 330^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 178 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,11 - 345^\circ$

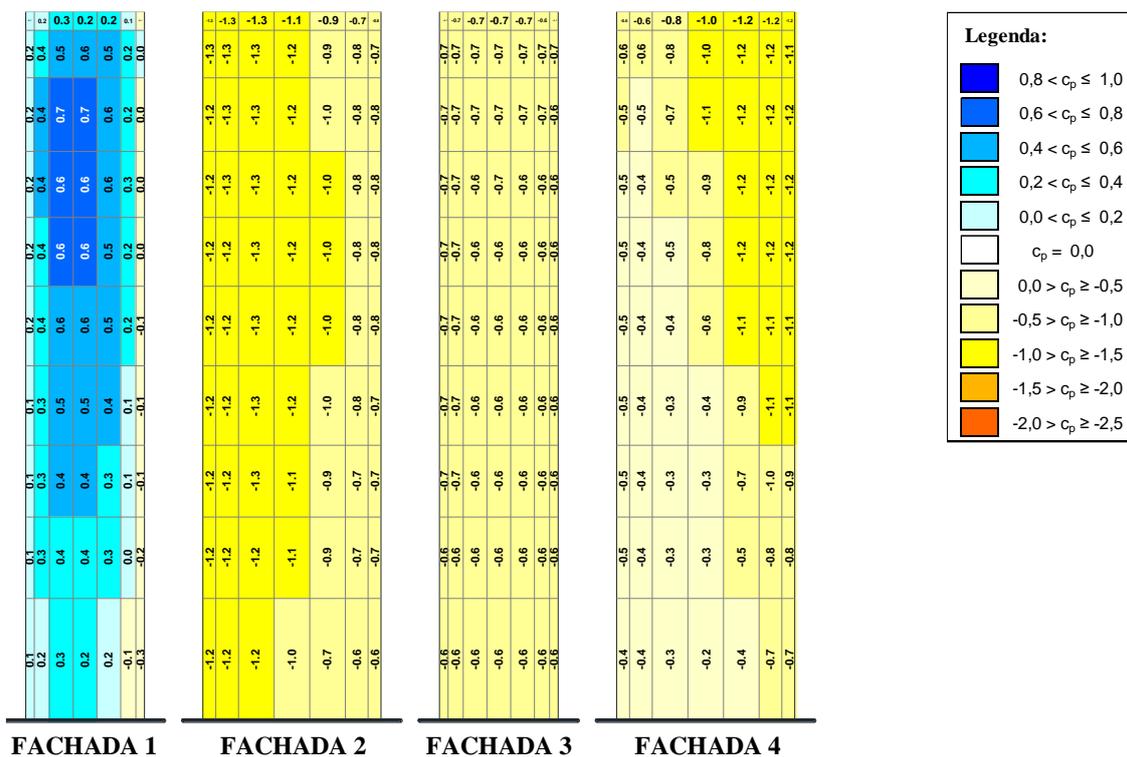


(fonte: elaborado pelo autor)

Determinação experimental em túnel de vento dos fatores de vizinhança estáticos e dinâmicos para um modelo de edifício alto em distintas condições de vizinhança

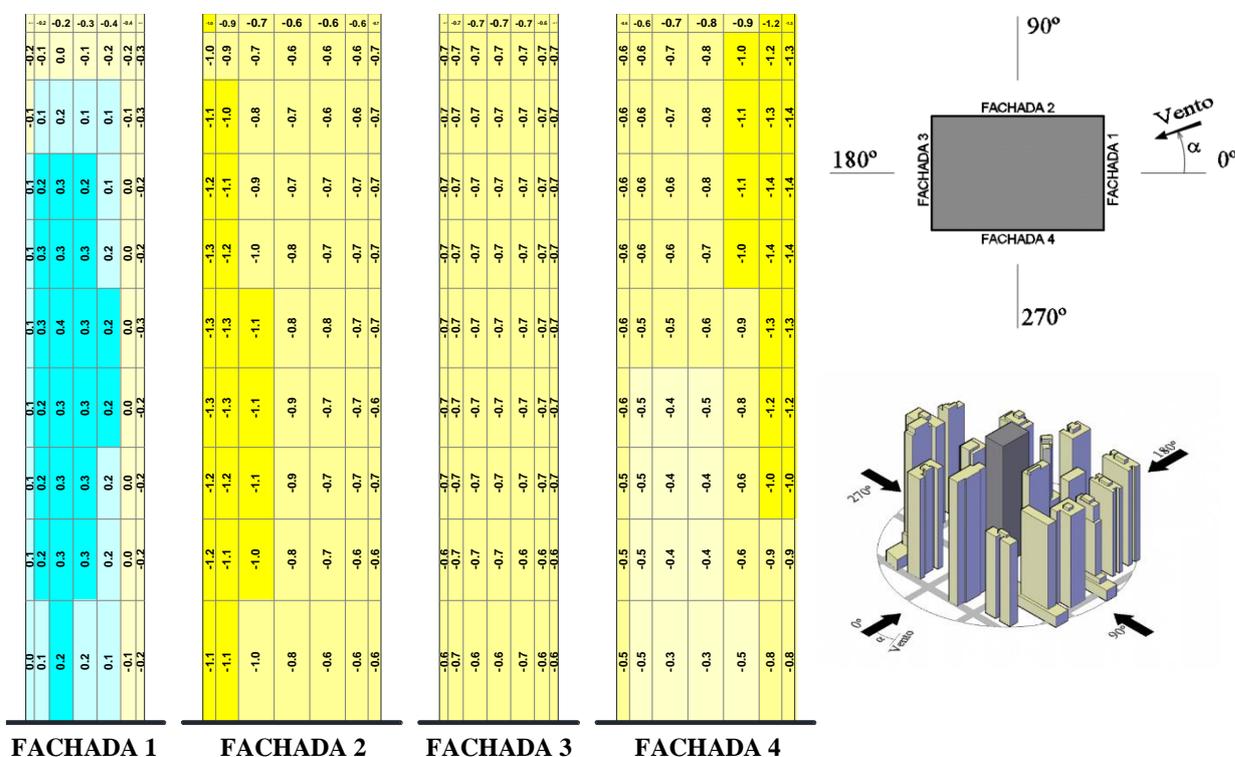
**APÊNDICE F – Distribuição dos coeficientes de pressão média para a
Configuração B de vizinhança e vento incidente com expoente $p = 0,26$**

Figura 179 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26 - 0^\circ$



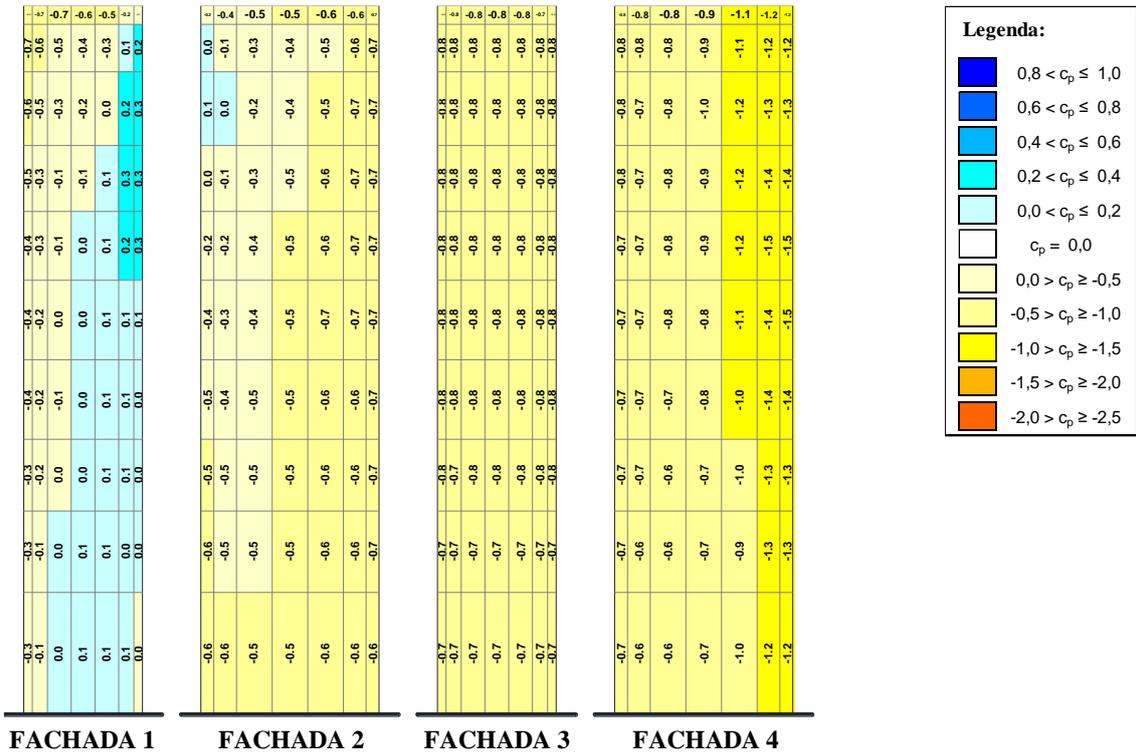
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 180 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26 - 15^\circ$



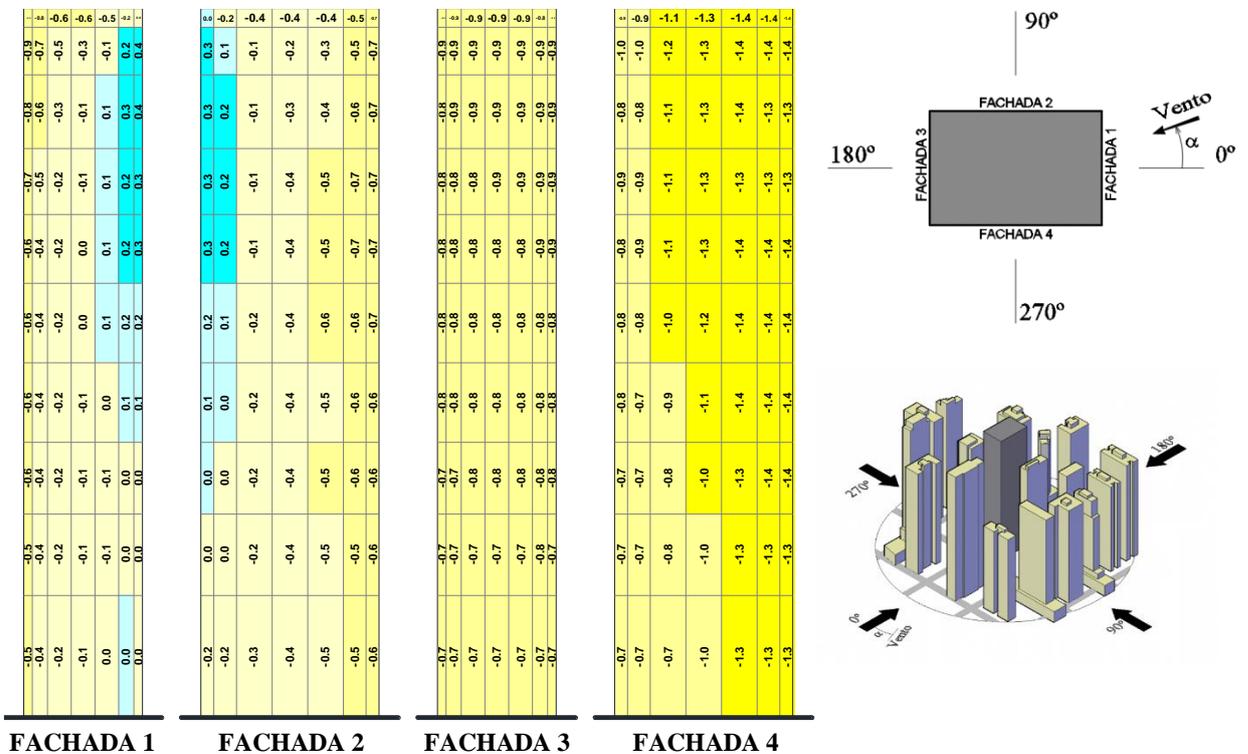
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 181 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26 - 30^\circ$



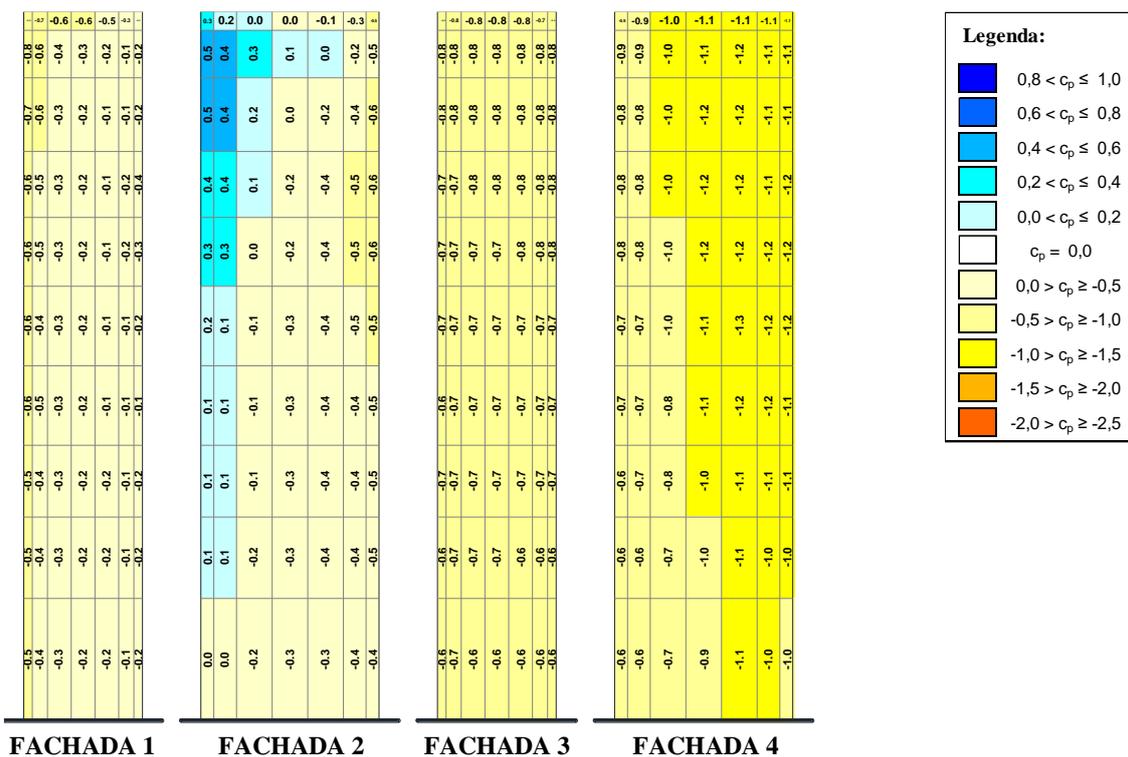
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 182 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26 - 45^\circ$



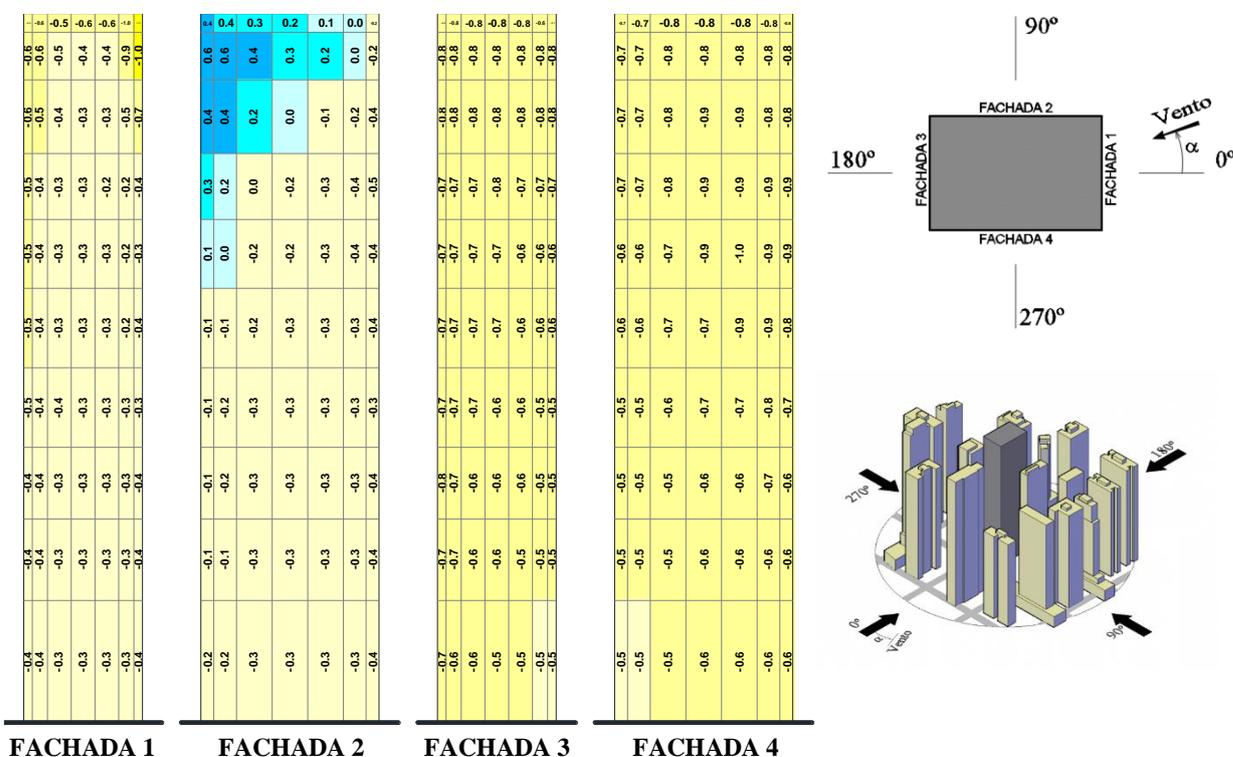
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 183 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26 - 60^\circ$



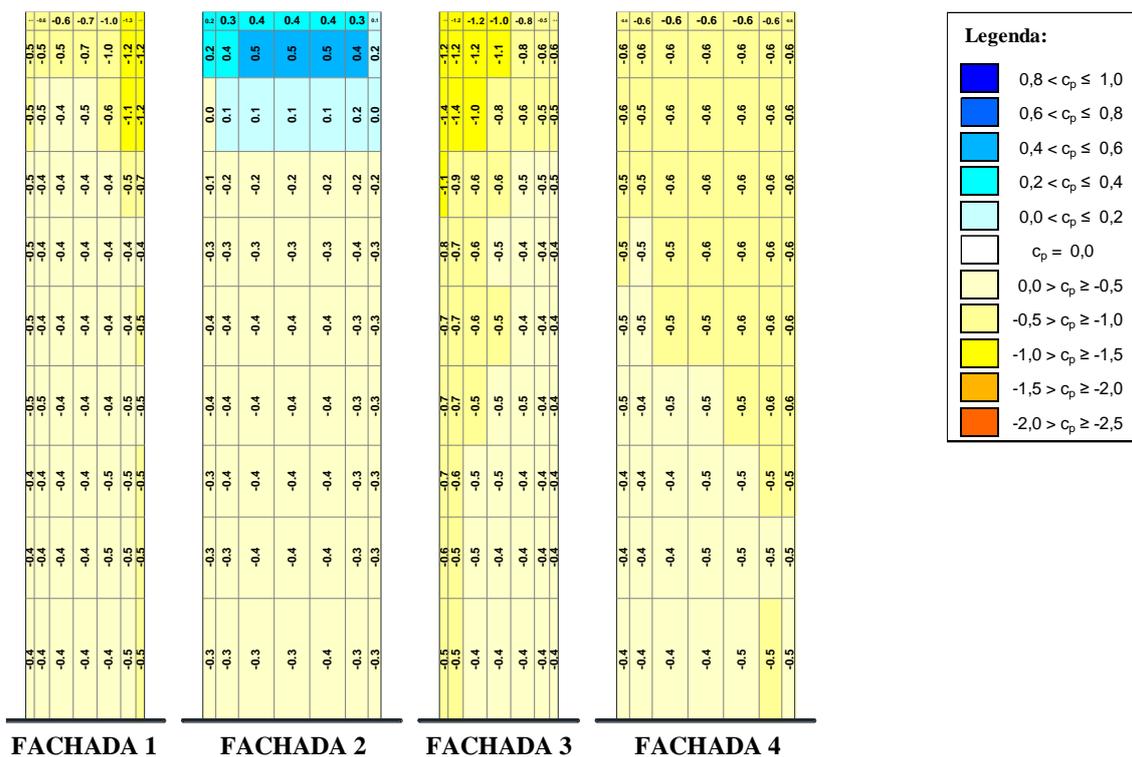
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 184 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26 - 75^\circ$



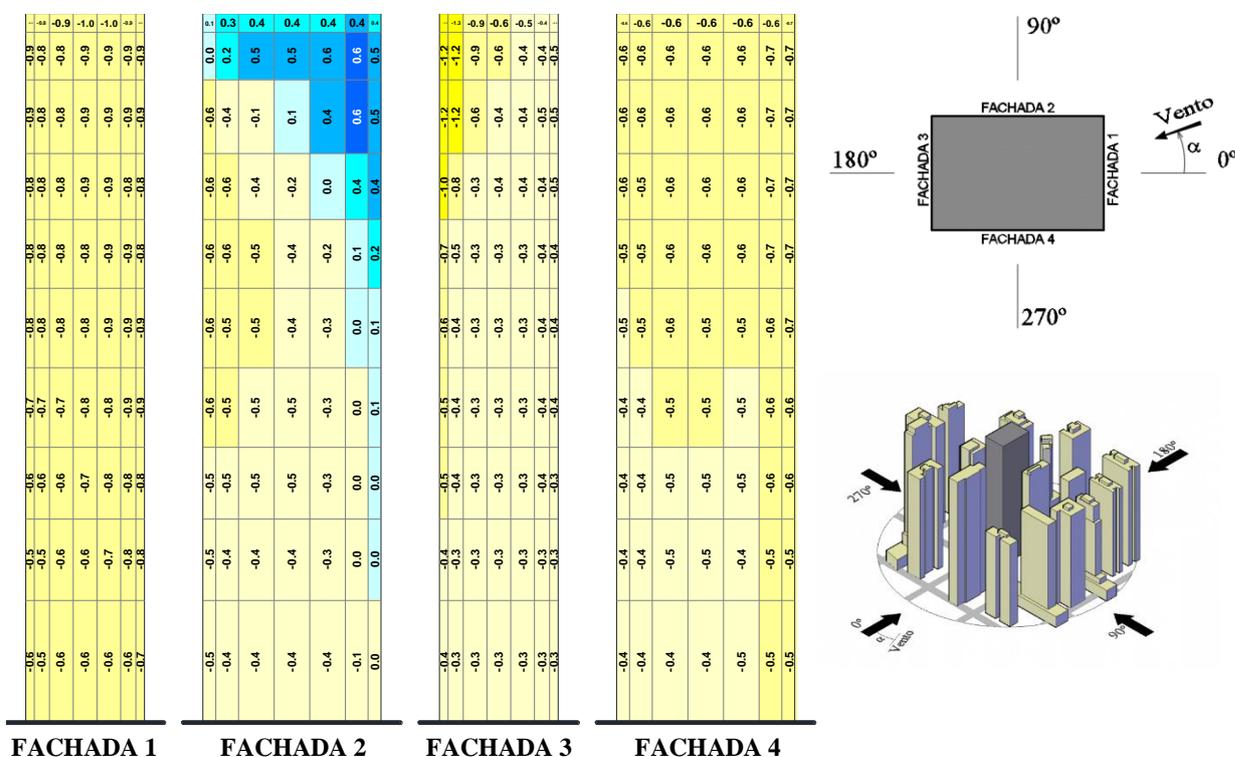
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 185 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26 - 90^\circ$



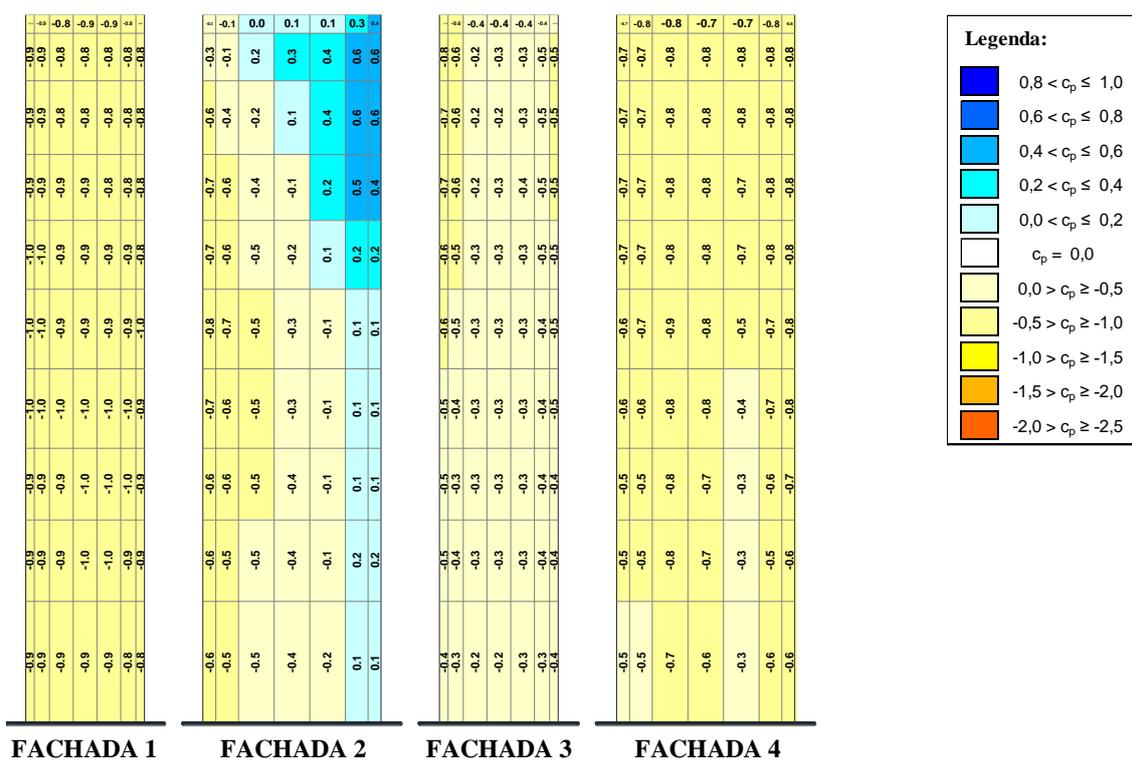
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 186 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26 - 105^\circ$



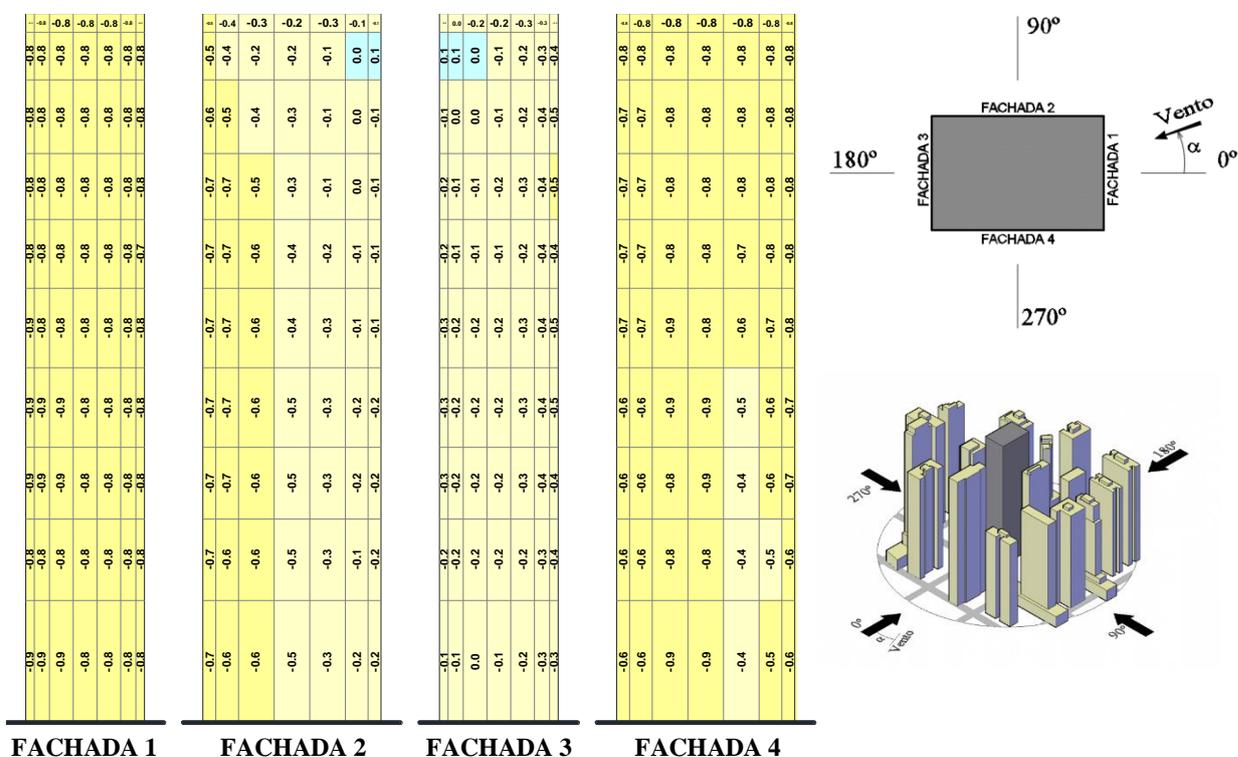
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 187 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26 - 120^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

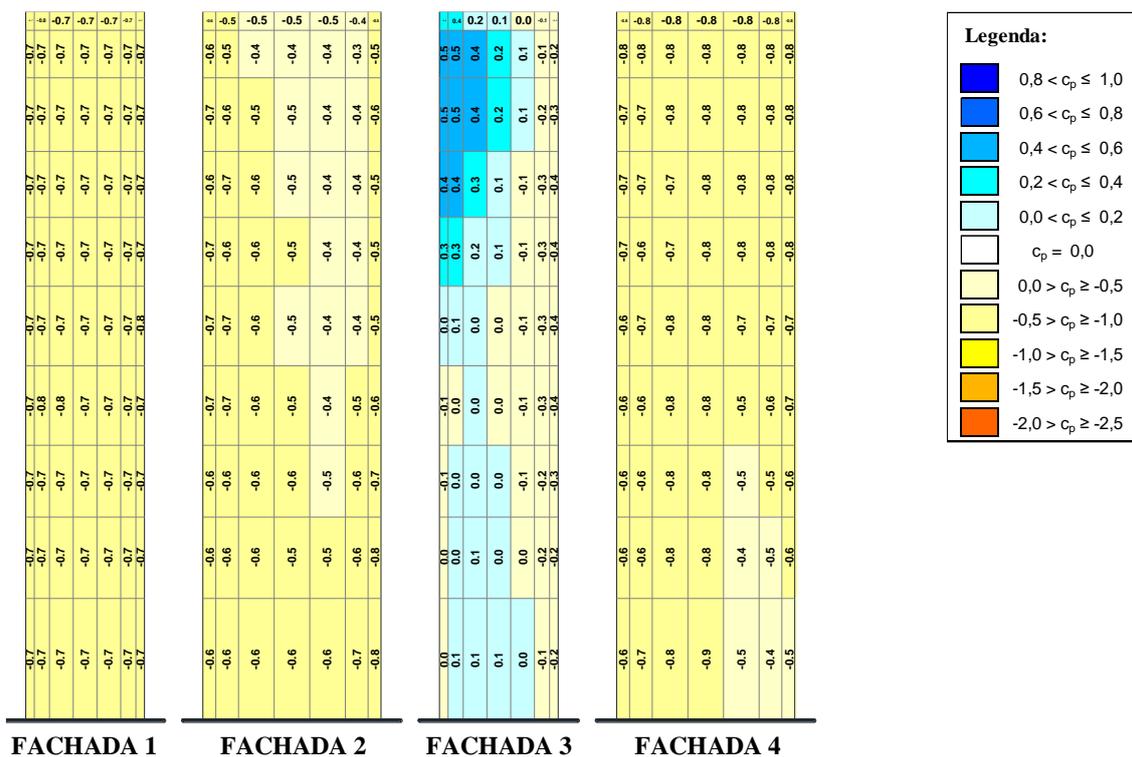
Figura 188 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26 - 135^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

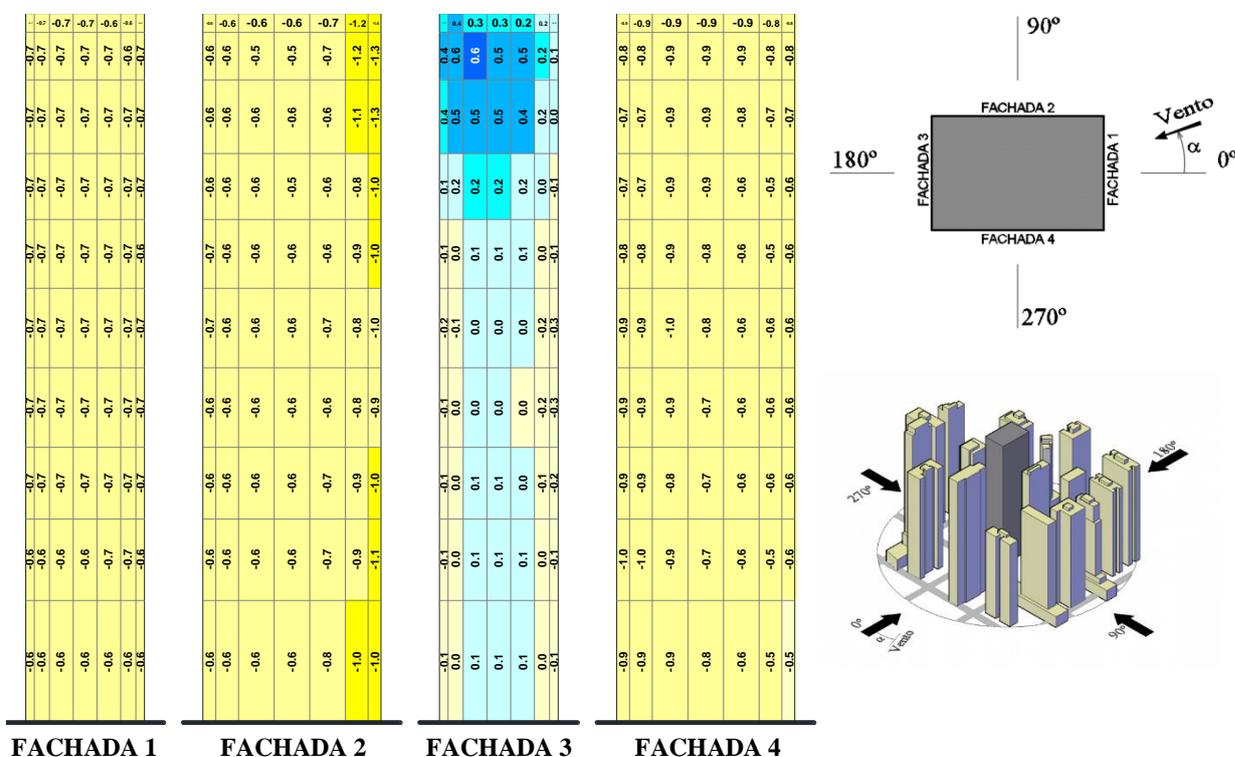
Determinação experimental em túnel de vento dos fatores de vizinhança estáticos e dinâmicos para um modelo de edifício alto em distintas condições de vizinhança

Figura 189 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26 - 150^\circ$

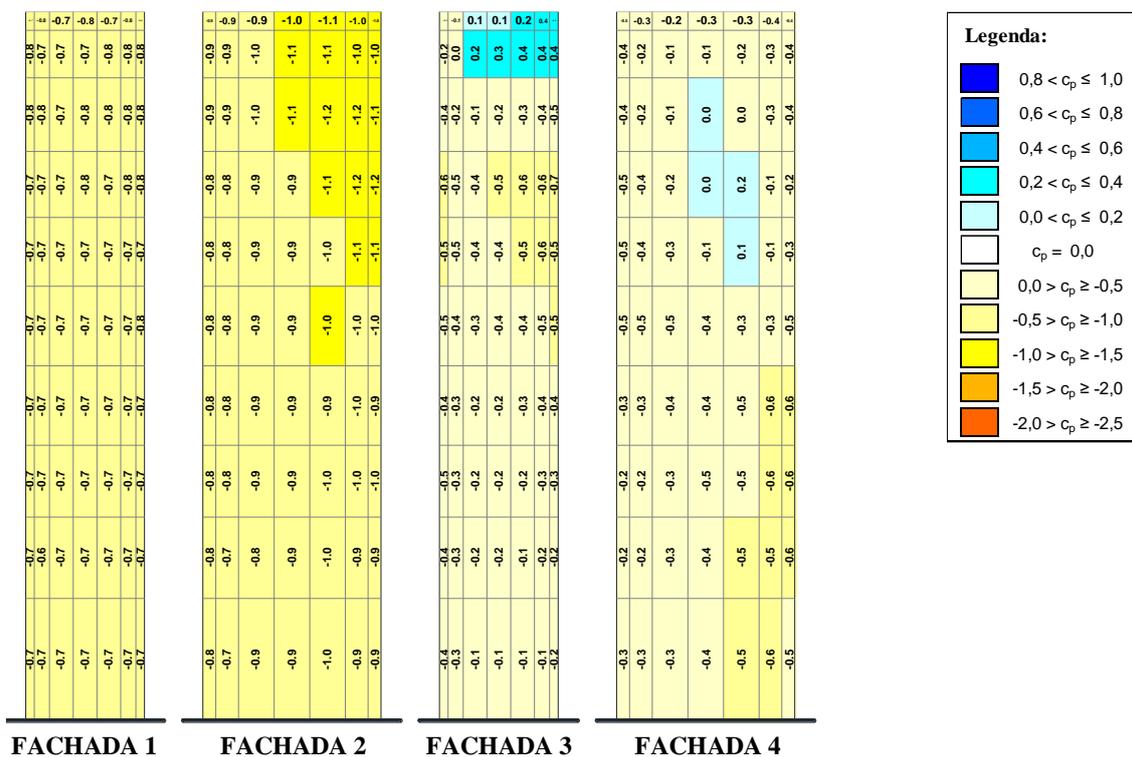


(fonte: elaborado pelo autor)

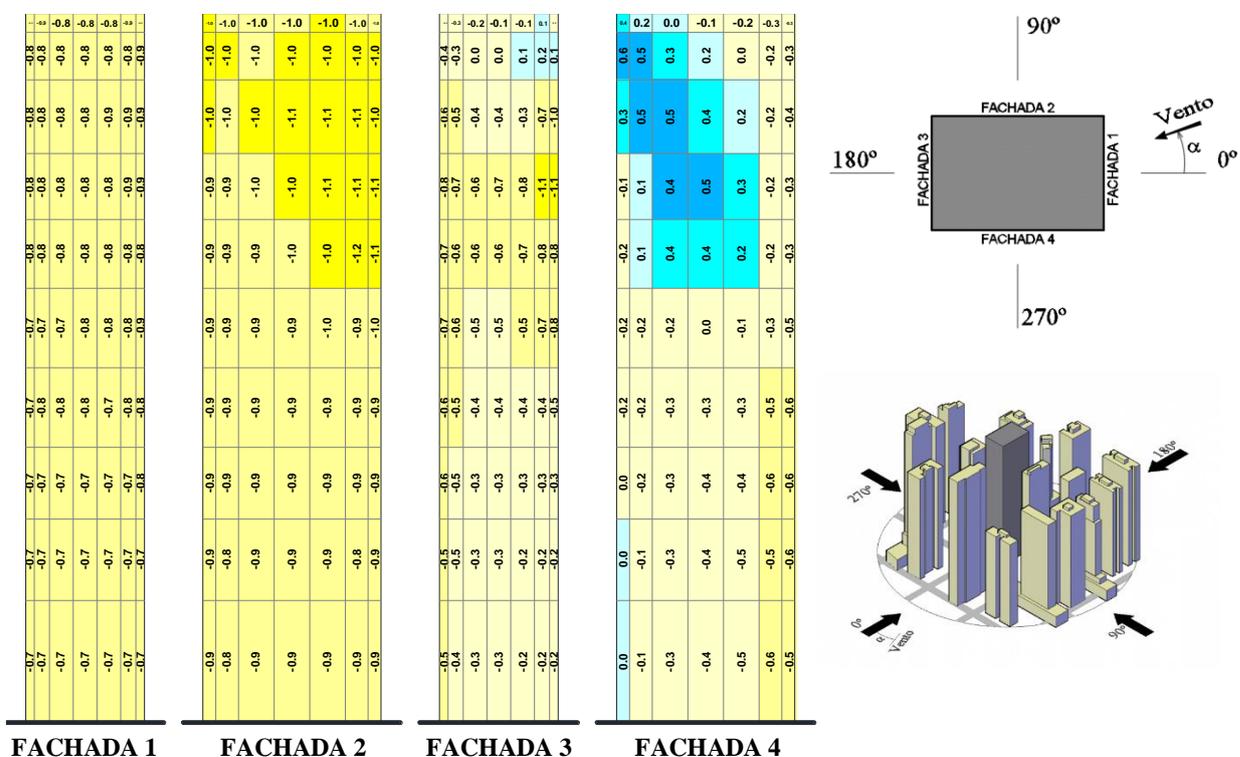
Figura 190 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26 - 165^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

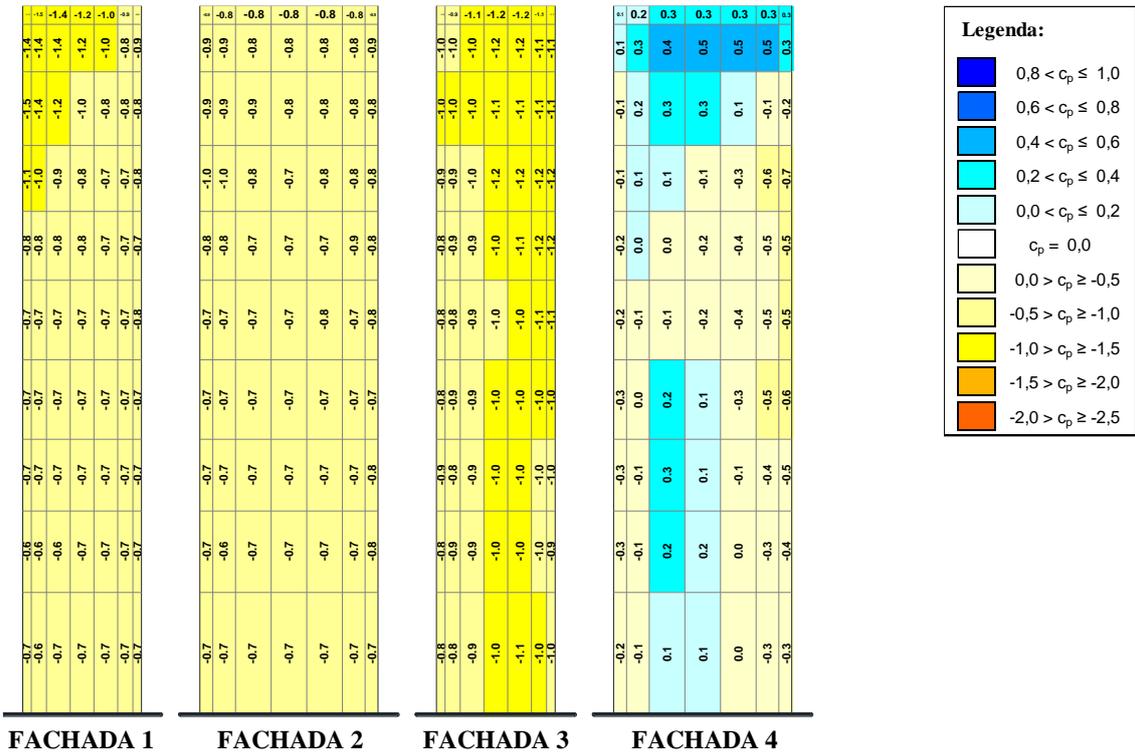
Figura 193 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26 - 210^\circ$ 

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 194 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26 - 225^\circ$ 

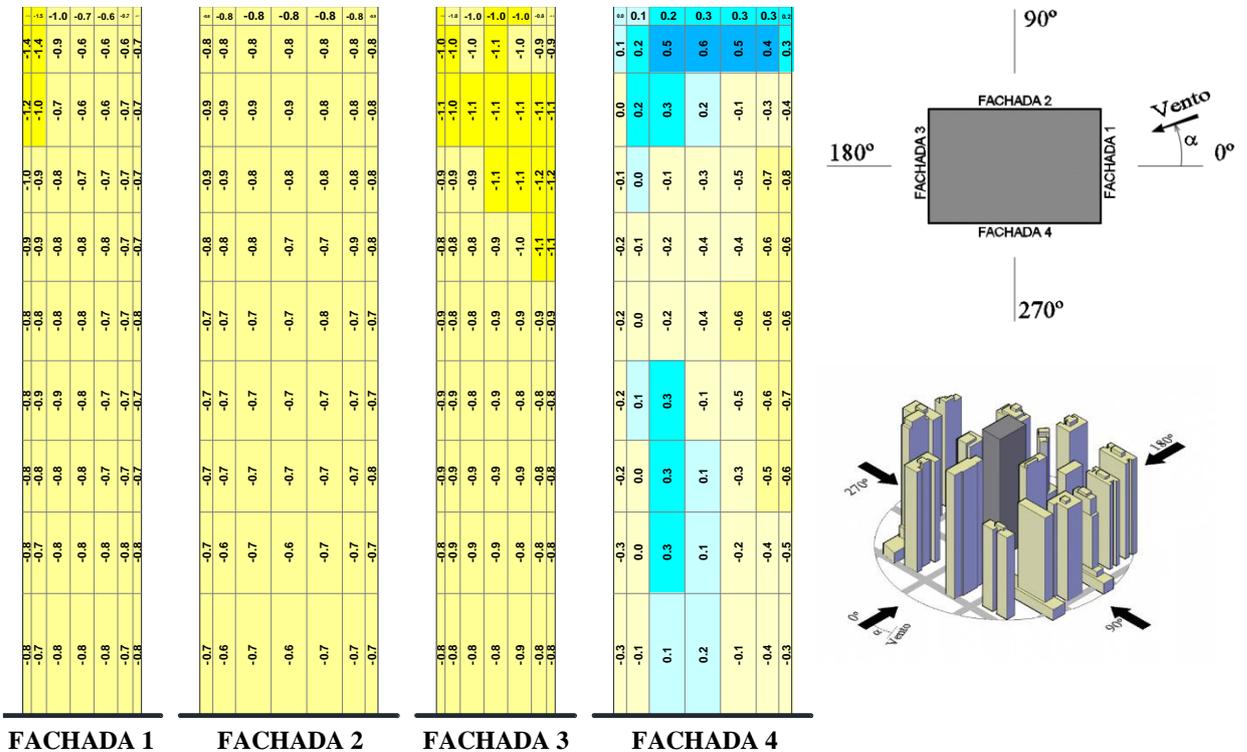
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 197 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26 - 270^\circ$



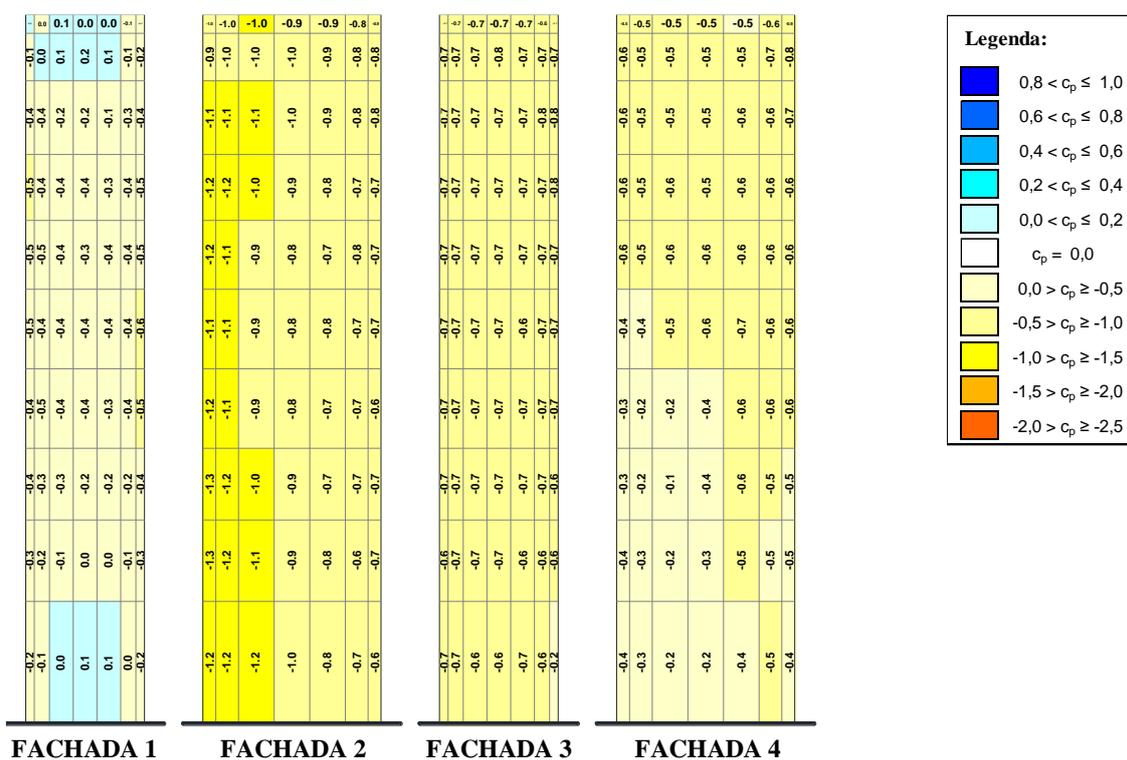
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 198 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26 - 285^\circ$



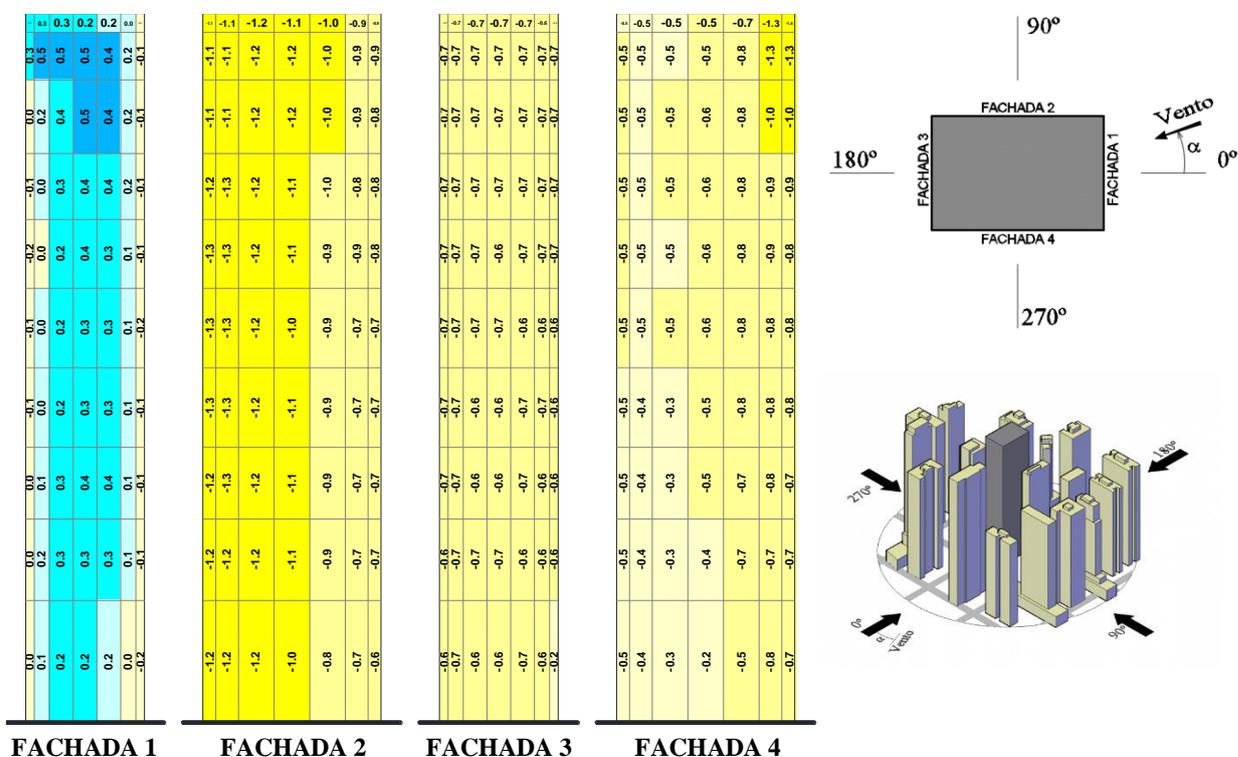
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 201 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26 - 330^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 202 - Distribuição dos coeficientes de pressão média - Conf. B - $p = 0,26 - 345^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

APÊNDICE G – Coeficientes de Força C_x e C_y calculados para cada ângulo de incidência do vento, Configurações de vizinhança e vento simulado

Tabela 9 - Coeficientes de força C_x por ângulo de incidência do vento

ÂNGULO [°]	vento 0,11			vento 0,26		
	Isolado	Conf. A	Conf. B	Isolado	Conf. A	Conf. B
0	1.09	1.02	1.20	0.84	0.74	0.87
15	1.08	0.91	1.00	0.89	0.72	0.70
30	1.07	0.87	0.82	0.88	0.70	0.61
45	0.86	0.78	0.74	0.70	0.64	0.57
60	0.39	0.42	0.49	0.34	0.34	0.39
75	-0.27	-0.10	0.37	-0.13	-0.04	0.26
90	0.00	0.18	0.15	0.01	0.10	0.09
105	0.27	0.01	-0.44	0.10	-0.02	-0.31
120	-0.38	-0.43	-0.63	-0.32	-0.35	-0.49
135	-0.88	-0.65	-0.67	-0.74	-0.57	-0.54
150	-1.06	-0.78	-0.91	-0.88	-0.68	-0.65
165	-1.09	-0.80	-0.86	-0.84	-0.65	-0.68
180	-1.11	-0.91	-0.95	-0.83	-0.68	-0.76
195	-1.10	-0.96	-1.01	-0.87	-0.76	-0.75
210	-1.08	-0.87	-0.51	-0.86	-0.71	-0.40
225	-0.86	-0.65	-0.44	-0.73	-0.57	-0.31
240	-0.37	-0.45	-0.09	-0.34	-0.36	-0.07
255	0.25	-0.19	0.41	0.09	-0.13	0.25
270	0.00	-0.01	0.25	0.00	-0.03	0.19
285	-0.27	-0.21	0.19	-0.11	-0.07	0.12
300	0.38	0.38	0.01	0.34	0.34	0.03
315	0.85	0.69	0.08	0.74	0.58	0.07
330	1.05	0.84	0.34	0.86	0.71	0.39
345	1.09	0.96	1.05	0.87	0.75	0.77

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 10 - Coeficientes de força C_y por ângulo de incidência do vento

ÂNGULO [°]	vento 0,11			vento 0,26		
	Isolado	Conf. A	Conf. B	Isolado	Conf. A	Conf. B
0	0.00	0.00	-0.46	-0.01	0.01	-0.35
15	0.03	0.18	-0.22	0.19	0.22	-0.12
30	0.58	0.54	0.44	0.52	0.46	0.37
45	0.90	0.74	0.83	0.75	0.60	0.70
60	1.07	0.90	0.98	0.90	0.78	0.73
75	1.20	1.03	0.61	0.99	0.83	0.47
90	1.38	1.05	0.28	1.03	0.83	0.28
105	1.19	0.91	0.32	0.95	0.73	0.29
120	1.08	0.93	0.56	0.87	0.77	0.43
135	0.89	0.79	0.36	0.75	0.68	0.30
150	0.56	0.61	0.09	0.52	0.53	0.13
165	0.02	0.28	0.08	0.21	0.24	0.06
180	0.02	-0.02	-0.22	-0.01	-0.02	-0.15
195	-0.07	-0.17	-0.42	-0.22	-0.20	-0.33
210	-0.61	-0.53	-0.62	-0.54	-0.47	-0.55
225	-0.94	-0.72	-0.88	-0.81	-0.63	-0.72
240	-1.09	-0.76	-0.97	-0.90	-0.65	-0.78
255	-1.24	-0.80	-0.92	-0.95	-0.69	-0.70
270	-1.41	-1.00	-0.85	-0.99	-0.80	-0.65
285	-1.22	-1.07	-0.72	-0.94	-0.83	-0.55
300	-1.08	-0.88	-0.56	-0.90	-0.70	-0.43
315	-0.91	-0.78	-0.56	-0.79	-0.64	-0.40
330	-0.60	-0.65	-0.51	-0.55	-0.50	-0.40
345	-0.05	-0.17	-0.51	-0.23	-0.18	-0.41

(fonte: elaborado pelo autor)

APÊNDICE H – Coeficientes de Torção C_t calculados para cada ângulo de incidência do vento, configurações de vizinhança e vento simulado

Tabela 11 - Coeficientes de torção C_t por ângulo de incidência do vento

ÂNGULO [°]	vento 0,11			vento 0,26		
	Isolado	Conf. A	Conf. B	Isolado	Conf. A	Conf. B
0	0.05	-0.73	6.94	0.30	-0.47	2.60
15	-11.87	-6.02	1.78	-8.79	-3.66	2.66
30	0.63	0.49	13.68	0.28	1.44	11.11
45	7.21	2.56	17.08	6.09	3.08	14.25
60	10.98	6.73	16.54	9.47	6.55	12.47
75	6.69	8.16	7.22	7.63	6.48	5.70
90	0.05	-0.51	-0.61	0.08	-0.25	0.11
105	-6.90	-8.29	-7.27	-7.11	-6.84	-6.75
120	-10.89	-9.41	-16.66	-8.35	-8.06	-11.86
135	-6.56	-7.44	-9.97	-4.93	-5.97	-7.11
150	0.34	-4.51	0.63	0.77	-3.35	-0.16
165	12.68	1.75	-0.90	8.70	2.15	0.98
180	-0.34	-3.97	1.59	0.44	-2.58	1.14
195	-12.63	-7.88	1.26	-8.66	-5.48	0.91
210	-0.89	1.62	3.99	-0.74	1.82	3.91
225	6.31	5.00	7.79	5.51	4.71	6.16
240	10.61	4.41	8.27	8.61	4.43	7.91
255	6.43	1.79	10.60	7.33	1.61	7.77
270	-0.02	-7.65	7.09	0.37	-5.50	4.92
285	-6.76	-12.04	8.38	-6.78	-9.56	5.40
300	-10.28	-9.84	7.25	-7.97	-7.97	5.15
315	-6.32	-8.95	3.08	-4.75	-6.89	0.66
330	0.49	-3.91	-4.26	1.06	-1.86	-3.72
345	12.84	6.78	1.09	9.54	4.86	-0.81

(fonte: elaborado pelo autor)